



Sustainable**Solutions**
CORPORATION



Président, panel d'experts indépendants
ACV des tuyaux en PVC/normes ISO série
14040 et EPD/norme ISO 14025



Conformité de l'ACV aux règles de
catégories de produit et à la norme
ISO 14025 vérifiée

AVRIL 2017

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES CANALISATIONS D'EAU POTABLE ET D'ÉGOUT EN PVC ET ANALYSE DE DURABILITÉ DES MATÉRIAUX DE TUYAUX

Cette étude vise à évaluer les infrastructures de canalisations souterraines dans l'objectif de fournir des services d'égout et d'eau durable pour une durée de 100 ans : (1) avec un minimum de risque de dégradation de la qualité de l'eau, (2) tout en réduisant les coûts de fonctionnement, d'entretien et de réparation et (3) en prenant en considération les variables qui peuvent influencer les performances des tuyaux et les exigences au niveau du service. Le rapport fournit également des données pertinentes qui peuvent aider les agents des services publics avec leurs plans de gestion des actifs et leurs évaluations des coûts tout au long du cycle de vie pour différents matériaux de tuyaux.



AVANT-PROPOS

La présente *Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité comparative des matériaux pour tuyaux*, datée de 2017, représente la première évaluation complète d'un réseau de canalisations souterraines en Amérique du Nord, fondée sur une méthodologie d'analyse tout au long d'un cycle de vie de 100 ans. Cette évaluation comprend une étude des tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC), réalisée en conformité avec les normes de la série ISO 14040 concernant l'analyse du cycle de vie (ACV), ainsi que la publication, ultérieurement, d'une déclaration environnementale produit (EPD) pour les tuyaux en PVC, conforme aux normes de la série ISO 14025 et certifiée indépendamment par NSF International.

Le but de la présente étude est de réaliser une évaluation approfondie des données de l'ACV et de rapporter de manière transparente les conclusions de l'ACV des tuyaux en PVC aux parties prenantes des réseaux de canalisations d'eau potable, d'égouts sanitaires et pluviaux.

L'ACV et l'EPD des tuyaux en PVC appuient les objectifs et la vision de la Clean Water and Safe Drinking Water Infrastructure Sustainability Policy (Politique sur l'eau potable et sur la durabilité des infrastructures d'eau potable), publiée en 2010 par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA), et le Programme national de l'eau sur le changement climatique, publié en 2015 par l'EPA, visant à assurer la durabilité à long terme des réseaux de distribution d'eau. La présente étude comporte également une évaluation comparative des matériaux pour tuyaux, basée sur des informations accessibles au grand public.

L'ACV des tuyaux en PVC a été soumise à un examen critique par un panel international d'experts en analyse du cycle de vie. L'ACV des tuyaux en PVC a démontré que les tuyaux en PVC offrent à la fois des avantages environnementaux et des avantages économiques, dans le cadre de la résolution des besoins en infrastructures d'eau potable et d'égouts, pour les services publics et les municipalités. L'ACV et les travaux de recherche menés aux fins de l'étude montrent que le PVC a des répercussions sur l'environnement moindre, d'un point de vue cycle de vie et empreinte carbone. Il bénéficie en effet d'une énergie intrinsèque plus faible, une consommation énergétique moindre lors de la phase d'utilisation et des propriétés de durabilité supérieures, par rapport à d'autres matériaux de tuyaux. Il est important pour les ingénieurs et les fonctionnaires municipaux de comprendre tous les aspects du cycle de vie des matériaux utilisables pour la fabrication de tuyaux, et d'utiliser toutes les données actuellement disponibles pour évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie des réseaux de canalisations. Ce rapport est publié à un moment où les problèmes liés au vieillissement des réseaux de canalisations, à la corrosion des tuyaux souterrains et à la qualité de l'eau occupent une place centrale dans la réflexion, mettant en évidence les défis importants auxquels sont confrontées les infrastructures d'eau potable et d'égouts dans tout le pays.

Sustainable Solutions Corporation (SSC) est une société réputée comme un expert en analyse du cycle de vie, ainsi qu'en conception et analyse de produits durables. Pour assurer la transparence dans l'industrie, Uni-Bell PVC Pipe Association a commandité SSC pour réaliser une analyse du cycle de vie (ACV) indépendante pour les tuyaux en PVC couramment utilisés pour les canalisations d'eau potable, d'égouts sanitaires et pluviaux, couvrant le secteur de marché des tuyaux en PVC rigide de 10 à 152 cm (de 4 à 60 pouces). Le tuyau utilisé dans la présente étude est fabriqué aux États-Unis ou au Canada à l'aide d'un stabilisateur à base d'étain. Les tuyaux en PVC rigide fabriqués en Amérique du Nord ne contiennent pas de phtalates, de plomb ou de cadmium. La réalisation de l'ACV pour l'industrie nord-américaine des tuyaux en PVC et la publication de l'EPD des tuyaux en PVC offrent une transparence complète sur les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie, et les avantages, des tuyaux en PVC.



SUSTAINABLE SOLUTIONS CORPORATION

RÉSUMÉ

PRÉSENTATION

Le présent rapport *Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité des matériaux de tuyaux* comporte :

- ▶ un examen approfondi de l'analyse du cycle de vie (ACV) de tuyaux en PVC pour sept produits de tuyaux
- ▶ une comparaison de leurs performances et propriétés de durabilité avec d'autres matériaux de tuyaux
- ▶ des discussions supplémentaires sur la durabilité

CONTEXTE – ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DE TUYAUX EN PVC

L'association PVCPA (Uni-Bell PVC Pipe Association) a commandité une ACV pour sept produits tuyaux en PVC dans trois segments de marché (canalisations sous pression d'eau potable, conduites à écoulement par gravité pour égouts sanitaires et pluviaux). Les conduites à écoulement par gravité considérées comprennent à la fois des produits à paroi pleine et à paroi nervurée.

Les objectifs d'ACV étaient les suivants :

- ▶ Déterminer les impacts énergétiques « du berceau à la tombe » pour les sept tuyaux en PVC
- ▶ Comparer ces résultats aux informations accessibles au grand public sur les produits concurrents

L'ACV a été réalisée par Sustainable Solutions Corporation (SSC), une société spécialisée dans l'analyse du cycle de vie, ainsi que dans la conception et l'analyse de produits durables.

TRANSPARENCE DE L'ACV

Les mesures suivantes ont été prises pour assurer la transparence de l'ACV :

- ▶ Méthodologie : l'ACV a été réalisée en conformité avec les normes d'évaluation des analyses du cycle de vie de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), les normes de la série ISO 14040.
- ▶ Examen par les pairs : l'ACV a été soumise à un examen critique par un groupe d'experts indépendants dans le domaine de la durabilité. Les experts en question étaient : Rita Schenck (Institute for Environmental Research and Education), Nigel Howard (Clarity Environment) et Charlie He (Carollo Engineers).



PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ACV

L'ACV a montré que le PVC a des impacts environnementaux moindres sur la durée totale du cycle de vie dans la plupart des catégories que les autres matériaux analysés. Les domaines étudiés comprenaient :

- ▶ la production et le transport des matières premières
- ▶ la production, le transport et l'installation de tuyaux
- ▶ la phase d'utilisation des tuyaux (y compris l'entretien, les réparations et le remplacement) a été analysée et rapportée séparément
- ▶ la phase de fin de vie des tuyaux

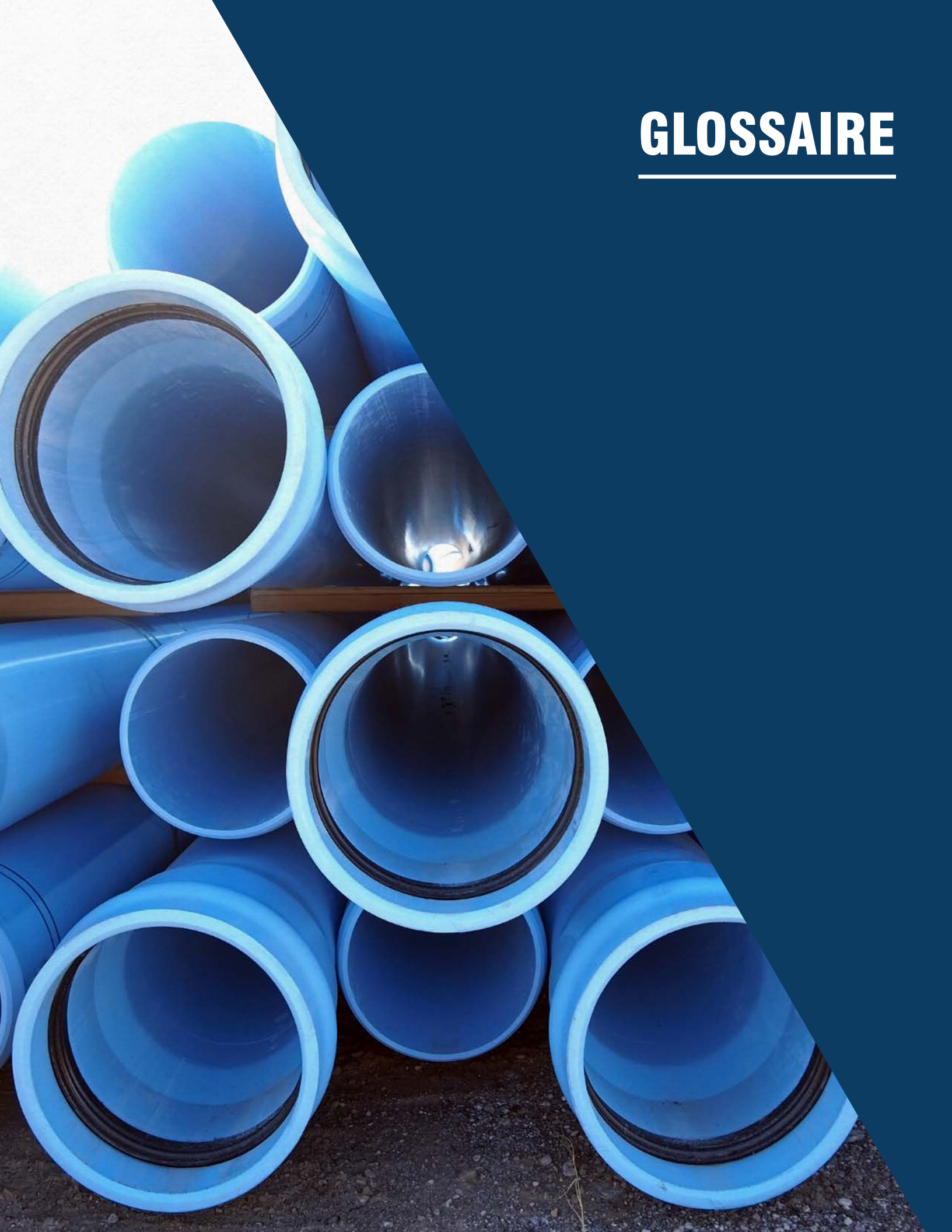
L'ACV des tuyaux en PVC a démontré, tout comme les publications existantes ayant comparé divers matériaux utilisables pour la fabrication de tuyaux, que les tuyaux en PVC offrent un avantage concurrentiel pour la plupart des applications de canalisations.

INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES

Ce rapport vise à expliquer l'ACV, les données sur les tuyaux en PVC générées et les comparaisons effectuées avec d'autres matériaux de tuyaux. En outre, la présente étude se penche sur des sujets importants qui aideront les services publics de l'eau et de l'assainissement à mieux évaluer les performances et la pertinence de divers matériaux pour tuyaux, notamment :

- ▶ les questions liées à la santé et à la sécurité
- ▶ la qualité de l'air et de l'eau
- ▶ l'impact monétaire des fuites, de la corrosion interne et de la corrosion externe de tuyaux

GLOSSAIRE



POTENTIEL D'ACIDIFICATION La tendance d'un produit chimique à former des ions H+ acidifiants qui dégradent l'environnement naturel.

FRAGILITÉ Qui présente dureté et rigidité, mais peu de résistance à la traction.

DU BERCEAU À LA SORTIE D'USINE Analyse partielle du cycle de vie d'un produit depuis l'extraction de ses ressources (« berceau ») jusqu'au produit manufacturé à l'usine (« sortie d'usine »). N'inclut pas les phases de transport, d'installation, d'utilisation et d'élimination du produit.

DU BERCEAU À LA TOMBE Analyse complète du cycle de vie d'un produit depuis l'extraction de ses ressources (« berceau ») jusqu'aux phases d'utilisation et d'élimination.

DU BERCEAU À L'INSTALLATION Analyse partielle du cycle de vie d'un produit depuis l'extraction de ses ressources (« berceau ») jusqu'à la fabrication du produit, son transport et son installation sur le site final. N'inclut pas les phases d'utilisation et d'élimination du produit.

DEMANDE CUMULÉE D'ÉNERGIE Somme de toutes les sources d'énergie tirées directement de la terre (comme le gaz naturel, le pétrole, le charbon, la biomasse ou l'hydroélectricité) et utilisées pour créer un produit. Synonyme d'énergie intrinsèque.

DURÉE DE VIE PRÉVUE Durée pendant laquelle les concepteurs d'un réseau de canalisations prévoient que ledit réseau fonctionnera à l'intérieur de ses paramètres normaux d'utilisation.

DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE PRODUIT (EPD), vérifiée et enregistrée de façon indépendante, qui communique des informations transparentes et comparables sur l'impact environnemental tout au long du cycle de vie de produits. Également connue sous l'appellation « déclarations environnementales de type III ».

ÉNERGIE INTRINSÈQUE Somme de toutes les sources d'énergie tirées directement de la terre et utilisées pour créer un produit. Synonyme de demande cumulée d'énergie.

POTENTIEL D'EUTROPHISATION Mesure relative des niveaux de phosphore et d'azote rejetés dans des eaux intérieures.

DÉFAILLANCE Lorsque les performances d'un tuyau ne répondent plus à ses paramètres normaux d'utilisation, pour des raisons structurelles ou hydrauliques (en raison de fuites excessives ou d'une réduction de la capacité de débit).

ÉNERGIE DES MATIÈRES DE DÉPART Énergie potentielle des matières premières entrant dans la fabrication du produit.

POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT PLANÉTAIRE Mesure relative de la quantité de chaleur qu'un gaz à effet de serre piège dans l'atmosphère.

CYCLE DE VIE Une série de phases par lesquelles un produit, un processus ou un service passe au cours de sa vie.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) Technique servant à identifier les impacts environnementaux associés à un produit, un processus ou un service au cours de sa vie. Par contraste, la LCC est axée sur les coûts financiers.

DÉTERMINATION DES COÛTS DU CYCLE DE VIE (LCC) Méthode pour évaluer les coûts monétaires associés à un produit, un procédé ou un service au cours de sa vie. Par contraste, l'ACV est axée sur les impacts environnementaux.

POTENTIEL D'APPAUVRISSMENT DE LA COUCHE D'OZONE Quantité relative de dégradation de la couche d'ozone de la terre causée par un composé chimique.

DURÉE DE VIE PHYSIQUE Durée pendant laquelle le réseau de tuyaux peut être utilisé (pas nécessairement de manière attrayante sur le plan économique).

RÈGLES DE CATÉGORIES DE PRODUIT (PCR) Ensemble d'exigences et de lignes directrices spécifiques pour l'élaboration d'une déclaration environnementale produit (EPD).

ÉNERGIE INTRINSÈQUE RÉCURRENTÉ Énergie consommée pour entretenir, réparer, restaurer, rénover ou remplacer des matériaux, des composants ou des systèmes au cours de la phase d'utilisation des tuyaux.

DURÉE DE VIE Durée pendant laquelle un produit, un processus ou un service fonctionne à l'intérieur de ses paramètres normaux d'utilisation, c.-à-d., axée sur les performances.

POTENTIEL DE FORMATION D'OZONE PHOTOCHIMIQUE (« SMOG ») Contribution relative d'un composé chimique à la formation d'ozone au niveau du sol (« smog ») dans un espace d'air.

FLUAGE Propriété de certains matériaux de tuyaux entraînant un fléchissement progressif des tuyaux sous une charge au fil du temps.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS

RÉSUMÉ

GLOSSAIRE

1.0	Principales conclusions de l'ACV des tuyaux en PVC et l'examen des propriétés de durabilité des tuyaux	12
1.1	L'ACV des tuyaux en PVC est conforme aux exigences des normes ISO, tandis que l'EPD des tuyaux en PVC offre une divulgation transparente des impacts environnementaux	12
1.2	Les hypothèses de durée de vie des tuyaux sont essentielles à l'analyse du cycle de vie	13
1.3	La qualité cohérente de l'eau à long terme est une exigence essentielle de durabilité tout au long du cycle de vie des tuyaux	14
1.4	La fabrication est une phase importante du cycle de vie. Considérez des matériaux de tuyaux qui utilisent un procédé de fabrication efficace avec un minimum d'émissions dans l'environnement.	14
1.5	Le transport et l'installation des matériaux des tuyaux ont des répercussions importantes sur le coût du cycle de vie et sur l'empreinte carbone	15
1.6	La consommation d'énergie pour le pompage entraîne un coût et un impact importants tout au long du cycle de vie d'un réseau de canalisations	15
1.7	L'efficacité de pompage d'eau et la capacité des égouts sont deux facteurs de coût importants pour les municipalités au fil du temps	16
1.8	La gestion de la fin de vie est une considération importante du cycle de vie	16
1.9	Les ACV de tuyaux en PVC menées à travers le monde sont arrivées à des conclusions similaires	17
2.0	Infrastructures de distribution d'eau durable	18
2.1	Revue du contexte	18
2.2	Les tuyaux en PVC en Amérique du Nord	18
2.2.1	La certification à la norme NSF/ANSI 61 garantit l'absence de lixiviation de chlorure de vinyle par les tuyaux en PVC	19
2.2.2	Longévité des tuyaux en PVC	19
2.3	Redéfinition de la durabilité et de la qualité de l'eau	19
2.3.1	Caractéristiques de tuyaux durables	20
3.0	Introduction à l'analyse du cycle de vie (ACV)	21
3.1	Objectifs de l'analyse du cycle de vie	22
3.2	Principaux aspects de la méthodologie des normes ISO de l'ACV des tuyaux en PCV	22
3.3	Examen par un panel d'experts indépendants	22

3.4	Comprendre la détermination des coûts du cycle de vie	23
3.5	Unités fonctionnelles de 30 mètres/100 pieds recommandées par l'industrie	23
3.6	Couverture du secteur	24
4.0	Évaluation des impacts environnementaux du cycle de vie	25
4.1	Définitions et résultats de l'impact sur l'environnement selon la méthode TRACI	25
4.2	Demande cumulée d'énergie (énergie intrinsèque)	26
4.3	Émissions de gaz à effet de serre (Potentiel de réchauffement de la planète) et impacts environnementaux selon TRACI	27
5.0	Tuyaux du berceau à la sortie d'usine	30
5.1	Extraction et production des matières premières	30
5.1.1	Rapports sur les émissions	30
5.2	Production de tuyaux	32
5.3	Matériaux recyclés	33
6.0	Installation des tuyaux	34
6.1	Distribution des tuyaux	34
6.2	Impacts potentiels sur l'environnement de l'installation de tuyaux	34
7.0	Phase d'utilisation et performance des tuyaux en PVC	36
7.1	Durée de vie des tuyaux avec un point de référence de 100 ans	36
8.0	Examen des autres matériaux potentiels pour tuyaux	38
8.1	Méthodologie et hypothèses de la recherche	38
8.2	Facteurs ayant un impact sur l'analyse de la durée de vie des tuyaux	38
8.3	Sélection des matériaux utilisés aux fins de la comparaison	38
8.4	Durée de vie des canalisations souterraines	40
8.4.1	Durée de vie de chaque matériau de tuyau	41
8.4.2	Durée de vie de 100 ans des tuyaux en PVC	42
8.5	Facteurs influant sur la durée de vie de tuyaux d'eau	42
8.5.1	Corrosion externe	42
8.5.2	Corrosion interne	43
8.6	Risque de corrosion et problèmes de qualité de l'eau	44
8.6.1	Corrosion des tuyaux en fonte grise avec des joints contenant du plomb : un problème pour la qualité de l'eau et la santé publique	44
8.7	Corrosion interne et perte d'énergie	44
8.7.1	Diamètre intérieur des tuyaux	44
8.7.2	Facteur de friction des tuyaux	44

9.0	Caractéristiques environnementales et de performance d'autres matériaux de tuyau	48
9.1	Tuyaux en fonte ductile	48
9.1.1	Durée de vie des tuyaux en fonte ductile	48
9.1.2	ACV et énergie intrinsèque de la fonte ductile	49
9.1.3	Performances des tuyaux en fonte ductile pendant la phase d'exploitation	50
9.2	Tuyaux en béton	51
9.2.1	Durée de vie des tuyaux en béton non armé (NRCP)	51
9.2.2	Durée de vie des tuyaux cylindriques en béton précontraint (PCCP)	52
9.2.3	Performances des tuyaux en béton non armé (NRCP) pendant la phase d'exploitation	52
9.2.4	Performances des tuyaux cylindriques en béton précontraint (PCCP)	52
9.3	Tuyaux en polyéthylène et en polypropylène	58
9.3.1	Durée de vie des tuyaux en polyéthylène (PEHD)	58
9.3.2	Énergie intrinsèque des tuyaux en polyéthylène (PEHD)	54
9.3.3	Performances des tuyaux en polyéthylène (PEHD) pendant la phase d'exploitation	54
9.3.4	Durée de vie des tuyaux en polypropylène (PP)	54
9.3.5	Performances des tuyaux à parois nervurées en polyéthylène (PEHD) et polypropylène (PP) pendant la phase d'exploitation	54
9.4	Tuyaux en grès	55
9.4.1	Durée de vie des tuyaux en grès vitrifié (VCP)	55
9.4.2	Énergie intrinsèque des tuyaux en grès vitrifié (VCP)	55
9.4.3	Performances des tuyaux en grès vitrifié (VCP) pendant la phase d'exploitation	56
9.5	Résumé des caractéristiques environnementales et de performance d'autres matériaux de tuyau	57
10.0	Économies d'énergie de pompage avec les tuyaux en PVC	58
10.1	Économies d'énergie de pompage avec les tuyaux en PVC	58
10.2	Empreinte carbone faiblement valorisée des tuyaux en PVC	60
11.0	Normes de durabilité	62
11.1	Infrastructures durables et évaluations	62
11.1.1	Institute for Sustainable Infrastructure (ISI) : Envision ^{MD}	62
11.1.2	Certification SMarT	64
12.0	Sommaire des conclusions - Énergie intrinsèque et durabilité	65
12.1	Sommaire des conclusions de la comparaison de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux sous pression et à écoulement par gravité sur une durée de 100 ans	65
12.1.1	Comparaison de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux sous pression	65
12.1.2	Comparaison de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux à écoulement par gravité	68

13.0	Conclusions	72
13.1	Résumé des constatations et conclusions de l'ACV	72

ANNEXE

Canalisation sous pression	73
Ruptures de canalisations	73
Perte d'eau dans les canalisations sous pression	74
Canalisation sous pression : Calculs de l'énergi hydraulique	76
Tuyau À Écoulement Par Gravité	80
Calcul de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux à écoulement par gravité	80
Flux d'infiltration	84
Sommaire De L'énergie Intrinsèque De Divers Matériaux De Tuyau	84
Comparaison Des Énergies De Pompage Pendant Un Cycle De Vie De 100 Ans	85
Énergie de pompage totale pendant un cycle de vie de 100 ans : coûts au fil du temps en utilisant des valeurs diverses de durée de vie des tuyaux	88
Comparaisons des coûts tous au long du cycle de vie de 100 ans	90
Étude Des Défaillances Des Tuyaux De Canalisations En Fonte Grise Et En Fonte Ductile	90
Fonte grise coulée en fosse	90
Fonte grise	90
La durée de vie de la fonte ductile est inférieure à 50 ans	90
Les tuyaux en fonte ductile ont des parois plus minces	91
Corrosion Des Tuyaux En Fonte, La Lixiviation Et Risques Pour La Qualité De L'eau	91
Une quantité plus importante de produits chimiques (inhibiteurs de corrosion) est utilisée dans l'eau potable lorsque des canalisations en fonte sont utilisées	91
Les revêtements intérieurs en mortier de ciment sont une source potentielle de lixiviation de métaux lourds	91
Fer et manganèse en provenance des tuyaux en fonte	92
Implications de la sélection de tuyaux	93
La corrosion du fer (eau rouge/rouillée) peut provoquer la lixiviation du plomb dans l'eau	93
La corrosion du fer (eau rouge/rouillée) peut épuiser les désinfectants de l'eau	93
Impacts sur la santé	94
Corrosion des tuyaux en fonte et problèmes de qualité de l'eau à Flint	94
Le pH de l'eau d'une source peut changer	95
Étude de cas comparative d'ACV de tuyaux d'égout	95

RÉFÉRENCES

PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ACV DES TUYAUX EN PVC ET L'EXAMEN DES PROPRIÉTÉS DE DURABILITÉ DES TUYAUX

L'étude *Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité des matériaux de tuyaux* combine deux éléments majeurs d'une analyse de durabilité. En premier lieu, la présente étude documente l'énergie intrinsèque cumulée des tuyaux en PVC, pour chacune des phases de leur cycle de vie, du berceau à la tombe. Ceci crée une plate-forme commune pour à la fois discuter et comparer les aspects de l'empreinte carbone du produit et ses impacts environnementaux en termes scientifiques.

Le deuxième composant prend en considération les éléments qui peuvent influencer les performances du tuyau et les attentes en matière de niveau de service. Alors que les fabricants indiquent une durée de vie opérationnelle pour leurs tuyaux basée sur des tests et les procédés de fabrication, les services publics de l'eau et de l'assainissement sélectionnent en général une durée de vie différente pour les environnements d'installation. La durée de vie est déterminée par les caractéristiques de conception, les conditions d'utilisation, les conditions ambiantes à l'intérieur et à l'extérieur des tuyaux, et l'usage prévu. La présente étude reconnaît ce fait et a élaboré une durée de vie opérationnelle fondée sur les performances pour chaque matériau de tuyau. Cette durée de vie opérationnelle fondée sur les performances dans l'environnement d'installation se concentre sur la capacité d'un tuyau à offrir un niveau soutenu d'une eau de grande qualité de façon économique. Pour ce faire, les principaux matériaux de tuyaux et les diverses variables environnementales et de durabilité ont été pris en considération. Cela comprend un examen approfondi des deux matériaux de tuyaux les plus courants, le PVC et la fonte ductile, ainsi que les propriétés spécifiques d'autres matériaux de tuyaux. La durabilité, en termes de qualité et livraison constantes de l'eau par l'intermédiaire d'un réseau de conduites souterraines, inclut les variables de risque de corrosion, d'impacts sur le changement climatique et de coûts énergétiques. Lors de la détermination de la durée de vie opérationnelle d'un matériau de tuyau, une durée de vie prévue du réseau de 100 ans a été utilisée. Une fois tous ces éléments combinés, les coûts monétaires seront appliqués, afin de mieux comparer les résultats. Vous trouverez ci-dessous les points saillants des principales conclusions de l'étude générale.

1.1 L'ACV des tuyaux en PVC est conforme aux exigences des normes ISO, tandis que l'EPD des tuyaux en PVC offre une divulgation transparente des impacts environnementaux

- ▶ L'ACV des tuyaux en PVC fournit une analyse du cycle de vie et un examen de durabilité complets et transparents pour l'industrie nord-américaine des canalisations d'eau potable et d'égouts.
- ▶ L'ACV des tuyaux en PVC aborde toutes les phases nécessaires du cycle de vie, du berceau à la tombe, y compris :
 - ▷ Extraction et transformation des matières premières
 - ▷ Fabrication
 - ▷ Transport et distribution
 - ▷ Installation, utilisation et entretien
 - ▷ Recyclage et élimination finale
- ▶ En incluant les impacts tout au long du cycle de vie du produit, l'ACV fournit une vue complète des aspects environnementaux du produit et une image précise des compromis environnementaux lors de la sélection de produits.
- ▶ Les analyses du cycle de vie des tuyaux sont fondées sur une durée de vie de 100 ans au minimum, en raison de la très longue vie des actifs d'infrastructures de réseau de canalisations.
- ▶ L'ACV constitue une analyse plus complète et plus transparente des impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie et fournit un indicateur de performance environnementale bien meilleur que les revendications de propriétés uniques, telles que le contenu recyclé. Certains matériaux, comme le métal, nécessitent de grandes quantités d'énergie pour leur recyclage. En outre, le processus émet des émissions toxiques supplémentaires par rapport à la non-production de métal non recyclé.

- ▶ La certification SMaRT de l'Institute for Market Transformation to Sustainability pour les tuyaux en fonte ductile et en grès vitrifié (VCP) n'offre pas une transparence totale en ce qui concerne la certification environnementale.
 - ▷ Aucune information n'est divulguée en matière d'environnement sur le cycle de vie, ce qui ne permet aucune comparaison avec d'autres matériaux de tuyaux.
 - ▷ Sans divulgation transparente des données sur l'impact environnemental, il n'est pas clair si des traitements d'atténuation de la corrosion pour les tuyaux en fonte ductile, tels qu'un revêtement intérieur en mortier de ciment ou l'usage d'autres additifs visant à réduire la corrosion, sont inclus dans l'analyse et la certification des tuyaux.
 - ▷ La certification SMaRT interdit la production de dioxines au cours de la fabrication ; toutefois, la fabrication de tuyaux en fonte ductile produit des dioxines.

1.2 Les hypothèses de durée de vie des tuyaux sont essentielles à l'analyse du cycle de vie

- ▶ Lors de l'évaluation de la durabilité de la conception du cycle de vie de produits de canalisation, il est important de comprendre et d'évaluer les impacts sur le cycle de vie de tous les matériaux utilisés dans le réseau de canalisations.
- ▶ La présente étude d'ACV de tuyaux en PCV appuie les efforts des meilleures pratiques et concepts de gestion des actifs qui s'efforcent de réduire les coûts sur la durée totale du cycle de vie des actifs souterrains d'eau potable, d'égouts sanitaires et pluviaux, tout en maintenant les performances des tuyaux et les attentes en matière de niveau de service, en maintenant la qualité de l'eau et en minimisant les ruptures de canalisations, les pertes d'eau, les infiltrations et la nécessité de fouilles.
- ▶ Les fabricants de tuyaux commercialisent divers matériaux de tuyaux avec une durée de vie estimée associée. La durée de vie « estimée » ne représente pas le point où les performances du tuyau peuvent commencer à ne plus satisfaire les niveaux de service prévus.
- ▶ La présente étude examine les diverses durées de vie estimées publiées dans la littérature et par les fabricants, mais elle intègre également la preuve pratique des tendances de l'industrie en matière de défaillances et des études d'excavations, afin de dériver un âge réel de performance des tuyaux, utilisable pour l'évaluation des performances lors d'un cycle de 100 ans.
 - ▷ Par exemple, des tuyaux en fonte ont été utilisés dans des installations de distribution d'eau depuis plus de 100 ans. Avec des pertes d'eau pouvant atteindre 80 %, il est clair que la durée de vie pratique des canalisations a expiré il y a plusieurs dizaines d'années. Quand un tuyau est utilisé au-delà de sa durée de vie opérationnelle, les conséquences sont : une augmentation des coûts de traitement et de pompage de l'eau, une augmentation des factures d'eau pour les consommateurs, une augmentation des indemnités pour dommages matériels, une augmentation des risques pour les consommateurs concernant la qualité de l'eau et pour la confiance dans les agents des services publics.
- ▶ La présente étude fournit plusieurs exemples avec des durées de vie opérationnelles de 50, 75 et 100 ans, afin d'aider les responsables de services de distribution d'eau à comprendre les hypothèses de modélisation utilisées dans la présente étude.
- ▶ Une durée de vie opérationnelle de 100 ans est attribuée aux tuyaux en PVC, en se basant sur 60 ans d'expérience, des études approfondies par l'industrie, des échantillons d'excavations sur le terrain et des données historiques, qui corroborent des taux de défaillance et de rupture de canalisations très faibles.
- ▶ Une étude de tuyaux d'égouts en PVC exhumés a estimé leur durée de vie entre 100 et 300 ans.
- ▶ Les taux de rupture de tuyaux en PVC réduisent avec le temps, alors que les défaillances de tuyaux en fonte et en béton, sensibles à la corrosion, augmentent au fil du temps, ce qui entraîne des coûts d'exploitation et d'entretien plus élevés.
- ▶ Selon les données publiées dans la littérature et par l'industrie concernant les tendances en termes de défaillances de tuyaux, les tuyaux en fonte ductile (fonte ductile) et en polyéthylène haute densité (PEHD) avec des parois plus minces ne devraient pas durer 100 ans en raison de la corrosion interne/externe et de l'oxydation/du fluage, respectivement.
 - ▷ Par exemple, un tuyau en fonte grise à paroi plus épaisse est souvent cité comme ayant une durée de vie physique de 75 à 100 ans. Toutefois, pendant une bonne partie de la durée d'utilisation du tuyau, ses performances peuvent être considérablement dégradées en raison de corrosion interne ou externe, et de tuberculisation, ce qui a des répercussions sur la qualité de l'eau et augmente les coûts de pompage. De tels tuyaux ont ainsi été utilisés de manière inefficace bien au-delà de leur durée de vie opérationnelle.
- ▶ La fonte ductile, comme le PVC, a été utilisée pour les réseaux de distribution d'eau et les conduites d'eaux usées depuis environ 60 ans. Dans la présente étude, une durée de vie opérationnelle de 50 ans est attribuée aux tuyaux en fonte ductile, en se basant sur les données de défaillances de tuyaux en fonte ductile et le fait que les nouveaux tuyaux en fonte ductile ont des parois beaucoup plus minces que les anciens tuyaux en fonte et ne bénéficient pas d'études et d'analyses indépendantes du matériau sur le terrain lors d'excavations.
- ▶ Les réseaux de tuyaux en métal nécessitent des évaluations d'état approfondies, des enquêtes sur la corrosion, des systèmes de protection contre la corrosion et des contrôles de la qualité de l'eau.
- ▶ Comme il existe très peu de données sur la longévité et les performances réelles des nouveaux tuyaux en PEHD avec des parois plus minces, l'hypothèse a été faite d'une durée de vie opérationnelle de 50 ans en raison du risque d'oxydation, de fluage et de réduction du facteur de sécurité.

1.3 La qualité cohérente de l'eau à long terme est une exigence essentielle de durabilité tout au long du cycle de vie des tuyaux

- ▶ Les tuyaux en PVC ne se corrodent pas avec les bactéries et le biofilm, et ils ne servent pas comme source d'éléments nutritifs pour la croissance de bactéries.
- ▶ Les tuyaux en PVC ne se dégradent pas, ne se corrodent pas et ne lixivient rien lorsqu'ils sont exposés à de l'eau corrosive, des eaux usées, des gaz d'éégout ou des désinfectants.
- ▶ Les tuyaux en PVC ne nécessitent pas d'additifs chimiques pour empêcher la corrosion interne.
- ▶ Les tuyaux en PVC ne présentent pas de défaillances prématurées induites par l'oxydation.
- ▶ Les tuyaux en PVC ne contiennent pas d'agents plastifiants comme le DEHP ou autres phtalates.
- ▶ Les tuyaux en PVC ne contiennent pas de plomb.
- ▶ Les tuyaux en PVC ne contiennent pas de BPA.
- ▶ Les tuyaux en PVC ne lixivient pas de chlorure de vinyle monomère.
- ▶ Les tuyaux en fonte grise ont utilisé du plomb fondu comme un joint de tuyau depuis la fin des années 1800. Tout réseau de distribution d'eau à base de tuyaux en fonte âgés de plus de 60 ans utilise vraisemblablement du plomb pour sceller les joints entre les tuyaux. Ces tuyaux en fonte présentent de graves problèmes de corrosion et des pertes d'eau élevées, et peuvent constituer une source de contamination par le plomb dans l'approvisionnement en eau potable.
- ▶ Les tuyaux en métal et en béton présentent toujours des risques de corrosion interne et externe. Ils ont besoin d'introduire des additifs chimiques (phosphates) dans l'eau potable pour réduire la corrosion de leurs parois. Les phosphates augmentent les risques de croissance biologique (comme une prolifération d'algues dans les cas extrêmes) dans les sources d'eau potable, les lacs et les rivières.
- ▶ Les tuyaux en fonte corrodés entraînent la formation d'eau rouillée, présentant un excès d'ions de fer. Cela peut rendre les désinfectants de l'eau inefficaces et créer un risque accru de contamination.
- ▶ La zone à l'intérieur d'un tuyau en fonte ductile, depuis le début de la cloche jusqu'au joint, n'est pas recouverte de matériau de revêtement intérieur, de sorte que la partie de chaque joint de tuyau en fonte ductile installé expose de l'eau potable à une surface non certifiée à la norme NSF/ANSI 61.
- ▶ Des études montrent que les revêtements intérieurs en mortier de ciment utilisés dans les tuyaux en fonte ductile peuvent disparaître ou se dégrader après 10 à 30 ans en raison de problèmes structurels et de lixiviation chimique. Cela laisse de l'eau potable exposée à une paroi de tuyau non certifiée à la norme NSF/ANSI 61.

1.4 La fabrication est une phase importante du cycle de vie. Considérez des matériaux de tuyaux qui utilisent un procédé de fabrication efficace avec un minimum d'émissions dans l'environnement.

- ▶ La fabrication de tuyaux en PVC est un processus très efficace. Elle nécessite des apports faibles en énergie et en eau. Par ailleurs les débris et des matériaux usagés (matières rebroyées) peuvent être renvoyés directement dans le processus de fabrication. Il n'en résulte quasiment pas de déchets de fabrication.
- ▶ L'extrusion de tuyaux en PVC nécessite une petite quantité d'énergie, de sorte que la fabrication est un petit contributeur aux impacts du berceau à la tombe.
- ▶ L'utilisation de technologies de conservation de l'eau par systèmes en circuit fermé a considérablement réduit la consommation d'eau pour la fabrication de tuyaux en PVC, démontrant l'engagement de l'industrie envers l'amélioration continue et l'efficacité énergétique.
- ▶ De nombreux procédés de production de matériaux de tuyaux émettent des dioxines, tout comme la fabrication de tuyaux en fonte ductile, de tuyaux en fonte grise pour la plomberie, de tuyaux en béton et en résine de PVC. Les données de l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) sur les émissions de dioxines liées à fabrication de résine de PVC montrent que les niveaux de dioxine sont extrêmement bas pour la production de résine de PVC et sont sans cesse réduits.
- ▶ Les données de l'EPA montrent que les émissions de dioxine émises par une fonderie de fonte ductile sont presque six fois plus élevées que celles d'une installation de production de résine de PVC.
- ▶ Les installations de fabrication de tuyaux en PVC n'émettent pas de dioxines.
- ▶ La fabrication de tuyaux en fonte ductile à partir de métaux recyclés peut libérer un certain nombre d'autres produits chimiques tels que du plomb, du mercure, du manganèse, du zinc, des composés de chrome, de la triméthylamine, du xylène, du méthanol et du phénol dans le processus.
- ▶ Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont beaucoup plus élevées pour les tuyaux en béton que pour les tuyaux en PVC. Cela illustre clairement la nécessité d'évaluer tous les aspects du cycle de vie lors de la sélection de matériaux pour les tuyaux. L'industrie du ciment est classée comme le troisième plus grand émetteur de GES dans le monde, libérant plus de 5 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone.
- ▶ La production de tuyaux en PVC à l'aide de matériaux vierges consomme moins d'énergie que la production de fonte ductile à partir de matériaux recyclés, ce qui réduit l'impact sur l'environnement pour les projets d'infrastructures de distribution d'eau.

1.5 Le transport et l'installation des matériaux des tuyaux ont des répercussions importantes sur le coût du cycle de vie et sur l'empreinte carbone

- ▶ Les tuyaux en PVC ont une empreinte carbone due au transport plus faible par mètre installé que les tuyaux en fonte ductile, en béton et en grès.
- ▶ Les tuyaux en PVC ont un poids par mètre d'environ 25 % de ceux en fonte ductile, ce qui signifie que les tuyaux en PVC peuvent être transportés en produisant moins d'émissions de carbone que ceux en fonte ductile de même longueur.
- ▶ Des installations de fabrication de tuyaux en PVC existent un peu partout aux États-Unis et au Canada, ce qui réduit les coûts de transport et l'impact sur l'environnement.
- ▶ Le poids léger et la durabilité des tuyaux en PVC peuvent réduire les coûts d'installation et l'impact sur l'environnement, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre. Des équipements plus légers et des équipes de travail de plus petite taille peuvent être utilisés pour l'installation de tuyaux en PVC, en comparaison avec d'autres matériaux.
- ▶ Les tuyaux en PVC éliminent les coûts de trafic, l'impact sur la construction et sur l'environnement, ainsi que les pertes liées au remplacement de canalisations sur une durée de vie prévue de 100 ans.
- ▶ Les tuyaux en PVC peuvent être installés en faisant des économies de temps de 30 % par rapport aux tuyaux en béton.
- ▶ Les tuyaux en fonte ductile de 200 mm (8 pouces) produisent neuf fois plus d'émissions de carbone au cours de leurs phases de fabrication, de transport et d'installation que des tuyaux équivalents en PVC.
- ▶ Les matériaux de tuyaux tels que la fonte ductile, le polypropylène, le polyéthylène, le grès et le béton exigent des coûts supplémentaires et ont un impact accru sur l'environnement en raison de la nécessité de les remplacer au moins une fois au cours d'une durée de vie prévue de 100 ans.

1.6 La consommation d'énergie pour le pompage entraîne un coût et un impact importants tout au long du cycle de vie d'un réseau de canalisations

- ▶ L'énergie nécessaire pour pomper l'eau représente un coût important sur la durée totale du cycle de vie d'un réseau de canalisations sous pression. L'utilisation de matériaux de tuyaux qui ne corrodent pas réduit la consommation énergétique de pompage et réduit l'empreinte carbone du réseau de canalisations tout au long de son cycle de vie. La présente étude fournit aux ingénieurs des services publics de l'eau une indication des coûts énergétiques de pompage pour différents matériaux de tuyaux sur une période de 100 ans.
- ▶ Le traitement des eaux municipales et les réseaux de distribution d'eau nécessitent une quantité importante d'énergie pour déplacer l'eau. Les services publics de l'eau et de l'assainissement représentent souvent jusqu'à 40 % de la consommation totale d'énergie d'une municipalité.
- ▶ L'énergie nécessaire pour pomper l'eau à travers un réseau de canalisations sous pression sur la durée de vie des canalisations est une source importante d'impacts potentiels sur l'environnement.
- ▶ De plus en plus souvent, les services publics et les gouvernements locaux mettent en œuvre des stratégies visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre de leurs objectifs à long terme.
- ▶ Il a été montré que les tuyaux en béton et en fonte ne présentent pas des performances optimales pendant leur durée d'exploitation, car ils sont souvent affligés par des problèmes de ruptures de canalisations, de pertes d'eau, de problèmes de qualité de l'eau, ainsi que de coûts d'exploitation et d'entretien plus élevés à cause de la corrosion.
- ▶ Des sols corrosifs affectent 75 % des services publics de l'eau. La durabilité et la résistance à la corrosion d'une canalisation affectent grandement l'impact sur l'environnement tout au long du cycle de vie. Les tuyaux en fonte ductile peuvent durer à peine 11 à 14 ans dans des sols moyennement corrosifs, nécessitant de nombreux remplacements sur une période de 100 ans. Cela augmente l'impact sur l'environnement de l'énergie intrinsèque des tuyaux en fonte par un facteur pouvant atteindre 9 fois par rapport aux tuyaux en PVC.
- ▶ La réduction de la corrosion à l'intérieur et à l'extérieur des tuyaux en fonte ductile nécessite l'ajout d'autres matériaux tels qu'un revêtement en mortier de ciment sur la surface intérieure et d'un revêtement en polyéthylène sur la surface extérieure. Des systèmes de protection cathodique sont également utilisés dans les réseaux de distribution d'eau pour aider à éviter la corrosion dans les tuyaux en fonte grise ou en fonte ductile. L'utilisation incorrecte ou excessive de systèmes de protection cathodique peut corroder les tuyaux en fonte ductile. L'ajout d'autres substances pour éviter la corrosion augmente la consommation des ressources, l'énergie intrinsèque et l'empreinte carbone du produit. Les tuyaux en PVC n'ont pas besoin d'autres substances pour éviter la corrosion.

- ▶ La corrosion réduit le coefficient d'écoulement de Hazen-Williams et augmente les coefficients de Manning-Strickler en raison de la rugosité accrue de la surface interne du tuyau.
- ▶ La corrosion affecte l'efficacité de pompage de manière significative. Garder les tuyaux en service au-delà de leur durée de vie utile entraîne des coûts d'exploitation et d'entretien accrus. La dégradation de la surface des canalisations internes peut commencer presque immédiatement après l'installation de tuyaux en fonte ductile ou en béton.
- ▶ L'énergie nécessaire pour pomper l'eau à travers des tuyaux en PVC sur une durée de vie prévue de 100 ans reste constante, car les parois des tuyaux en PVC sont lisses et ne deviennent pas rugueuses au fil du temps. Cela produit des économies de coûts sur la durée totale du cycle de vie et abaisse l'empreinte carbone par rapport à des tuyaux en fonte ductile ou en béton, qui nécessitent plus d'énergie de pompage au fil du temps à cause de la corrosion, des fuites et des dégradations internes.
- ▶ Pour des tuyaux équivalents de 200 mm (8 pouces), la demande en énergie primaire de pompage est jusqu'à 100 % et 54 % plus élevée respectivement pour les tuyaux en PEHD et les tuyaux en fonte ductile que pour les tuyaux en PVC.
- ▶ Le coût en capital de nouveaux tuyaux en PVC peut être près de 23 % moins élevé que le nettoyage et l'application d'un nouveau revêtement intérieur sur les tuyaux en fonte ductile.
- ▶ Les tuyaux en PVC ont une énergie intrinsèque plus faible et des parois résistantes à la corrosion toujours bien lisses, ce qui aide les services publics et les administrations locales à minimiser l'énergie (et donc les GES) nécessaire pour exploiter leurs réseaux de distribution d'eau.

1.7 L'efficacité de pompage d'eau et la capacité des égouts sont deux facteurs de coût importants pour les municipalités au fil du temps

- ▶ Les tuyaux en polyéthylène (PEHD) ont un plus petit diamètre intérieur que les tuyaux en fonte ductile et les tuyaux en PVC, ce qui a un impact important sur leur efficacité de pompage au fil du temps.
- ▶ Les tuyaux cylindriques en béton précontraint (PCCP) ou en fonte ductile peuvent avoir un plus grand diamètre intérieur initialement et un bon facteur de friction lorsqu'ils sont neufs, mais les installations de pompage ne sont pas conçues en se basant sur la capacité de nouvelles canalisations. La détérioration du revêtement intérieur en mortier de ciment et la corrosion des tuyaux en fonte ductile entraînent le besoin pour une plus grande énergie de pompage sur la durée de vie prévue de 100 ans que dans le cas des tuyaux en PVC.
- ▶ Les tuyaux cylindriques en béton précontraint (PCCP) ou en fonte ductile peuvent présenter une diminution de 30 % de leur coefficient de frottement au cours de leur durée de vie utile. Cela signifie que les canalisations en fonte ductile et en béton précontraint (PCCP) plus anciennes peuvent nécessiter une énergie de pompage jusqu'à 100 % plus élevée que les canalisations neuves.
- ▶ Aux États-Unis, 66 % des canalisations d'approvisionnement en eau ont un diamètre inférieur ou égal à 200 mm (8 pouces). À l'échelle nationale des États-Unis, l'utilisation de canalisations en PVC au lieu de canalisations en fonte ductile pourrait économiser 21 milliards de dollars en coûts de pompage sur une durée de vie prévue du réseau de 100 ans. Si des canalisations en PVC étaient utilisées au lieu de canalisations en PEHD, les économies seraient de 37 milliards de dollars (en dollars 2016).
- ▶ Les stations de pompage pour les canalisations en matériau autre que le PVC doivent être conçues avec de plus grandes capacités et des lignes d'alimentation électrique plus puissantes, à cause de l'augmentation des frottements internes au fil du temps. Ces installations de pompage de plus grande capacité nécessitent en outre une énergie intrinsèque plus élevée pour leur construction, leur exploitation et leur entretien sur leur durée de vie prévue.
- ▶ Pour des tuyaux d'égout équivalents à paroi pleine de 600 mm (24 pouces) avec des pentes d'inclinaison identique, les tuyaux en PVC ont une capacité supérieure de 24 % par rapport aux tuyaux en fonte ductile, supérieure de 50 % par rapport aux tuyaux en grès et supérieure de 35 % par rapport aux tuyaux en béton non armé (NRCP).

1.8 La gestion de la fin de vie est une considération importante du cycle de vie

- ▶ Les tuyaux en PVC peuvent être recyclés dans du tuyau de PVC jusqu'à huit fois, sans réduction de leurs propriétés mécaniques.
- ▶ Les tuyaux en PVC peuvent être recyclés en de nombreux produits. Le PVC est un matériau inerte qui ne se dégrade pas facilement, de sorte que quand les tuyaux en PVC atteignent la fin de leur durée de vie, ils auront un impact minime sur l'environnement s'ils sont laissés dans le sol.
- ▶ Le contenu recyclé n'est qu'une propriété parmi d'autres et elle est loin d'offrir une vue complète de l'impact sur l'environnement sur la durée totale du cycle de vie. Les tuyaux de drainage en fonte ont été supprimés comme une alternative verte à GreenSpec® en raison de « l'énergie intrinsèque élevée nécessaire pour produire le produit et les émissions polluantes des cokeries ».
- ▶ La source de métaux recyclés la plus importante pour les tuyaux en fonte ductile provient du recyclage des automobiles. Ce type de ferraille est le plus difficile à utiliser, car sa composition chimique est variable et elle peut comprendre du mercure (un polluant atmosphérique instable) et d'autres toxines.
- ▶ Les tuyaux en PVC sont recyclables. Cependant, étant donné qu'ils sont très durables, la plupart d'entre eux n'ont pas encore atteint leur stage de recyclage.

1.9 Les ACV de tuyaux en PVC dans le monde entier présentent des conclusions similaires

- ▶ La présente étude a examiné plusieurs études d'ACV accessibles au public, menées à travers le monde. Les conclusions de ces études concordent avec les résultats de l'ACV pour les tuyaux en PVC.
- ▶ Les tuyaux en PVC présentent de nombreux avantages en termes de durabilité. Des études internationales ont identifié les avantages des tuyaux en PVC en termes de performances environnementales et de durabilité par rapport aux autres matériaux.
- ▶ Une ACV indépendante sur les réseaux de canalisations d'eaux usées a conclu que la fonte ductile avait l'impact sur l'environnement le plus critique, tandis que les tuyaux en PVC avaient l'impact moindre.
- ▶ Des études confirment que les tuyaux en PVC constituent une option à faible coût initial et permettent des économies à long terme, en raison de leur meilleure efficacité de pompage, de leur résistance à la corrosion et de leur longévité.



INFRASTRUCTURES DE DISTRIBUTION D'EAU DURABLE

2.1 Revue du contexte

En 2010, l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) a publié la Clean Water and Safe Drinking Water Infrastructure Sustainability Policy (Politique sur l'eau potable et sur la durabilité des infrastructures d'eau potable) qui décrit une vision et des priorités globales pour assurer la durabilité à long terme des infrastructures de l'eau¹. La politique incite les services publics de l'eau à améliorer leurs processus de planification existants, afin de s'assurer que leurs investissements en infrastructures de distribution d'eau sont efficaces sur leur durée de vie prévue, économes en ressources, et respectueux des objectifs de la collectivité. Cette politique comprend l'analyse d'une série d'alternatives et d'autres approches innovatrices, fondées sur l'analyse du cycle de vie complet, tout en faisant face au défi de réparer et de remplacer les infrastructures de distribution d'eau existantes.

En 2015, l'EPA a publié le plan de travail pour le Programme national de l'eau concernant le changement climatique. Le plan indique que « face à un climat changeant, les services publics de gestion de l'eau potable, des eaux usées et des eaux pluviales, qui se veulent résilientes et flexibles, doivent faire tout leur possible pour assurer un approvisionnement en eau propre et saine, afin de protéger la santé publique et l'environnement en prenant des décisions d'investissement intelligentes pour améliorer la durabilité de leurs infrastructures et de leurs opérations et des collectivités qu'ils servent, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre grâce à une meilleure efficacité énergétique ».²

La présente *Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité comparative des matériaux pour tuyaux* est axée sur une étude approfondie des impacts sur l'environnement, les avantages et la durabilité des tuyaux en PVC pour les infrastructures d'eau potable et d'égouts. L'analyse du cycle de vie (ACV) a été choisie comme outil pour analyser de manière transparente, quantifier et rapporter les impacts potentiels sur l'environnement associés à chaque phase du cycle de vie de canalisations en PVC. L'ACV a été examinée par des pairs et a constitué la base de l'élaboration et de la publication de la déclaration environnementale produit (EPD) de l'industrie des tuyaux en PVC, par NSF International. L'EPD, telle que validée par NSF International, déclare « les tuyaux et les raccords en PVC sont résistants aux produits chimiques généralement présents dans les réseaux de distribution d'eau et de collecte d'égout, empêchant ainsi la lixiviation et les rejets dans les eaux souterraines et de surface... Aucun produit chimique

*connu n'est libéré dans le système de distribution d'eau. Aucun effet toxique connu ne se produit lors de l'utilisation du produit.*³

Outre les résultats de l'ACV, la présente étude analyse de manière exhaustive les impacts environnementaux des tuyaux en PVC en se fondant sur les pratiques environnementales utilisées dans l'ensemble de l'industrie des tuyaux et effectue des analyses comparatives. Les résultats démontrent que les tuyaux en PVC présentent des avantages environnementaux et économiques pour des systèmes d'eau et d'égout durables.

2.2 Les tuyaux en PVC en Amérique du Nord

Le PVC a été découvert dans les années 1830, mais n'a pas été utilisé comme matériau de canalisations en Amérique du Nord avant 1951. Le Dr P. Heilmayr, PhD considéré par beaucoup comme l'un des pères fondateurs de l'extrusion de PVC moderne, ainsi que les historiens en PVC, le Dr J. Summers et A. Whitney, confirment que les tuyaux en PVC produits en 1952 pour la Marine américaine utilisaient stabilisants à base d'étain, ce qui est devenu par la suite le standard de l'industrie à la fois pour les tuyaux et pour les raccords. L'utilisation de plomb comme agent stabilisant a été rejetée dès le début par l'industrie nord-américaine des tuyaux et raccords en PVC. En 1955, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) a commencé à élaborer des normes pour les tuyaux en plastique. La National Sanitation Foundation (maintenant connue sous le nom de NSF International) a commencé à certifier les tuyaux en PVC utilisant de l'étain comme stabilisant pour les applications liées à l'eau potable en 1956.

L'ACV, ainsi que la présente étude approfondie, ont été commandées par l'association PVCPA (Uni-Bell PVC Pipe Association). Cette association professionnelle représente le marché des tuyaux en PVC rigide de 10 à 152 cm (de 4 à 60 pouces) en Amérique du Nord. Les tuyaux en PVC rigide pour l'eau et les eaux usées, fabriqués aux États-Unis et au Canada, n'utilisent pas et ne contiennent pas de phtalates, de plomb ou de cadmium. Par conséquent, les tuyaux en PVC sont reconnus comme un produit sécuritaire et bénéfique pour la santé publique.

Bien que la présente *Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité comparative des*

matériaux pour tuyaux soit axée sur les systèmes de canalisations en PVC, la présente étude couvre l'ensemble des informations sur le cycle de vie accessibles au grand public et offre une évaluation comparative des matériaux pour tuyaux. Toute comparaison peut constituer un défi complexe en raison d'un manque de compréhension des matériaux et de la complexité du processus d'évaluation quantitative des impacts environnementaux et de consommation d'énergie, notamment parce que les tuyaux ont des durées de vie utile différentes. La comparaison des données de l'ACV est également difficile en raison de l'incertitude inhérente et des différences dans les paramètres et les données.

2.2.1 La certification à la norme NSF/ANSI 61 garantit l'absence de lixiviation de chlorure de vinyle par les tuyaux en PVC

L'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) n'a trouvé aucun cas de lixiviation de chlorure de vinyle en provenance de tuyaux en PVC munis de joints d'étanchéité fabriqués en Amérique du Nord utilisés pour le transport et la distribution de l'eau dans des tailles de 10 à 152 cm (de 4 à 60 pouces). Selon une étude de l'EPA de 2002 sur l'infiltration et la lixiviation, certains tuyaux en PVC sans joints d'étanchéité (utilisant à la place une colle à solvant organique), de moins de 5 cm (2 pouces) de diamètre, fabriqués aux États-Unis avant 1977, ont présenté des lixiviations de chlorure de vinyle. Cependant, aucun cas de lixiviation de chlorure de vinyle émanant de tuyaux en PVC fabriqués en Amérique du Nord après 1977 n'a jamais été rapporté.⁴

Il est important de comprendre ce que la lixiviation de chlorure de vinyle signifie et comment elle est réglementée. Les États américains exigent que les produits de réseaux publics d'eau potable en contact avec l'eau potable soient certifiés conformes à la norme NSF/ANSI 61, « Composants du système d'eau potable – Effets sur la santé ». La norme a été élaborée pour mesurer et limiter les niveaux de contaminants chimiques et d'impuretés qui sont indirectement transmis à l'eau potable par les produits, les composants et les matériaux utilisés dans les systèmes d'eau potable. Cette norme fixe une limite pour la quantité de chlorure de vinyle résiduel contenu dans les tuyaux et les raccords en PVC et veille à ce que toutes les exigences en matière de santé et de sécurité de l'eau potable soient respectées. Cependant, la surveillance du chlorure de vinyle dans les systèmes d'eau peut être difficile, car des études ont montré que le chlorure de vinyle peut être un sous-produit de désinfection des systèmes de traitement chlorés.⁵

La norme NSF/ANSI 61 exige que le niveau de chlorure de vinyle monomère résiduel (RVCM) mesuré dans les tuyaux en PVC vendus et installés aux États-Unis soit constamment en dessous de 0,2 partie par milliard, ce qui représente un dixième du niveau admissible établi par l'EPA pour l'eau potable. Le résultat des tests de chlorure de vinyle monomère dans les tuyaux en PVC est très souvent « non détecté ».⁶ NSF International a encadré l'élaboration des normes nationales américaines concernant tous les matériaux et produits qui traitent ou entrent en contact avec l'eau. En 1990, l'EPA a remplacé son propre programme consultatif sur les produits liés à l'eau potable avec les normes de NSF International.

2.2.2 Longévité des tuyaux en PVC

L'application de caractéristiques de tuyaux incorrectes, combinée à un manque de connaissances de la conception des systèmes de tuyaux en PVC, a sous-estimé la durée de vie opérationnelle des canalisations en PVC. Le rapport *Buried No Longer* (Elles ne sont plus enterrées) de l'American Water Works Association a publié des durées de vie incorrectes pour les tuyaux en PVC, basées sur les perceptions des années 1960-1970.⁷ Ces perceptions ont été réfutées par de nombreux travaux de recherches, études et tests de la durée de vie et des performances de tuyaux en PVC.^{8 9 10 11 12} L'espérance de vie réelle des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC a été démontrée comme dépassant 100 ans. Des performances et une espérance de vie inexacts pour les tuyaux peuvent surestimer les coûts de remplacement des tuyaux pour la gestion des actifs d'eau.¹³ Pour les services publics d'eau disposant de programmes de gestion des actifs, une mauvaise hypothèse concernant la durée de vie des tuyaux fausserait les stratégies d'entretien, les plans de gestion des actifs et les prévisions, ce qui entraînerait des projections surestimées des besoins en financement pour le remplacement d'infrastructures. Cela entraîne des taux d'intérêt plus élevés et un mauvais alignement des obligations à long terme.

2.3 Redéfinition de la durabilité et de la qualité de l'eau

Cet examen de durabilité complet définit une nouvelle norme de référence, avec clarté et transparence, pour les fabricants américains et canadiens de tuyaux d'eau, d'eaux usées et d'eaux pluviales, ainsi que les ingénieurs des services publics et les autorités élues. Il redéfinit également la planification de la durabilité pour les infrastructures de réseau de conduites souterraines.

La durabilité est la capacité à maintenir un certain niveau de performance, une ressource ou une opération à long terme. La durabilité est une évaluation et une attention critique sur les performances économiques, environnementales et sociales d'une organisation ou d'un produit. En considérant les caractéristiques sociales et environnementales d'un produit, en plus de ses aspects financiers et économiques, il est possible d'atteindre un équilibre. Les préoccupations liées au développement durable sont de plus en plus prédominantes du fait que plus de 50 % des infrastructures municipales d'eau et d'eaux usées aux États-Unis approchent la fin de leur durée de vie utile. Selon une étude entreprise par le Congrès en 2002, la corrosion des réseaux d'eau et d'eaux usées aux États-Unis coûte plus de 50,7 milliards de dollars par an. Depuis janvier 2000, l'impact financier de la corrosion sur les infrastructures d'eau et d'égouts aux États-Unis a dépassé 700 milliards de dollars et continue à augmenter.¹⁴ Avec plus de 300 000 ruptures de canalisations par an anticipées au cours des dix prochaines années, les services municipaux ont préparé le terrain en allouant plus de 532 milliards de dollars en frais d'amélioration capitalisés, afin de résoudre les problèmes liés à la détérioration des réseaux de canalisations, aux débordements d'égouts et à l'augmentation de la demande en nouveaux réseaux de distribution d'eau accompagnant la croissance de la population.¹⁵

2.3.1 Caractéristiques de tuyaux durables

Un produit de tuyau durable doit présenter les caractéristiques suivantes :

- ▶ Coûts initiaux et d'exploitation faibles
- ▶ Longévité, avec une durée de vie d'au moins 100 ans
- ▶ Consommation énergétique de pompage faible au cours de la durée de vie opérationnelle
- ▶ Résistance à la corrosion (aucun matériau ou coût supplémentaire requis)
- ▶ Entretien minime
- ▶ Faible énergie intrinsèque
- ▶ Déchets au minimum au cours de la fabrication
- ▶ Pratiques de fabrication durables
- ▶ Coûts d'installation minimaux
- ▶ Impacts de transport minimaux
- ▶ Recyclage en fin de vie
- ▶ Très haute qualité de l'eau sans additifs chimiques
- ▶ Pas d'infiltration ou d'exfiltration

Les tuyaux en PVC répondent aux caractéristiques de tuyaux durables énumérées ci-dessus. Les performances et la durabilité sont en outre assurées par les caractéristiques énumérées ci-dessous. L'industrie des tuyaux en PVC a en outre clairement révélé ses impacts sur l'environnement dans ce rapport et par l'intermédiaire de la Déclaration environnementale produit certifiée de NSF International.

La durabilité du PVC est également attribuée à :

- ▶ La résistance à la corrosion et aux produits chimiques sans avoir besoin d'autres revêtements protecteurs, de chemises ou d'autres pièces
- ▶ Poids moindre (par rapport à d'autres matériaux) et facilité de transport
- ▶ Rapport résistance-poids élevé
- ▶ Module d'élasticité faible, ce qui réduit l'ampleur des coups de bélier, ou surpressions
- ▶ Résistance à la traction à long terme par rapport à d'autres tuyaux thermoplastiques
- ▶ Joints étanches à l'eau empêchant les fuites et les infiltrations d'eau
- ▶ Résistance exceptionnelle à l'abrasion interne et externe
- ▶ Grande résistance aux chocs, même à basse température
- ▶ Résistance aux flammes
- ▶ Coefficients de débit supérieurs, contribuant à des coûts d'exploitation et d'entretien faibles au cours de la durée de vie prévue¹⁶

Les préoccupations liées au développement durable sont de plus en plus prééminentes du fait que plus de 50 % des infrastructures municipales d'eau et d'eaux usées aux États-Unis approchent la fin de leur durée de vie utile.



3.0

INTRODUCTION À L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

L'analyse du cycle de vie est un outil utilisé pour identifier les impacts environnementaux d'un produit, d'un processus ou d'une activité sur toute sa durée de vie. Les études d'ACV quantifient et interprètent également les flux environnementaux depuis et vers l'environnement (y compris les émissions dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que la consommation d'énergie et d'autres ressources matérielles) sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit (ou d'un processus ou d'un service).¹⁷

Les phases typiques du cycle de vie du berceau à la tombe, telles qu'illustrées sur la figure 3.1, comprennent :

- 01** : Extraction et transformation des matières premières
- 02** : Fabrication
- 03** : Transport et distribution
- 04** : Installation, utilisation et entretien
- 05** : Recyclage et élimination finale

En incluant les impacts tout au long du cycle de vie du produit, l'ACV fournit une vue complète des aspects environnementaux du produit et une image précise des véritables compromis environnementaux lors de la sélection de produits.

L'étude d'ACV a examiné sept produits de canalisation en PVC, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination finale. La phase d'utilisation a été analysée séparément. Les divers matériaux de tuyaux sont décrits dans le tableau 3.1.

FIGURE 3.1 : CYCLE DE VIE DES TUYAUX EN PVC

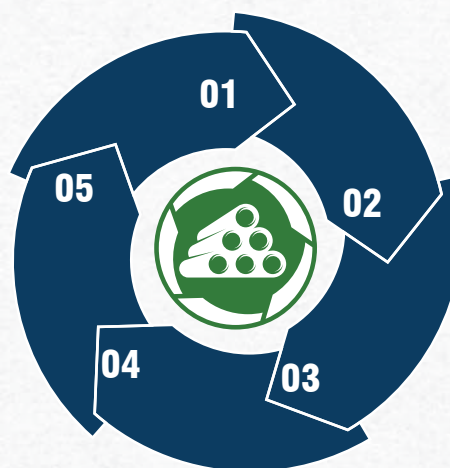


TABLEAU 3.1 : PRODUITS TUYAUX EN PVC COUVERTS DANS LE CADRE DE L'ACV

Utilisation	Norme	Diamètre nominal	Rapport dimensionnel/ rigidité du tuyau	Poids moyen (lb/pi)
Eau potable	AWWA C900	200 mm (8 po)	DR18	9,1
	AWWA C900	200 mm (8 po)	DR25	6,7
	AWWA C905**	600 mm (24 po)	DR25	55,9
Eaux pluviales	ASTM F794 AASHTO M304	Paroi nervurée de 600 mm (24 po)	PS46	19,2
Égout sanitaire	ASTM F794	Paroi nervurée de 200 mm (8 po)	PS46	2,5
	ASTM D3034	Paroi pleine de 200 mm (8 po)	PS46	4,3
	ASTM F679	Paroi pleine de 600 mm (24 po)	PS46	38,7

* Données de poids basées sur la documentation des fabricants et les normes de tuyaux.

** À partir d'août 2016, les dispositions de la norme AWWA C905 ont été remplacées et incluses dans la norme AWWA C900.

Il existe diverses méthodes globales pour catégoriser et caractériser l'impact du cycle de vie des flux dans et depuis l'environnement, ce qui peut compliquer quelque peu la comparabilité des différentes études d'ACV. D'autres variables dans les ACV comprennent les limites du système (jusqu'où en amont, en aval et latéralement l'analyse va-t-elle), l'unité fonctionnelle (quels sont le volume, la masse et l'objectif de l'objet soumis à l'évaluation) et les méthodes d'ACV spécifiques, telles que l'attribution (comment les impacts sont-ils affectés au produit, aux sous-produits, et sur quelle base). Lors de la comparaison de deux études d'ACV, ces facteurs sont essentiels, afin de pouvoir interpréter l'analyse.

L'EPD et l'ACV des tuyaux en PVC pour l'industrie nord-américaine des tuyaux en PVC offrent une transparence complète sur les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie, et les avantages, des tuyaux en PVC. La fabrication et l'installation de tuyaux en PVC sont complétées par les normes et les certifications de l'ASTM International (anciennement l'American Society for Testing and Materials), l'AWWA (American Water Works Association), l'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), la CSA (Association canadienne de normalisation) et NSF International. Cela garantit que les produits tuyaux en PVC répondent aux plus hauts standards de qualité et de sécurité.

Les résultats de l'ACV sont présentés dans la présente étude. En outre, ces résultats sont présentés dans l'EPD de l'industrie des tuyaux en PVC publiée par NSF International. Une EPD est considérée comme une déclaration environnementale de Type III, qui fournit des données ACV d'une manière standardisée, permettant au lecteur de comparer la performance environnementale des produits en fonction du cycle de vie. Une EPD est fondée sur des règles de catégories de produit (PCR), qui constitue un ensemble de règles, d'exigences et de lignes directrices spécifiques pour les déclarations de Type III. Avant la publication d'une EPD, les PCR et l'ACV sont soumises à un examen par une partie tierce. L'EPD est également vérifiée de façon indépendante et publiée par le biais d'un opérateur de programme.

3.1 Objectifs de l'analyse du cycle de vie

Les objectifs de l'analyse du cycle de vie de tuyaux en PVC étaient les suivants :

- ▶ Quantifier les impacts sur l'environnement à l'aide de la méthodologie d'analyse du cycle de vie d'après les normes établies par les séries 14040 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO)
- ▶ Étudier chaque phase du cycle de vie d'un tuyau en PVC pour les effets connexes
- ▶ Examiner l'application de technologies modernes sur la production de tuyaux en PVC
- ▶ Étudier les caractéristiques de la phase d'utilisation et les performances des tuyaux
- ▶ Étudier les techniques d'installation

3.2 Principaux aspects de la méthodologie des normes ISO de l'ACV des tuyaux en PVC

L'étude d'ACV pour l'industrie nord-américaine des tuyaux en PVC a été réalisée conformément aux normes d'inventaire d'analyse du cycle de vie (ICV) et d'évaluation des impacts environnementaux du cycle de vie (EICV), décrites au paragraphe 3.1, établies par les normes d'analyse du cycle de vie séries 14040 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Les principaux aspects de l'étude incluent :

- ▶ Les résultats de l'étude d'ACV ont été publiés dans une déclaration environnementale de produit qui est conforme aux normes ISO 14025 et qui a été vérifiée de manière indépendante par NSF International, selon les exigences définies par l'addendum pour l'Amérique du Nord des Règles de catégories de produit pour les systèmes de canalisations utilisées pour la collecte des eaux usées et des eaux pluviales (à écoulement par gravité), qui comprend les systèmes de canalisations d'eau potable, conformément à la version 2 de l'addendum.¹⁸
- ▶ L'étude a été examinée par des pairs, un panel d'experts indépendants de l'industrie, et par des experts en ACV, afin de confirmer sa conformité aux normes internationales en matière d'ACV.
- ▶ L'ACV des tuyaux en PVC offre une transparence environnementale complète, du berceau à la tombe, et fournit la première étude à l'échelle de l'industrie des tuyaux de l'Amérique du Nord résultant en une EPD conforme à la norme ISO 14025.
- ▶ L'EPD publiée complète les tests et certifications existants des tuyaux en PVC réalisés par NSF International, et confirme que les tuyaux en PVC utilisés dans les réseaux de distribution d'eau potable ne renferment aucune substance toxique et ne présentent aucun risque potentiel d'atteinte à la santé.¹⁹

3.3 Examen par un panel d'experts indépendants

L'analyse ACV des tuyaux en PVC a été soumise à un examen critique par un panel international d'experts en analyse du cycle de vie. L'EPD publiée repose sur les résultats de la présente ACV, ayant été soumise à un examen critique. Les membres du panel d'experts indépendants étaient :

Rita Schenck, PhD, LCACP (Président) : Directrice exécutive,
Institute for Environmental Research and Education (IERE)

Experte de renommée mondiale et Directrice exécutive de l'Institut, la Dr Rita Schenck apporte à ce projet ses connaissances et son œil critique en matière d'ACV. En tant que membre de la commission qui a élaboré la première version de la norme ISO 14000 dans les années 1990, elle est parfaitement familière avec la façon dont ces normes régissent les ACV et les EPD. Dr Schenck a fondé l'Institute of Environmental Research and Education (IERE) après avoir travaillé pendant de nombreuses années comme gestionnaire de l'environnement. Dr Schenck a représenté les États-Unis dans la négociation des normes ISO dans le domaine des ACV. Elle met son expertise internationale en ACV au service du comité scientifique de la conférence des ACV agroalimentaires, auquel elle siège, du CILCA (Conférence des ACV d'Amérique latine), et de nombreuses conférences, évaluations et preuves d'expert.

Nigel Howard, C. Chem. : Directeur général
Clarity Environment

M. Nigel Howard a acquis une réputation internationale pour ses travaux, en particulier dans le domaine des ACV et de la notation environnementale de bâtiments. Au début de sa carrière, au Royaume-Uni, il a travaillé pour le Conseil scientifique du Grand Londres où il était chargé de l'évaluation des produits (y compris les matières plastiques) et des enquêtes sur les défaillances de produits (y compris les canalisations). Il a également réalisé le U.K. Environmental Profiles Project (une méthodologie convenue par consensus pour 24 secteurs de produits de construction au Royaume-Uni) et a été un pionnier du *Green Guide to Specification* (Guide vert des spécifications) basé sur les ACV. Il a présidé le Panel de consultation publique sur le PVC du Ministère de l'environnement, des transports et des régions, du gouvernement du Royaume-Uni. Il a passé 5 ans aux États-Unis en tant que vice-président et directeur technique pour le U.S. Green Buildings Council (USGBC) où il a contribué au projet de base de données de l'inventaire d'analyse du cycle de vie projet et a dirigé le Comité consultatif technique et scientifique de l'USGBC chargé de l'ACV et des implications pour la santé des produits en PVC et matériaux alternatifs.

Charlie He, P.E. : Vice-président associé
Carollo Engineers

M. Charlie (Qun) He, vice-président associé et ingénieur principal chez Carollo, a plus de 12 ans d'expérience dans les secteurs de l'eau et du traitement des eaux usées, l'analyse des données liées à la qualité de l'eau, la modélisation informatique, les travaux d'analyse avancée, la chimie de l'environnement, les ressources hydriques, l'hydrologie, la distribution de l'eau, et la collecte et le traitement des eaux usées. M. He est un professionnel accrédité LEED et a acquis une vaste exposition dans le domaine de la durabilité. Il est un spécialiste de la conception de bâtiments durables et de leur impact sur la qualité de l'eau. Il a mené des évaluations de l'impact environnemental du cycle de vie, des calculs des émissions de carbone, a participé à des études d'optimisation de systèmes d'eau et d'eaux usées, et à des analyses de l'efficacité énergétique.

3.4 Comprendre la détermination des coûts du cycle de vie

Il ne faut pas confondre une ACV avec des analyses de détermination des coûts du cycle de vie (LCC). Une LCC évalue les coûts monétaires associés à un produit ou un service, tandis qu'une ACV se concentre sur les impacts environnementaux potentiels d'un produit, un système ou un service.²⁰ Le coût total du cycle de vie d'un projet n'est pas limité à l'investissement initial du projet. Des coûts supplémentaires sont pris en compte durant la durée de vie du projet, y compris les coûts d'exploitation, d'entretien, de remplacement et de fin de vie. Chaque aspect est examiné pour chaque modèle de conception proposé pour un projet. L'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA), la Conférence des maires des États-Unis et l'American Water Works Association (AWWA) recommandent toutes la détermination des coûts du cycle de vie pour la vérification et la sélection de projets, et dans le cadre de la planification d'une stratégie de réparation et de remplacement. Un outil a été développé par la Water Environment Research Foundation (WERF) pour les services publics d'eau, afin de les aider à analyser et déterminer les coûts du cycle de vie.²¹ Des études européennes ont constaté que les tuyaux en PVC présentent le meilleur coût total de possession pour les réseaux de distribution d'eau potable. Sur une période de 50 ans, les tuyaux en PEHD sont en moyenne 9 à 12 % plus chers que les tuyaux en PVC, tandis que les tuyaux en fonte ductile sont 19 à 26 % plus chers.²² Combiner le coût total du cycle de vie et l'analyse environnementale du cycle de vie fournit un processus robuste et convaincant pour les prises de décisions enviro-économiques.

3.5 Unités fonctionnelles de 30 mètres/100 pieds recommandées par l'industrie

La fonction des tuyaux en PVC faisant l'objet de l'étude est de transporter de l'eau potable, des eaux pluviales ou des eaux usées, sur une distance spécifiée. La présente étude utilise un système de tuyaux de 30 mètres (100 pieds) de longueur, avec des diamètres spécifiés et identiques, afin de divulguer et comparer leurs impacts environnementaux. Des joints d'étanchéité et du lubrifiant sont utilisés dans les installations de tuyaux avec des joints en forme de cloche ; ils sont donc inclus dans cette analyse. La longueur de 30 mètres (100 pieds) a été déterminée en se basant sur l'addendum des Règles de catégories de produit publié par UL Environment pour les déclarations environnementales produit.²³ L'unité fonctionnelle est particulièrement importante, car des matériaux différents ont des densités différentes et des épaisseurs de paroi différentes pour réaliser une fonction équivalente de transport de liquides. Par conséquent, un système de tuyaux de 30 mètres (100 pieds) de longueur est considéré comme le plus approprié pour la fonction.

3.6 Couverture du secteur

La présente étude a utilisé les données en provenance de 23 sites de fabrication de membres de l'association PVCPA (Uni-Bell PVC Pipe Association) (voir le tableau 3.2 pour les entreprises participantes), ce qui représente environ 22 % de toutes les usines de fabrication de tuyaux en PVC aux États-Unis et au Canada (voir la figure 3.2). Le tableau 3.3 indique le nombre de sites de fabrication qui ont fourni des données brutes pour chacun des sept types de tuyaux faisant partie de l'analyse.

FIGURE 3.2 : CARTE DES SITES DE FABRICATION DE TUYAUX EN PVC PARTICIPANT À L'ACV

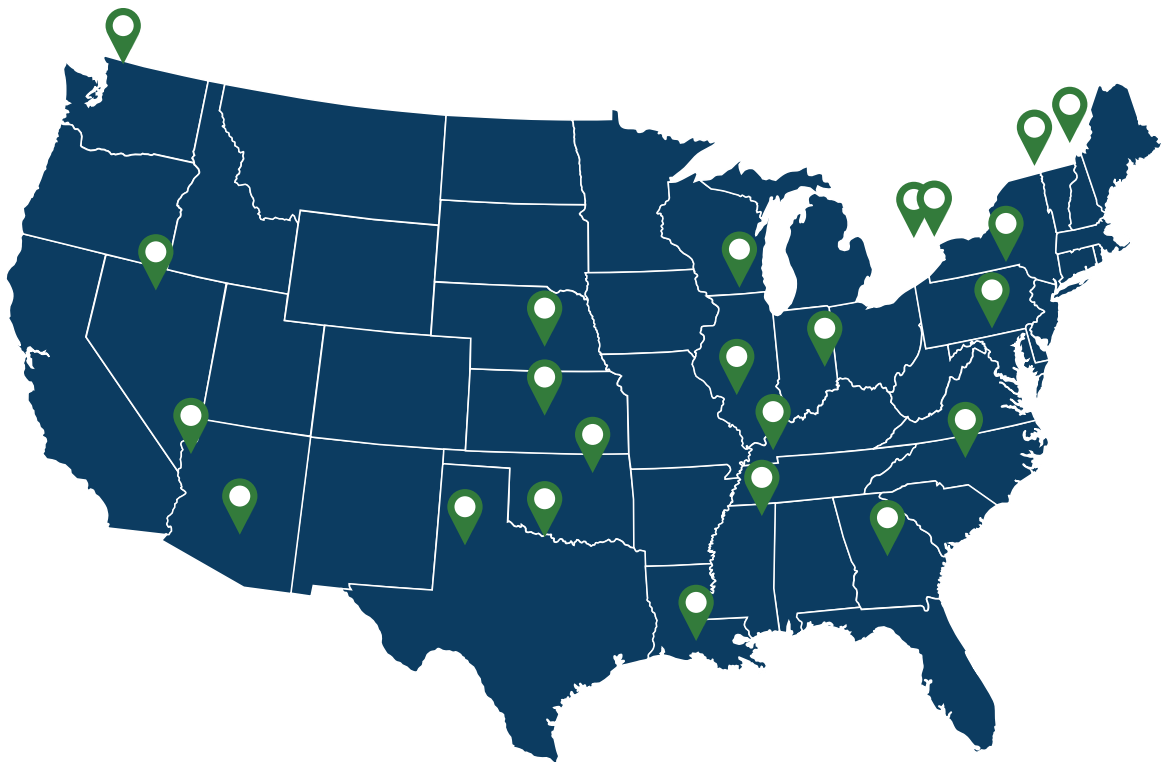


TABLEAU 3.2 : FABRICANTS DE CANALISATIONS EN PVC PARTICIPANTS

Fabricants de canalisations en PVC participants	Nombre de sites de fabrication participant
Diamond Plastics Corp.	7
IPEX, Inc.	3
National Pipe & Plastics Corp.	1
North American Pipe Corp.	8
North American Specialty Products	1
PipeLife Jet Stream, Inc.	1
Royal Building Products	2

TABLEAU 3.3 : SITES DE FABRICATION DE TUYAUX EN PVC QUI ONT SOUMIS DES DONNÉES BRUTES

Norme / Taille / Produit	Nombre de sites de fabrication
AWWA C900 / 100 mm (8 po) / DR18	21
AWWA C900 / 100 mm (8 po) / DR25	3
AWWA C905 / 600 mm (24 po) / DR25	11
ASTM F794 / AASHTO M304 / 600 mm (24 po) / PS46	3
ASTM F794 / 100 mm (8 po) / PS46	2
ASTM D3034 / 100 mm (8 po) / PS46	17
ASTM F679 / 600 mm (24 po) / PS46	11

4.0

ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU CYCLE DE VIE

Les informations suivantes décrivent et illustrent les impacts environnementaux potentiels du cycle de vie pour les tuyaux en PVC et doivent être utilisés dans l'évaluation de tous les produits et systèmes de canalisation. Les résultats de l'ACV présentés dans cette section portent sur deux produits : Les canalisations sous pression de 200 mm (8 pouces) en PVC DR25 PC165 AWWA C900 et les canalisations d'égout de 200 mm (8 pouces) en PVC à paroi pleine PS46 SDR35 ASTM D3034, commercialisées sous forme d'unités fonctionnelles de 30 m (100 pieds) pour une durée de vie prévue de 100 ans.

Pour des raisons de coût, la pratique courante pour la plupart des services publics de l'eau et de l'assainissement est de laisser les tuyaux dans le sol à la fin de leur durée de vie utile, au lieu de creuser pour récupérer les matériaux. Les tuyaux en PVC, en raison de la longue durée de vie de leur matériau, ne sont pas encore entrés dans le cycle des déchets recyclés. En conséquence, les impacts en fin de vie sont considérés comme négligeables. En outre, les tuyaux en PVC demeurent un matériau inerte.

Les impacts durant la phase d'utilisation des canalisations d'eau sous pression, c'est-à-dire l'énergie consommée par la friction contre les parois des tuyaux dans lesquels l'eau est pompée, sont pris en compte de manière séparée. Par conséquent, les résultats présentés dans cette section incluent : l'extraction et la transformation des matières premières, le transport des matières premières jusqu'au site de fabrication des tuyaux, le fabricant des tuyaux, l'emballage, la distribution et l'installation.

4.1 Définitions et résultats de l'impact sur l'environnement selon la méthode TRACI

La demande cumulée d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et les autres impacts sur l'environnement ont été inclus dans les résultats de la présente étude. La méthodologie de calcul des impacts sur l'environnement de l'agence EPA des États-Unis et ses outils pour la réduction et l'évaluation des produits chimiques et des autres impacts environnementaux (TRACI) ont été utilisés. Les catégories d'impacts selon TRACI incluent l'appauvrissement de l'ozone, le smog, l'acidification, l'eutrophisation et les émissions de GES ou le potentiel de réchauffement de la planète (PRP).

Les définitions des catégories d'impact comprennent :²⁴

- ▶ **Potentiel d'appauvrissement de l'ozone** : L'amincissement de la couche d'ozone dans la stratosphère de la Terre. L'appauvrissement de la couche d'ozone augmente la quantité de rayonnement ultraviolet de longueurs d'onde courtes (UVB) qui atteint la surface de la Terre. Les UVB sont généralement reconnus comme étant un facteur qui contribue au cancer de la peau, à la cataracte et à la baisse du rendement des cultures.
- ▶ **Potentiel de formation d'ozone photochimique ou « smog »** : L'ozone dans la troposphère est un des constituants du smog qui est causé par une réaction entre la lumière du soleil, l'oxyde d'azote et des composés organiques volatils (COV). Elle est connue pour causer des problèmes de santé respiratoire et endommager la végétation.
- ▶ **Potentiel d'acidification** : Un processus par lequel les polluants sont transformés en substances acides qui dégradent l'environnement naturel. Les conséquences courantes de ce phénomène sont l'acidification des lacs et les rivières, la lixiviation des métaux toxiques, la dégradation des forêts et la destruction de bâtiments.
- ▶ **Potentiel d'eutrophisation** : Une augmentation dans les niveaux de nutriments rejetés dans l'environnement. Les conséquences courantes de ce phénomène sont une productivité biologique pouvant conduire à l'appauvrissement en oxygène, ainsi que des impacts importants sur la qualité de l'eau, affectant toutes les formes de la vie aquatique et végétale.
- ▶ **Potentiel de réchauffement de la planète** : Augmentation de la température moyenne de la Terre, causée principalement par la libération de gaz à effet de serre. Les conséquences courantes de ce phénomène sont une augmentation des catastrophes naturelles et la montée du niveau de la mer.

L'extraction et la transformation des matières premières est le principal vecteur de l'amincissement de la couche d'ozone et des émissions de gaz à effet de serre, tant pour les tuyaux d'eau et que pour les tuyaux d'égout. Cependant, l'installation est le vecteur des autres catégories, notamment le smog, l'acidification et l'eutrophisation. Ce rapport examine plus en détail ces phases et discute les initiatives de l'industrie, passées et présentes, pour réduire les impacts environnementaux des tuyaux en PVC.

4.2 Demande cumulée d'énergie (énergie intrinsèque)

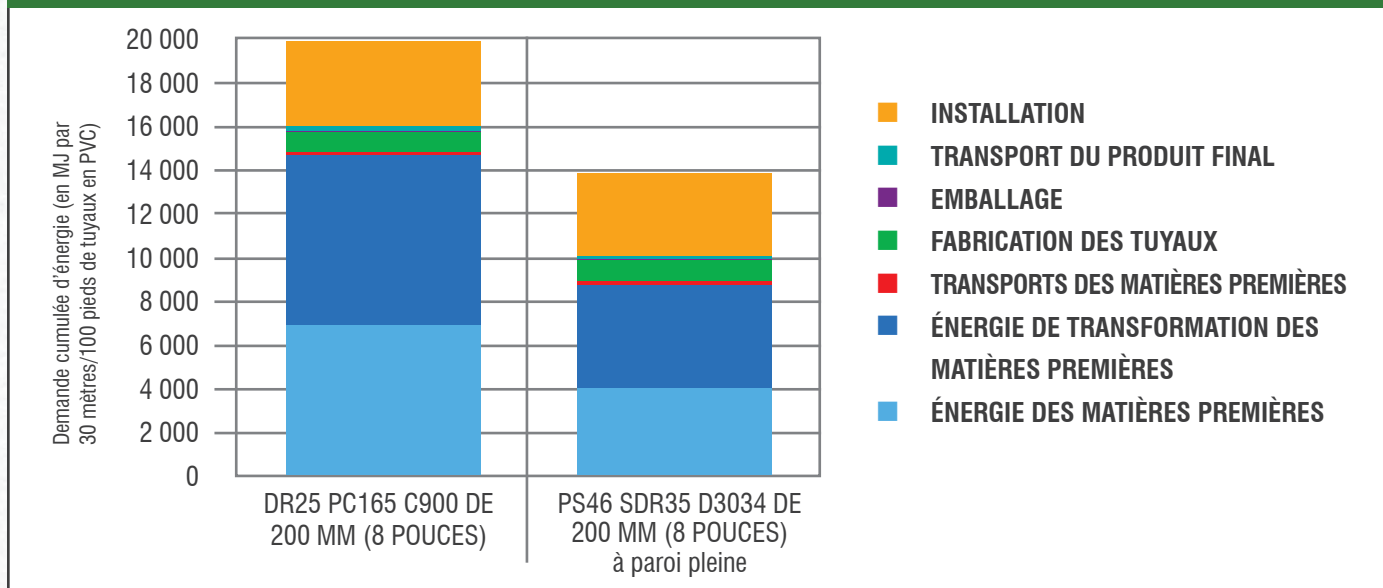
La demande cumulée d'énergie est un autre terme pour l'énergie intrinsèque et elle constitue un indice de référence important utilisé pour de nombreux produits, y compris les tuyaux. La demande cumulée d'énergie est la somme de toutes les sources d'énergie tirées directement de la terre (comme le gaz naturel, le pétrole, le charbon, la biomasse ou l'hydroélectricité) et utilisées pour créer un produit. L'énergie des matières de départ est l'énergie potentielle des matières premières entrant dans la fabrication du produit. Cette énergie est souvent appelée le pouvoir calorifique (inférieur ou supérieur) ou la valeur calorifique (nette ou brute). Pour les tuyaux en PVC, la source d'énergie des matières de départ est le gaz naturel utilisé pour fabriquer de l'éthylène. L'énergie des combustibles est l'énergie libérée lorsque des combustibles sont brûlés lors de la fabrication du produit. Ainsi, contrairement à l'énergie du combustible, l'énergie de la matière première n'est pas consommée dans le processus de fabrication du produit et ne contribue pas à la création de CO₂ ou d'autres polluants. La demande cumulée d'énergie pour les divers systèmes de tuyaux est tabulée et résumée dans le tableau 4.1.

L'énergie de transformation des matières premières et l'énergie de la matière première sont les principaux facteurs de la demande cumulée d'énergie. Cependant, la phase d'installation est également un grand contributeur à la demande cumulée d'énergie.

L'énergie intrinsèque initiale est influencée par la source des matières premières, le produit tuyau et la nature de l'installation, comme illustré sur la figure 4.1. La phase d'utilisation consomme également de l'énergie, mais est présentée séparément, dans une section ultérieure. Au cours de la phase d'utilisation, toute énergie intrinsèque récurrente (énergie consommée pour entretenir, réparer, restaurer, rénover ou remplacer des matériaux, des composants ou des systèmes au cours de la phase d'utilisation des tuyaux) doit être prise en compte. Les analyses d'ACV ne s'étendant pas à la même durée de vie de 100 ans pour les matériaux de canalisations ne prendront pas en compte l'énergie intrinsèque et les impacts sur l'environnement entraînés par la remise en état des canalisations, si nécessaire, au cours de la période spécifiée, ni les impacts entraînés par le remplacement des tuyaux.

TABLEAU 4.1 : DEMANDE CUMULÉE D'ÉNERGIE GLOBALE SUR LA DURÉE TOTALE DU CYCLE DE VIE DE TUYAUX EN PVC (EN MJ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS)

Phase du cycle de vie	DR25 PC165 C900 DE 200 MM (8 POUCES)	PS46 SDR35 D3034 DE 200 MM (8 POUCES) à paroi pleine
Matières premières	1,5E+04	8,7E+03
<i>Énergie de la matière première</i>	7,0E+03	4,1E+03
<i>Énergie de traitement des matières premières</i>	7,7E+03	4,6E+03
Transports des matières premières	1,3E+02	1,1E+02
Fabrication des tuyaux	9,7E+02	1,2E+03
Emballage	4,4E+01	4,2E+01
Total du berceau à la sortie d'usine	1,6E+04	1,0E+04
Du berceau à la sortie d'usine, moins l'énergie des matières premières	8,9E+03	5,9E+03
Transport du produit final	2,0E+02	1,0E+02
Installation	3,8E+03	3,7E+03
Total	2,0E+04	1,4E+04
Total, moins l'énergie des matières premières	1,3E+04	9,8E+03

FIGURE 4.1 : DEMANDE CUMULÉE D'ÉNERGIE GLOBALE SUR LA DURÉE TOTALE DU CYCLE DE VIE DU BERCEAU À L'INSTALLATION POUR LES DIFFÉRENTES PHASES DU CYCLE DE VIE DE TUYAUX EN PVC (EN MJ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS)

4.3 Émissions de gaz à effet de serre (Potentiel de réchauffement de la planète) et impacts environnementaux selon TRACI

Du dioxyde de carbone et d'autres GES sont émis chaque fois qu'on brûle des combustibles fossiles. Les émissions de GES peuvent aussi résulter d'un certain nombre d'autres activités humaines, y compris le méthane produit par les sites d'enfouissement. Ces gaz peuvent emprisonner la chaleur près de la Terre et contribuent au réchauffement climatique. En septembre 2013, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a conclu que « il est très probable que l'influence humaine a été la principale cause du réchauffement observé depuis le milieu du 20e siècle », avec un intervalle de confiance de 95 %.²⁵ Le PRP des émissions d'une activité est calculé sur la base du nombre équivalent de kilogrammes de dioxyde de carbone (équiv. CO₂).

L'extrusion de tuyaux en PVC nécessite une petite quantité d'énergie, de sorte que la fabrication est un petit contributeur aux émissions de GES dans l'analyse des impacts du berceau à la tombe. Le tableau 4.2 et la figure 4.2 montrent les émissions de GES pour les différentes phases du cycle de vie des tuyaux en PVC pour canalisations d'eau potable et d'égout. Le tableau 4.3 et la figure 4.3 montrent les impacts environnementaux selon TRACI pour les canalisations sous pression de 200 mm (8 pouces) en PVC DR25 PC165 AWWA C900. Voir le tableau 4.4 et la figure 4.4 pour les impacts environnementaux selon TRACI pour les tuyaux d'égouts sanitaires de 200 mm (8 pouces) en PVC à paroi pleine PS46 SDR35 ASTM D3034.

TABLEAU 4.2 : IMPACT GLOBAL EN ÉMISSIONS DE GES TOUT AU LONG DU CYCLE DE VIE DU BERCEAU À L'INSTALLATION DE TUYAUX EN PVC (KG ÉQUIV. CO₂ PAR 30 M/100 PIEDS)

Phase du cycle de vie	DR25 PC165 C900 DE 200 MM (8 POUCES)	PS46 SDR35 D3034 DE 200 MM (8 POUCES) à paroi pleine
Matières premières	680	400
Transports des matières premières	9	8
Fabrication des tuyaux	77	73
Emballage	2	2
Transport du produit final	15	8
Installation	178	250
Total	960	740

FIGURE 4.2 : IMPACT GLOBAL EN ÉMISSIONS DE GES TOUT AU LONG DU CYCLE DE VIE DU BERCEAU À L'INSTALLATION DE TUYAUX EN PVC (KG ÉQUIV. CO₂ PAR 30 M/100 PIEDS)

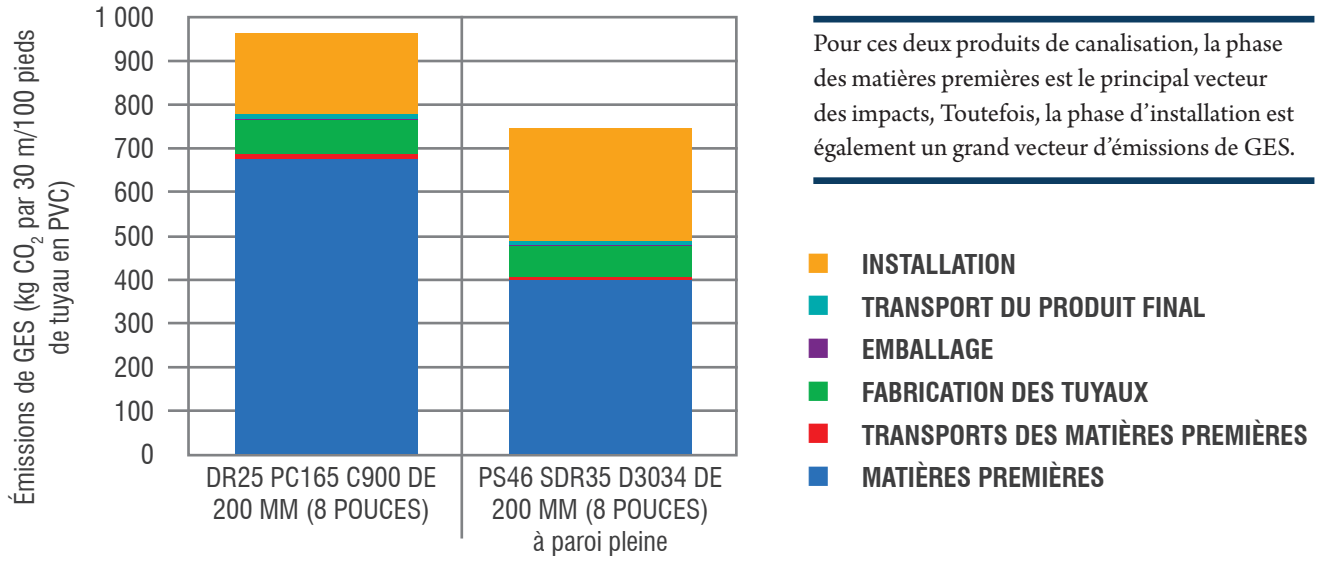


FIGURE 4.3 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR LES CANALISATIONS SOUS PRESSION EN PVC DE 200 MM (8 POUCES) DR25 PC165 C900 (MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES IMPACTS SELON TRACI)

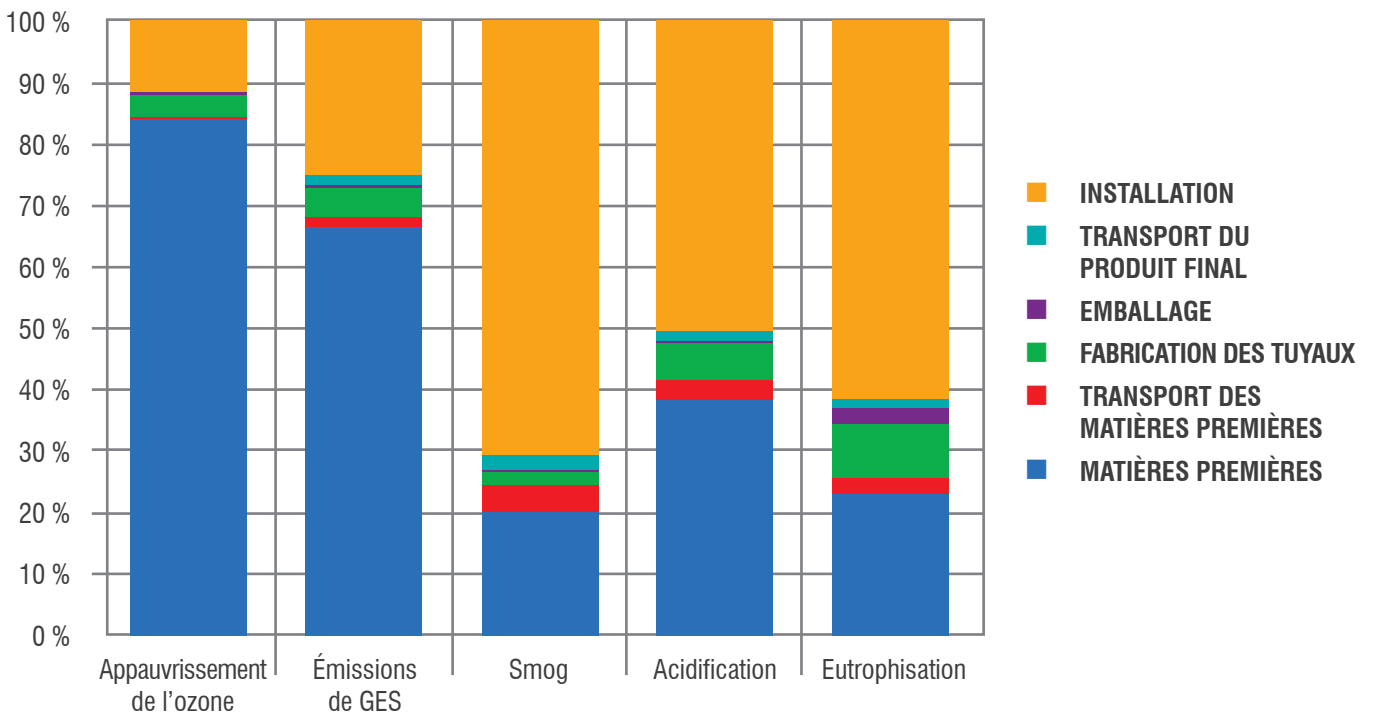
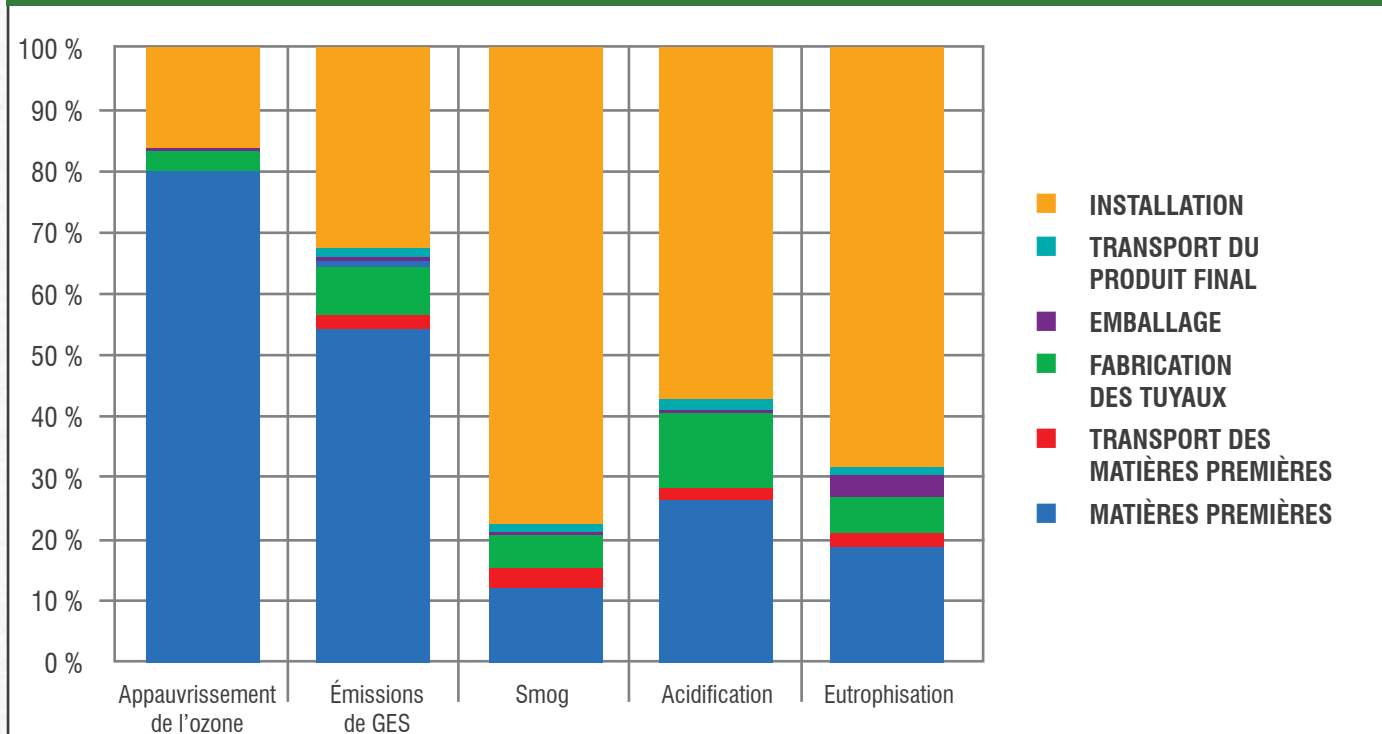


TABLEAU 4.3 : PVC DE 200 MM (8 POUCES) DR25 PC165 C900 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CANALISATIONS SOUS PRESSION EN UTILISANT LA MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DES IMPACTS TRACI

Catégorie d'impact	Unité par 30 m (100 pi)	Matières premières		Fabrication		Construction		Total
		Extraction et transformation des matières premières&	Transports des matières premières	Processus de fabrication	Emballage	Transport du produit final	Installation	
Appauvrissement de l'ozone	kg CFC-11 équiv.	3,9E-05	3,5E-10	9,6E-07	1,1E-07	5,7E-10	5,2E-06	4,6E-05
Émissions de GES	kg CO ₂ équiv.	6,8E+02	9,3E+00	4,9E+01	1,9E+00	1,5E+01	2,5E+02	1,0E+03
Smog	kg O ₃ équiv.	2,4E+01	5,1E+00	2,9E+00	1,3E-01	2,4E+00	8,5E+01	1,2E+02
Acidification	mol H ⁺ équiv.	1,3E+02	9,0E+00	2,0E+01	5,7E-01	5,0E+00	1,7E+02	3,3E+02
Eutrophisation	kg N équiv.	1,4E-01	9,6E-03	5,2E-02	1,5E-02	5,0E-03	3,8E-01	6,0E-01

TABLEAU 4.4 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES TUYAUX D'ÉGOUTS SANITAIRES DE 200 MM (8 POUCES) EN PVC À PARI PLEINE PS46 SDR35 ASTM D3034 EN UTILISANT LA MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DES IMPACTS TRACI

Catégorie d'impact	Unité par 30 m (100 pi)	Matières premières		Fabrication		Construction		Total
		Extraction et transformation des matières premières&	Transports des matières premières	Processus de fabrication	Emballage	Transport du produit final	Installation	
Appauvrissement de l'ozone	kg CFC-11 équiv.	2,4E-05	3,0E-10	5,4E-07	1,0E-07	2,9E-10	5,2E-06	2,9E-05
Émissions de GES	kg CO ₂ équiv.	4,0E+02	7,8E+00	7,3E+01	1,7E+00	7,5E+00	2,5E+02	7,4E+02
Smog	kg O ₃ équiv.	1,5E+01	3,2E+00	4,5E+00	1,3E-01	1,2E+00	8,5E+01	1,1E+02
Acidification	mol H ⁺ équiv.	7,7E+01	5,7E+00	3,2E+01	5,4E-01	2,5E+00	1,7E+02	2,8E+02
Eutrophisation	kg N équiv.	1,1E-01	6,0E-03	3,6E-02	1,6E-02	2,5E-03	3,8E-01	5,4E-01

FIGURE 4.4 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES TUYAUX D'ÉGOUTS SANITAIRES DE 200 MM (8 POUCES) EN PVC À PARI PLEINE PS46 SDR35 ASTM D3034 (EN UTILISANT LA MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DES IMPACTS TRACI)


5.0

TUYAUX DU BERCEAU À LA SORTIE D'USINE

Avec l'adoption de produits durables et des améliorations de conception, l'industrie des résines de PVC a fait de grands progrès dans la réduction des émissions et des impacts sur l'environnement lors de l'extraction des matières premières et de la transformation des matériaux menant à la production de résine de PVC. Comme il est démontré dans ce rapport, les matières premières et la phase d'installation sont les principaux vecteurs des impacts potentiels sur l'environnement lorsque l'on analyse les phases du cycle de vie du berceau à l'installation de tuyaux en PVC. Cette section va plus loin dans sa revue des progrès réalisés dans la production en amont de la résine de PVC pour la production de tuyaux, ainsi que des processus de production de tuyaux.

30

5.1 Extraction et production des matières premières

La production de la résine de PVC utilise du chlorure de vinyle monomère (CVM), qui est produit à partir d'éthylène et de chlore. Le chlore est produit à partir de sel, principalement par électrolyse à diaphragme/cellules à membranes. L'utilisation de cette technologie, comparée au processus à cellules de mercure utilisé précédemment, réduit considérablement la consommation d'énergie, les émissions et les déchets dangereux. Aux États-Unis et au Canada, plus de 99 % de la résine de PVC est produite à partir de chlorure de vinyle monomère, qui est fabriqué par électrolyse à diaphragme/cellules à membranes.²⁶

Les tuyaux en PVC fabriqués aux États-Unis et au Canada ne contiennent pas de plomb.

Les préoccupations concernant le chlorure de vinyle proviennent d'émissions dans l'atmosphère pendant la production de la résine, et non pas de la fabrication ou de l'utilisation des tuyaux en PVC. Les émissions dans l'atmosphère pendant la production de résine ont diminué de façon constante depuis 1987. Selon le Vinyl Institute, la production de résine de PVC a augmenté de 76 % depuis 1987, mais les émissions de chlorure de vinyle publiées par le biais des formulaires d'inventaire des rejets de produits chimiques toxiques

de l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA), ont diminué de 75 % dans la même période.²⁷ Au cours des années, la réduction des émissions de chlorure de vinyle a causé une réduction de l'impact environnemental global de la phase des matières premières du cycle de vie.

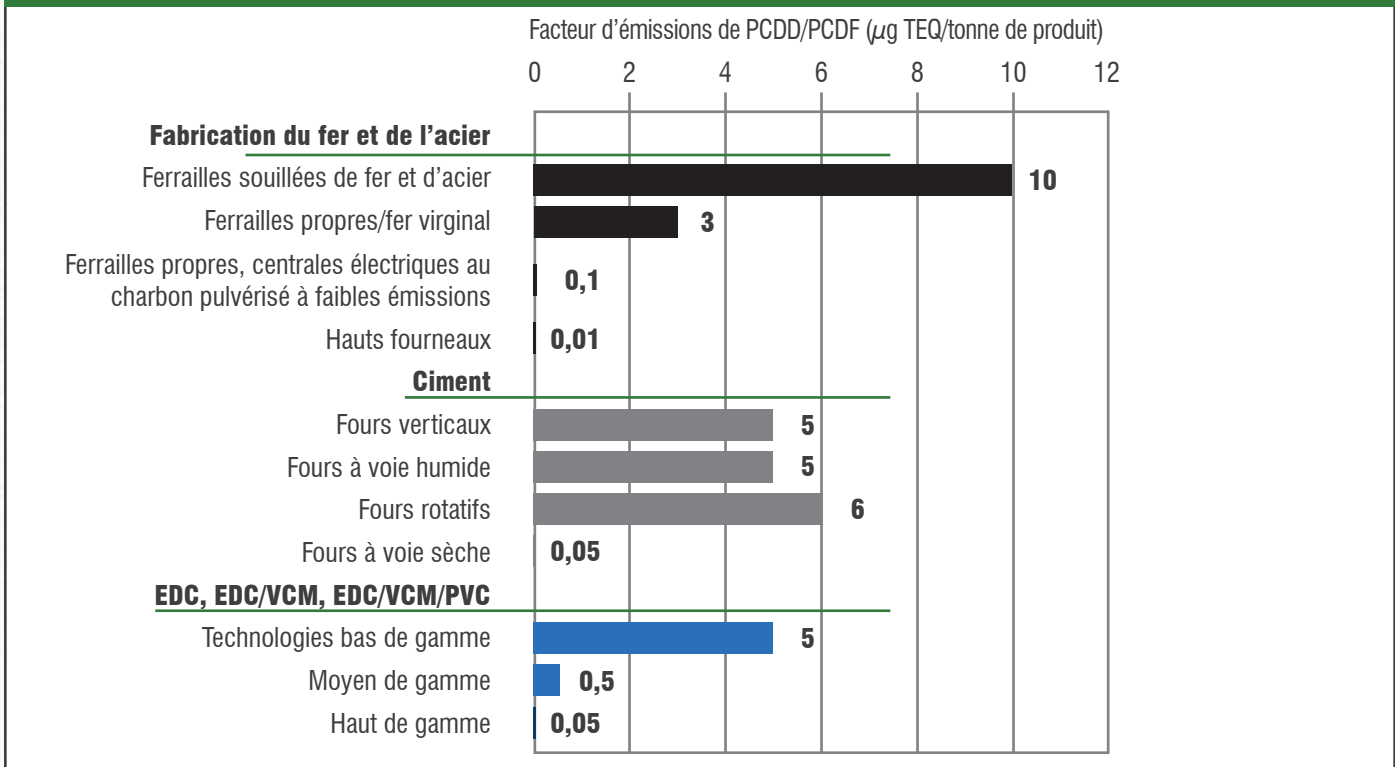
Les tuyaux en PVC rigide fabriqués aux États-Unis et au Canada ne contiennent pas de plastifiants, comme le phtalate de diéthylhexyle (DEHP), le BPA ou autres phtalates. Les tuyaux en PVC fabriqués aux États-Unis et au Canada ne contiennent pas non plus de plomb. L'industrie nord-américaine des tuyaux en PVC utilise un stabilisateur de chaleur à base d'étain. De très petites quantités de stabilisateurs de chaleur sont utilisées dans les produits en PVC pour faciliter la transformation aux très hautes températures d'extrusion requises lors de la fabrication.

5.1.1 Rapports sur les émissions

Une tendance à la baisse au cours des années, similaire à celle des émissions de chlorure de vinyle, a également été observée en ce qui concerne les émissions de dioxines. Les émissions de dioxines par la résine de PVC ont actuellement un taux de moins d'une particule par billion de résine de PVC produite. L'inventaire des rejets de produits chimiques toxiques de l'EPA et un rapport du Vinyl Institute montrent que les émissions de dioxines ont diminué de 79 % entre 2000 et 2011.²⁸

Certains groupes ont exprimé des inquiétudes au sujet des émissions de dioxines en provenance du PVC. Toutefois, la production de résine de PVC n'est pas la seule industrie qui produit des dioxines. Les procédés de fabrication de la fonte ductile et de la fonte grise pour la plomberie, ainsi que les tuyaux en béton, produisent également des dioxines. La production totale de résine de PVC pour les tuyaux de canalisations est responsable de moins de 0,09 % de la quantité totale de dioxine relâchée dans l'environnement aux États-Unis, comparativement avec les moteurs diesel (env. 5 %), les équipements lourds (env. 2 %) et l'industrie de la combustion du bois (env. 3 %) qui sont chacun responsables d'une production de dioxines plus élevée, sur une base annuelle.²⁹

FIGURE 5.1 : FACTEURS D'ÉMISSION DE DIOXINES ESTIMÉS DU PNUE SELON DES SOURCES DE PRODUCTION DONNÉES



Selon l'EPA et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le frittage des métaux et la production de magnésium (ces deux matériaux étant utilisés dans la production de l'acier et du fer) et la production d'électricité à partir du charbon sont également d'importantes sources d'émissions de dioxines.^{30 31 32} Le PNUE a élaboré des facteurs d'émission standards pour les installations qui sont des sources importantes d'émissions de dioxines.³³ Un échantillon de ces facteurs est illustré à la figure 5.1. GreenSpec® a retiré les tuyaux d'évacuation en fonte de leurs catalogues de produits en raison de la haute énergie intrinsèque et de la pollution provoquée par les émissions des cokeries.³⁴

Lors de la sélection de matériaux de tuyaux, il est important d'utiliser la philosophie du cycle de vie et de comprendre tous les impacts des matériaux, en particulier les émissions pendant la phase de fabrication.

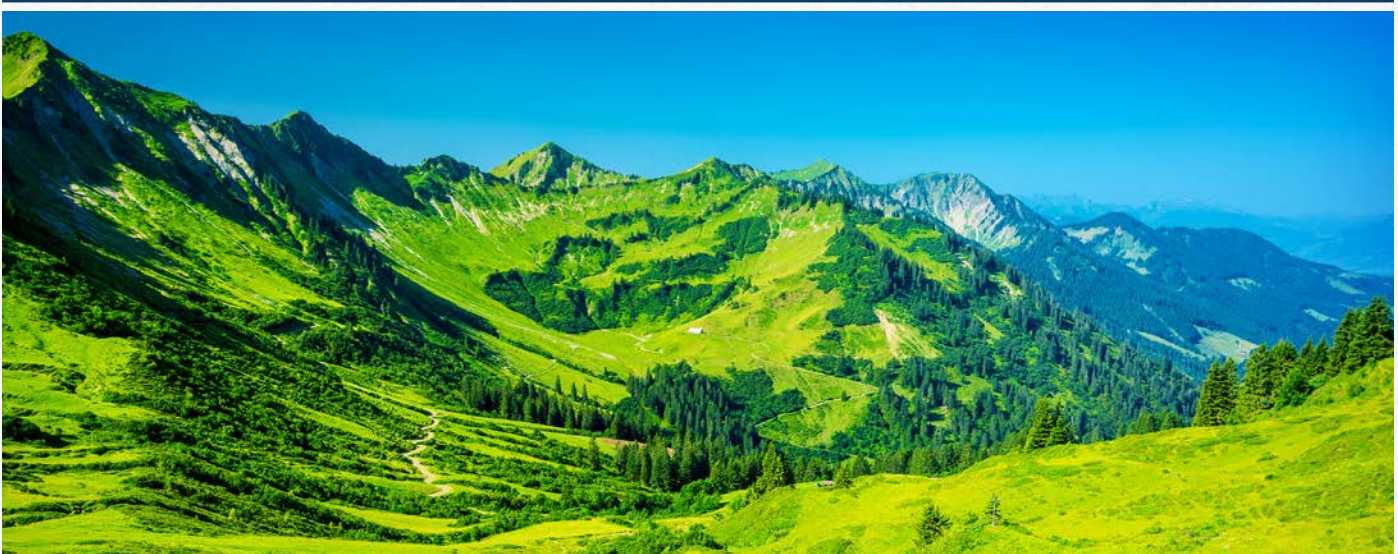
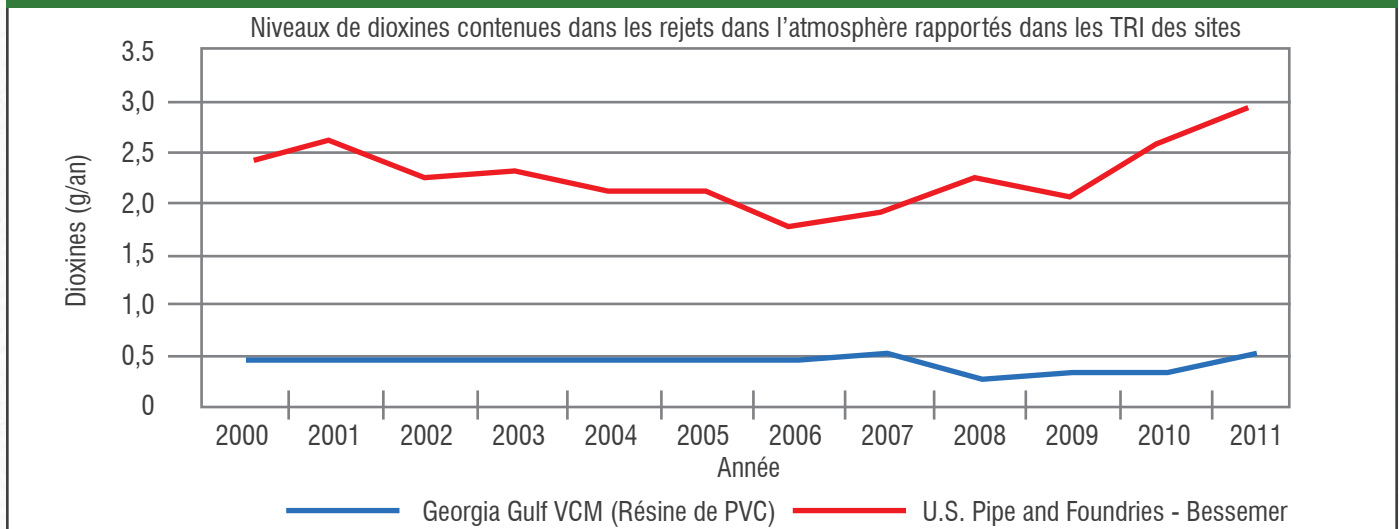


FIGURE 5.2 : NIVEAUX ANNUELS DE DIOXINES CONTENUES DANS LES REJETS DANS L'ATMOSPHÈRE À UNE USINE DE FABRICATION DE RÉSINE DE PVC À BASE DE VCM ET À UNE USINE DE TUYAUX EN FONTE DUCTILE, TELS QUE PUBLIÉS DANS LES INVENTAIRES DES REJETS TOXIQUES DE L'EPA DES ÉTATS-UNIS



Les émissions de dioxines sont surveillées par l'EPA des États-Unis par le biais d'inventaires des rejets toxiques (rapports TRI). Les données des TRI sont accessibles au public. La figure 5.2 représente un échantillon des émissions de dioxines dans l'atmosphère, telles que rapportées par un fabricant de résine de PVC à base de VCM et un fabricant de fonte ductile.³⁵

Comme le montre la figure 5.2, l'usine de fabrication de résine de PVC rapporte moins d'émissions de dioxines que l'usine de fonte ductile. Cette illustration confirme que les émissions de dioxines sont également une source d'inquiétude pour les autres matériaux de tuyaux.

L'EPA des États-Unis a élaboré des règlements pour contrôler et réduire les émissions de polluants atmosphériques toxiques en provenance de fonderies de fer. Les règlements de l'EPA pour les fonderies de fer et d'acier ont été publiés en avril 2004 et l'EPA affirme que ces règlements ont permis de réduire les matières particulaires, la quantité totale de polluants atmosphériques dangereux (PAD) métalliques, y compris le cadmium, le chrome, le plomb, le manganèse et le nickel, ainsi que des PAD organiques, y compris le benzène, les dioxines, le formaldéhyde, le méthanol, le naphthalène et la triéthylamine. Les effets sur la santé liés à l'exposition à ces polluants peuvent comprendre le cancer et les troubles chroniques ou aigus des voies respiratoires, les troubles de la reproduction et du système nerveux central.³⁶

De nombreuses installations de fonte ductile rapportent également leurs émissions de métaux lourds tels que le plomb et le mercure, ainsi qu'une foule d'autres émissions de produits chimiques toxiques. Les cinq émissions dans l'atmosphère lors de la production de tuyaux en fonte ductile sont la triéthylamine, le xylène, le méthanol, le phénol et l'ammoniac, qui sont créés au cours du processus de moulage de la fonte ductile. Les scories et la poussière générées par le processus de production peuvent aussi être contaminées par le manganèse, le zinc, le plomb et les composés du chrome.^{37 38 39}

Des rapports sur les émissions de l'industrie du fer sont fondés sur la Compilation des facteurs d'émission des polluants atmosphériques (AP-42) : Sources de pollution stationnaires ponctuelles ou diffuses.⁴⁰ Dans le projet de politique liée à la dioxine de l'EPA, les dioxines ont été notées

dans le traitement des minerais pour obtenir des métaux, y compris la production secondaire de récupération des métaux à partir de déchets. L'American Foundry Society a noté qu'en raison de la mauvaise qualité de certains protocoles d'essai de cheminées, les facteurs d'émission rapportés pour la production de fer sont peut-être sous-estimés. En outre, il a été démontré que la production secondaire de fer à partir de ferraille émet encore plus de polluants que la production primaire.

« Le recyclage des métaux peut produire des niveaux de formation de dioxine plus élevés, car la ferraille contient généralement des peintures, des huiles, des revêtements, des plastiques et d'autres impuretés qui peuvent dégager à la fois du chlore et du carbone. Dans ce cas, des dioxines peuvent être générées pendant le prétraitement de la ferraille, visant à éliminer ces impuretés, ou au cours de l'affinage des métaux dans les fours (fusion). Les dioxines peuvent également provenir de la combustion des combustibles dans les fours. En outre, les opérations de coulée nécessitent de faire fondre et de verser le métal chaud dans des moules. Ces procédés à haute température peuvent également donner lieu à des émissions de dioxines, selon le matériau du moule. Les émissions de dioxines en provenance de la production de métaux sont relativement mal connues, en partie parce qu'une grande partie de l'effet de serre est fugitif, et donc, elles ne sortent pas d'une cheminée où elles pourraient être mesurées. »⁴¹

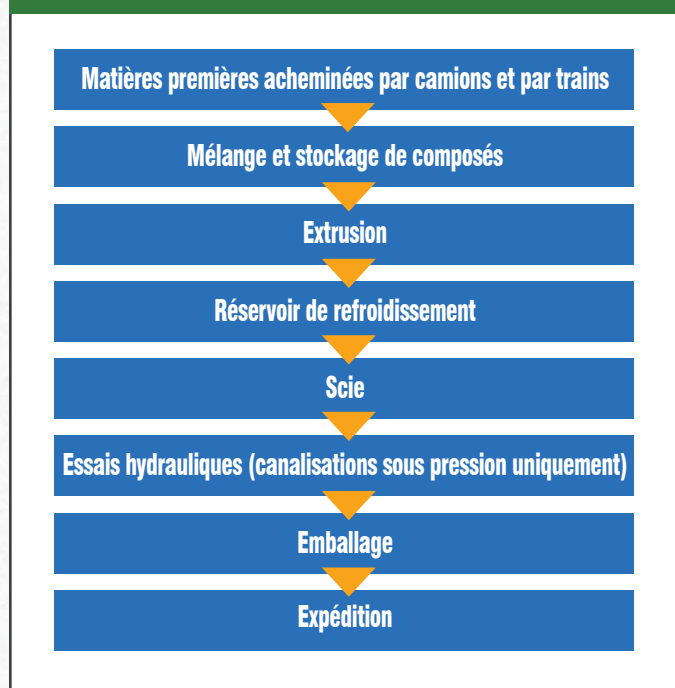
5.2 Production de tuyaux

La fabrication de tuyaux en PVC est un processus très efficace. Elle nécessite des apports faibles en énergie et en eau, et a la capacité de remettre immédiatement les débris des matériaux directement dans le processus de fabrication. Il n'en résulte quasiment pas de déchets de fabrication.

La résine de PVC et quelques additifs supplémentaires sont mélangés puis extrudés pour fabriquer des tuyaux d'un diamètre et d'une épaisseur de paroi spécifiés. Le tuyau extrudé est ensuite refroidi avec de l'eau. L'eau de refroidissement est généralement un processus en circuit fermé, ce qui permet d'économiser des millions de litres

d'eau, par an, dans chaque usine. L'usage accru de technologies de conservation de l'eau en circuit fermé démontre l'engagement de l'industrie des tuyaux en PVC envers une amélioration continue de l'efficacité. Après le processus de refroidissement, les tuyaux sont coupés en longueurs standards avec une scie électrique et une extrémité de chaque tuyau est placée dans une machine pour lui donner sa forme de cloche. Chaque longueur standard de tuyau utilisée dans les systèmes municipaux d'eau potable est testée sous pression sur la ligne de production. Les tuyaux finis sont ensuite disposés sur des cadres en bois et attachés en place, chargés sur un camion ou un wagon, puis expédiés à un distributeur ou sur un chantier. Presque tous les déchets de matériaux sont broyés et ramenés vers l'extrudeuse, résultant en très peu de déchets. Le procédé de fabrication utilise de petites quantités d'électricité et ne produit presque pas d'émissions. La figure 5.3 présente les phases impliquées dans le processus de fabrication de tuyaux en PVC.

FIGURE 5.3 : DIAGRAMME DES OPÉRATIONS DE TUYAUX EN PVC



Depuis l'introduction généralisée des tuyaux en PVC dans les années 1960, l'industrie des tuyaux en PVC a continué d'innover tout en améliorant les performances de la fabrication. L'ACV des tuyaux en PVC a utilisé des données datant de 2012, fournies par les fabricants de résine de PVC, afin de tenir compte des nouvelles technologies mises en œuvre. En utilisant ces données, l'ACV reflète avec exactitude la production actuelle de tuyaux en PVC.

Le processus de fabrication typique de la fonte ductile comprend l'utilisation de ferrailles, de constituants d'alliage, de sable et de métaux de collage. La source de métaux recyclés la plus importante pour les tuyaux en fonte ductile provient du recyclage des automobiles. Ce type de déchets métalliques est le plus difficile à utiliser, car leur composition chimique est variable et peut inclure du mercure (un polluant de l'air volatil) et d'autres toxines.^{42,43} Si un cubilot est utilisé dans le processus de production de la fonte ductile, du coke et du calcaire sont également nécessaires pour la

scorification.⁴⁴ Des débris métalliques et du métal recyclé sont fondus et souvent injectés avec des alliages tels que le magnésium.⁴⁵ Le fer fondu est coulé en utilisant une méthode de coulée centrifuge. Les tuyaux en fonte ductile sont ensuite refroidis et recuits, puis soumis à un processus de finition pour leur application finale.⁴⁶ Des scories et des poussières sont générées en tant que déchets. La consommation d'énergie dans une fonderie de fer est élevée : un cubilot de fonte ductile utilise environ 13,7 MJ par kilogramme de fonte ductile, tandis qu'un processus d'induction utilise 29,2 MJ par kilogramme de fonte ductile.⁴⁷

Par ailleurs, les vieux tuyaux en fonte grise ou en fonte ductile sont rarement recyclés. En cas de recyclage de tuyaux en fonte installés avant les années 1950, il faut faire particulièrement attention, car ils possèdent vraisemblablement des joints au plomb. Les tuyaux en fonte à joints au plomb doivent être retirés du sol et éliminés comme des déchets dangereux.

5.3 Matériaux recyclés

La recyclabilité est une propriété à prendre en compte dans l'analyse environnementale d'un produit. Les tuyaux en PVC peuvent être recyclés en tuyaux en PVC. La capacité de recycler des matériaux dans des produits identiques ou de valeur égale est appelée produits en boucle fermée. Le recyclage en boucle fermée constitue souvent un moyen de réduire les impacts du cycle de vie et de préserver les ressources. Au cours de la production, les fabricants de tuyaux en PVC peuvent broyer des déchets de fabrication et les intégrer dans le produit, ce qui réduit considérablement les déchets de l'activité de fabrication. Tous les tuyaux en PVC pour canalisations sous pression ou sans pression fabriqués en Amérique du Nord sont autorisés à utiliser des matières rebroyées internes. L'utilisation de matières rebroyées internes évite la production de grandes quantités de déchets qui iraient dans des décharges.

Les tuyaux en PVC étant installés dans le sol, il n'est généralement pas faisable, d'un point de vue économique, d'excaver les tuyaux à la fin de leur durée de vie utile, afin de les recycler. En outre, quel que soit le matériau des tuyaux, l'énergie nécessaire à l'excavation éclipserait les avantages du recyclage. Toutefois, les tuyaux en PVC excavés pour d'autres raisons (p. ex., lors de travaux de construction) ont un haut potentiel de recyclage et peuvent être recyclés mécaniquement en matériau pour tuyaux, et offrir les mêmes fonctions structurelles que si les tuyaux étaient fabriqués uniquement à partir de matériaux vierges.

Des recherches sont en cours sur le cycle de vie en boucle fermée des tuyaux en PVC. En fait, une étude récente montre que les propriétés mécaniques des tuyaux en PVC qui utilisent 100 % de matières recyclées ne changent pas, même après huit cycles de meulage et d'extrusion du même matériau.⁴⁸

Le contenu recyclé, en tant que propriété unique, n'est pas toujours un indicateur pertinent d'un faible impact sur l'environnement. Par exemple, une quantité relativement importante d'énergie est requise pour traiter les métaux recyclés afin de fabriquer de la fonte ductile. La production de tuyaux en PVC à l'aide de matériaux vierges consomme moins d'énergie que la production de fonte ductile à partir de matériaux recyclés, ce qui réduit l'impact sur l'environnement pour les projets d'infrastructures de distribution d'eau.

6.0

INSTALLATION DES TUYAUX

Comme noté dans les résultats globaux du cycle de vie, la phase d'installation des tuyaux est une phase importante en termes d'impact potentiel sur l'environnement des tuyaux en PVC. Comme les conditions d'installation sont très variables, la discussion qui suit traite de nombreux aspects et considérations de la phase d'installation de systèmes de tuyaux en PVC, malgré leur facilité d'installation.

34

6.1 Transport des tuyaux

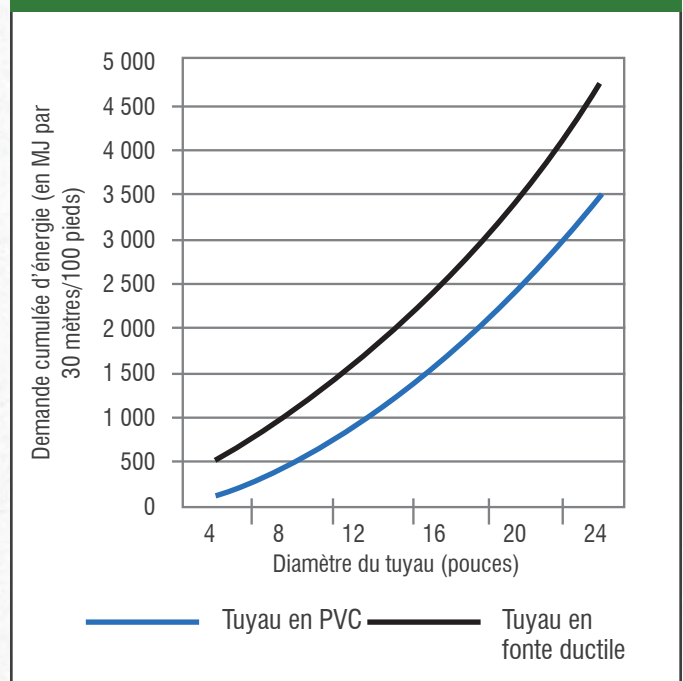
Le poids léger des tuyaux en PVC contribue à réduire les impacts environnementaux (et les coûts) du transport et permet de faciliter la manipulation des tuyaux une fois qu'ils arrivent sur le chantier final (voir figure 6.1).

6.2 Impacts potentiels sur l'environnement de l'installation de tuyaux

L'installation de tuyaux en PVC est supposée être similaire à l'installation de tuyaux fabriqués à partir d'autres matériaux. L'installation nécessite l'excavation et le remplissage de tranchées. La profondeur et le temps requis pour creuser et remplir une tranchée varient considérablement par région, type de sol, climat, infrastructures existantes, opérateur d'équipement, convention locale et autres facteurs. Par conséquent, le temps et les efforts requis pour l'installation sont très variables. Pour les tuyaux de 200mm (8 pouces), la tranchée doit avoir au moins 600 mm (24 pouces) de largeur. Pour les tuyaux de 600 mm (24 pouces), la tranchée doit avoir entre 900mm (36 pouces) et 1200mm (48 pouces) de largeur. En règle générale, une pelle rétrocaveuse est utilisée pour creuser la tranchée, tandis qu'une petite benne est utilisée pour la remplir.

La phase d'installation de tuyaux présente des impacts environnementaux, en raison de l'utilisation de combustibles fossiles dans le matériel d'excavation, qui émettent des gaz à effet de serre et d'autres émissions. En outre, l'extraction de matériaux de remplissage et les ressources requises pour les travaux de réparation de la chaussée contribuent à l'impact sur l'environnement lors de

FIGURE 6.1 : DEMANDE CUMULÉE D'ÉNERGIE POUR LE TRANSPORT



la phase d'installation. Le poids léger (25 % du poids de la fonte ductile par unité de longueur) et la durabilité des tuyaux en PVC peuvent réduire les impacts et les coûts d'installation, car il est possible d'utiliser des équipements plus légers pour manipuler les tuyaux et des équipes de travail de plus petite taille. L'utilisation d'équipements plus petits permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'autres catégories d'impacts environnementaux.

Comme le temps d'installation des tuyaux varie beaucoup, une brève analyse de sensibilité a été effectuée sur la demande cumulée d'énergie liée à l'installation d'une canalisation d'eau de 200mm (8 pouces).

Le tableau 6.1 et la figure 6.2 présentent les valeurs et montrent sous forme graphique les résultats d'une analyse de sensibilité des temps d'installation d'un tuyau de 30 m (100 pieds) de 200mm (8 pouces). Réduire le temps d'installation des tuyaux est un aspect clé, qui peut être recherché dans la conception du cycle de vie du produit.

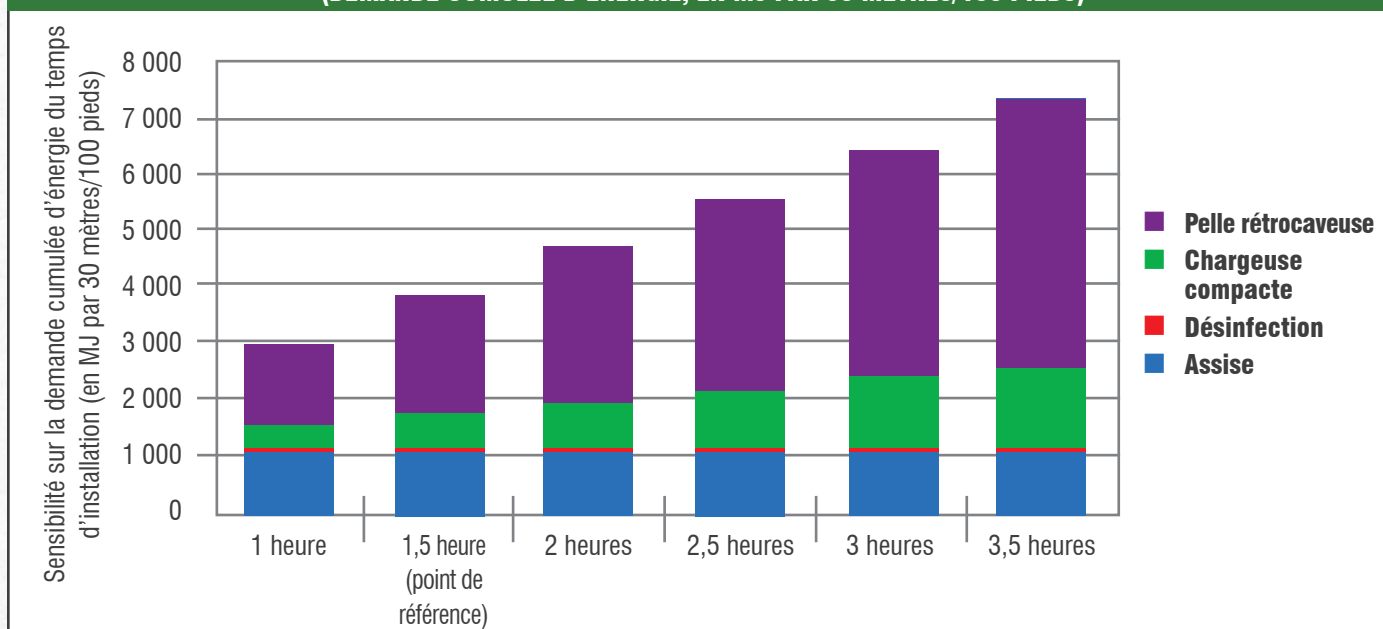
Les coûts de trafic et les pertes de revenus sont les deux principaux coûts liés à l'installation.⁴⁹ En fin de compte, pour réduire ces coûts, il faut réduire la fréquence de remplacement et la nécessité d'installer de nouvelles infrastructures de canalisations. Par conséquent, en installant des tuyaux en PVC qui sont très durables, assurent un faible taux de défaillance et ne sont pas sujets à la corrosion, les coûts d'installation et d'exploitation sont réduits lorsqu'on les amortit une durée de vie utile prévue de 100 ans. Comme les tuyaux en PVC ne nécessitent pas de remplacement pendant leur durée de vie prévue de 100 ans, ils éliminent les coûts de trafic, les impacts de construction et sur l'environnement, ainsi que d'autres pertes de revenus liées au remplacement de canalisations. Lors d'une installation de canalisations d'égout avec tranchée à ciel ouvert, les tuyaux en PVC sont mis en place 30 % plus rapidement que les tuyaux en béton.⁵⁰

Lors de la sélection de matériaux de tuyaux, les concepteurs doivent tenir compte des coûts d'installation et d'exploitation, ainsi que des impacts environnementaux connexes.

TABLEAU 6.1 : ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES TEMPS D'INSTALLATION DE TUYAUX SOUS PRESSON DE 200MM (8 POUÇES) DE DIAMÈTRE DE 30 M (100 PIEDS) DE LONG (DEMANDE CUMULÉE D'ÉNERGIE, EN MJ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS)

	1,5 heure (point de référence)	2 heures	2,5 heures	3 heures	3,5 heures
Pelle rétrocaveuse	2 100	2 800	3 500	4 200	4 900
Chargeuse compacte	530	700	880	1 100	1 200
Désinfection	70	70	70	70	70
Assise	1 100	1 100	1 100	1 100	1 100
Total	3 800	4 700	5 600	6 500	7 300

FIGURE 6.2: ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES TEMPS D'INSTALLATION DE TUYAUX SOUS PRESSON DE 200MM (8 POUÇES) DE DIAMÈTRE DE 30 M (100 PIEDS) DE LONG (DEMANDE CUMULÉE D'ÉNERGIE, EN MJ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS)



7.0

PHASE D'UTILISATION ET PERFORMANCE DES TUYAUX EN PVC

Les infrastructures souterraines d'eau potable et d'égouts ont une très longue durée de vie prévue. Les coûts de construction de ces actifs essentiels sont élevés, et le sont encore plus s'ils doivent être remplacés au cours de leur cycle de vie. Le processus de conception du système doit se concentrer sur la durée de vie durable à long terme des produits.

36

7.1 Durée de vie des tuyaux avec un point de référence de 100 ans

La durée de vie du PVC devrait dépasser les 100 ans.^{51 52 53} En se basant sur plus de 60 ans d'expérience sur le terrain et de tests en laboratoire, la présente étude fait l'hypothèse d'une durée de vie de 100 ans pour le PVC. La durée de vie d'un produit est la durée pendant laquelle le produit peut être utilisé de manière rentable. La nouvelle norme ou le nouvel objectif pour une durée de vie considérée comme durable, pour les infrastructures de canalisations souterraines, est établi à 100 ans. Lors de la détermination de la durée de vie d'un tuyau, les mesures de rendement externes et internes des tuyaux et les niveaux de service doivent être pris en compte. Il est recommandé que toutes les ACV futures relatives à l'utilisation de matériaux de tuyaux pour canalisations souterraines utilisent cette référence de 100 ans.

Afin de distribuer l'eau potable tout au long de la durée de vie prévue, l'eau est mise sous pression et pompée à travers le réseau de canalisations, afin d'être livrée à une destination donnée, avec un débit volumétrique

disponible spécifié. Lors de son passage à travers les tuyaux, l'eau crée des frottements contre la paroi des tuyaux, ce qui cause une perte de pression qui augmente avec la distance. Cette friction nécessite une plus grande puissance de pompage pour surmonter la perte de charge, ce qui augmente considérablement les coûts d'exploitation du réseau. La présente étude a analysé les impacts environnementaux de cette énergie de pompage. Une moyenne des réseaux électriques américains a été utilisée pour modéliser ces effets environnementaux sur une durée de vie de 100 ans.

Le tableau 7.1 et la figure 7.1 montrent les impacts environnementaux du berceau à l'installation de tuyaux en PVC DR25 de 200 mm (8 pouces), comparés aux impacts de la phase utilisation pour le pompage pendant 100 ans à un débit constant d'eau de 1,27 m³ (336 gallons US) par minute, avec une pompe ayant une efficacité énergétique de 75 %. Le débit de 1,27 m³ (336 gallons US) par minute correspond à une vitesse d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s) dans un tuyau en PVC DR25 de 200 mm (8 pouces). La demande en eau étant basée sur le débit volumétrique, le même débit de 1,27 m³ (336 gallons US) par minute a été utilisé pour la comparaison de toutes les options de tuyaux en PVC DR25 de 200 mm (8 pouces). La même méthodologie a été utilisée pour la comparaison des tuyaux en PVC DR18 de 200 mm (8 pouces) et des tuyaux en PVC DR25 de 600 mm (24 pouces).

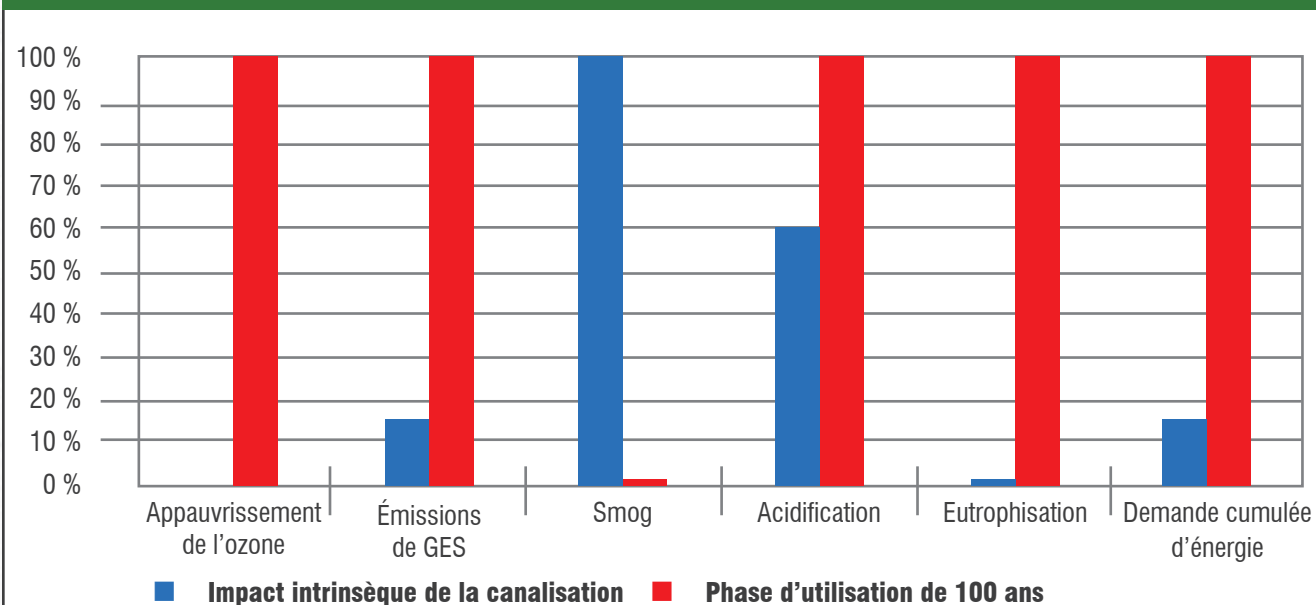
La phase d'utilisation du cycle de vie des tuyaux constitue la principale cause d'impacts environnementaux des tuyaux en PVC, à l'exception du smog qui est principalement causé par la production d'électricité et la combustion de carburant par les équipements d'installation des tuyaux, ainsi que l'extraction et de la production des matières premières.



TABLEAU 7.1 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA PHASE D'UTILISATION POUR DES TUYAUX EN PVC DE 200 MM (8 POUÇES) DR25 PC165 C900

Catégorie d'impact	Unité par 30 m (100 pieds de tuyau)	Impact intrinsèque de la canalisation	Phase d'utilisation de 100 ans
Appauvrissement de l'ozone	kg CFC-11 équiv.	4,6E-05	9,0E+03
Émissions de GES	kg CO ₂ équiv.	1,0E+03	6,1E+03
Smog	kg O ₃ équiv.	1,2E+02	1,1E+00
Acidification	mol H ⁺ équiv.	3,3E+02	5,5E+02
Eutrophisation	kg N équiv.	6,0E-01	7,8E+01
Demande cumulée d'énergie	MJ	2,0E+04	1,3E+05

FIGURE 7.1: IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA PHASE D'UTILISATION POUR DES TUYAUX EN PVC DE 200 MM (8 PO) DR25 PC165 C900. IMPACT INTRINSÈQUE DE LA CANALISATION



8.0

EXAMEN DES AUTRES MATÉRIAUX POTENTIELS POUR TUYAUX

8.1 Méthodologie et hypothèses de la recherche

L'objectif de cette section est d'énoncer les hypothèses et les calculs utilisés dans la présente étude pour la comparaison de la durée de vie des tuyaux de canalisations, la sélection des tuyaux, les calculs d'énergie, les calculs de coûts et les conclusions tirées, en vue de fournir une vision réaliste s'appuyant sur l'expérience des ingénieurs en conception de tuyaux dans les domaines de la conception, la construction et l'exploitation.

8.2 Facteurs ayant un impact sur l'analyse de la durée de vie des tuyaux

La durée de vie prévue de chaque type de matériau de tuyau est un facteur important pour l'analyse du cycle de vie (ACV), ainsi que les calculs de détermination des coûts du cycle de vie (LCC). Une étude limitée peut utiliser une durée de vie prévue de 50 ans seulement, pour tous les tuyaux, en faisant l'hypothèse qu'après cette période les tuyaux seront remplacés de toute façon pour augmenter leur capacité. Une telle étude peut ne pas tenir compte des questions liées aux prises de décisions concernant des infrastructures durables, notamment ce qui a trait à la fiabilité, la durabilité et la nécessité de maintenir un niveau de service ou de rendement constant.

Un autre moyen de déterminer la durée de vie axée sur les performances constitue à attribuer une valeur aux divers matériaux de tuyaux, à des fins de comparaison. Cela implique aller au-delà des revendications et du marketing des fabricants, et d'examiner les données et les sources d'information, afin de mieux comprendre le niveau de service offert par chaque type de tuyau.

Des durées de vie des canalisations de moins de 100 ans impliquent une énergie intrinsèque plus élevée dans le contexte de la phase du berceau à la sortie d'usine, qui comprend la fabrication des tuyaux de remplacement, ainsi que l'énergie supplémentaire pour le transport et l'installation.

En raison du caractère exhaustif de la présente étude et des exigences des règles de catégories de produit (PCR), une durée de vie prévue de 100 ans a été utilisée. Cette décision a été prise en vue d'établir une nouvelle norme de référence pour l'analyse de durabilité et pour prendre en considération les nombreux risques auxquels les réseaux de distribution d'eau potable, et de collecte des égouts sanitaires et des eaux pluviales doivent faire face. Les tuyaux peuvent avoir des durées de vie allant de 15 à plus de 100 ans.⁵⁴ Des durées de vie des canalisations de moins de 100 ans impliquent une énergie intrinsèque plus élevée dans le contexte de la phase du berceau à la sortie d'usine, qui comprend la fabrication des tuyaux de remplacement, ainsi que l'énergie supplémentaire pour le transport et l'installation. La nécessité de remplacement des tuyaux pendant la durée de vie de 100 ans accroît également de façon considérable l'ensemble des coûts sur la durée totale du cycle de vie, et ce, à cause des coûts supplémentaires de remboursement des emprunts additionnels nécessaires pour payer la conception, les droits de passage additionnels, la vente d'obligations et la construction associés au projet de remplacement.

8.3 Sélection des matériaux utilisés aux fins de la comparaison

Les produits suivants sont considérés comme des matériaux de tuyaux comparables, utilisés par les services publics de l'eau et de l'assainissement lors de la planification d'infrastructures de réseaux de canalisations nouvelles ou de remplacement. Reportez-vous au tableau 8.1 pour des produits de tuyaux sous pression comparable et au tableau 8.2 pour des produits de tuyaux à écoulement par gravité comparables.

TABLEAU 8.1 : PRODUITS DE CANALISATION SOUS PRESSION COMPARABLES

Taille et type de tuyau en PVC	Produits comparables	Norme
PVC DR18 PC235 C900 de 200 mm (8 pouces)	PVC DR18 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C900
	Fonte ductile CL51 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C151
	PEHD 4710 DR9 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C906
PVC DR25 PC165 C900 de 200 mm (8 pouces)	PVC DR25 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C900
	Fonte ductile CL51 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C151
	PEHD 4710 DR13.5 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C906
PVC DR25 PC165 C905 de 600 mm (24 pouces)	PVC DR25 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C905
	Fonte ductile CL51 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C151
	PEHD 4710 DR13.5 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C906
	PCCP PC200 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C301

Remarque : l'intérieur de toutes les canalisations sous pression en fonte ductile doit être revêtu de mortier de ciment, conformément à la norme AWWA C104.

Comme la gestion de la durabilité est intégrée à la gestion des actifs pour atteindre les coûts financiers et environnementaux les plus bas possibles, il est possible de conceptualiser une nouvelle durée de vie axée sur les performances.



TABLEAU 8.2 : PRODUITS DE CANALISATION À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ COMPARABLES

Taille et type de tuyau en PVC	Produits comparables	Norme
PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 200 mm (8 pouces)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM F794
	Fonte ductile de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746
PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 600 mm (24 pouces)	PVC PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F794
	PP PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F2736
	PEHD PS34 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F2306
	PVC PS46 de 525 mm (21 pouces)	ASTM F794
PVC PS46 SDR35 D3034 à paroi pleine de 200 mm (8 pouces)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM D3034
	Fonte ductile de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746
	Grès vitrifié (VCP) de 200 mm (8 pouces)	ASTM C700
PVC PS46 F679 à paroi pleine de 600 mm (24 pouces)	PVC PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F679
	Fonte ductile de 600 mm (24 pouces)	ASTM A746
	Grès vitrifié (VCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C700
	Béton non armé (NRCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C14
	PVC PS46 de 525 mm (21 pouces)	ASTM F679

Remarque : l'intérieur de toutes les canalisations d'égouts en fonte ductile doit être revêtu de mortier de ciment, conformément à la norme AWWA C104.

8.4 Durée de vie des canalisations souterraines

La détermination de la durée de vie des infrastructures est un processus important dans l'élaboration de stratégies de gestion de l'entretien appliquées à divers actifs. La détermination de la durée de vie repose sur de nombreux facteurs, notamment l'évaluation des conditions, les courbes de décroissance, les systèmes informatisés de gestion de l'entretien (SIGE), les antécédents de travail ou les points chauds centrés sur un système d'information géographique (SIG), les niveaux de service validés et les normes de l'industrie, ainsi que l'expérience régionale et locale. La durée de vie est un facteur important à prendre en considération dans le calcul des coûts sur la durée totale du cycle de vie, afin de faire preuve d'une capacité de gérer les actifs en déterminant les coûts sur la durée totale du cycle de vie les plus faibles. Ces coûts sont inclus dans les stratégies de remplacement et de réparation prévus et dans les projections de financement, telles que publiées dans un plan de gestion des actifs.

Dans le passé, la conception de systèmes de réseaux de canalisations était purement axée sur la capacité des canalisations. Un tuyau deviendrait défaillant à la « fin de sa vie utile » ou à un point de défaillance à la « fin de sa vie physique ». Une « fin de vie utile » pourrait être liée à une fuite d'eau ou à une perte de pression, ou à tout autre manquement à une exigence de conformité ou à un niveau de service défini par la collectivité. Anciennement, les efforts de gestion des actifs d'infrastructures étaient uniquement axés sur l'extension du service.⁵⁵ Les exigences de rapport stipulées se concentraient uniquement sur la « fin de la vie comptable », à savoir le moment où les actifs étaient entièrement amortis. La technologie et les pratiques de gestion des actifs ont amélioré la capacité des services publics de l'eau et de l'assainissement à mieux analyser les relations entre les niveaux de service, les mesures de rendement et les coûts financiers de la gestion des actifs.⁵⁶ Ainsi, la « fin de la vie économique » est le moment où un actif cesse de représenter l'option présentant le coût le plus bas pour satisfaire un niveau de service ou de performance spécifié.

Comme la gestion de la durabilité est intégrée à la gestion des actifs pour atteindre les coûts financiers et environnementaux les plus bas possibles, il est possible de conceptualiser une nouvelle durée de vie.

Les ingénieurs en réseaux d'eau, d'eaux usées et d'eaux de drainage considèrent généralement l'expression « axé sur les performances » comme s'appliquant uniquement à une méthode d'attribution de contrats, définie comme « une méthode d'attribution de contrats axée sur les débits, la qualité et les résultats, ... qui met l'accent sur des normes et des rendements spécifiques et mesurables ».⁵⁷ L'approche de conception traditionnelle était très prescriptive, par nature, ce qui résultait en un manque d'information sur les conséquences. Cela signifie que, à la phase de la conception, il y avait un manque de compréhension de la durabilité de service. Une approche de spécification axée sur les performances exigerait une évaluation soignée et réaliste de l'interdépendance entre le design et la durabilité, ainsi que les coûts futurs d'entretien, de réparation et d'exploitation. La base conceptuelle d'une approche axée sur les performances est de s'assurer que les performances requises sont maintenues pendant toute la durée de vie prévue, parallèlement à l'optimisation des coûts encourus tout au long de la durée de vie.⁵⁸ Dans le cas d'infrastructures souterraines de conduites d'eau, et

aux fins de déterminer une durée de vie dans le cadre de la présente étude, les exigences de performance définies par l'utilisateur d'actifs de conduites d'eau comprennent :

- Fournir des services de distribution d'eau sur une période de 100 ans comportant un degré de risque minimal quant à la qualité de l'eau.
- Fournir un niveau uniforme et très élevé de distribution d'eau de qualité d'une façon rentable, sans augmenter sensiblement le coût d'exploitation, d'entretien et de réparation sur une période de 100 ans.

Un élément clé de la durée de vie porte sur les besoins en énergie et les coûts de l'énergie de pompage associés à l'exploitation d'un réseau de canalisations.

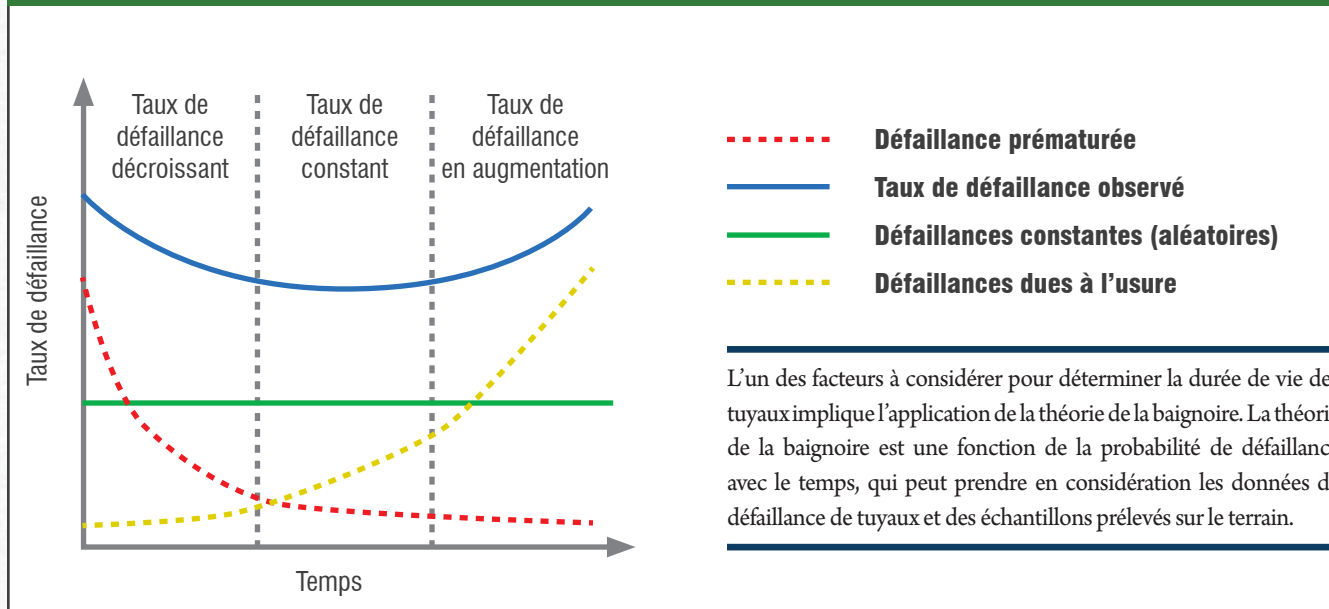
Le coût total de possession comprend la mise de fonds initiale, les coûts d'entretien et les coûts d'exploitation du réseau de canalisations. L'analyse des coûts sur la durée totale du cycle de vie est appliquée pour comparer diverses options de sélection de tuyaux. Dans ce type d'analyse comparative, il est possible d'évaluer l'énergie intrinsèque et d'autres impacts sociaux et environnementaux en tenant compte de la santé publique et des risques financiers. À mesure que le processus de qualification progresse, il est possible d'introduire au processus d'approvisionnement la sélection de tuyaux axée sur les performances, afin de s'assurer que les contribuables puissent bénéficier des attributs définis par l'utilisateur.

L'un des facteurs à considérer pour déterminer la durée de vie des tuyaux implique l'application de la théorie de la baignoire. La théorie de la baignoire est une fonction de la probabilité de défaillance avec le temps, qui peut prendre en considération les données de défaillance de tuyaux et des échantillons prélevés sur le terrain.⁵⁹ Cette théorie, illustrée à la figure 8.1, reconnaît qu'un tuyau d'eau peut ne pas être en parfait état lorsqu'il est placé et installé dans le sol. Certains défauts et dommages peuvent survenir pendant la fabrication, le transport et l'installation, ce qui, en fin de compte, nuit à la qualité générale du produit. Les causes de défaillance peuvent inclure des défauts de conception, un mauvais contrôle de la qualité ou des vices de fabrication. Le processus de construction peut également avoir une incidence sur la défaillance des tuyaux, notamment pour des causes liées au transport, aux erreurs humaines ou à du travail mal fait. Des procédés de construction ou d'installation négligents ou incorrects peuvent aussi réduire les performances des tuyaux. Au fil des ans, l'exploitation et l'entretien affectent les performances des tuyaux et sont la source de diverses causes de défaillances, y compris des interférences mécaniques, thermiques, chimiques, biologiques ou externes, des catastrophes naturelles, ainsi que des opérations d'entretien et de maintenance inappropriées.⁶⁰

Les meilleures pratiques visant à prolonger la durée de vie des actifs souterrains comprennent : la correction des défauts de conception du système de distribution, la réduction des erreurs humaines, l'utilisation de réducteurs de pression, l'emploi de systèmes automatisés et l'amélioration de la formation. Ces améliorations apportées au système sont importantes pour l'évaluation des matériaux de tuyaux.

La durée de vie est un facteur important à prendre en considération dans le calcul des coûts sur la durée totale du cycle de vie, afin de faire preuve d'une capacité de gérer les actifs en déterminant les coûts sur la durée totale du cycle de vie les plus faibles.

FIGURE 8.1: APPLICATION DE LA THÉORIE DE LA BAIGNOIRE POUR DÉTERMINER LA DURÉE DE VIE DES TUYAUX



Un autre moyen de déterminer la durée de vie consiste à attribuer une valeur aux divers matériaux de tuyaux, à des fins de comparaison. Cela implique aller au-delà des revendications et du marketing des fabricants, et d'examiner les sources d'information, afin de mieux comprendre le niveau de service offert par chaque type de tuyau. La combinaison des performances et des prestations des services requis est essentielle pour l'attribution d'une valeur.⁶¹ Elle prend en considération le moment où des ruptures de canalisations se produisent, des problèmes de qualité de l'eau surgissent ou la dégradation (interne ou externe) des tuyaux devient une préoccupation nécessitant une attention particulière. Dans de telles circonstances, les tuyaux ont effectivement atteint la fin de leur durée de vie en tant qu'actif géré à faible coût et leur coût total du cycle de vie ou leur coût total de possession commence à augmenter considérablement.

8.4.1 Durée de vie de chaque matériau de tuyau

Aux fins de la présente modélisation et évaluation sur 100 ans des infrastructures souterraines de distribution d'eau durable, les durées de vie des tuyaux suivantes ont été utilisées, comme indiqué dans le tableau 8.3.

Considérations générales pour l'attribution des durées de vie des tuyaux :

- ▶ Données historiques de défaillance/remplacement
- ▶ Conditions de sol moyennes aux États-Unis.
- ▶ Épaisseur des tuyaux
- ▶ Taux de corrosion
- ▶ Friabilité
- ▶ Perte d'eau et infiltration

TABEAU 8.3 : COMPARAISON DES HYPOTHÈSES CONCERNANT LA DURÉE DE VIE DES TUYAUX CONSIDÉRÉS

Durée de vie des tuyaux avant remplacement utilisées par l'ACV		
Matériau du tuyau	Norme	Durée de vie (années)
PVC	AWWA C900	100
PVC	AWWA C905	100
PVC	ASTM D3034	100
PVC	ASTM F679	100
PVC	ASTM F794	100
Fonte ductile	AWWA C151	50
Fonte ductile	AWWA A746	50
PEHD	AWWA C906	50
PEHD	ASTM F2306	50
PCCP	AWWA C301	75
PP	ASTM F2736	50
VCP	ASTM C700	50
Béton non armé (NRCP)	ASTM C14	50

Reportez-vous à la section 9 pour une discussion détaillée sur l'attribution des durées de vie.

8.4.2 Durée de vie de 100 ans des tuyaux en PVC

Le PVC a une durée de vie de plus de 100 ans pour les applications de distribution d'eau, de collecte d'eaux usées et d'eaux pluviales. Il n'est en effet pas sujet à la corrosion. Le PVC dispose de plus de 60 ans de succès en termes de performances de service. Le rapport *PVC Pipe Longevity Report: Affordability and the 100+ Year Benchmark Standard* par le Dr S. Folkman, datant de mai 2014, a étudié la durée de vie des conduites d'eau et d'eaux usées en PVC.⁶² Les conclusions de cette étude sont qu'une combinaison de travaux de recherche, d'excavations sur le terrain, de tests et d'analyses, a confirmé la justification d'une norme de référence de plus de 100 ans pour les tuyaux en PVC. En Europe, des excavations et des tests après 70 ans d'utilisation ont confirmé que les tuyaux en PVC durent plus de 170 ans.⁶³ Selon l'article *Predicting the Residual Life of PVC Sewer Pipes* par A.J. Whittle et J. Tennakoon, une étude basée sur des tests effectués sur des canalisations d'égout en PVC exhumées, la durée de vie prévue supplémentaire pour les tuyaux d'égout en PVC étudiés était au minimum d'environ 100 ans et la « meilleure estimation » de près de 300 ans.⁶⁴ Des tuyaux d'égout en PVC également déterrés et testés en Europe ont révélé des résultats similaires.⁶⁵ L'article *An Examination of Innovative Methods Used in the Inspection of Wastewater Systems*, par la Water Environment Research Foundation (WERF) a conclu que « Si un service public exploite principalement des tuyaux en PVC, il est inutile d'investir dans un système d'inspection visant à mesurer les pertes par les parois dues à la corrosion ».⁶⁶ De même, lorsque le coût tout-compris par unité de longueur d'un tuyau en métal est utilisé, le coût total est beaucoup plus élevé, à la fois pour le coût des investissements et pour les coûts d'exploitation et d'entretien, lorsqu'on ajoute les coûts du programme de contrôle de la corrosion. La sélection des tuyaux a pour conséquence des coûts plus élevés ou moins chers pour une collectivité locale.⁶⁷

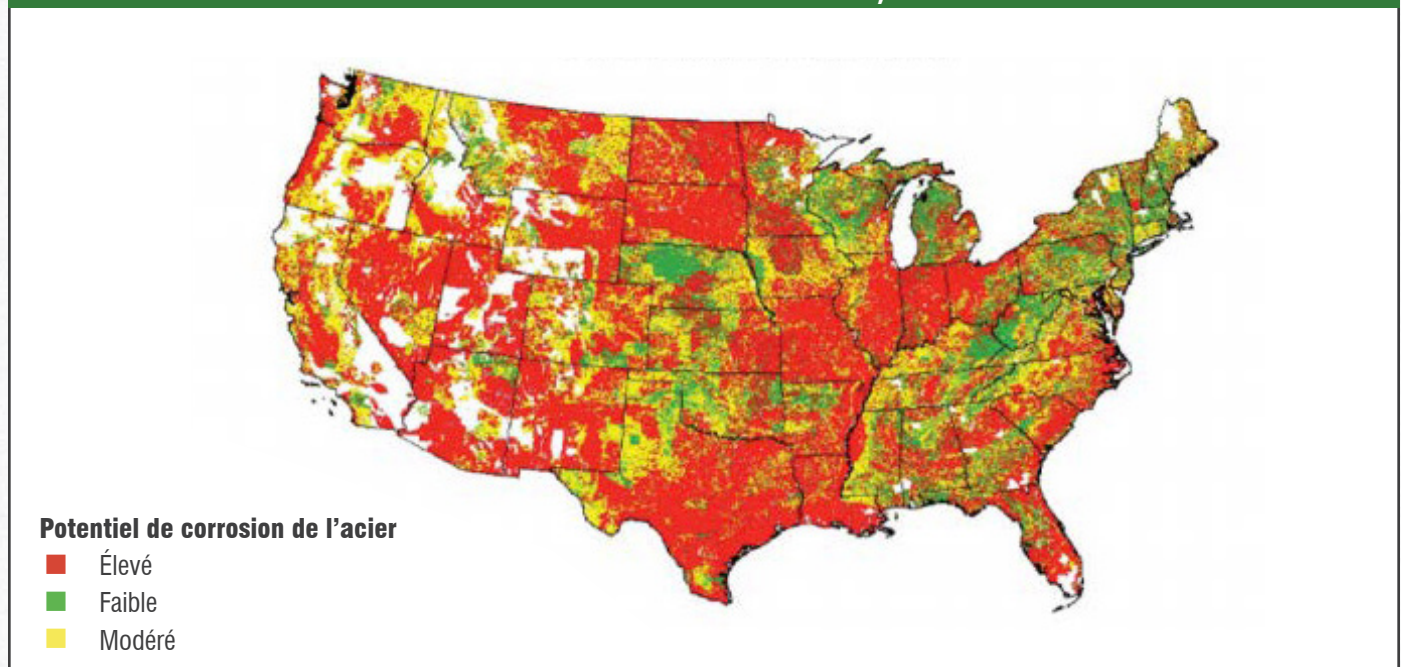
8.5 Facteurs influant sur la durée de vie de tuyaux d'eau

De nombreux facteurs influent sur la durée de vie réelle d'infrastructures d'eau souterraines. La corrosion, sous ses diverses formes, est la principale cause de défaillance de tuyaux en Amérique du Nord, créant une foule de problèmes, directement liés à la corrosion, mais aussi à la prestation des services et à la qualité de l'eau. Les autres facteurs comprennent les défaillances dues à l'oxydation, provoquées par les produits de désinfection utilisés dans les systèmes d'eau, une infiltration ou une exfiltration excessive en raison de la corrosion ou de fuites au niveau des joints, ainsi que les pertes de débit ou des besoins de pompage accrus en raison de l'augmentation de la friction dans les tuyaux ou de l'accumulation de biosolides ou de tuberculisation à l'intérieur des tuyaux.

8.5.1 Corrosion externe

La corrosion est le risque prédominant et la cause principale de ruptures et de défaillance de canalisations aux États-Unis. Elle doit par conséquent être prise en considération lors de la conception de systèmes de réseaux de canalisations. Les risques de types divers de corrosion seront toujours présents (le changement climatique ne fera qu'aggraver ce problème) et auront toujours besoin d'être surveillés. La corrosion des tuyaux en fonte affecte négativement la qualité de l'eau.⁶⁸ Selon l'article *Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study* par le Dr S. Folkman, 75 % de tous les services publics de l'eau et de l'assainissement opèrent dans un sol corrosif.⁶⁹ La carte présentée sur la figure 8.2 montre le potentiel de corrosion aux États-Unis.

FIGURE 8.2: CARTE DES SOLS CORROSIFS AUX ÉTATS-UNIS (POTENTIEL DE CORROSION DE L'ACIER DANS LA ZONE CONTINENTALE DES ÉTATS-UNIS)



Les fuites dans les infrastructures de distribution d'eau résultent en environ 8,3 millions de mètres cubes d'eau (2,2 billions de gallons) perdue par an.⁷⁰ La plupart de ces pertes résultent de tuyaux percés ou corrodés. La corrosion et les fuites augmentent les besoins en énergie de pompage, peuvent favoriser la croissance de bactéries et autres organismes, et peuvent provoquer une lixiviation des métaux dans l'approvisionnement en eau. Les études estiment que les tuyaux en PVC ont une durée de vie de plus de 100 ans.⁷¹ Une des raisons de cette grande longévité est que les tuyaux en PVC sont résistants à la corrosion, qu'elle soit interne et externe. Dans les sols à pH élevé, les tuyaux en métal peuvent se corroder et défaillir bien avant les durées de vie publiées par leurs fabricants.

La fonte ductile commence à défaillir après typiquement 21 à 40 ans. Les piqûres et les trous formés par la corrosion ont été identifiés comme la cause la plus courante de défaillance des matériaux de tuyaux en fonte ductile. La durée de vie publiée des tuyaux en fonte ductile correspond à l'impact de corrosion de sols faiblement ou modérément corrosifs sur des tuyaux non protégés. De même, les canalisations sous pression en béton commencent à défaillir après typiquement 21 à 40 ans, montrant que les sols corrosifs affectent également la durée de vie des tuyaux en béton. Selon B. Cohen, dans l'article *Fixing America's Crumbling Underground Water Infrastructure*, les tuyaux en fonte ductile à paroi plus épaisse installés dans les premiers réseaux devaient durer 50 à 75 ans.⁷² Toutefois, l'étude d'un réseau de distribution dans l'État du Wisconsin a montré que 79 % des canalisations en fonte ductile installées entre 1953 et 1982 n'ont duré que 25 à 50 ans.⁷³ Le U.S. Bureau of Reclamation a demandé au National Research Council (NRC) d'évaluer la fiabilité des tuyaux en fonte ductile munis d'une protection cathodique et d'un revêtement extérieur en polyéthylène sur une durée de vie de 50 ans. Le NRC a conclu : « Le Comité ne considère pas que les études de la DIPRA confirment que les tuyaux en fonte ductile revêtus de PE peuvent respecter les attentes en matière de fiabilité sur une durée de vie de plus de 50 ans ». ⁷⁴

Dans les sols où il existe un risque de corrosion, les tuyaux en métal, comme la fonte ductile, auront besoin d'être remplacés fréquemment. Selon une étude de l'AWWA Water Research Foundation de 2011, les tuyaux en fonte ductile avec des parois fines (représentant la majorité des canalisations en métal vendues), placés dans des sols moyennement corrosifs, ont une espérance de vie de seulement 11 à 14 ans.⁷⁵ Si les mêmes tuyaux, sujets à la corrosion, sont utilisés dans des sols et des lieux à haut risque, et doivent être remplacés tous les 15 ans sur la période de 100 ans, ils auront besoin d'être remplacés jusqu'à 7 fois. Ceci augmente considérablement (par un facteur pouvant aller jusqu'à 7) l'énergie intrinsèque, l'impact sur l'environnement et les coûts du système.

La corrosion, sous ses diverses formes, est la principale cause de défaillance de tuyaux en Amérique du Nord, créant une foule de problèmes, directement liés à la corrosion, mais aussi à la prestation des services et à la qualité de l'eau.

8.5.2 Corrosion interne

Corrosion due aux eaux usées

La corrosion d'une canalisation n'est pas seulement causée par son environnement externe. Elle peut également être causée de manière interne, par les eaux d'égout, les eaux usées ou d'autres liquides ou gaz à l'intérieur des tuyaux. Par exemple, les eaux d'égout et les eaux usées « ... contiennent des niveaux importants de matières organiques et biologiques, y compris de nombreuses bactéries, qui restent actives dans les flux de déchets. Du point de vue de la corrosion, les types de bactéries les plus importants sont ceux qui métabolisent les composés sulfurés, parce qu'une telle activité microbiologique peut produire des produits chimiques acides susceptibles de corroder le béton, l'acier ou le fer. Certaines bactéries oxydent également les ions ferreux en ions ferriques, ce qui rend leur environnement local plus corrosif pour l'acier au carbone. » ⁷⁶

La manière la plus courante par laquelle ces micro-organismes affectent les flux d'eaux usées est par la formation de colonies, créant un environnement local qui est suffisamment acide pour dissoudre le béton et corroder l'acier et la fonte ductile. Un autre problème commercial important, en raison notamment de l'action du *Thiobacillus ferrooxidans*, est la formation de dépôts d'oxyhydroxyde de fer (III), qui est très insoluble, et qui est susceptible d'obstruer les tuyaux en acier ou en fonte. Du sulfure d'hydrogène gazeux (H₂S), avec son odeur familière d'« œufs pourris », peut également se former et acidifier l'humidité superficielle dans l'espace de tête de structures fermées ou couvertes, ce qui provoque la corrosion acide des surfaces en béton ou en métal. H₂S et l'oxygène se combinent pour former des acides polythioniques, une forme faible d'acide sulfurique.

L'industrie des eaux usées prend très au sérieux les questions liées à la corrosion et à la santé publique. Une enquête indépendante auprès de l'industrie visant à déterminer les matériaux de tuyaux de collecte des eaux usées qui offrent les plus grands avantages pour l'intérêt public, une fois en service, a été effectuée en 2010 et en 2012, et publiée dans le *Trenchless Technologies Pipe Materials Guide* (Guide des matériaux de tuyaux utilisant des technologies sans tranchée, le « Guide »).⁷⁷ L'industrie des eaux usées a répondu que la longévité et la durée de vie sont les facteurs les plus importants dans le choix de matériaux de tuyaux. Les ingénieurs en eaux usées considèrent les tuyaux comme étant non seulement un moyen de transport, mais aussi une barrière importante pour la santé publique contre toute éventuelle contamination. Prenant en considération les conditions corrosives et caustiques internes, le *Guide* a déterminé que parmi les matériaux de tuyaux de canalisations couramment utilisés, le PVC était le matériau offrant la plus longue durée de vie, devant la brique, l'argile, le grès, le béton, la fibre de verre, le béton de polymère, le polyéthylène, la fonte grise, la fonte ductile et l'acier. Le PVC existe depuis des dizaines d'années et ses propriétés de résistance à la corrosion en ont fait un matériau couramment utilisé dans l'industrie des eaux usées.⁷⁸

Corrosion par l'eau d'approvisionnement

Un pH excessivement élevé ou faible peut endommager les systèmes de distribution d'eau. Une eau avec un pH élevé provoque la formation

de dépôts dans les conduites d'eau et dans les appareils utilisant l'eau. Ces dépôts incrustés réduisent l'efficacité de la désinfection au chlore, ce qui entraîne le besoin d'utiliser des quantités de chlore plus importantes. Une eau avec un pH faible corrode ou dissout les métaux et autres substances.⁷⁹ De manière générale, l'eau avec un pH < 7 est considérée comme acide, tandis que l'eau avec un pH > 7 est considérée comme basique. L'EPA recommande que les systèmes de distribution d'eau au public maintiennent le pH de l'eau entre 6,5 et 8,5. « Les ions négatifs de chlorures sont corrosifs, aussi, lorsque de l'eau à forte teneur en chlorures est pompée à travers des canalisations contenant du plomb (ou des tuyaux en fonte ou en cuivre assemblés avec des soudures au plomb), le plomb se lixivie dans l'eau. »⁸⁰ Les réseaux de distribution d'eau requièrent des analyses constantes de la qualité de l'eau, car celle-ci peut changer avec la température, la dégradation des composants en métal et en ciment dans les matériaux des tuyaux, la rupture de canalisations, les produits de prévention de la corrosion et les additifs de désinfection.

Les fuites dans les infrastructures de distribution d'eau résultent en environ 8,3 millions de mètres cubes d'eau (2,2 billions de gallons) perdue par an. La plupart de ces pertes résultent de tuyaux percés ou corrodés.

8.6 Risque de corrosion et problèmes de qualité de l'eau

Lorsque des infrastructures souterraines de conduites d'eau dépassent leur durée de vie pratique prévue, les services publics de l'eau et de l'assainissement doivent évaluer les dangers connus dont le plomb dans les tuyaux en fonte, les ruptures de canalisations, les avis d'ébullition de l'eau, contamination de l'eau potable, de la corrosion, des erreurs de traitement de l'eau rouillée qui créent des risques pour la santé publique, la propriété privée, l'augmentation des coûts d'entretien, la perte d'eau, l'augmentation de la facture d'eau et politiquement difficile, la méfiance du public. Ces facteurs sont connus et s'accrocher aux pratiques commerciales traditionnelles continuera à poser des problèmes pour l'industrie de l'eau en produisant les mêmes résultats où la corrosion représente un risque important pour les matériaux des tuyaux et de la qualité de l'eau potable. Par ailleurs, le changement climatique et d'autres tendances continueront à affecter les matériaux des tuyaux sujets à la corrosion. Les conclusions et les preuves présentées dans la présente étude peuvent aider les responsables de services publics de l'eau et de l'assainissement à tenir des discussions plus informées, afin d'améliorer les attentes des clients et des agents des services publics en ce qui concerne leurs infrastructures durables et l'élaboration de politiques et de stratégies assurant la qualité de l'eau.

8.6.1 Corrosion des tuyaux en fonte grise avec des joints contenant du plomb : un problème pour la qualité de l'eau et la santé publique

Historiquement, aux États-Unis, divers types de tuyaux et de joints ont été utilisés par l'industrie de l'eau. « Les matériaux utilisés pour la fabrication de tuyaux de distribution d'eau et de leurs joints se sont améliorés. »⁸¹ Comme on le voit dans la figure 8.3, le plomb est le principal matériau pour les joints de la plupart des types de tuyaux en fonte grise et cela présente à l'heure actuelle un risque pour la qualité de l'eau potable. Le plomb était utilisé comme matériau de joint de tuyaux en fonte grise jusqu'aux années 1980. La corrosion dans les systèmes de tuyaux d'eau potable en métal continuera d'être un facteur de risque pour la santé publique. Selon un rapport de la Conférence des maires des États-Unis, les canalisations d'eau en fonte avec joints au plomb constituent l'une des sources possibles de la contamination par le plomb de l'approvisionnement en eau potable de la ville de Flint, au Michigan.⁸²

D'autres discussions sur la corrosion des tuyaux et la qualité de l'eau sont présentées dans l'Annexe.

8.7 Corrosion interne et perte d'énergie

8.7.1 Diamètre intérieur des tuyaux

La taille du diamètre intérieur des tuyaux est cruciale pour déterminer les caractéristiques hydrauliques des tuyaux sous pression et à écoulement par gravité. En ce qui concerne les tuyaux utilisés dans les analyses de la présente étude, leurs diamètres intérieurs ont été déterminés en fonction des normes de tuyaux en vigueur, des tolérances dimensionnelles permises par ces normes, des épaisseurs standards de revêtements intérieurs et de la documentation produite par les fabricants.

8.7.2 Facteur de friction des tuyaux

Les coefficients de frottement des tuyaux ont été obtenus à partir de recherches dans la littérature, suivie, d'une compilation des données en provenance de 55 sources. Par exemple, une analyse récente pour la ville de Detroit a montré que l'efficacité de pompage dans un réseau de canalisations en fonte ductile ne cesse de diminuer avec le temps et ne répond plus aux spécifications de fabrication.⁸³ L'autorité de l'eau Virginie-Occidentale (WVWA) sont arrivés à des conclusions similaires dans son analyse des conduites en fonte ductile.⁸⁴ En se basant sur la compilation et l'examen des données, les valeurs du coefficient d'écoulement de Hazen-Williams utilisées pour les canalisations sous pression et des coefficients de Manning-Strickler utilisées pour les canalisations à écoulement par gravité sont résumées dans le tableau 8.4. La recherche effectuée a révélé des documentations des taux de détérioration des facteurs de friction, notamment pour les coefficients d'écoulement de Hazen-Williams utilisés pour les canalisations sous pression. Ces taux de détérioration au fil du temps ont été incorporés dans le calcul de l'énergie hydraulique pour les divers types de matériaux de tuyaux.⁸⁵

FIGURE 8.3: ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES UTILISÉES POUR LES CONDUITES D'EAU AUX ÉTATS-UNIS AU 20^E SIÈCLE

Matériau des tuyaux	Type de joint	Protection intérieure contre la corrosion	Protection extérieure contre la corrosion	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Acier	Soudé	Aucune	Aucune	■	■	■	■	■	■						
Acier	Soudé	Ciment	Aucune					■	■	■	■	■	■	■	■
Fonte grise coulée en fosse	Plomb	Aucune	Aucune	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fonte grise centrifugée	Plomb	Aucune	Aucune			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fonte grise centrifugée	Plomb	Ciment	Aucune			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fonte grise centrifugée	Leadite	Aucune	Aucune			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fonte grise centrifugée	Leadite	Ciment	Aucune			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fonte grise centrifugée	Caoutchouc	Ciment	Aucune						■	■	■	■	■	■	■
Fonte ductile	Caoutchouc	Ciment	Aucune							■	■	■	■	■	■
Fonte ductile	Caoutchouc	Ciment	PE							■	■	■	■	■	■
Amiante-ciment	Caoutchouc	Aucune	Aucune				■	■	■	■	■	■	■	■	■
Béton armé	Caoutchouc	Aucune	Aucune	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Béton précontraint	Caoutchouc	Aucune	Aucune					■	■	■	■	■	■	■	■
PVC	Caoutchouc	Aucune	Aucune						■	■	■	■	■	■	■

■ Disponibilité des matériaux de tuyaux

■ Périodes de disponibilité et d'utilisation des matériaux

■ Périodes étendues de lixiviation potentielle des joints à base de plomb des tuyaux en fonte

Graphique adapté à partir de sources de l'EPA⁸⁶

TABLEAU 8.4 : COEFFICIENTS DE FROTTEMENT UTILISÉS POUR LES TUYAUX

Matériau des tuyaux	Normes	Hazen-Williams	Manning-Strickler
PVC	C900, C905, F794, D3034, F679	155 à 150	0,009
Fonte ductile	C151, C104, A746	≤ 140	0,013
PEHD	C906, F2706	155 à 150	0,012
PP	F2736	S.O.	0,012
PCCP/NRCP	C301, C14	≤ 140	0,013
VCP	C700	S.O.	0,013

Les concepteurs de stations de pompage, de conduites de transport de l'eau et de réseaux de distribution d'eau utilisent un coefficient de frottement, habituellement un coefficient « C » de Hazen-Williams, qui est représentatif de l'âge pondéré pour le système qu'ils conçoivent. Pour démontrer les impacts environnementaux causés par la rugosité de la surface des canalisations, des analyses d'échantillons ont été effectuées en appliquant des taux de dégradation acceptés du coefficient de Hazen-Williams pour différents matériaux de tuyaux. Les coefficients ont été modifiés pour tenir compte de la dégradation au fil du temps, à partir de leurs nouvelles valeurs, jusqu'à la valeur dégradée la plus basse. Le tableau 8.5 présente une comparaison des coefficients de Hazen-Williams pour les tuyaux nouvellement installés, après 50 ans et après 100 ans. Le tableau 8.5 indique également les pertes énergétiques à chacune de ces dates jalons, qui s'ajoutent au coût global et à l'impact environnemental du système. La figure 8.4 illustre graphiquement les effets d'une perte de charge par frottement plus élevée, au fil du temps, sur l'énergie de pompage. La figure 8.4 repose sur une durée vie de plus de 100 ans pour les tuyaux sous pression en PVC, de 75 ans pour ceux en béton précontraint (PCCP), de 50 ans pour ceux en PEHD tuyau, et de 50 ans pour les tuyaux à écoulement par gravité en fonte ductile.

Pendant la durée de vie complète des canalisations, la surface des tuyaux peut devenir rugueuse, augmentant les pertes énergétiques dues aux frottements que les pompes doivent surmonter pour transporter l'eau potable. La rugosité des tuyaux au fil du temps n'est pas la même pour tous les matériaux. Les tuyaux en PVC ne se corrodent pas et ne deviennent pas rugueux, conservant ainsi les propriétés hydrauliques du système d'eau proches des spécifications de conception d'origine de l'installation.

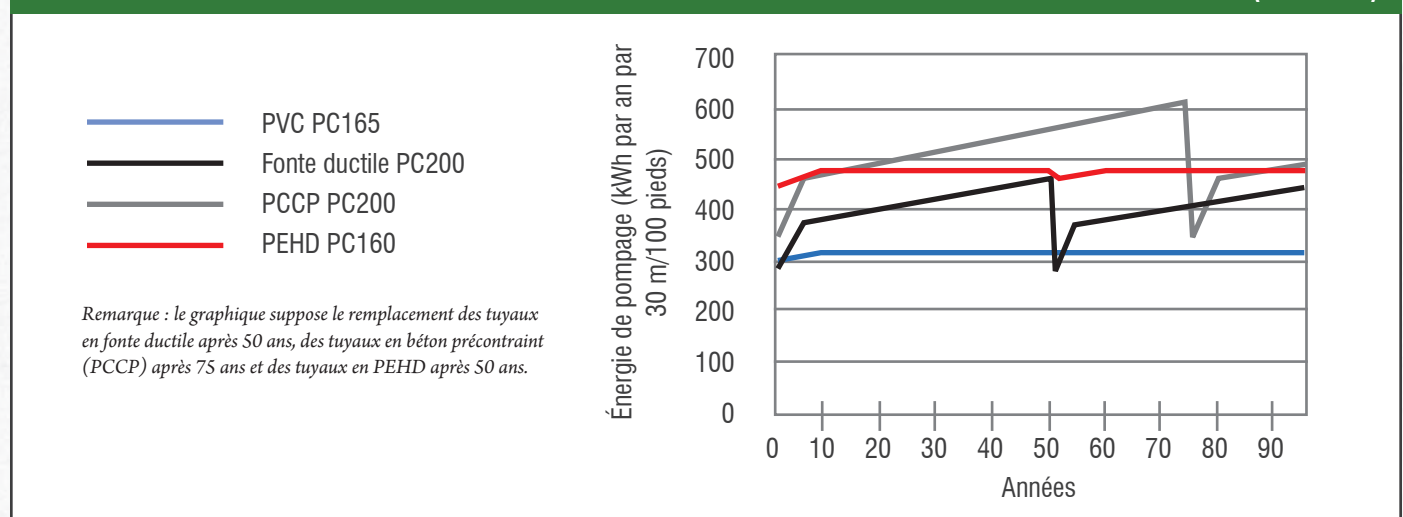
Comme les tuyaux en PVC ne se corrodent pas au fil du temps, le caractère lisse de la surface de leur paroi interne ne diminue pas. Les tuyaux en PVC ont une surface lisse qui minimise les pertes énergétiques

Effets de la corrosion sur l'efficacité de pompage et les coûts d'exploitation. Des études ont démontré que l'efficacité de pompage diminue continuellement avec le temps, à mesure que les tuyaux deviennent corrodés.

TABLEAU 8.5 : EFFETS DE LA DÉTERIORATION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT SUR LA PERTE DE CHARGE DE TUYAUX DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE DE 200 MM (8 PO) AVEC L'HYPOTHÈSE D'UN ÉCOULEMENT CONSTANT

Jalon du cycle de vie	Coefficients de Hazen-Williams			Pertes d'énergie par friction (kWh par an par 30 m/100 pieds)		
	PVC (DR25)	PEHD (DR13.5)	Fonte ductile revêtue de ciment (350 psi)	PVC (DR25)	PEHD (DR13.5)	Fonte ductile revêtue de ciment (350 psi)
Installation	155	155	140	125	185	140
50 ans	150	150	110	130	195	225
100 ans	150	150	95	130	195	280

FIGURE 8.4 : COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES ANNUELLES DE POMPAGE POUR DES TUYAUX DE 600 MM (24 POUCES)



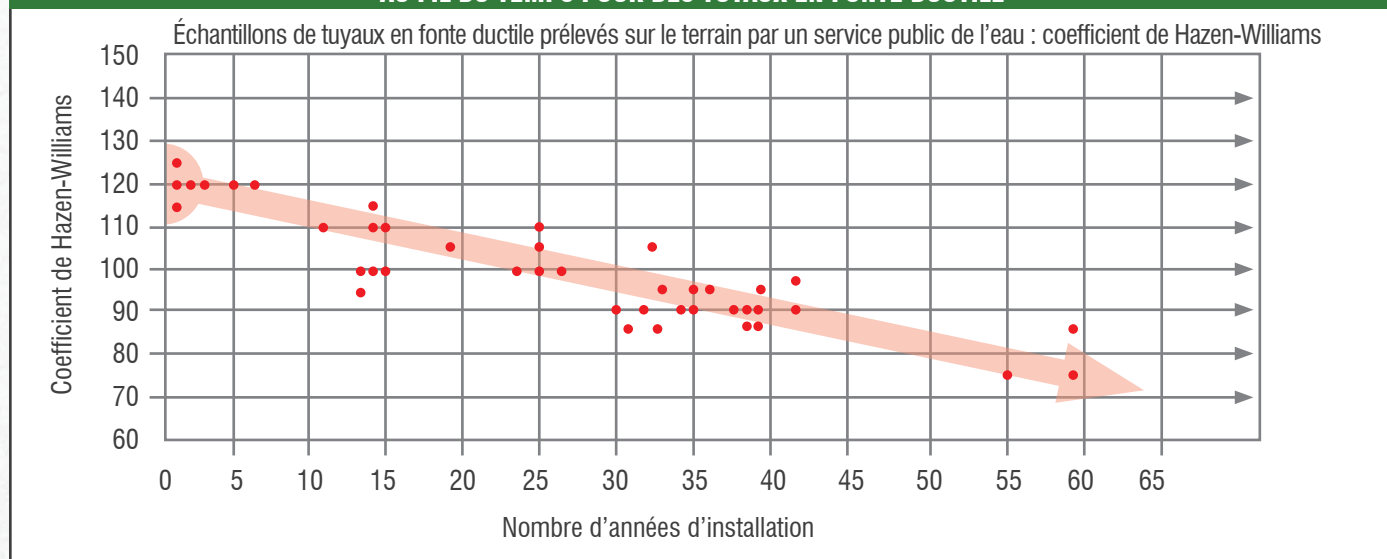
par friction tout au long de la durée de vie des tuyaux par rapport aux tuyaux en métal ou en béton. Le coefficient de Hazen-Williams (le facteur « C ») pour les tuyaux en PVC neufs est de 155 à 165 (plus la valeur est élevée, plus la canalisation est lisse).⁸⁷ Un coefficient de débit $C = 150$ est généralement utilisé comme une valeur conservatrice pour la conception de systèmes de canalisations en PVC.^{88 89 90} En revanche, selon l'association DIPRA (Ductile Iron Pipe Research Association), les tuyaux en fonte ductile revêtus de mortier de ciment neufs peuvent avoir un facteur C de 140. Cependant, en raison de la corrosion et de la détérioration des matériaux de revêtement intérieur, les parois internes des tuyaux en fonte ductile deviennent beaucoup plus rugueuses au fil du temps, et leur facteur C diminue.⁹¹ Pour éviter la corrosion et offrir une paroi de tuyau qui est homologuée pour le contact avec l'eau potable, un revêtement intérieur en mortier de ciment doit être appliqué aux tuyaux d'eau en fonte ductile. Les facteurs C des tuyaux en béton et des tuyaux en métal revêtus de mortier de ciment sont généralement entre 120 et 140 pour les tuyaux neufs et de 75 à 100 pour les tuyaux usagés et à mesure que les tuyaux se dégradent au fil du temps.⁹² Des échantillons prélevés sur le terrain par l'autorité de l'eau Virginie-Occidentale

Les tuyaux en PVC ne se corrodent pas et ne deviennent pas rugueux, conservant ainsi les propriétés hydrauliques du système d'eau proches des spécifications de conception d'origine de l'installation.

(WVWA) sur plus de 60 tuyaux en fonte ductile revêtue de mortier de ciment ont montré comment le facteur C diminue progressivement de 125 à 75 sur une période de 55 ans. La Commission sanitaire du grand Washington (WSSC), qui est le huitième plus grand service public de l'eau et de l'assainissement aux États-Unis, et qui fournit de l'eau potable à 1,8 million de personnes, a fourni des 27 échantillons de données prélevés sur le terrain qui montrent une tendance similaire. Voir la figure 8.5.⁹³ Le PEHD n'est pas non plus soumis à une corrosion interne et dispose d'une paroi interne lisse. Un facteur C de 150 est généralement utilisé pour les tuyaux sous pression en PEHD.



FIGURE 8.5: ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS SUR LE TERRAIN MONTRANT LA BAISSÉ DU FACTEUR « C » AU FIL DU TEMPS POUR DES TUYAUX EN FONTE DUCTILE



CARACTÉRISTIQUES ENVIRONNEMENTALES ET DE PERFORMANCE D'AUTRES MATÉRIAUX DE TUYAU

Bien que la capacité de comprendre les impacts environnementaux des produits de tuyaux en PVC est utile en soi, une certaine perspective peut aussi être acquise en examinant comment les résultats de l'étude d'ACV se comparent par rapport à ceux d'autres ACV et études de performance de tuyaux ayant été publiées.⁹⁴⁻⁹⁵ Toutes ces études ont été menées par des praticiens différents et mettent en œuvre des considérations méthodologiques potentiellement différentes. Les diverses ACV et études de performance accessibles au grand public ont été examinées pour évaluer la cohérence de leurs conclusions. Cette section présente les résultats de ces études publiées et accessibles au grand public. Ces études peuvent varier en termes de limites et d'hypothèses.

9.1 Tuyaux en fonte ductile

La fonte ductile est un matériau de tuyaux très utilisé dans les systèmes de réseaux de distribution d'eau partout aux États-Unis et au Canada. Cependant, selon un rapport de la National Taxpayers Union, la longévité des tuyaux en fonte ductile a chuté en raison de leurs parois très minces et de leur susceptibilité élevée à la corrosion, comparé aux anciens tuyaux en fonte.⁹⁶ Les tuyaux en fonte ductile sont de nos jours rarement utilisés au Canada et présentent une tendance à la baisse bien connue aux États-Unis.

9.1.1 Durée de vie des tuyaux en fonte ductile

Au fil du temps, les tuyaux en fonte ductile ont été fabriqués avec des parois de plus en plus minces, faisant de la corrosion un risque important et omniprésent.⁹⁷ Des études ont démontré que la défaillance des revêtements intérieurs en mortier de ciment (lixiviation chimique et structurelle) se produit après 10 à 30 ans. Ces défaillances ont un impact sur la durée de vie prévue.⁹⁸⁻⁹⁹ L'augmentation de l'utilisation de matériaux recyclés peut accélérer la corrosion, en raison de la qualité potentiellement inférieure de la ferraille recyclée. Tous les facteurs qui conduisent à une détérioration des tuyaux en fonte ductile sont susceptibles de réduire sa durée de vie à moins de 50 ans.¹⁰⁰

Initialement, la fonte ductile était vantée comme ayant une résistance à la corrosion surpassant celle de la fonte grise normale. Cette idée a fini par s'imposer sur le marché et a permis aux tuyaux en fonte ductile à paroi mince de remplacer les tuyaux en fonte grise normale à paroi plus épaisse. Toutefois, la recherche a fourni des preuves que la corrosion était comparable parmi les différents types de tuyaux à base de fer :

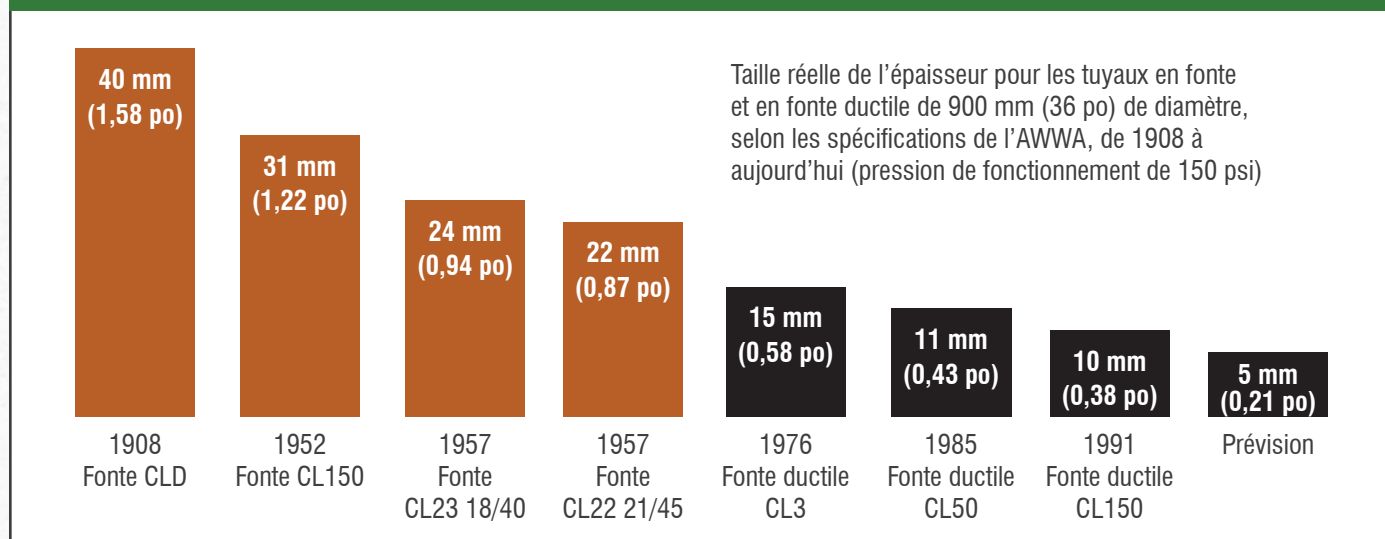
- ▶ Des travaux de recherche effectués par le National Bureau of Standards (maintenant le National Institute of Standards and Technology) ont indiqué il y a plusieurs dizaines d'années que la fonte ductile, la fonte grise et l'acier se corrodent à des vitesses similaires dans les sols à faible résistivité.¹⁰¹
- ▶ Le National Bureau of Standards a conclu dans un article daté de 1976 que la fonte ductile et l'acier « enterrés dans les mêmes sols ... se corrodent à peu près à la même vitesse. »¹⁰²
- ▶ La Ductile Iron Pipe Research Association (DIPRA) reconnaît que, pour des raisons pratiques, il est raisonnable de faire l'hypothèse que la fonte ductile et la fonte grise se corrodent à la même vitesse.¹⁰³ Cependant, la DIPRA n'a pas ajusté les attentes du marché basées sur une réduction de 76 % de l'épaisseur de la paroi des tuyaux.

La paroi plus mince des tuyaux en fonte ductile est le principal facteur contribuant à sa durée de vie plus courte, par rapport à la fonte grise, et à l'augmentation des ruptures dans les canalisations, liée à la corrosion.¹⁰⁴ Historiquement, les tuyaux en fonte plus épais offraient à la corrosion plus de métal à ronger (c.-à-d., alloué à la corrosion). Comme le montre la figure 9.1, la différence d'épaisseur entre les parois au fil du temps peut atteindre jusqu'à 76 % pour une même catégorie de diamètre et de pression.¹⁰⁵ Si l'épaisseur de la paroi de tuyaux en fonte ductile est seulement un cinquième de l'épaisseur de la paroi de tuyaux en fonte grise et que la vitesse de corrosion est la même, alors la durée de vie prévue des tuyaux en fonte ductile sera beaucoup moins élevée que celle des tuyaux en fonte grise, dans des environnements similaires. Les parois des tuyaux en fonte ont été réduites de 4,0 cm (1,58 pouce) en 1908 à 1,0 cm (0,38 pouce) en 1991. Il a été récemment proposé des réduire l'épaisseur des parois à 0,5 cm (0,21 pouce). La différence d'épaisseur des parois est une considération à prendre en compte lors des évaluations de la corrosion et de la sélection des méthodes de contrôle. Certains services publics de l'eau et de l'assainissement requièrent une catégorie de tuyaux en fonte ductile de plus grosse épaisseur (ce qui augmente l'énergie intrinsèque et les coûts en capital) dans le but d'augmenter la résistance à la corrosion. Le raisonnement simple est que, dans les mêmes conditions de sol et d'humidité, les tuyaux en métal à parois fines, se corrodent et deviennent défectueux plus rapidement que leurs prédécesseurs en fonte grise à parois épaisses.¹⁰⁶ Les tuyaux en fonte à parois épaisses ont pris plus de temps à se corroder par leurs parois que les tuyaux en fonte ductile modernes, à parois fines.¹⁰⁷ Toutefois, pendant la vaste majorité de leur période d'utilisation, ces anciens tuyaux étaient moins performants du point de vue hydraulique. Ils étaient également à l'origine de problèmes de qualité de l'eau et nécessitaient un entretien coûteux.

« La corrosion est la principale cause de défaillance des tuyaux en fonte ductile, suivie par les ruptures transversales puis les défaillances de joints. »¹⁰⁸ Comme indiqué précédemment, 75 % des services publics de l'eau aux États-Unis opèrent dans un sol corrosif. La vitesse de corrosion à travers l'épaisseur de la paroi des tuyaux entraîne une durée de vie qui ne dépasse pas 50 ans pour les tuyaux en fonte ductile.^{109 110} Les sols argileux ont tendance à produire des vitesses de corrosion beaucoup plus élevées que les autres types de sol.¹¹¹ Avec une épaisseur de paroi standard aussi faible que 6 mm (0,25 pouce), une vitesse de corrosion modérée peut générer des piqûres qui traversent la paroi des tuyaux en fonte ductile en moins de dix ans. L'utilisation incorrecte ou excessive de systèmes de protection cathodique peut corroder les tuyaux en fonte ductile. L'utilisation d'un revêtement extérieur en polyéthylène comme méthode viable de protection contre la corrosion est encore un sujet de controverse parmi les spécialistes de la corrosion. Les affirmations par les fabricants de canalisations, les fournisseurs de revêtements de protection et les entreprises de protection cathodique sont souvent partiales de par leurs intérêts dans la vente de leurs produits.¹¹² De nombreux ingénieurs en corrosion considèrent le polywrap un moyen inefficace de protection contre la corrosion sur des tuyaux en fonte ductile.¹¹³ Même avec un revêtement extérieur en polyéthylène (ce qui n'est pas une méthode de protection contre la corrosion approuvée par la National Association

of Corrosion Engineers)^{et 114} et l'utilisation de tuyaux de catégorie de paroi plus épaisse, afin d'offrir plus de matériaux de paroi à sacrifier pour les piqûres de corrosion, les tuyaux en fonte ductile peuvent avoir une durée de vie qui ne dépasse pas 50 ans en raison de sols corrosifs. D'autres facteurs affectant la durée de vie des tuyaux en fonte ductile sont la détérioration du revêtement intérieur en mortier de ciment et la corrosion interne. Ces facteurs réduisent la capacité des tuyaux à répondre aux demandes des clients. Par ailleurs, seuls les tuyaux en fonte ductile avec revêtement intérieur en mortier de ciment sont certifiés à la norme NSF/ANSI 61, « Composants du système d'eau potable – Effets sur la santé ». L'intérieur de la paroi du tuyau en fonte ductile n'est pas certifié conforme à la norme NSF/ANSI 61. Lorsque le revêtement intérieur en mortier de ciment se dégrade au cours de l'utilisation ou se casse lors du taraudage de trous, de l'installation, du transport ou d'une mauvaise manipulation, l'eau potable peut entrer en contact avec des matériaux à base de fer, ce qui constitue un risque potentiel pour la santé publique. De plus, la partie en forme de cloche des tuyaux en fonte ductile présente un risque pour la santé publique puisque l'eau potable est exposée à une surface non certifiée au moment où elle passe à travers cette partie de la canalisation. Le coût en capital d'installation de nouveaux tuyaux en PVC peut être près de 23 % moins élevé que le nettoyage et l'application d'un nouveau revêtement intérieur sur des tuyaux en fonte ductile.¹¹⁵

FIGURE 9.1 : DIMINUTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA PAROI DES TUYAUX EN FONTE AU FIL DU TEMPS



9.1.2 ACV et énergie intrinsèque de la fonte ductile

Selon la Ductile Iron Pipe Research Association (DIPRA), l'industrie des tuyaux en fonte ductile a effectué une ACV.¹¹⁶ Malheureusement, les résultats de l'ACV n'ont pas été communiqués au public et n'ont pas pu être utilisés dans ce rapport. Toutefois, d'autres études ayant analysé l'énergie intrinsèque des tuyaux en fonte ductile ont été publiées. Lorsque l'on compare l'énergie de matériaux de tuyaux, tels que la fonte ductile, il est très important de tenir compte du poids par unité de longueur des produits de tuyau. Comme le PVC pèse moins lourd que la fonte ductile, pour une longueur de canalisation équivalente, son énergie intrinsèque réelle est inférieure. De même, la quantité de dioxyde de carbone émise

lors de la production de tuyaux en PVC est bien inférieure à celle émise lors de la production de tuyaux en fonte ductile.

Les sources utilisées pour la présente étude font l'hypothèse que le poids d'un revêtement intérieur en ciment de mortier augmente proportionnellement au diamètre du tuyau en fonte ductile, de sorte que l'énergie intrinsèque par kilogramme de tuyau en fonte ductile avec revêtement intérieur en mortier de ciment peut être considérée comme une valeur constante.

Pour les tuyaux en fonte ductile, le risque de corrosion de l'intérieur et de l'extérieur des parois des tuyaux peut nécessiter l'ajout d'autres matériaux, tels qu'un revêtement intérieur en ciment de mortier et un revêtement extérieur en polyéthylène avec ou sans biocide antimicrobien et inhibiteur de corrosion, enduit d'asphalte ou autres matériaux à

l'extérieur. Ces matériaux supplémentaires augmentent la consommation de ressources, l'énergie intrinsèque et l'empreinte carbone du produit. Lors de l'évaluation de la durabilité de la conception du cycle de vie de produits de canalisation, il est important de comprendre et d'évaluer les impacts sur le cycle de vie de tous les matériaux utilisés dans le réseau de canalisations. L'Association européenne des tubes et raccords plastiques (TEPPFA) a commandé une ACV comparant les tuyaux en fonte ductile et en PVC.¹¹⁷ Une étude d'ACV similaire a été menée par le Laboratoire de modélisation de l'environnement à l'Université Polytechnique de Catalogne en 2005.¹¹⁸ Bien que ces études n'incluent pas une évaluation de tous les composants des systèmes de canalisations en fonte ductile, elles ont, tout comme cette étude, montré que les tuyaux en PVC ont une énergie intrinsèque et d'autres impacts environnementaux bien plus faibles que ceux de la fonte ductile.

Comprendre l'énergie de pompage sur la durée totale du cycle de vie des tuyaux est très important, car elle a un impact sur les coûts d'exploitation et sur l'empreinte carbone des municipalités pour de nombreuses décennies à venir.

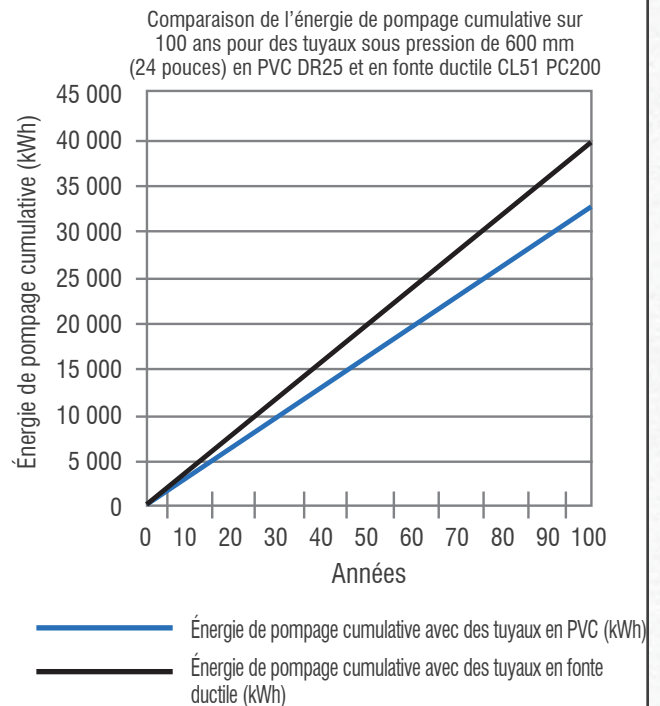
La norme AWWA pour les tuyaux en fonte ductile, la norme AWWA C151, ne requiert pas une homologation par NSF International pour l'utilisation pour le transport d'eau potable. Par conséquent, pour pouvoir être utilisés pour le transport et la distribution d'eau potable, les tuyaux en fonte ductile doivent être revêtus intérieurement d'un matériau homologué par NSF International, comme le mortier de ciment ou la résine époxy. Ce revêtement intérieur réduit le diamètre intérieur et modifie le coefficient de frottement. Des études ont démontré que le coefficient de frottement de revêtements intérieurs en mortier de ciment diminue au fil du temps. Cette résistance de frottement supplémentaire augmente l'effort de pompage nécessaire pour fournir un débit d'eau constant et diminue la quantité d'eau qui peut être livrée dans un système de distribution d'eau au fil du temps.

Lors de l'évaluation de la durabilité de la conception du cycle de vie de produits de canalisation, il est important de comprendre et d'évaluer les impacts sur le cycle de vie de tous les matériaux utilisés dans le réseau de canalisations.

9.1.3 Performances des tuyaux en fonte ductile pendant la phase d'exploitation

Les tuyaux sous pression en fonte ductile commencent leur vie avec un diamètre intérieur légèrement supérieur à ceux des tuyaux en PVC. Cependant, après environ trois ans d'utilisation, les tuyaux en fonte ductile nécessitent une plus grande quantité d'énergie de pompage que des tuyaux en PVC de même dimension nominale et même débit. Les coûts énergétiques de pompage dans les tuyaux sous pression augmentent tout au long de sa durée de vie utile en raison de la corrosion interne qui augmente continuellement résistance frictionnelle, tandis que celle des tuyaux en PVC demeure constante. La figure 9.2 illustre la différence entre l'énergie de pompage cumulative sur 100 ans pour des tuyaux sous pression de 600 mm (24 pouces) en PVC et en fonte ductile, avec le même débit de pompage. Sur la figure 9.2, l'énergie de pompage pour les tuyaux en fonte ductile fait l'hypothèse de leur remplacement après 50 ans, accompagné d'une réinitialisation de leur coefficient de frottement (C). Si les tuyaux en fonte ductile sont utilisés au-delà de leur durée de vie de 50 ans, l'augmentation de la résistance de frottement provoque une augmentation des coûts de pompage, ainsi que des dépenses d'exploitation et d'entretien. Comme expliqué dans l'Annexe, l'énergie de pompage cumulative pour les tuyaux en fonte ductile, sans remplacement après 50 ans, serait beaucoup plus grande qu'illustré sur la figure 9.2 sur une période de 100 ans, car la paroi interne de la canalisation se dégrade de plus en plus avec le temps.

FIGURE 9.2 : COMPARAISON DES ÉNERGIES DE POMPAGE CUMULATIVES SUR 100 ANS DE TUYAUX DE 600 MM (24 POUÇES) EN PVC ET EN FONTE DUCTILE



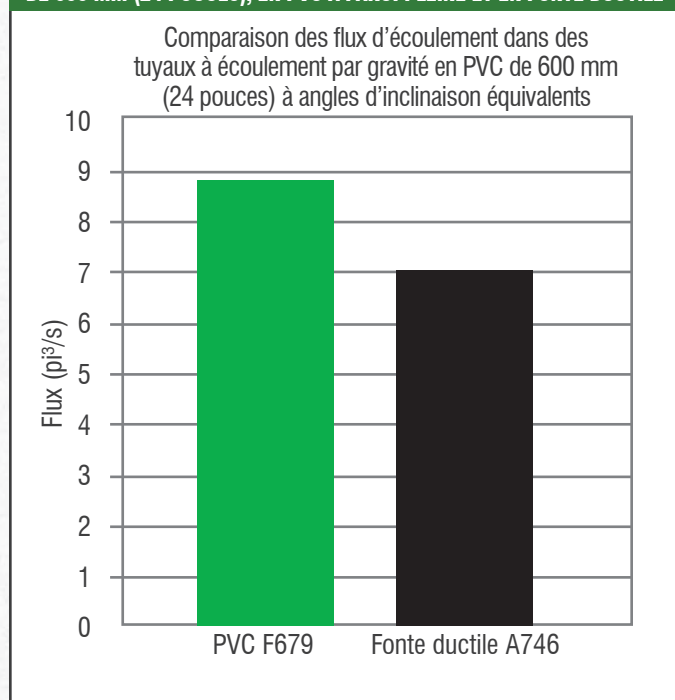
Remarque : le graphique suppose le remplacement des tuyaux en fonte ductile après 50 ans.

Les tuyaux en fonte ductile à écoulement par gravité sont sujets à la corrosion, interne et externe, qui détériore le tuyau jusqu'au point de fuite (infiltration/exfiltration) en formant des trous dans les parois. Le revêtement intérieur en mortier de ciment et le substrat en fonte ductile sont sensibles à la corrosion lorsqu'ils sont exposés à un environnement d'égout sanitaire. En outre, les tuyaux à écoulement par gravité en fonte ductile standard, ASTM A746, n'exigent pas que les joints soient testés pour des conditions de forte pression externe ou de vide interne (pression d'infiltration). L'infiltration peut entraîner une hausse des coûts pour l'usine de traitement.

De même, les tuyaux sous pression en fonte ductile standards, AWWA C151, n'exigent pas que les joints soient testés pour dans des conditions de forte pression externe ou de vide interne. Cela pose un problème important pour la qualité de l'eau, étant donné que les canalisations qui fuient présentent un risque de laisser des contaminants pénétrer dans le réseau d'alimentation en eau. En effet, en cas de chute de pression dynamique (à la suite de la défaillance d'une pompe ou d'une vanne, d'un incendie ou d'autres changements soudains de la demande sur le système) de l'eau souterraine contaminée peut pénétrer dans le tuyau.¹¹⁹ Dans le cas des tuyaux à écoulement par gravité, la détérioration des parois intérieures des tuyaux en fonte ductile provoque une plus grande résistance à l'écoulement et une augmentation du coefficient de Manning-Strickler. La friction hydraulique plus élevée à l'intérieur des tuyaux en fonte ductile signifie qu'un tuyau à écoulement par gravité en fonte ductile placé à un même angle d'inclinaison qu'un tuyau en PVC a une capacité hydraulique moindre. La figure 9.3 compare les flux d'écoulement dans des tuyaux en PVC et en fonte ductile de 600 mm (24 pouces), avec des pentes d'inclinaison identique.

Comme le montre la figure 9.3, le flux d'écoulement dans les tuyaux en PVC de 600 mm (24 pouces) est supérieur d'environ 20 % à celui des tuyaux en fonte ductile de 600 mm (24 pouces) équivalents, tous les tuyaux étant placés avec des pentes d'inclinaison identique.

FIGURE 9.3 : COMPARAISON DES FLUX D'ÉCOULEMENT DANS DES TUYAUX DE 600 MM (24 POUCES), EN PVC À PAROI PLEINE ET EN FONTE DUCTILE



9.2 Tuyaux en béton

Tandis que le ciment est souvent considéré comme ayant une faible énergie intrinsèque par unité de poids, l'industrie du ciment est l'un des plus grands émetteurs de gaz à effet de serre au monde. Elle est en effet classée troisième plus grande émettrice. L'industrie du ciment émet plus de 5 % de l'ensemble des émissions de dioxyde de carbone, à cause de la consommation de charbon dans les fours à chaux.¹²⁰

Au Royaume-Uni, l'Association des fabricants de tuyaux en béton, soutenue par l'Association britannique du ciment, a publié une étude d'ACV sur les tuyaux en béton. Les données primaires utilisées dans cette étude datent de 1999 et 2000, ce qui ne répond pas aux recommandations de qualité des données temporelles formulées par la norme ISO 14044. Les différences de méthodologies et d'hypothèses dans les études d'ACV empêchent d'effectuer des comparaisons précises.

Les tuyaux en béton non armé (NRCP) ont une énergie intrinsèque estimée d'environ 1,34 MJ/kg,¹²¹ tandis que les tuyaux en béton précontraint ont une énergie intrinsèque de 3,74 MJ/kg.¹²² Ce rapport présente une estimation de l'énergie intrinsèque d'un système de canalisations en béton comparable, basée sur l'énergie intrinsèque susmentionnée et sur le poids des tuyaux obtenu à partir des normes produits et de la documentation produite par les fabricants.

Une revue complète de la littérature sur les études d'ACV liées au PVC, pour diverses applications (y compris les tuyaux), a été commandée par la Commission européenne en 2004. Des dizaines d'études d'ACV ont ainsi été examinées et résumées. Plusieurs de ces études ont confirmé que les tuyaux d'égout en plastique, y compris ceux en PVC, provoquent moins d'impacts au cours du cycle de vie dans toutes les catégories, notamment le réchauffement climatique, les déchets municipaux, l'acidification, le smog d'été et l'enrichissement en éléments nutritifs, que les tuyaux en béton similaires.¹²³

9.2.1 Durée de vie des tuyaux en béton non armé (NRCP)

Une hypothèse de durée de vie des tuyaux à écoulement par gravité en béton non armé de 50 ans a été utilisée, en raison de la corrosion du matériau des tuyaux dans les applications d'égouts sanitaires. Le béton non armé (NRCP) est plus enclin à s'effondrer parce qu'il est dépourvu d'acier de renforcement structurel pour supporter partiellement les tuyaux lorsque leur partie supérieure se dissout en raison de la condensation du sulfure d'hydrogène gazeux. Lorsqu'ils sont revêtus intérieurement d'un matériau non structurel, les tuyaux en béton sont difficiles à réparer ou à remettre en état, car la perte partielle par corrosion de la paroi des tuyaux réduit la résistance structurelle de l'épaisseur de paroi restante.

9.2.2 Durée de vie des tuyaux cylindriques en béton précontraint (PCCP)

Une hypothèse de durée de vie des tuyaux en béton précontraint (PCCP) de 75 ans a été utilisée, en raison des défaillances documentées des câbles de précontrainte et de la dégradation du revêtement intérieur en mortier de ciment au fil du temps.¹²⁴ Les chlorures et les sulfates peuvent réagir avec les matériaux à base de ciment et finir par éroder les tuyaux en béton.

La norme AWWA pour des conduites sous pression en béton précontraint, la norme AWWA C301, ne requiert pas une homologation à la norme NSF/ANSI 61 pour l'utilisation pour le transport d'eau potable. D'une part la norme AWWA permettant l'utilisation de cendres volantes, de fumées de silice et d'autres adjuvants pour béton, et d'autre part la tendance des tuyaux en béton à se fendre, les revêtements intérieurs et le noyau intérieur des tuyaux en béton peut lixivier des matériaux dangereux tels que l'arsenic, le béryllium, le chrome, le plomb, le manganèse, le mercure et le sélénium dans l'eau potable. Des études ont démontré que le coefficient de frottement du béton diminue au fil du temps. Cette résistance de frottement accrue augmente l'effort de pompage nécessaire pour fournir un débit d'eau constant et diminue la quantité d'eau qui peut être livrée dans un système de distribution d'eau au fil du temps.

9.2.3 Performances des tuyaux en béton non armé (NRCP) pendant la phase d'exploitation

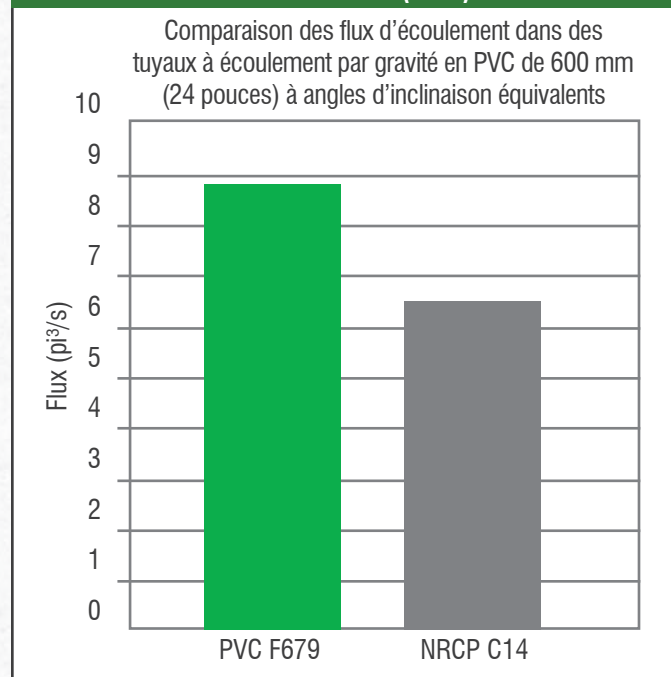
Dans les applications d'égouts à écoulement par gravité, l'énergie des tuyaux en béton pendant la phase d'exploitation est fortement affectée par la corrosion et la détérioration des parois.

Les tuyaux en béton à écoulement par gravité sont sujets à la corrosion interne, qui détériore le tuyau jusqu'au point de fuite (infiltration) en formant des trous dans les parois, ce qui, à terme mène à une défaillance structurelle des tuyaux. Les parois intérieures des tuyaux en béton sont sensibles à la corrosion lorsqu'elles sont exposées à l'atmosphère d'égouts sanitaires. Les manuels de conception indiquent que cette corrosion peut atteindre jusqu'à 2,5 cm d'épaisseur par an dans des environnements à haute teneur en sulfures. C'est pour cette raison que les spécifications de nombreuses villes qui permettent l'utilisation de tuyaux en béton pour les égouts requièrent que la conception inclue du béton supplémentaire ou des matériaux de revêtement sacrificiels comme le PVC.

Les normes ASTM-C14 et ASTM C76 pour tuyaux en béton à écoulement par gravité n'exigent pas que les joints soient testés contre la pression d'infiltration. Les normes pour tuyaux d'égout en PVC exigent que les joints soient testés dans des conditions de vide interne, afin de s'assurer qu'ils ne fuiront pas en cas de pression hydrostatique externe (infiltration). La détérioration de l'intérieur des parois des tuyaux en béton peut entraîner une résistance accrue à l'écoulement et une augmentation du coefficient de Manning-Strickler. La friction hydraulique plus élevée au niveau des parois, à l'intérieur des tuyaux en béton, signifie qu'un tuyau à écoulement par gravité en béton placé à un même angle d'inclinaison qu'un tuyau en PVC a une capacité hydraulique moindre. La figure 9.4 compare les

flux d'écoulement dans des tuyaux en PVC et en béton de 600 mm (24 pouces) placés à un même angle d'inclinaison. Comme le montre la figure 9.4, le flux d'écoulement est moindre pour un tuyau en béton de 600 mm (24 pouces) que pour un tuyau d'égout en PVC de 600 mm (24 pouces), à angles d'inclinaison équivalents.

FIGURE 9.4 : COMPARAISON DES FLUX D'ÉCOULEMENT DANS DES TUYAUX DE 600 MM (24 POUÇES), EN PVC À PAROI PLEINE ET EN BÉTON NON ARMÉ (NRCP)

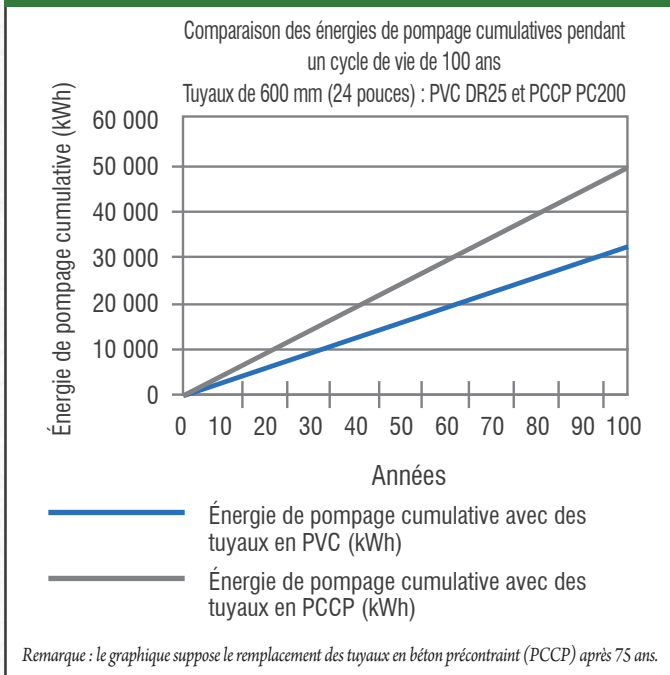


9.2.4 Performances des tuyaux cylindriques en béton précontraint (PCCP)

L'énergie des tuyaux en béton pendant la phase d'exploitation est fortement affectée par la détérioration du coefficient de frottement des parois intérieures des tuyaux de canalisations sous pression.

Modélisés dans le cadre de la présente étude, les tuyaux sous pression en béton ont commencé avec un diamètre intérieur légèrement plus grand et un coefficient de frottement interne plus élevé que les tuyaux en PVC. Parce que la friction intérieure continue d'augmenter au cours de la durée d'exploitation des canalisations, les canalisations sous pression en béton auront besoin d'une plus grande énergie de pompage que celles en PVC au cours de la durée de vie prévue, en assumant le même diamètre nominal et le même débit de pompage. La figure 9.5 illustre la différence entre l'énergie de pompage cumulative sur 100 ans pour des tuyaux sous pression de 600 mm (24 pouces) en PVC DR25 et en PCCP PC200, avec le même débit de pompage. Sur la figure 9.5, l'énergie de pompage pour les tuyaux en béton précontraint (PCCP) fait l'hypothèse de leur remplacement après 75 ans, accompagné d'une réinitialisation de leur coefficient de frottement. Comme expliqué dans l'Annexe, l'énergie de pompage cumulative pour les tuyaux en béton précontraint (PCCP), sans remplacement après 50 ans, serait beaucoup plus grande qu'illustré sur la figure 9.5 sur une période de 100 ans, car la paroi interne de la canalisation se dégrade de plus en plus avec le temps, ce qui augmente les coûts de pompage.

FIGURE 9.5 : COMPARAISON DES ÉNERGIES DE POMPAGE CUMULATIVES SUR 100 ANS DE TUYAUX DE 600 MM (24 POUCES) EN PVC ET EN PCCP



9.3 Tuyaux en polyéthylène et en polypropylène

9.3.1 Durée de vie des tuyaux en polyéthylène (PEHD)

Le PEHD est utilisé pour les conduites d'eau, d'égouts sanitaires et d'eaux pluviales. Une hypothèse de durée de vie des tuyaux sous pression en PEHD de 50 ans a été utilisée, en raison du risque de fluage et d'oxydation par le chlore et d'autres produits chimiques qui limitent leur longévité.¹²⁵ La durée de vie prévue des tuyaux en PEHD 4710 à paroi plus mince est de seulement environ la moitié de celle des tuyaux en PEHD 3608 à parois plus épaisses, selon les résultats de tests indépendants.¹²⁶ Le PEHD 3408 a été décrit dans la norme C906-07 comme ayant un coefficient de sécurité de 2,0. Le PEHD 3408 n'est pas mentionné dans la norme C906-15. Il a été remplacé ou renommé avec d'autres composés dans la nouvelle norme. Le PEHD 4710 a un coefficient de sécurité de seulement 1,6 (équivalent à un facteur de conception de 0,63).

Le guide *Manual of Water Supply Practices MSS, PE Pipe – Design and Installation* de l'AWWA fait une référence à une durée de vie de 50 ans, mais aucune référence ou recommandation pour une durée de vie plus longue.¹²⁷ La difficulté à déterminer la longévité des tuyaux en PEHD est attribuable aux effets des désinfectants, de la pression et de la température sur les tuyaux. D'autres facteurs, tels que des défauts de fabrication et des dommages durant l'installation peuvent accélérer les

défaillances. Les affirmations que la nouvelle résine composée PE4710 résiste mieux à la dégradation par les désinfectants pourraient être plus que compensées par la réduction d'épaisseur des parois des tuyaux, l'augmentation de la contrainte sur les parois associée à la conception, et la réduction du coefficient de sécurité. La durée de vie des tuyaux en PEHD 4710 n'est pas actuellement prouvée et manque d'études d'excavation et d'échantillons prélevés sur le terrain. En se fondant sur la recherche et à des fins de comparaison dans la présente étude, une durée de vie de 50 ans a été utilisée.^{128 129 130} Cette valeur est peut-être surestimée, étant donné le manque de documentation concernant les performances et la durée de vie des nouveaux tuyaux en PEHD 4710 et leur coefficient de sécurité plus petit.

La durée de vie d'un tuyau peut être affectée par la corrosion, l'installation, les contraintes, les tensions et d'autres facteurs. Bien que la dégradation due à la corrosion soit courante avec les tuyaux en métal, les tuyaux en plastique ne sont pas sensibles à la corrosion électrochimique. Une préoccupation a été exprimée à propos de l'oxydation résultant d'une exposition constante à un désinfectant chloré. Cependant, des études et des tests ont conclu que les tuyaux en PVC ne sont pas sujets à l'oxydation après exposition au chlore ou au dioxyde de chlore (ClO_2).¹³¹ D'autres matériaux plastiques, tels que le PEHD, sont vulnérables à ce type d'oxydation, ce qui affecte la durabilité de ces produits.^{132 133 134} Les tuyaux en PEHD, en polypropylène et en fibre de verre sont sensibles au fluage. Le fluage peut être un facteur important dans la durée de vie de ces produits, lorsqu'ils sont utilisés dans des applications basées sur un écoulement par gravité. Ces facteurs, ainsi que d'autres, influent sur les décisions de conception quant à l'estimation de la durée de vie d'un matériau de tuyau dans son environnement d'exploitation, tout en répondant à l'ensemble des niveaux de service durable.

La recherche indique que le dioxyde de chlore est le désinfectant le plus agressif, suivi par le chlore et les chloramines. En présence de désinfectants à base de chlore, de dioxyde de chlore ou de chloramines, les canalisations en PEHD peuvent être soumises à l'oxydation sur la surface de leur paroi intérieure. Sous l'effet de la pression, la pénétration due à la diffusion d'oxydants et les attaques par des radicaux libres entraînent des fissures supplémentaires dans la structure des parois des tuyaux.^{135 136}

Une étude analysant la performance structurelle de 22 canalisations à écoulement libre en PEHD au Texas, a montré que 100 % des canalisations testées souffraient d'au moins un mode de défaillance, y compris des fissures/fractures, des déformations excessives, un déplacement des joints, des courbures inverses et un flambage. Cette étude est importante parce que les tuyaux avaient été installés sous la supervision du ministère des transports de l'État et selon les procédures standard pour les tuyaux en PEHD. Un autre point à prendre en compte en ce qui concerne les tuyaux à écoulement par gravité en PEHD à parois nervurées, est la croissance d'ondulations, qui peut être importante, et qui nécessiterait l'utilisation d'un coefficient de Manning-Strickler plus élevé pour tenir compte de l'augmentation de la rugosité des tuyaux au fil du temps.¹³⁷

9.3.2 Énergie intrinsèque des tuyaux en polyéthylène (PEHD)

L'équipe de recherche en énergie durable de l'Université de Bath a établi un inventaire de l'empreinte carbone et de l'énergie de divers matériaux, y compris les tuyaux en PEHD, et a publié ses résultats en 2011.¹³⁸ L'énergie intrinsèque de tuyaux en PEHD est de 84,4 MJ/kg, avec une empreinte carbone intrinsèque de 2,54 kg de CO₂/kg. Le PEHD une énergie intrinsèque beaucoup plus élevée que celle du PVC équivalent lorsque l'on prend en compte l'épaisseur des parois et le poids par unité de longueur.

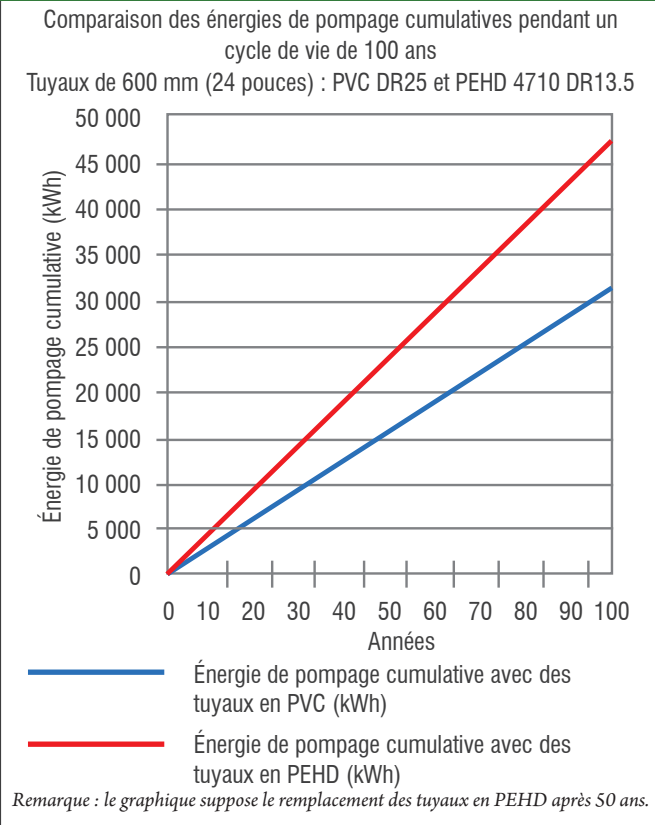
9.3.3 Performances des tuyaux en polyéthylène (PEHD) pendant la phase d'exploitation

La contrainte transversale des tuyaux en polyéthylène pour établir la base de la conception hydrostatique est égale à seulement 40 % de celle des tuyaux en PVC. En raison de leur faible résistance à la traction, les tuyaux sous pression en PEHD doivent avoir des parois plus épaisses pour produire des canalisations avec une catégorie de pression comparables à celle des canalisations en PVC. Les parois plus épaisses des tuyaux en PEHD impliquent un diamètre intérieur plus petit et une section de flux de transport plus petite. Les tuyaux sous pression en PEHD et en PVC ont des coefficients de frottement internes similaires. L'énergie intrinsèque lors de la phase d'exploitation du cycle de vie des tuyaux en PEHD est beaucoup plus élevée que celle des tuyaux en PVC, en raison de la section de flux de transport beaucoup plus petite dans le cas des tuyaux en polyéthylène. À titre de comparaison, un tuyau en PVC DR18 de 200 mm (8 pouces) a une section de flux de transport 33,2 % plus grande que celle d'un tuyau en PEHD comparable, tandis qu'un tuyau en PVC DR25 de 600 mm (24 pouces) a une section de flux de transport 17,9 % plus grande que celle d'un tuyau en PEHD comparable. La figure 9.6 illustre clairement que sur un cycle de vie de 100 ans, l'énergie de pompage nécessaire pour des tuyaux en PEHD 4710 DR13.5 de 600 mm (24 pouces) est beaucoup plus importante que l'énergie de pompage nécessaire pour des tuyaux en PVC DR25 de 600 mm (24 pouces).

9.3.4 Durée de vie des tuyaux en polypropylène (PP)

Les tuyaux en polypropylène pour les applications à écoulement par gravité ont une durée de vie opérationnelle de 50 ans en raison du risque de fluage et de la réduction à long terme de son module d'élasticité. Les tuyaux en PP sont utilisés pour les applications d'eaux pluviales et d'égouts sanitaires. Selon une étude de Franklin Associates, le polypropylène a une énergie intrinsèque estimée à 81 MJ/kg.¹³⁹ Les données de Franklin Associates confirment les hypothèses utilisées dans la présente étude en ce qui a trait au PP.

FIGURE 9.6 : COMPARAISON DES ÉNERGIES DE POMPAGE CUMULATIVES SUR 100 ANS DE TUYAUX DE 600 MM (24 POUÇES) EN PVC ET EN PEHD

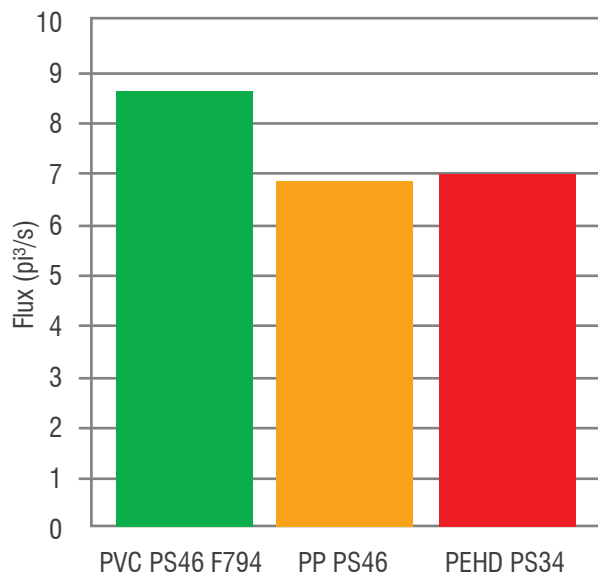


9.3.5 Performances des tuyaux à parois nervurées en polyéthylène (PEHD) et polypropylène (PP) pendant la phase d'exploitation

Les tuyaux à écoulement par gravité en polyéthylène (PEHD) et polypropylène (PP) ont des parois intérieures lisses avec des ondes annulaires, et des parois extérieures lisses ou non. Les parois intérieures lisses des tuyaux en PEHD et en PP sont très minces, ce qui cause une réflexion des ondes annulaires sur les parois intérieures des tuyaux. La surface ondulée de la paroi intérieure des tuyaux en PEHD et en PP peut causer une friction hydraulique plus importante que celle des tuyaux en PVC à paroi pleine ou à paroi ondulée. La friction plus élevée à l'intérieur des tuyaux en PEHD et en PP signifie que, placés à un même angle d'inclinaison qu'un tuyau en PVC, ils ont une capacité hydraulique moindre. La figure 9.7 compare les flux d'écoulement dans des tuyaux en PVC de 600 mm (24 pouces) et dans des tuyaux en PEHD et en PP de 600 mm (24 pouces), avec des pentes d'inclinaison identique.

FIGURE 9.7 : COMPARAISON DES FLUX D'ÉCOULEMENT DANS DES TUYAUX DE 600 MM (24 POUCES) À PAROI NERVURÉE, EN PVC, PP ET PEHD

Comparaison des flux d'écoulement dans des tuyaux à écoulement par gravité en PVC de 600 mm (24 pouces) à angles d'inclinaison équivalents



Les tuyaux en PEHD et en PP sont soumis au fluage. Le fluage est une propriété de certains matériaux qui, lorsqu'ils sont soumis à une pression forte, présentent une déformation lente au fil du temps. Pour les tuyaux enterrés à écoulement par gravité en PEHD et en PP, le phénomène de fluage signifie que les tuyaux continuent à fléchir au fil du temps. Les normes pour les tuyaux à écoulement par gravité en PEHD et en PP prévoient une marge pour le fluage des tuyaux tout au long de la durée de vie des canalisations.

- ▶ Dans le cas des tuyaux en PEHD, la résistance à la traction après 50 ans peut valoir moins d'un tiers de sa valeur initiale, tandis que le module d'élasticité après 50 ans peut valoir moins d'un cinquième de sa valeur initiale.
- ▶ Dans le cas des tuyaux en PP, la résistance à la traction après 50 ans peut valoir moins d'un tiers de sa valeur initiale, tandis que le module d'élasticité après 50 ans peut valoir moins d'un sixième de sa valeur initiale.

Comme la plupart des concepteurs de tuyaux utilisent le module d'élasticité à court terme pour les valeurs de fluage, les flexions à long terme peuvent entraîner des défaillances au niveau des joints ou des parois des tuyaux. Les concepteurs doivent prendre en compte la diminution de la résistance structurelle des tuyaux en PEHD et en PP pour concevoir des durées de vie utile pouvant atteindre 50 ans. La conception de durées de vie utile plus longues nécessiterait des remplacements spéciaux et coûteux et des conceptions spéciales.

Des comparaisons supplémentaires, y compris avec des tuyaux en PVC à paroi nervurée, sont présentées dans l'Annexe.

9.4 Tuyaux en grès

Le grès vitrifié a été utilisé pour les tuyaux d'égout aux États-Unis depuis la fin des années 1800.

9.4.1 Durée de vie des tuyaux en grès vitrifié (VCP)

Les tuyaux à écoulement par gravité en grès vitrifié ont une longue histoire de défaillances structurelles dans les sols argileux gonflants (qui affectent 75 % de l'Amérique du Nord). Les tuyaux en VCP ont aussi fait l'objet de défaillances au niveau des joints des tuyaux en raison de l'intrusion de racines d'arbres, résultant en des fissures des tuyaux, même si ces problèmes laissent les canalisations continuer à fonctionner partiellement. D'un point de vue exploitation et entretien, la canalisation peut devenir fonctionnellement obsolète bien avant la fin de sa durée de vie prévue.¹⁴⁰ Avant leur installation, les tuyaux en grès doivent être vérifiés pour confirmer que leur excentricité se situe dans la plage de tolérance spécifiée. Les VCP sont vulnérables à des défaillances au niveau des cloches/joints lors du transport, de l'installation et de l'exploitation. En raison de leur fragilité, une durée de vie de 50 ans est attribuée aux tuyaux en VCP. Il convient de noter que tout au long de leur phase d'exploitation, les tuyaux en VCP nécessitent beaucoup d'entretien, notamment pour nettoyer les intrusions de racines d'arbres et résoudre les problèmes de blocages et de débordements. De plus, les coûts opérationnels sont élevés pour les tuyaux en VCP à cause de leur susceptibilité à l'infiltration, qui augmente le volume des eaux usées à traiter. Les infiltrations peuvent également entraîner des amendes réglementaires et avoir des impacts budgétaires en raison des frais d'amélioration capitalisés pour les remplacements.

9.4.2 Énergie intrinsèque des tuyaux en grès vitrifié (VCP)

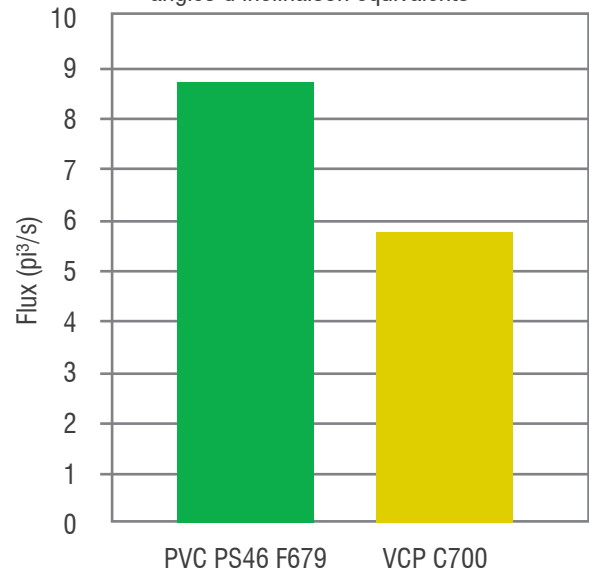
L'énergie intrinsèque des tuyaux en VCP est de 7,9 MJ/kg, tandis que leurs émissions de carbone sont de 0,55 kg de CO₂/kg de tuyau.¹⁴¹ Le National Clay Pipe Institute (NCPI) a obtenu la certification SMaRT. Pour obtenir cette certification, une analyse du cycle de vie doit être effectuée. Malheureusement, ses résultats n'ont pas été publiés par l'organisme de certification ou par l'association professionnelle. La présente *Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité comparative des matériaux pour tuyaux* présente une estimation de l'énergie intrinsèque d'un système de canalisations comparable, basée sur l'énergie intrinsèque susmentionnée et sur le poids des tuyaux obtenu à partir des normes produits et de la documentation produite par les fabricants.

9.4.3 Performances des tuyaux en grès vitrifié (VCP) pendant la phase d'exploitation

Les ondes sur les parois intérieures des tuyaux à écoulement par gravité en grès vitrifié neufs augmentent la friction hydraulique. Le VCP a tendance à laisser les constituants des eaux usées (notamment la graisse) adhérer à la paroi des tuyaux. Les matières qui s'accumulent sur la paroi des canalisations augmentent la friction hydraulique. Les tuyaux en VCP sont des tuyaux rigides avec une faible résistance à la traction. Les tuyaux rigides, de par leur nature, doivent supporter une surcharge plus importante que les tuyaux flexibles. Si les tuyaux ne sont pas chargés uniformément, les contraintes de traction peuvent provoquer des fissures. Lorsque les tuyaux sont soumis à des contraintes à cause d'une installation imparfaite, de branchements d'immeubles à la canalisation, de joints mal alignés, d'une charge irrégulière ou de mouvements dans les sols alentour, les parois des tuyaux peuvent se fissurer. Des fissures dans les tuyaux en VCP peuvent causer des irrégularités dans les parois des tuyaux, ce qui peut augmenter la friction hydraulique. Des fissures dans la paroi des tuyaux peuvent permettre l'intrusion de racines d'arbres, ce qui réduit la section de flux de transport et la capacité hydraulique. Il est largement accepté que le coefficient de frottement de tuyaux en VCP n'est pas aussi bon que celui de tuyaux en PVC à paroi pleine ou à paroi ondulée. La friction plus élevée à l'intérieur des tuyaux en grès vitrifié signifie que, placés à un même angle d'inclinaison qu'un tuyau en PVC, ils ont une capacité hydraulique moindre. La figure 9.8 compare les flux d'écoulement dans des tuyaux en PVC de 600 mm (24 pouces) et dans des tuyaux en VCP de 600 mm (24 pouces), avec des pentes d'inclinaison identique. Il convient de noter que les mauvaises performances de flux des tuyaux en VCP par rapport à celles des tuyaux en PVC seraient encore pires qu'indiquées si les risques de fissures, de joints mal alignés et d'intrusion de racines d'arbres étaient inclus dans les calculs hydrauliques. Des tuyaux en VCP fissurés permettent les infiltrations et les entrées d'eau dans les tuyaux. Historiquement, les systèmes de collecte en VCP ont contribué à des problèmes d'infiltration et d'entrée d'eau qui ont conduit à des problèmes réglementaires et des plans d'assainissement massifs.^{142 143}

FIGURE 9.8 : COMPARAISON DES FLUX D'ÉCOULEMENT DANS DES TUYAUX DE 600 MM (24 POUCES), EN PVC À PAROI PLEINE ET EN VCP

Comparaison des flux d'écoulement dans des tuyaux à écoulement par gravité en PVC de 600 mm (24 pouces) à angles d'inclinaison équivalents



9.5 Résumé des caractéristiques environnementales et de performance d'autres matériaux de tuyau

Le tableau 9.1 présente l'énergie intrinsèque du berceau à la sortie d'usine de tuyaux en PVC de 30 mètres (100 pieds) de longueur, comparée à celles des matériaux de spécifications similaires analysés dans la présente étude. Bien que les résultats concernant chaque matériau soient obtenus de sources différentes et présentent une certaine variabilité dans la qualité de leurs données, il est possible d'utiliser ces résultats pour illustrer avec précision les valeurs d'énergie intrinsèque du berceau à la sortie d'usine pour les divers produits de tuyaux.

Lorsque l'on compare l'énergie de matériaux de tuyaux, il est très important de tenir compte du poids par unité de longueur des produits de tuyau, parce que le poids influe directement sur l'énergie intrinsèque et l'empreinte carbone.

TABLEAU 9.1 : RÉSUMÉ DES ÉNERGIES INTRINSÈQUES DE LA CRÉATION À LA SORTIE D'USINE POUR LES TUYAUX EN PVC ET D'AUTRES MATÉRIEAUX POTENTIELS POUR LES TUYAUX

Taille et type de tuyau en PVC	Produits comparables	Norme	Énergie intrinsèque (en MJ par 30 mètres/100 pieds)
PVC DR18 PC235 C900 de 200 mm (8 pouces)	PVC DR18 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C900	23 300
	PEHD 4710 DR9 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C906	42 600
	Fonte ductile CL51 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C151	50 900
PVC DR25 PC165 C900 de 200 mm (8 pouces)	PVC DR25 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C900	15 900
	PEHD 4710 DR13.5 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C906	29 600
	Fonte ductile CL51 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C151	50 900
PVC DR25 PC165 C905 de 600 mm (24 pouces)	PVC DR25 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C905	137 900
	PEHD 4710 DR13.5 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C906	240 800
	Fonte ductile CL51 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C151 AWWA C104	206 600
	PCCP PC200 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C301	53 500
PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 600 mm (24 pouces)	PVC PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F794 AASHTO M304	49 700
	PP PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F2736	43 700
	PEHD PS34 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F2306	42 900
PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 200 mm (8 pouces)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM F794 AASHTO M304	5 900
	Fonte ductile de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746	46 500
PVC PS46 SDR35 D3034 à paroi pleine de 200 mm (8 pouces)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM D3034	10 000
	Fonte ductile de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746	46 500
	Grès vitrifié (VCP) de 200 mm (8 pouces)	ASTM C700	10 800
PVC PS46 F679 à paroi pleine de 600 mm (24 pouces)	PVC PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F679	98 600
	Fonte ductile de 600 mm (24 pouces)	ASTM A746	176 600
	Grès vitrifié (VCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C700	82 400
	Béton non armé (NRCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C14	21 300

Remarque : l'intérieur de toutes les canalisations sous pression en fonte ductile doit être revêtu de mortier de ciment, conformément à la norme AWWA C104.
L'intérieur de toutes les canalisations d'égouts en fonte ductile doit être revêtu de mortier de ciment, conformément à la norme AWWA C104.

ÉCONOMIES D'ÉNERGIE DE POMPAGE AVEC LES TUYAUX EN PVC

Trois scénarios de tuyaux sous pression sont présentés à la figure 10.1. Cet exemple d'analyse suppose que la friction hydraulique de chaque tuyau a augmenté au fil du temps à son taux normal. Chaque tuyau a été analysé en utilisant le même débit d'écoulement (en gal/min = gallons US par minute) pour chaque catégorie de pression. Le débit d'écoulement était basé sur une vitesse du fluide dans les tuyaux en PVC de 0,6 m/s (2 pi/s). La raison pour ce choix est que les services publics traitent et vendent de l'eau sur une base de volume. La vitesse du fluide dans les tuyaux est choisie dans la plage pratique d'utilisation correspondant aux dimensions de canalisations sélectionnées pour la présente étude. L'utilisation de débits d'écoulement courants permet des comparaisons précises entre des tuyaux en matériaux différents, de diamètres intérieurs différents et de coefficients de Hazen-Williams différents.

Dans le premier scénario de conception, des tuyaux en PVC DR18 PC235 de 200 mm (8 pouces) ont été comparés à des tuyaux équivalents en PEHD et en fonte ductile de catégories de pression similaires. Dans le deuxième scénario de conception, des tuyaux en PVC DR25 PC165 de 200 mm (8 pouces) ont été comparés à des tuyaux équivalents en PEHD et en fonte ductile de catégories de pression similaires. Dans le troisième scénario de conception, des tuyaux en PVC DR25 PC165 de 600 mm (24 pouces) ont été comparés à des tuyaux équivalents en PEHD, en fonte ductile et en béton précontraint (PCCP) de catégories de pression similaires.

L'analyse pour chaque taille et catégorie de tuyau sous pression a impliqué le calcul et la synthèse de l'énergie de pompage annuelle nécessaire pour obtenir le débit commun sur une durée de vie opérationnelle de 100 ans, par unité de longueur de 30 mètres (100 pieds) de tuyau, en fonction du diamètre interne de chaque tuyau, de la détérioration du facteur C au fil du temps, de l'efficacité commune de la pompe et de l'efficacité commune du moteur. La figure 10.1 illustre les résultats des trois analyses. L'énergie de pompage pour les tuyaux en PVC DR18 de 200 mm (8 pouces) est inférieure de 23 % à celle nécessaire pour les tuyaux en fonte ductile de 200 mm (8 pouces) équivalents, tandis que celle des tuyaux en PVC DR25 de 200 mm (8 pouces) est inférieure de 35 %. L'énergie de pompage est importante. En supposant qu'il existe 1,9 million de kilomètres de canalisations d'approvisionnement en eau aux États-Unis et que 66 % d'entre elles ont un diamètre inférieur ou égal à 200 mm (8 pouces),¹⁴⁴ les économies d'énergie sur une période de 100 ans offertes par des tuyaux en PVC au lieu de tuyaux en fonte ductile, en utilisant les consommations d'énergie tirées de ces exemples, pourraient atteindre jusqu'à 298 milliards de kWh. À un coût d'énergie électrique de 0,07 \$ par kWh, l'utilisation de tuyaux en PVC au lieu de tuyaux en fonte ductile se traduirait en des économies pouvant atteindre jusqu'à 21 milliards de dollars.

L'énergie de pompage pour les tuyaux en PVC DR18 de 200 mm (8 pouces) est inférieure de 50 % à celle nécessaire pour les tuyaux en PEHD de 200 mm (8 pouces) équivalents, tandis que celle des tuyaux en PVC DR25 de 200 mm (8 pouces) est inférieure de 33 %. En d'autres termes, la demande en énergie primaire requise par des tuyaux équivalents de 200 mm (8 pouces) est jusqu'à 100 % plus élevée pour des canalisations en PEHD que pour des canalisations en PVC. Dans ces comparaisons, le tuyau en PEHD de 200 mm (8 pouces) utilise le double de l'énergie de pompage du tuyau en PVC DR18 et 1,5 fois l'énergie de pompage du tuyau en PVC DR25. Les économies d'énergie sur une période de 100 ans réalisées par l'utilisation de PVC, plutôt que de PEHD, en utilisant les consommations d'énergie tirées de ces exemples, pourraient atteindre jusqu'à 532 milliards de kWh. À un coût d'énergie électrique de 0,07 \$ par kWh, l'utilisation de tuyaux en PVC au lieu de tuyaux en PEHD se traduirait en des économies pouvant atteindre jusqu'à 37 milliards de dollars.

10.1 Économies d'énergie de pompage avec les tuyaux en PVC

L'utilisation d'énergie se traduit par des coûts lorsque l'on prend en compte l'énergie électrique utilisée pour le pompage. Les trois scénarios de tuyaux ont pris en compte les coûts de pompage en se basant sur le coût moyen actuel de l'énergie électrique et en les augmentant d'un cent tous les dix ans pendant les 100 ans du cycle de vie. La figure 10.2 illustre les différences de coûts totaux d'énergie de pompage, sur les 100 ans du cycle de vie, entre le PVC et les autres matériaux.

Les services publics de taille moyenne ou de grande taille exploitent généralement plusieurs milliers de kilomètres de canalisation. Les économies potentielles liées à l'utilisation de tuyaux en PVC peuvent donc être importantes. La présente étude a utilisé un débit commun, généré par une vitesse équivalente de 0,6 m par seconde (2 pieds/s), pour l'analyse des différentes options de matériaux. Sur cette base, les économies annuelles de coûts d'énergie de pompage moyens sur 100 ans ont été calculées. Les économies pour un service public utilisant des canalisations en PVC de 200 mm (8 pouces) par rapport à leur équivalent en fonte ductile peuvent atteindre jusqu'à 440 000 \$ par an. Les économies résultant de l'utilisation de canalisations de 200 mm (8 pouces) en PVC plutôt qu'en PEHD peuvent atteindre jusqu'à 770 000 \$ par an. La figure 10.3 illustre les coûts de pompage pour ces réseaux de plusieurs milliers de kilomètres de canalisations de 200 mm (8 pouces). Reportez-vous à l'Annexe pour la méthode de calcul.

FIGURE 10.1 : COMPARAISON DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE POMPAGE SUR 100 ANS, POUR 30 MÈTRES (100 PIEDS) DE TUYAU

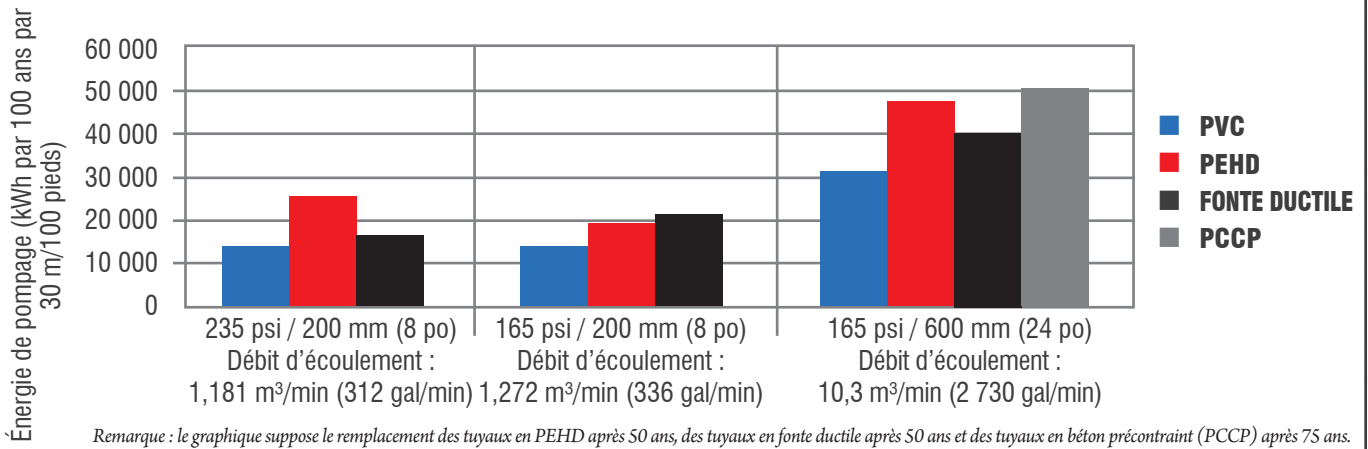


FIGURE 10.2 : COMPARAISON DES COÛTS EN ÉNERGIE DE POMPAGE SUR 100 ANS, POUR 30 MÈTRES (100 PIEDS) DE TUYAU

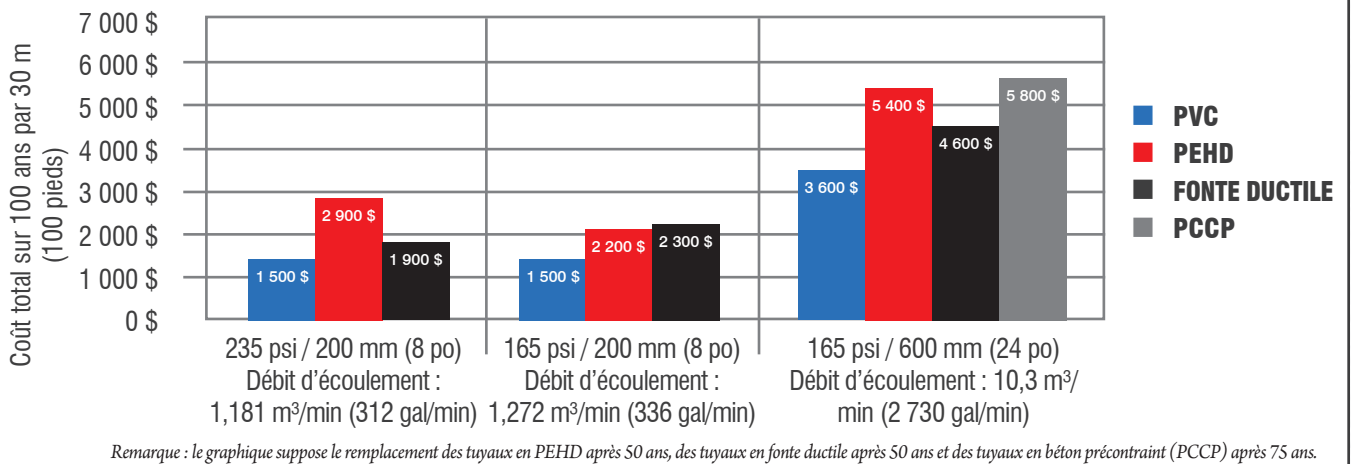
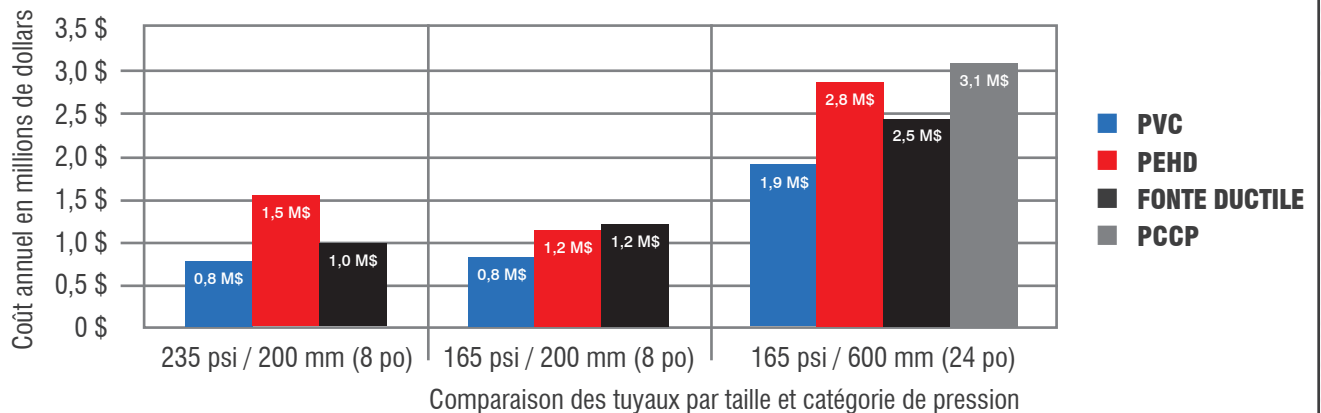


FIGURE 10.3 : COMPARAISON DES COÛTS ANNUELS MOYENS EN ÉNERGIE DE POMPAGE, PAR 1 600 KILOMÈTRES DE CONDUITE, EN SUPPOSANT UNE VÉLOCITÉ DE 60 CM/S (2 PI/S)



Les économies annuelles de coûts d'énergie de pompage moyens pour un tuyau de 200 mm (8 pouces) en PVC au lieu de fonte ductile peuvent atteindre 440 000 \$, tandis que les économies réalisées en utilisant un tuyau en PVC au lieu de PEHD peuvent atteindre 770 000 \$.

Remarque : le graphique suppose le remplacement des tuyaux en PEHD après 50 ans, des tuyaux en fonte ductile après 50 ans et des tuyaux en béton précontraint (PCCP) après 75 ans.

Des comparaisons sont également présentées pour des canalisations d'eau de 600 mm (24 pouces), afin de démontrer les économies potentielles pour des canalisations de plus grand diamètre. Les autres matériaux potentiels pour les tuyaux présentent des coûts d'exploitation plus élevés que les tuyaux en PVC : Les tuyaux en béton précontraint (PCCP) présentent un coût d'exploitation plus élevé de 60 % par rapport aux conduites en PVC, les conduites en PEHD un coût plus élevé de 49 % et les conduites en fonte ductile un coût plus élevé de 28 %.

En se basant sur la demande en eau par habitant, aux États-Unis, la vitesse moyenne dans des canalisations de 200 mm (8 pouces) est comprise entre 9 et 15 cm/s (0,3 à 0,5 pi/s). Une vitesse de 12 cm/s (0,4 pi/s) a été utilisée pour fournir une comparaison réaliste du débit d'eau dans les tuyaux de 200 mm (8 pouces) de divers types de matériaux. Les coûts de pompage pour chaque matériau potentiel pour les tuyaux ont été calculés en utilisant cette valeur de débit. La figure 10.4 illustre les coûts de pompage pour ces réseaux de plusieurs milliers de kilomètres de canalisations de 200 mm (8 pouces), en supposant une vitesse moyenne de 12 cm/s (0,4 pi/s).

La différence de consommation électrique entre les tuyaux en PVC et les tuyaux en fonte ductile dans un réseau de plusieurs milliers de kilomètres pourrait alimenter 4 maisons chaque année. Les économies d'électricité réalisées en utilisant des tuyaux en PVC plutôt que des tuyaux en PEHD pourraient couvrir l'alimentation électrique annuelle de 6 maisons en se fondant sur une consommation annuelle par foyer aux États-Unis de 10 812 kWh/an.¹⁴⁵

À des fins de comparaison, la présente étude a utilisé un débit d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s), plutôt que le débit moyen par habitant de 0,12 m/s (0,4 pi/s). De nombreuses discussions avec des ingénieurs de conception, des municipalités et des services publics de l'eau ont confirmé qu'un débit d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s) est très souvent utilisé lors de la conception de systèmes municipaux d'eau potable. Bien que cette valeur soit supérieure aux 0,12 m/s (0,4 pi/s) indiqués ci-dessus, les tendances respectives des divers matériaux demeurent les mêmes.

10.2 Empreinte carbone faiblement valorisée des tuyaux en PVC

L'empreinte carbone des différents matériaux de tuyaux peut être établie en prenant en compte l'utilisation d'énergie (en MJ par 30 m/100 pieds). Comme le montre la figure 10.5, un tuyau en PVC de 200 mm (8 pouces) présente une consommation électrique totale sur la durée totale du cycle de vie inférieure à celle de tuyaux en PEHD ou en fonte ductile. Le PEHD présente la plus grande consommation totale d'énergie sur une durée de vie de 100 ans, près de 2,5 fois supérieure à celle d'un tuyau en PVC, tandis que celle d'un tuyau en fonte ductile est près de 2,4 fois supérieure à celle d'un tuyau en PVC. La consommation électrique totale sur la durée totale du cycle de vie prend en compte les phases du berceau à l'installation du tuyau, ainsi que l'énergie totale de pompage utilisée sur une période de 100 ans et les remplacements éventuels du tuyau.

FIGURE 10.5 : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX ÉQUIVALENTS AUX TUYAUX DR18 DE 200 MM (8 POUÇES)

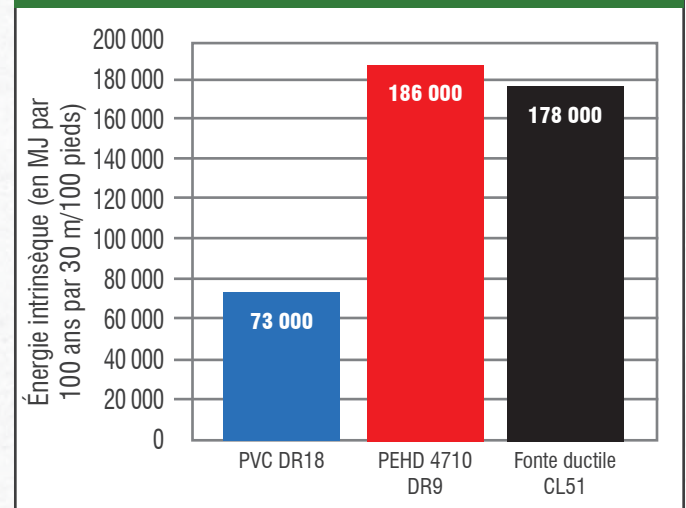
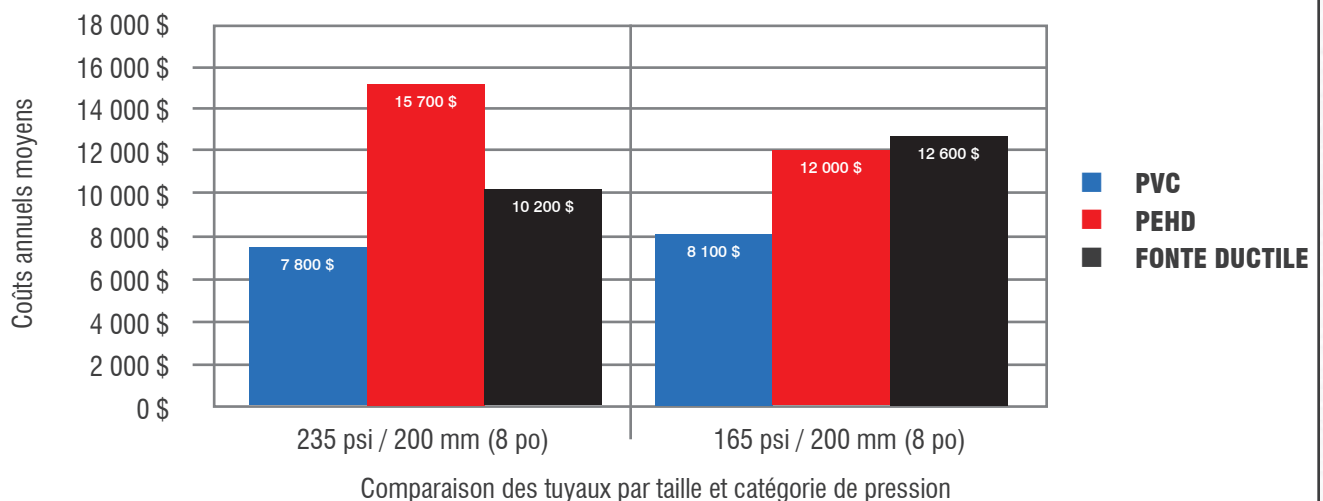


FIGURE 10.4 : COMPARAISON DES COÛTS ANNUELS MOYENS EN ÉNERGIE DE POMPAGE SUR 100 ANS, PAR 1 600 KILOMÈTRES DE CONDUITE, EN SUPPOSANT UNE VÉLOCITÉ DE 0,12 M/S (0,4 PI/S)



Remarque : le graphique suppose le remplacement des tuyaux en PEHD et en fonte ductile après 50 ans.

Le tableau 10.1 prend l'énergie du berceau à l'installation et la convertit en production de carbone, pour des tuyaux en PVC et en fonte ductile équivalents. Comme le montre la figure 10.6, si la production de carbone du berceau à l'installation était pénalisée pour des tuyaux en PVC et en fonte ductile équivalents de 200 mm (8 pouces) sur une longueur fonctionnelle de 30 m (100 pieds), les tuyaux en PVC seraient moins pénalisés, 25 \$ ou 35 \$ (selon la catégorie de pression) que les tuyaux en fonte ductile, 225 \$. Chaque remplacement des tuyaux en fonte ductile pendant la période de 100 ans, nécessiterait le paiement d'une nouvelle pénalité carbone. Comme discuté précédemment, les tuyaux en fonte ductile peuvent ne durer que 11 à 14 ans dans des sols moyennement corrosifs et auront besoin d'être remplacés 7 à 9 fois sur une période de 100 ans. Cela impliquerait, sur une période de 100 ans, une pénalité carbone pour les tuyaux en fonte ductile de 1 575 \$ à 2 025 \$ par 30 m (100 pieds) de canalisation, comparativement à une pénalité carbone pour les tuyaux en PVC de 25 \$ ou 35 \$. Ainsi, les pénalités, sur une période de 100 ans, pour une canalisation de 1,6 km (un mille) pourraient être de 83 160 \$ à 106 920 \$, comparativement à une pénalité pour les tuyaux en PVC de 1 320 \$ ou 1 848 \$.

FIGURE 10.6 : COMPARAISON DE L'EMPREINTE CARBONE VALORISÉE PAR 30 M (100 PIEDS) DE CANALISATION DE 200 MM (8 POUCES)

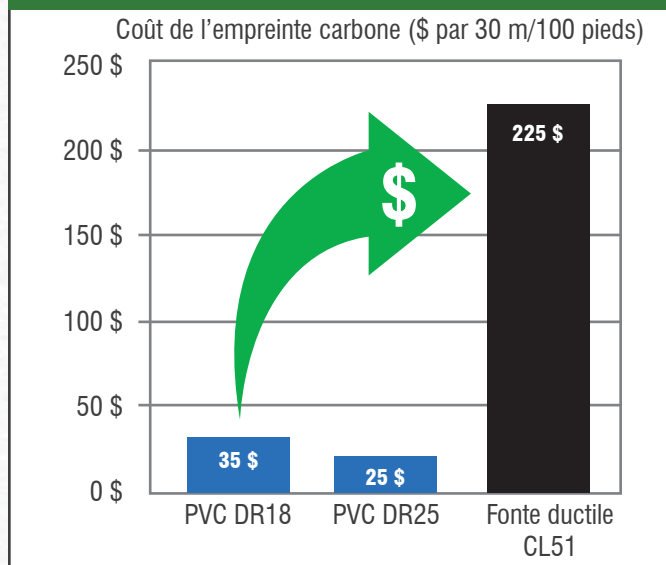


TABLEAU 10.1 : COMPARAISON DE L'EMPREINTE CARBONE VALORISÉE DES MATÉRIAUX DE TUYAUX PAR 30 M (100 PIEDS) DE CANALISATION DE 200 MM (8 POUCES)

Matériau des tuyaux	PRP total (kg CO ₂ par 30 m/100 pieds)	Du berceau à la sortie d'usine (kg CO ₂ par 30 m/100 pieds)	Distribution (kg CO ₂ par 30 m/100 pieds)	Installation (kg CO ₂ par 30 m/100 pieds)	Coût total
PVC DR18 de 200 mm (8 pouces)	1 400	1 100	20	250	35 \$
PVC DR25 de 200 mm (8 pouces)	1 000	700	15	250	25 \$
Fonte ductile CL51 de 200 mm (8 pouces)	9 000	8 600	61	300	225 \$



11.0

NORMES DE DURABILITÉ

62

Les États-Unis sont le plus grand consommateur de ressources naturelles au monde, utilisant environ 20 % de l'énergie mondiale, dont 93 % proviennent de ressources non renouvelables. Les États-Unis ont la plus grande consommation d'eau par habitant, avec une partie importante de l'eau perdue par les systèmes d'infrastructure. En raison de la disponibilité de l'eau, des demandes en eau concurrentes et de l'évolution des conditions hydrologiques, le département de l'Intérieur des États-Unis prévoit que de nombreux conflits au sujet de l'utilisation de l'eau se produiront dans l'ouest des États-Unis d'ici à 2025. Une infrastructure durable de l'eau est vitale pour fournir au public américain de l'eau propre et saine, et assurer la santé environnementale, économique et sociale des communautés du pays.

Tandis que toutes les municipalités du Canada et des États-Unis ont comme priorité l'approvisionnement en eau potable propre, la mise en place d'un système efficace de traitement des eaux usées et le contrôle des eaux pluviales, les caractéristiques et le coût des tuyaux sont pour elles des considérations essentielles. Les représentants du gouvernement, les ingénieurs et les entreprises qui installent, exploitent et entretiennent des infrastructures de distribution d'eau doivent comprendre qu'une approche des systèmes basée sur le cycle de vie signifie bien plus que simplement examiner le matériau des tuyaux. Adopter une telle approche signifie utiliser la philosophie du cycle de vie pour concevoir, installer et exploiter des systèmes de distribution d'eau de façon durable pour au moins 100 ans.

11.1 Infrastructures durables et évaluations

Les ACV aident les fabricants à comprendre tous les impacts environnementaux potentiels associés à un produit. Accompagnées d'analyses économiques, elles peuvent servir à élaborer des solutions plus durables et elles constituent un outil précieux pour les entreprises d'ingénierie, les municipalités et les services publics de l'eau et de l'assainissement, en les aidant à atteindre les objectifs de développement durable.

De nombreux codes et normes du bâtiment font désormais référence à l'utilisation d'une ACV comme un moyen de sélection de produits et de matériaux à faible impact sur l'environnement par rapport à d'autres solutions. Les codes et normes utilisent également les ACV comme un moyen d'intégrer la philosophie du cycle de vie dans les projets de construction et d'infrastructures.

11.1.1 Institute for Sustainable Infrastructure (ISI) : Envision^{MD}

L'Institute for Sustainable Infrastructure a mis au point la norme Envision^{MD}, un système de standardisation pour évaluer, noter et améliorer la durabilité des projets d'infrastructures tels que les systèmes de distribution d'eau potable, les systèmes de collecte des eaux usées et des eaux pluviales.

envisionTM



Il existe plusieurs crédits dans la norme Envision^{MD} liés aux impacts du cycle de vie, y compris la réduction de l'énergie intrinsèque nette et des émissions de gaz à effet de serre sur la durée totale du cycle de vie du produit. Une ACV peut être utilisée pour déterminer les effets d'un produit ou d'un système, ainsi que déterminer les réductions d'impacts environnementaux.

La norme Envision^{MD} de l'ISI considère également la réduction de la consommation d'énergie pendant la phase d'utilisation d'un produit, de sorte que l'ensemble du projet aura une contribution réduite au réchauffement planétaire et au changement climatique, et aura des coûts d'exploitation moins élevés.

Le tableau 11.1 décrit les grandes lignes des crédits de la norme Envision^{MD} de l'ISI relatives à l'analyse du cycle de vie.

Les représentants du gouvernement, les ingénieurs et les entreprises qui installent, exploitent et entretiennent des infrastructures de distribution d'eau doivent comprendre qu'une approche des systèmes basée sur le cycle de vie signifie bien plus que simplement examiner le matériau des tuyaux. Adopter une telle approche signifie utiliser la philosophie du cycle de vie pour concevoir, installer et exploiter des systèmes de distribution d'eau de façon durable pour au moins 100 ans.

Les projets visant à obtenir ces crédits pour réduire l'énergie intrinsèque nette des matériaux doivent d'abord comprendre le concept d'énergie intrinsèque des matériaux. Pour chercher à réduire cet impact, les projets doivent alors non seulement sélectionner les matériaux qui ont une faible énergie intrinsèque, mais également des matériaux qui continueront à présenter des performances satisfaisantes sur une certaine période de temps, tout en consommant, ou en causant passivement, une quantité minimale d'énergie. Maintenir de faibles besoins en énergie de pompage permet de limiter l'énergie consommée et l'empreinte carbone des projets, ce qui leur permet d'atteindre plus facilement les crédits CR1.1 et RA2.1 d'Envision^{MD}.

NSF International a élaboré une norme pour la durabilité des produits en contact avec l'eau.¹⁴⁶ Cette norme fournit un cadre cohérent, à base scientifique, pour la communication de l'information sur les propriétés durables des produits en contact avec l'eau. Cette norme encourage le développement de produits qui ont un impact réduit sur l'environnement et la société. Dans le cadre de cette norme, les fabricants et les associations professionnelles offrant des données publiées sur les analyses du cycle de vie contribuent à gagner des points. Des points supplémentaires sont accordés s'il est prouvé que les systèmes réduisent l'impact environnemental global.

Les normes Leadership for Energy and Environmental Design (LEED) ont intégré des crédits spécifiques pour les évaluations du cycle de vie et les EPD. Des crédits pilotes existent dans la norme LEED Version 3 et des crédits spécifiques existent dans la norme LEED Version 4. Cette norme est strictement axée sur les bâtiments et n'offre pas de crédits spécifiques pour les infrastructures de distribution d'eau ou de collecte d'eaux usées. Cependant, selon la taille et le périmètre d'un projet, les systèmes d'eaux pluviales et les systèmes sur site eaux usées et d'eau potable peuvent être inclus.

Tandis que toutes les municipalités du Canada et des États-Unis ont comme priorité l'approvisionnement en eau potable propre, la mise en place d'un système efficace de traitement des eaux usées et le contrôle des eaux pluviales, les caractéristiques et le coût des tuyaux sont pour elles des considérations essentielles.



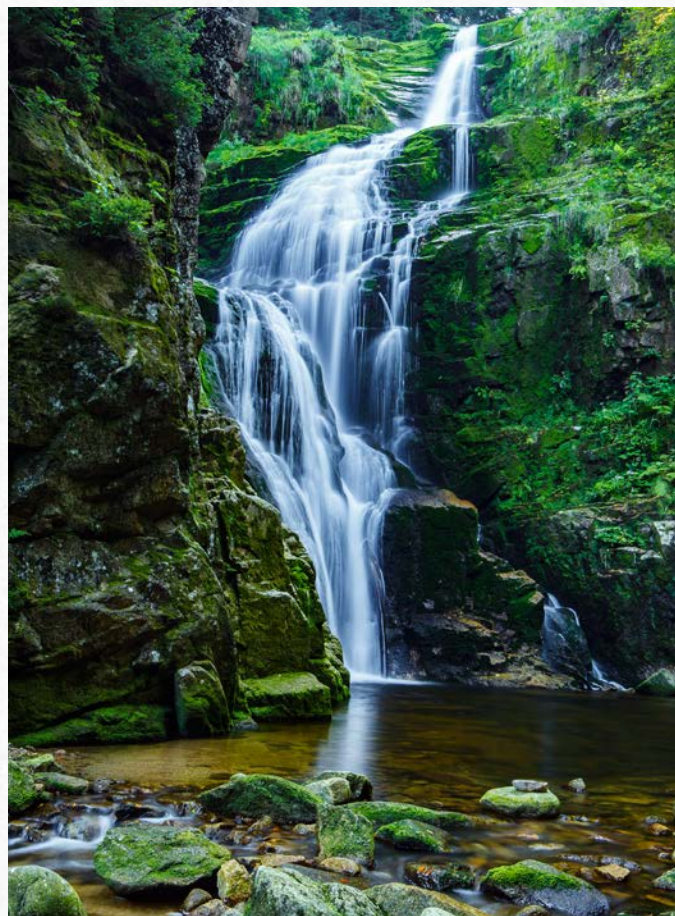
TABLEAU 11.1 : CRÉDITS ISI ENVISION^{MD} LIÉS AUX ACV

ISI Envision ^{MD}	Objectif visé	Paramètres quantitatifs d'évaluation
Affectation des ressources		
RA1.1 : Réduire l'énergie intrinsèque nette	Conserver l'énergie en réduisant l'énergie intrinsèque nette des matériaux du projet sur la durée totale du cycle de vie du projet.	Pourcentage de réduction de l'énergie intrinsèque nette déterminé par une évaluation de l'énergie tout au long du cycle.
RA1.2 : Appuyer des pratiques d'approvisionnement durables	Obtenir des matériaux et des équipements auprès de fabricants et de fournisseurs qui mettent en œuvre des pratiques durables.	Pourcentage de matières provenant de fabricants qui répondent aux exigences des pratiques durables.
RA2.1 : Réduire la consommation d'énergie	Conserver l'énergie en réduisant la consommation d'énergie globale d'exploitation et d'entretien sur la durée totale du cycle de vie du projet.	Pourcentage de réductions réalisées.
Changements climatiques et risques		
CR1.1 : Réduire les émissions de gaz à effet de serre	Réaliser une analyse complète des émissions de carbone sur la durée totale du cycle de vie et utiliser cette analyse pour réduire la quantité prévue d'émissions nettes de gaz à effet de serre sur la durée totale du cycle de vie du projet, afin réduire la contribution du projet au changement climatique.	Équivalent net de dioxyde de carbone sur la durée totale du cycle de vie (équivalent CO ₂).

11.1.2 Certification SMaRT

L'Institute for Market Transformation to Sustainability (MTS) a mis au point un système de notation appelé certification SMaRT. Plusieurs groupes de l'industrie, y compris la Ductile Iron Pipe Research Association (DIPRA) et le National Clay Pipe Institute (NCPI) ont reçu cette certification environnementale. La DIPRA n'a pas publié les résultats de son ACV sur les tuyaux en fonte ductile, bien que cela soit exigé par la certification SMaRT. Cela manque clairement de transparence et ne semble pas remplir les exigences des normes ISO en la matière. Les éléments suivants sont critiques de la certification SMaRT pour les tuyaux en fonte ductile :

- ▶ *Absence de divulgation d'informations environnementales sur le produit.* L'article 7.2.1 de la norme ISO 14025 exige qu'une évaluation des impacts environnementaux du cycle de vie (EICV), un inventaire d'analyse du cycle de vie (ICV) et des données sur le module d'information soient présentés. Toutefois, dans le cas de la certification SMaRT de la DIPRA, aucune de ces informations n'a été présentée.
- ▶ *Le programme SMaRT ne permet pas les comparaisons.* L'article 5.6 de la norme ISO 14025 prévoit que les déclarations environnementales permettent à un utilisateur de comparer les performances environnementales des produits sur la durée totale du cycle de vie. Toutefois, comme aucun des impacts n'est déclaré sur la durée totale du cycle de vie, les produits ne peuvent être comparés qu'au niveau de leur certification et du total des points obtenus, ce qui n'est pas transparent.
- ▶ *Les règles de catégories de produit (PCR) de la certification SMaRT ne représentent pas un produit, une catégorie ou une fonction de produit spécifique* bien que cela soit requis par l'article 6.2 de la norme ISO 14025 et l'article 6.7.2b de la norme ISO 14025. En fait, les PCR de la certification SMaRT déclarent : « Catégorie de produit et définition désignant tous les produits autres que les avions et les véhicules. La catégorie de produit comprend tous les produits de construction. La portée de SMaRT est conforme à cette catégorie et cette définition. (SMaRT §2) (ISO 21930 §§6.21(a) et 6.22). » Sans définition précise des catégories et des fonctions de produit spécifiques, ou en n'utilisant pas des PCR existantes ayant été soumises à des commentaires du public, il est impossible de déterminer et de comparer les véritables impacts sur l'environnement d'un produit.
- ▶ *SMaRT exclut certains types de matériaux*, ce qui est en contradiction directe avec les exigences de l'article 6.2 de la norme ISO 14025 : « L'objectif du programme doit être clair et doit définir si le programme est limité, par exemple, à une zone géographique donnée ou à certains secteurs industriels, produits ou groupes de produits. Un programme doit être accessible à toutes les organisations intéressées à l'élaboration de PCR ou de déclarations environnementales de Type III au sein de la portée définie. » Comme ce programme ne certifie pas les produits en PVC, il n'est pas accessible à tous les matériaux ou toutes les industries.
- ▶ *Aucunes données sur l'impact sur la durée totale du cycle de vie n'ont été publiées.* L'article 6.8.2 de la norme ISO 14025 exige d'inclure des informations environnementales quantifiées basées sur une ACV. Un principe directeur des produits plus respectueux de l'environnement est la transparence. Les clients



ne devraient pas accepter un produit qui prétend être « vert », mais ne fournit pas une divulgation complète de ses impacts environnementaux sur la durée complète de son cycle de vie.

- ▶ *Les conditions préalables à la certification SMaRT exigent l'absence d'émissions de substances chimiques toxiques visées la Convention de Stockholm* au cours des phases de fabrication, de commercialisation, de réutilisation et d'élimination d'un produit. En raison de cette condition préalable, SMaRT interdit explicitement le PVC¹⁴⁷, car des dioxines sont libérées lors de la production de la résine de PVC. Cependant, comme décrit dans la présente étude, un examen des inventaires des rejets toxiques de l'EPA a montré que les sites de fabrication de fonte ductile rejettent de la dioxine et d'autres produits chimiques toxiques tels que le plomb et le mercure, tandis que les fabricants de tuyaux en PVC ne rejettent aucun produit chimique toxique à leurs usines de fabrication.

Par ailleurs, MTS appelle maintenant la certification SMaRT une « déclaration environnementale produit (EDP) / déclaration sanitaire de produit (HPD) ». Une déclaration sanitaire de produit (HPD), par l'organisation HPD Collaborative, « définit de façon objective les renseignements essentiels requis pour soutenir la chaîne précise de divulgation par les fabricants et les fournisseurs, et des décisions éclairées par les concepteurs, les prescripteurs, les propriétaires et les utilisateurs de bâtiments. » La norme HPD exige une divulgation complète des risques sanitaires associés à chaque ingrédient d'un produit. Aucun risque sanitaire concernant les tuyaux en fonte ductile n'est rapporté par le biais de la certification SMaRT, ce qui n'est pas conforme à la norme HPD énoncée par l'organisation HPD Collaborative.

12.0

SOMMAIRE DES CONCLUSIONS - ÉNERGIE INTRINSÈQUE ET DURABILITÉ

12.1 Sommaire des conclusions de la comparaison de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux sous pression et à écoulement par gravité sur une durée de 100 ans

La présente *Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité comparative des matériaux pour tuyaux* a montré que les tuyaux sous pression et à écoulement par gravité en PVC ont l'énergie intrinsèque la plus faible parmi toutes les options de matériaux de tuyaux. L'énergie intrinsèque totale pour les tuyaux comprend l'énergie du berceau à la sortie d'usine, l'énergie de transport, l'énergie pour l'installation, l'énergie lors de la phase d'utilisation et l'énergie de fin de vie. Pour la présente étude, une durée de vie prévue du réseau de 100 ans a été utilisée pour comparer la plupart des options de matériaux de tuyaux. L'énergie intrinsèque du berceau à la sortie d'usine comporte les éléments suivants : l'énergie utilisée pour les matières premières, l'énergie utilisée pour la fabrication et l'énergie utilisée pour l'emballage. L'énergie intrinsèque utilisée pour le transport et pour l'installation comprend l'énergie nécessaire pour transporter le tuyau de l'usine

de fabrication au chantier et pour l'installer avec toute protection éventuelle contre la corrosion. La phase d'utilisation comprend l'énergie hydraulique sur 100 ans et les pertes d'eau sur 100 ans. Lorsque les tuyaux doivent être remplacés au cours de la durée de vie prévue de 100 ans, l'énergie consommée durant les phases du berceau à la sortie d'usine, de transport et d'installation des tuyaux de remplacement est incluse dans le calcul de l'énergie intrinsèque totale. L'énergie intrinsèque de fin de vie n'a pas été prise en compte, parce que les canalisations sont rarement retirées à la fin de leur vie.

65

12.1.1 Comparaison de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux sous pression

La figure 12.1 compare les tuyaux en PVC, PEHD et fonte ductile de 200 mm (8 pouces) avec une catégorie de pression égale à, ou équivalente à, celle du PVC DR18 PC235. Comme montré, l'énergie intrinsèque de tuyaux en PVC sur une durée de 100 ans est inférieure de 61 % à celle de tuyaux en PEHD et inférieure de 59 % à celle de tuyaux en fonte ductile.

FIGURE 12.1: ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR18 DE 200 MM (8 POUÇES)

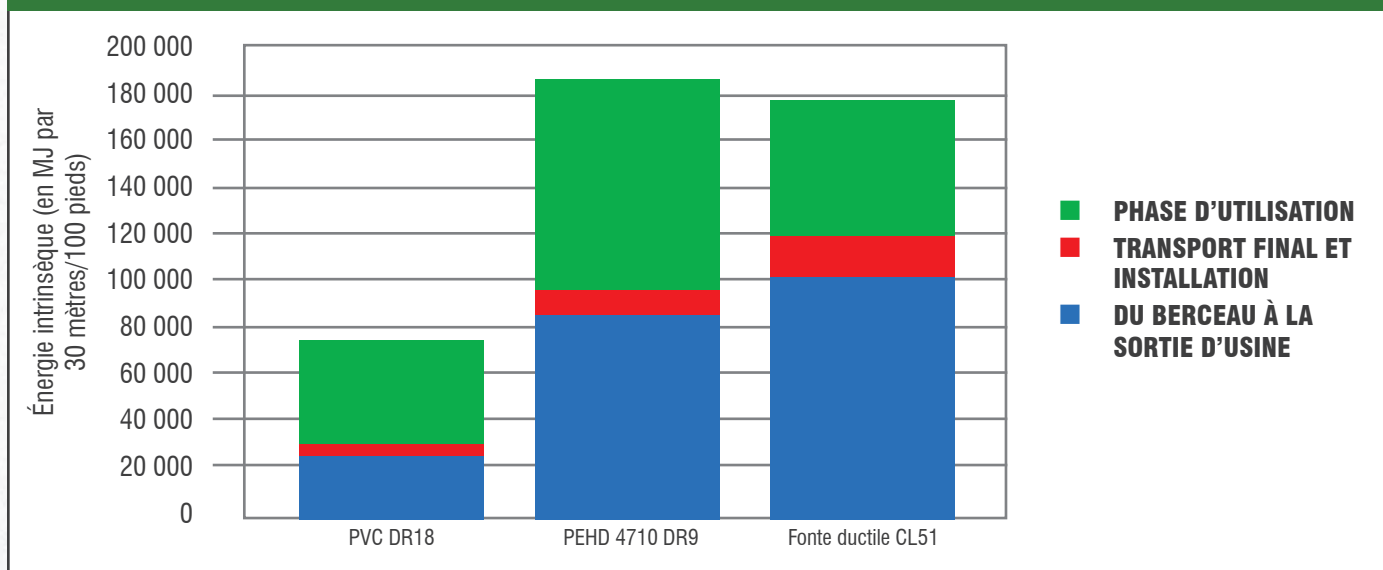
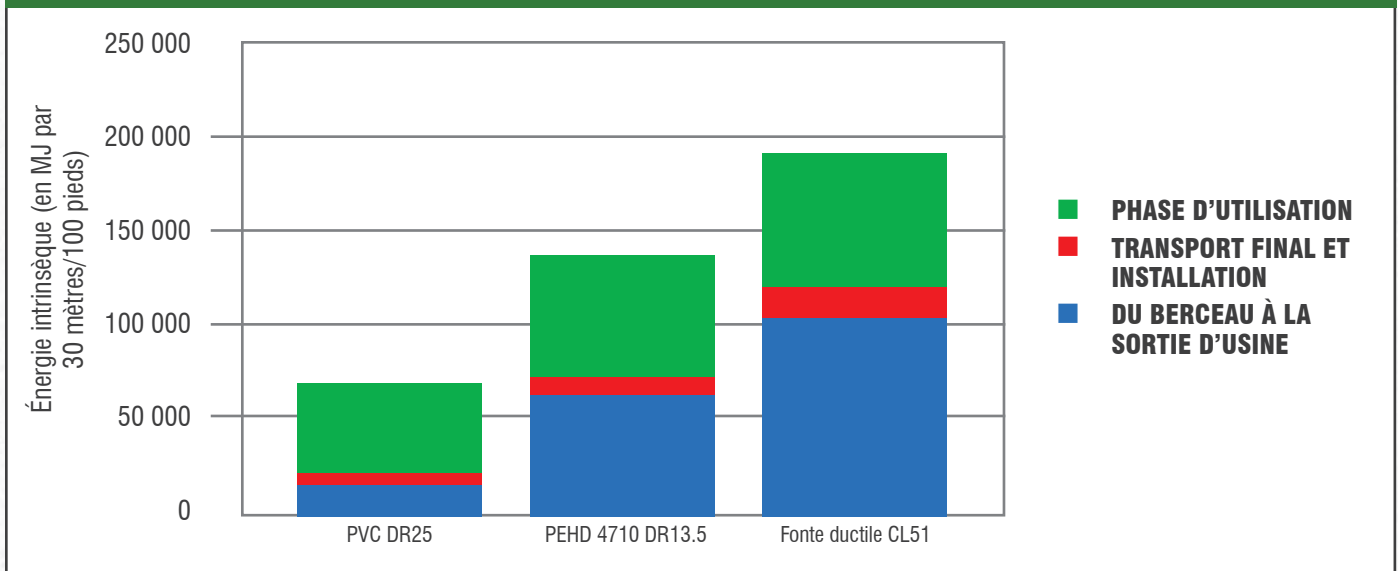


FIGURE 12.2: ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR25 DE 200 MM (8 POUÇES)

La figure 12.2 compare les tuyaux en PVC, PEHD et fonte ductile de 200 mm (8 pouces) avec une catégorie de pression égale à, ou équivalente à, celle du PVC DR25 PC165. Comme montré, l'énergie intrinsèque de tuyaux en PVC sur une durée de 100 ans est inférieure de 52 % à celle de tuyaux en PEHD et inférieure de 56 % à celle de tuyaux en fonte ductile.

La figure 12.3 compare les tuyaux en PVC, PEHD et fonte ductile de 600 mm (24 pouces) avec une classe de pression égale à, ou équivalente à, celle du PVC DR25 PC165. Comme montré, l'énergie intrinsèque de tuyaux en PVC sur une durée de 100 ans est inférieure de 61 % à celle de tuyaux en PEHD, inférieure de 56 % à celle de tuyaux en fonte ductile et inférieure de 17 % à celle de tuyaux en béton précontraint (PCCP).

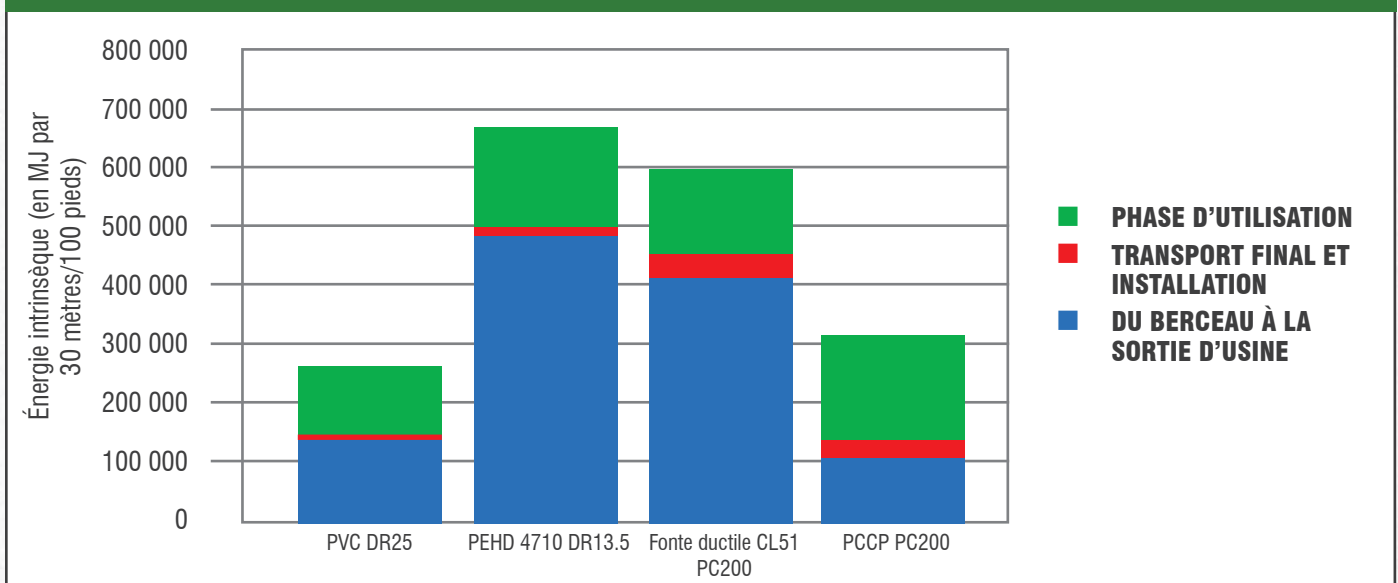
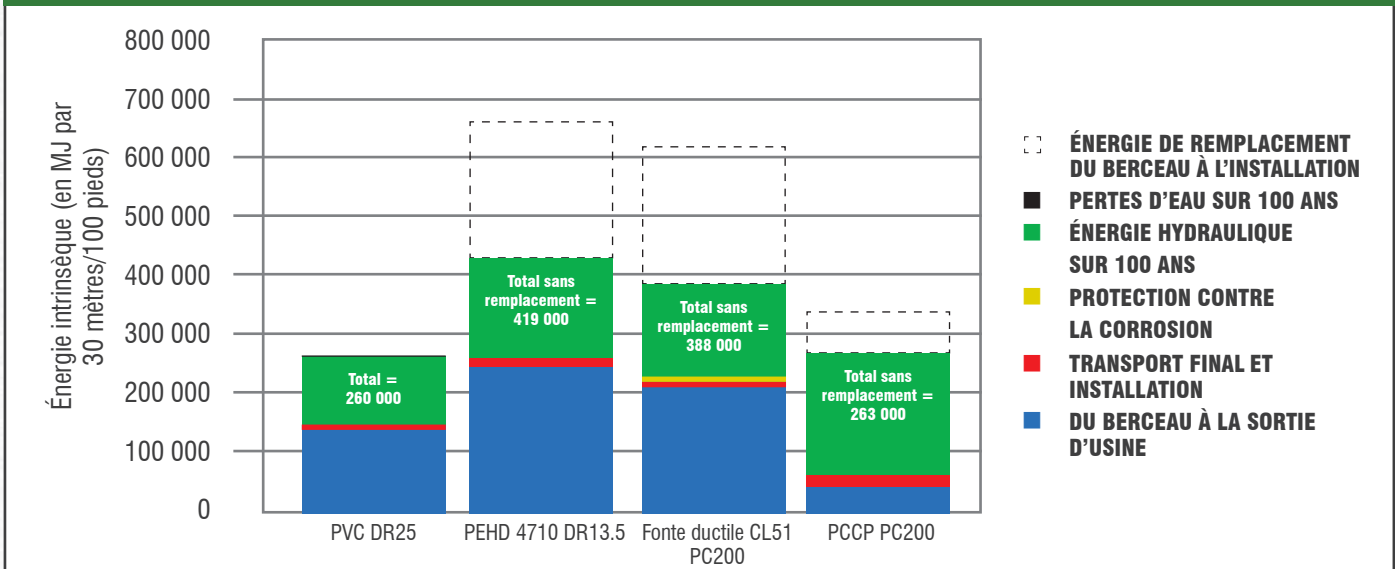
FIGURE 12.3: ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR25 DE 600 MM (24 POUÇES)

FIGURE 12.4 : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR25 DE 600 MM (24 POUÇES) (ÉNERGIE HYDRAULIQUE SANS REMPLACEMENT)


Les fabricants de tuyaux sous pression en PEHD, fonte ductile et béton précontraint (PCCP) peuvent prétendre que leurs tuyaux n'auront pas besoin d'être remplacés au cours de la durée de vie prévue de 100 ans et que la présente étude ne donne pas une représentation juste de leurs produits. Cependant, la présente étude a démontré que ces produits de tuyaux ont besoin d'être remplacés après 50 ans. De plus, même sans remplacement, ces matériaux de tuyaux ont une énergie intrinsèque totale plus élevée sur une durée de vie de 100 ans que les tuyaux en PVC.

La figure 12.4 montre les différences de valeur d'énergie intrinsèque entre les tuyaux de canalisations sous pression de 600 mm (24 pouces), sans considération pour l'énergie totale de la création à la sortie d'usine nécessaire pour le remplacement des tuyaux en PEHD, en fonte ductile et en béton précontraint (PCCP) (barre hachurée) au cours d'une durée de vie de 100 ans. Cette figure prend en compte la poursuite de la dégradation des parois intérieures des tuyaux au-delà du moment où leur remplacement devrait être programmé. La figure 12.4 montre que, sans remplacement, les tuyaux en PEHD, en fonte ductile et en béton précontraint (PCCP) auraient une énergie intrinsèque totale sur une durée de vie de 100 ans supérieure à celle du PVC. Bien que leur remplacement soit nécessaire au cours du cycle de vie, si l'on ignore ce remplacement, les tuyaux en PEHD ont une énergie intrinsèque sur une durée de vie de 100 ans supérieure de 38 % à celle des tuyaux en PVC, tandis que les tuyaux en béton précontraint (PCCP) ont une énergie intrinsèque supérieure de 33 % au PVC et ceux en fonte ductile ont une énergie intrinsèque supérieure de 1 % au PVC.

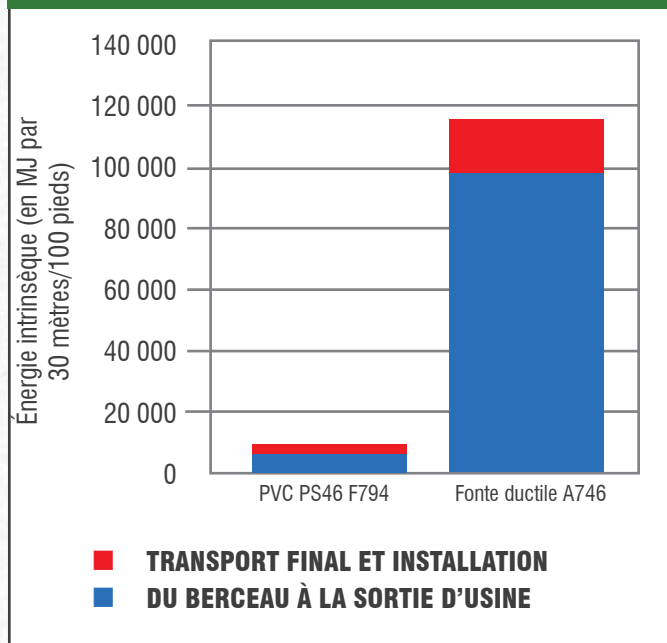
12.1.2 Comparaison de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux à écoulement par gravité

La comparaison de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux à écoulement par gravité sur une durée de 100 ans comprend l'énergie du berceau à la sortie d'usine, l'énergie de transport, l'énergie pour l'installation et l'énergie supplémentaire pour tout remplacement de tuyaux dont la durée de vue utile est inférieure à 100 ans. Dans le cas des tuyaux à écoulement par gravité, l'énergie durant la phase d'utilisation n'est pas calculée, parce qu'il n'y a pas besoin d'électricité pour que les fluides s'écoulent à travers et parce que l'énergie associée aux activités d'entretien et de traitement des flux d'infiltration est difficile à quantifier. Les infiltrations résultant de canalisations percées représentent un coût important et augmentent l'énergie consommée à l'usine de traitement des eaux usées. Les tuyaux en fonte ductile et en béton sont sensibles à la corrosion provoquée par les gaz d'égout, tandis que les tuyaux en grès vitrifié sont sujets à la fissuration. La corrosion et la fissuration des tuyaux entraînent des fuites d'eaux usées dans l'environnement, ce qui peut avoir de conséquences nocives pour l'environnement. La corrosion et la fissuration des tuyaux permettent également aux eaux souterraines de pénétrer dans les conduites d'égout, ce qui augmente inutilement l'énergie de pompage et l'utilisation de produits chimiques dans les usines de traitement des eaux usées. Les tuyaux en PEHD et en PP sont également enclins à fuir à la suite de problèmes de flexion et de fluage.^{148 149}

Les tuyaux en PVC ne sont pas sujets à la corrosion provoquée par les gaz d'égout et les joints de tuyaux en PVC sont sans fuite, ce qui élimine les problèmes causés par les infiltrations ou les exfiltrations. Si les coûts énergétiques et opérationnels associés aux infiltrations étaient ajoutés aux tableaux ci-dessous, les tuyaux d'égout en PVC apparaîtraient encore plus durables que les autres matériaux de tuyaux.

La figure 12.5 compare des tuyaux en PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 200 mm (8 pouces) avec des tuyaux à écoulement par

FIGURE 12.5 : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS PS46 F794 À PAROI NERVURÉE DE 200 MM (8 POUÇES)



gravité en fonte ductile équivalents. L'énergie intrinsèque totale de tuyaux en PVC sur une durée de 100 ans est inférieure de 91 % à celle de tuyaux d'égout en fonte ductile équivalents.

La figure 12.6 compare des tuyaux à écoulement par gravité à paroi pleine de 200 mm (8 pouces) en PVC, fonte ductile et grès vitrifié (VCP) équivalents avec des tuyaux à paroi pleine en PVC PS46 D3034. L'énergie intrinsèque totale de tuyaux d'égout en PVC sur une durée de 100 ans est inférieure de 88 % à celle de tuyaux d'égout en fonte ductile équivalents et 64 % à celle de tuyaux en grès vitrifié (VCP).

FIGURE 12.6 : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS PS46 D3034 À PAROI PLEINE DE 200 MM (8 POUÇES)

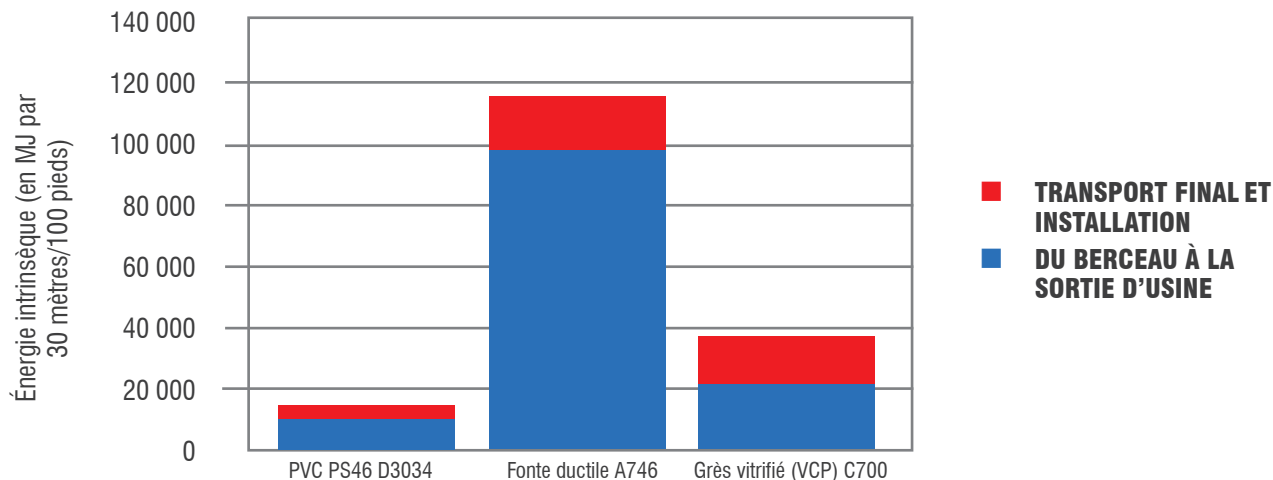
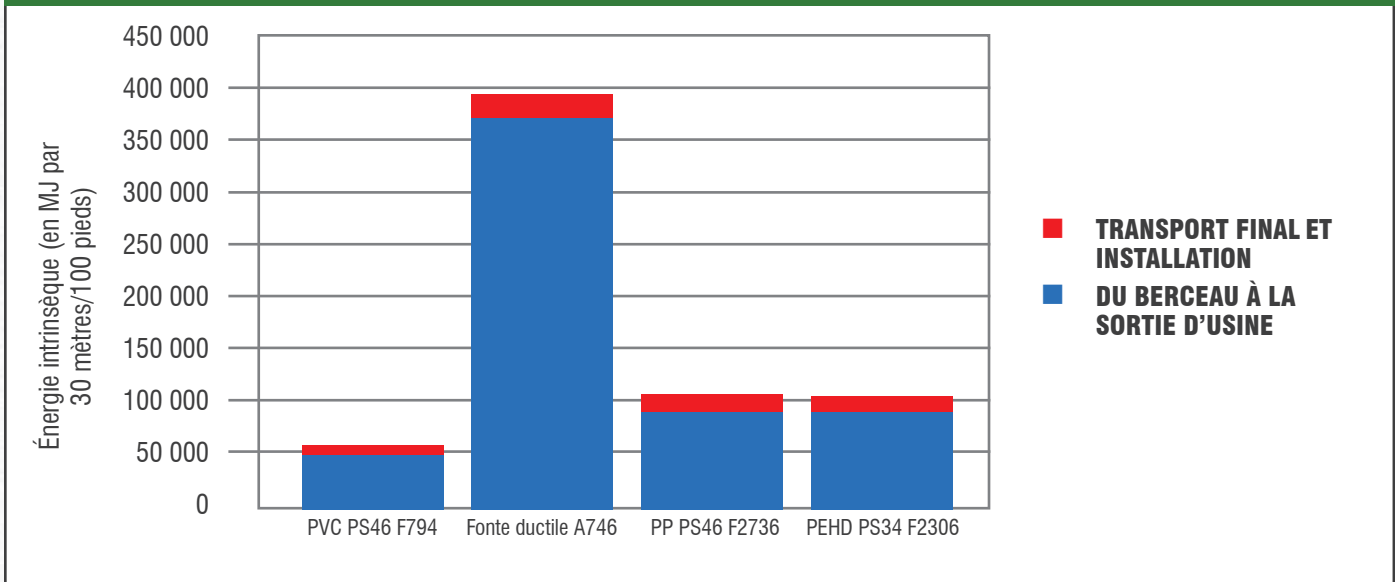


FIGURE 12.7: ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS PS46 F794 À PAROI NERVURÉE DE 600 MM (24 POUÇES)


La figure 12.7 compare des tuyaux de 600 mm (24 pouces) équivalents en PVC à paroi nervurée, en fonte ductile, en PP et en PEHD avec des tuyaux en PVC à paroi pleine PS46 D3034. L'énergie intrinsèque totale de tuyaux d'égout en PVC sur une durée de 100 ans est inférieure de 85 % à celle de tuyaux d'égout en fonte ductile équivalents, inférieure de 44 % à celle de tuyaux en PP et inférieure de 43 % à celle de tuyaux en PEHD. Il convient de noter que les tuyaux d'égout en PEHD ont une rigidité de tuyau inférieure de 26 % à celle de tuyaux en PVC.

La figure 12.8 compare des tuyaux à écoulement par gravité de 600 mm (24 pouces) en PVC à paroi pleine, fonte ductile, grès vitrifié (VCP) et béton non armé (NRCP) équivalents avec des tuyaux à paroi pleine en PVC PS46 F679. L'énergie intrinsèque totale de tuyaux d'égout en PVC sur une durée de 100 ans est inférieure de plus de 73 % à celle de tuyaux d'égout en fonte ductile équivalents et 44 % à celle de tuyaux en grès vitrifié (VCP).

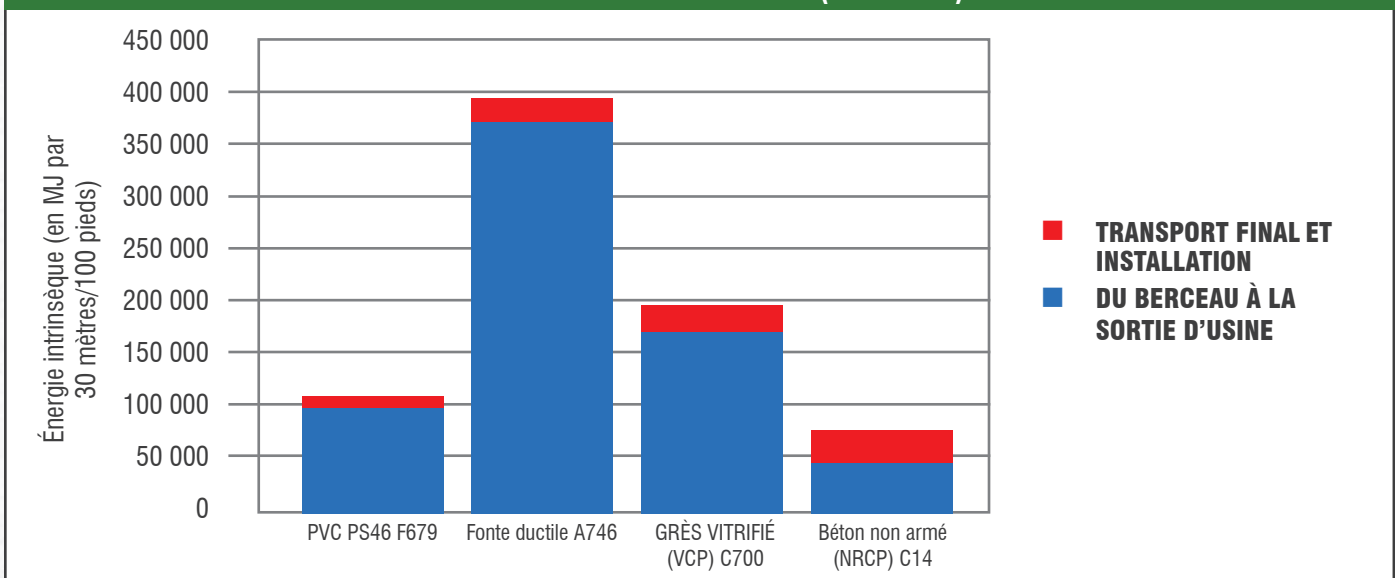
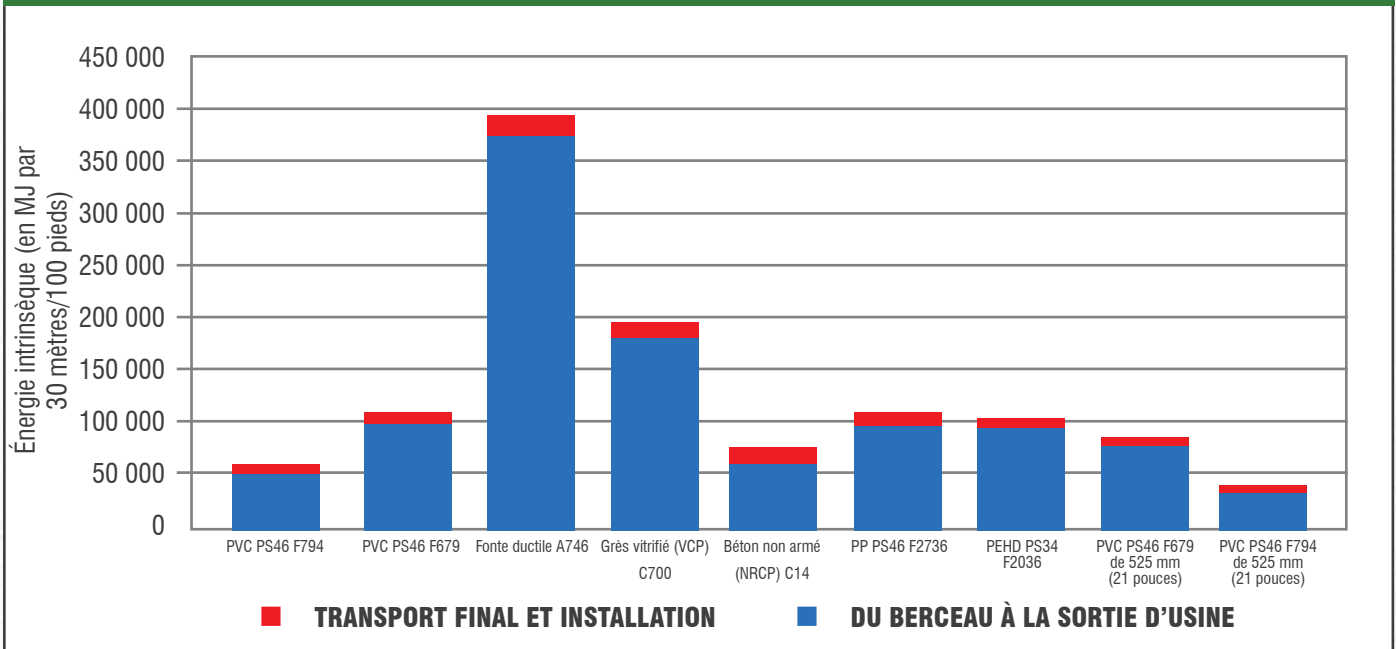
FIGURE 12.8: ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS PS46 F679 À PAROI PLEINE DE 600 MM (24 POUÇES)


FIGURE 12.9: ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS PS46 À PAROI PLEINE OU PAROI NERVURÉE DE 600 MM (24 POUÇES)



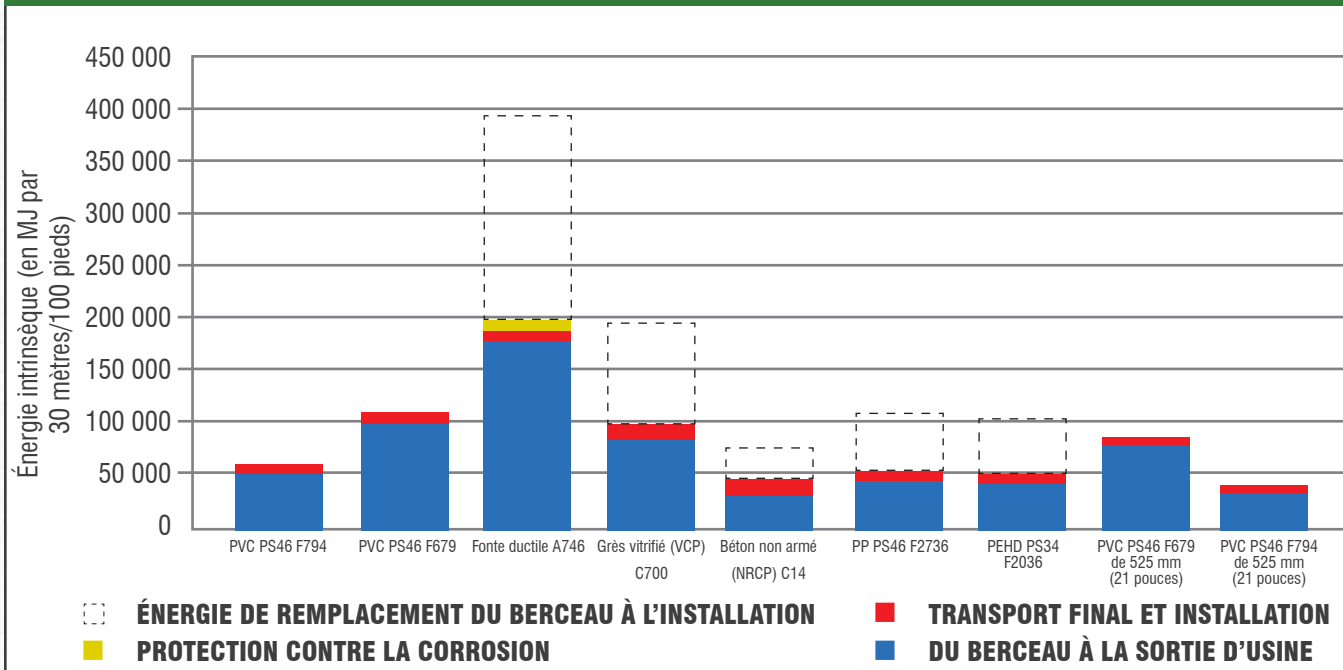
Les tuyaux en PVC ont une plus grande énergie intrinsèque que les tuyaux en béton non armé (NRCP), mais les tuyaux en NRCP sont très vulnérables à la détérioration causée par les gaz provenant des eaux usées. À cause de cette détérioration, les tuyaux en NRCP auront probablement besoin d'être remplacés deux fois ou plus au cours de la durée de vie prévue de 100 ans du système de canalisations. La corrosion de la paroi des tuyaux entraînerait également une augmentation des infiltrations et même éventuellement leur effondrement. Une augmentation des infiltrations accroît considérablement les besoins en énergie et les coûts d'un système d'assainissement. Non seulement l'effondrement d'un tuyau impliquerait des coûts importants pour sa réparation, mais il pourrait causer une contamination importante de l'environnement et mettre en danger la sécurité du public en détériorant les fondations d'immeubles ou de routes à proximité des conduites d'égout.

La figure 12.9 résume les valeurs d'énergie intrinsèque totale sur 100 ans de divers tuyaux de 600 mm (24 pouces) équivalents à paroi pleine et à paroi nervurée. Cette figure comprend également des tuyaux en PVC à paroi pleine et à paroi nervurée de 525 mm (21 pouces) dont il a été démontré qu'ils ont une capacité de débit équivalente aux tuyaux de 600 mm (24 pouces) en fonte ductile, en grès vitrifié (VCP),

béton non armé (NRCP), PP et PEHD du tableau A.8 de l'Annexe. Sur 100 ans de durée de vie opérationnelle, les tuyaux en PVC ont une énergie intrinsèque inférieure ou égale à celle de produits de tuyaux concurrents, à capacité de débit égale ou supérieure.



FIGURE 12.10: ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS PS46 À PAROI PLEINE OU PAROI NERVURÉE DE 600 MM (24 POUCES)



Afin d'être transparente, la figure 12.10 met en évidence les différences en termes d'énergie intrinsèque entre les tuyaux à écoulement par gravité de 600 mm (24 pouces) sans remplacement pendant une durée de vie de 100 ans. L'examen de la figure 12.10 révèle que les tuyaux de 600 mm (24 pouces) en fonte ductile, grès vitrifié (VCP), PP et PEHD ont des énergies intrinsèques de remplacement, sur 100 ans ou plus, que les tuyaux en PVC, même lorsque l'on ignore les énergies intrinsèques de remplacement.

La conception de canalisations à écoulement par gravité doit être fondée sur la capacité de débit, qui est une fonction du diamètre intérieur du tuyau et de sa rugosité. Les calculs montrent que, sur une pente équivalente, les tuyaux en PVC de 525 mm (21 pouces) ont une capacité supérieure ou égale à celle de tuyaux de 600 mm (24 pouces) d'autres matériaux. L'énergie intrinsèque totale, sur une durée de 100 ans, des tuyaux en PVC de 525 mm (21 pouces) offre un avantage encore plus grand par rapport aux tuyaux en autres matériaux.

Il n'est pas réaliste d'envisager l'utilisation de tuyaux en autres matériaux sans prévoir au moins un remplacement au cours du cycle de vie de 100 ans. Des problèmes de fuites, de corrosion, de fragilité ou de fluage peuvent limiter la faisabilité économique de l'exploitation de ces canalisations au-delà d'un certain point. La vulnérabilité des tuyaux en fonte ductile et en béton non armé (NRCP) à la corrosion interne et externe dans un environnement d'égout sanitaire nécessiterait plusieurs remplacements au cours d'une durée de vie prévue de 100 ans. Les problèmes de friabilité et de joints qui

affectent les tuyaux en grès vitrifié (VCP) et les problèmes de fluage et de flexion qui affectent les tuyaux en PP et PEHD limitent la durée de vie de ces produits, ce qui nécessite au moins un remplacement au cours de la durée de vie de 100 ans. Un facteur important qui n'était pas inclus dans les valeurs de l'énergie intrinsèque de remplacement indiquées sur la figure 12.10 est l'énergie intrinsèque associée à la remise en état des surfaces, la réfection des routes, les matériaux de pavage et les problèmes de circulation causés par la reconstruction. Ces facteurs peuvent facilement doubler les valeurs de l'énergie intrinsèque des remplacements. Le PVC ayant une durée de vie opérationnelle de plus de 100 ans présenterait un avantage encore plus grand si les valeurs de l'énergie intrinsèque des remplacements supplémentaires étaient ignorées.

Le présent rapport démontre les avantages en termes d'énergie intrinsèque et de durabilité des systèmes de tuyaux sous pression et à écoulement par gravité en PVC. Les services publics de distribution et d'assainissement qui tiennent compte de la durabilité, d'impact total de l'énergie intrinsèque et des effets des gaz à effet de serre sur l'environnement devraient sélectionner des tuyaux en PVC pour leurs nouveaux projets et leurs projets de remplacement. Le PVC devrait également être le choix évident pour les projets pour lesquels les services publics de distribution et d'assainissement considèrent l'ensemble du cycle de vie et les impacts environnementaux et économiques pour les matériaux de tuyaux.

13.0

CONCLUSIONS

Les concepteurs, les acheteurs et les opérateurs de systèmes d'eau qui sont responsables pour la réduction des coûts opérationnels et des impacts environnementaux doivent examiner les résultats vérifiés de manière indépendante de l'ACV et des EPD comme des critères objectifs de performance environnementale.

13.1 Résumé des constatations et conclusions de l'ACV

Les principales constatations et conclusions de l'Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité des matériaux de tuyaux sont récapitulées ci-dessous :

- ▶ Les tuyaux en PVC offrent l'empreinte carbone la plus faible parmi la plupart des produits de tuyaux pour canalisations sous pression et à écoulement par gravité.
- ▶ Les tuyaux en PVC n'émettent et ne lixivient pas de substances toxiques au cours de leur fabrication ou pendant le transport de l'eau.
- ▶ Les tuyaux en PVC ne se corrodent pas, intérieurement ou extérieurement, et ne nécessitent pas d'additifs chimiques pour inhiber la corrosion.
- ▶ Les tuyaux sous pression en PVC offrent des économies d'énergie de pompage à long terme, en raison de leur résistance à la corrosion, de leurs parois lisses et de leur section de flux de transport élevée.
- ▶ Les tuyaux à écoulement par gravité en PVC ont une plus grande capacité que ceux fabriqués avec d'autres matériaux en raison de leurs parois lisses, de leur résistance à l'abrasion, de leur résistance à l'infiltration et de l'absence de corrosion.
- ▶ Les tuyaux en PVC ont une durée de vie opérationnelle de plus de 100 ans, comme vérifié par de nombreuses études et excavations.
- ▶ Les tuyaux à écoulement par gravité en PVC ont l'énergie intrinsèque la plus faible sur une durée de vie de 100 ans et ne nécessitent pas de remplacement, ne présentent pas d'infiltrations et ne nécessitent pas de protection contre la corrosion, contrairement à d'autres matériaux.
- ▶ Les tuyaux sous pression en PVC ont l'énergie intrinsèque la plus faible sur une durée de vie de 100 ans et ne nécessitent pas de remplacement, utilisent moins d'énergie pour le pompage, présentent des ruptures de canalisations moins fréquentes et ne nécessitent pas de protection contre la corrosion, contrairement à d'autres matériaux.
- ▶ Les tuyaux en PVC offrent une empreinte carbone réduite pour les systèmes de distribution d'eau, en raison de leur faible énergie intrinsèque et de leur besoin moindre en énergie de pompage.
- ▶ Les tuyaux sous pression en PVC offrent les coûts de pompage annuels et sur toute la durée du cycle de vie les plus bas, parmi tous les matériaux de tuyaux.

- ▶ Les tuyaux sous pression en PVC et les tuyaux à écoulement par gravité en PVC offrent les coûts sur toute la durée du cycle de vie les plus bas, en raison de leurs faibles coûts d'installation et d'exploitation et parce qu'ils ne nécessitent pas de capital supplémentaire pour leur remplacement.
- ▶ Les tuyaux en PVC sont entièrement recyclables, mais leur durabilité ne leur a pas jusqu'alors vraiment permis d'entrer dans le cycle commercial de recyclage.
- ▶ Les tuyaux à écoulement par gravité en PVC de diamètre plus petit peuvent souvent servir à transporter un flux de liquide équivalent à celui de produits de tuyaux concurrents de plus grande taille. L'utilisation de tuyaux de diamètre plus petit permet d'utiliser moins de matériau et de réduire l'impact environnemental sur la durée totale du cycle de vie.

La plus grande partie de l'impact environnemental provient des phases d'extraction et de traitement des matières premières nécessaires à la fabrication de la résine de PVC et de la phase d'installation des tuyaux dans le sol. Les usines de fabrication de tuyaux en PVC ont un impact environnemental relativement faible. Les ingrédients d'alimentation de la fabrication de résine de PVC sont responsables de la majorité de l'impact environnemental et de l'utilisation de ressources, même si les additifs ont également un impact significatif. Au cours de la phase d'installation, c'est le carburant consommé par les pelles rétrocaveuses qui a l'impact le plus important.¹⁵⁰ L'utilisation de pelles rétrocaveuses est commune à toutes les opérations d'installation de tuyaux, quel que soit le matériau des tuyaux.

Au cours de la phase d'exploitation des canalisations sous pression, les pompes doivent surmonter la friction et la hauteur manométrique pour déplacer l'eau à travers les tuyaux, ce qui contribue généralement à la plus grande partie de l'impact environnemental sur la durée totale du cycle de vie des tuyaux de transport d'eau potable en PVC. La présente étude a démontré qu'au cours de la phase d'utilisation, comparativement à d'autres matériaux de tuyaux, les propriétés du PVC permettent de réduire la consommation énergétique due aux frottements, et donc l'impact environnemental associé. Après la phase d'utilisation, la phase du berceau à la sortie d'usine est, pour les tuyaux d'eaux pluviales et d'égout à écoulement par gravité, généralement la deuxième source d'impacts sur l'environnement.

Les résultats de la présente étude ont montré que les tuyaux en PVC fournissent un environnement concurrentiel et un avantage économique pour une variété de projets d'infrastructures d'eau potable et d'égouts, y compris des avantages de coûts sur la durée totale du cycle de vie et la possibilité de réduire considérablement les émissions de GES par rapport à d'autres matériaux de tuyaux. Les tuyaux en PVC sont d'un coût abordable et, grâce à leur durabilité, leur faible taux de rupture, leur résistance à la corrosion et leurs excellentes performances à long terme, ils permettent aux collectivités d'atteindre leurs objectifs en matière d'infrastructures durables.

ANNEXE

Cette annexe décrit les méthodes de calcul utilisées dans tout le rapport. Des données et des informations supplémentaires sur la corrosion et la qualité de l'eau sont également fournies. Les caractéristiques des tuyaux sélectionnés et utilisés dans la présente étude sont décrites, notamment leurs dimensions, leur poids, leurs paramètres hydrauliques et leur énergie intrinsèque.

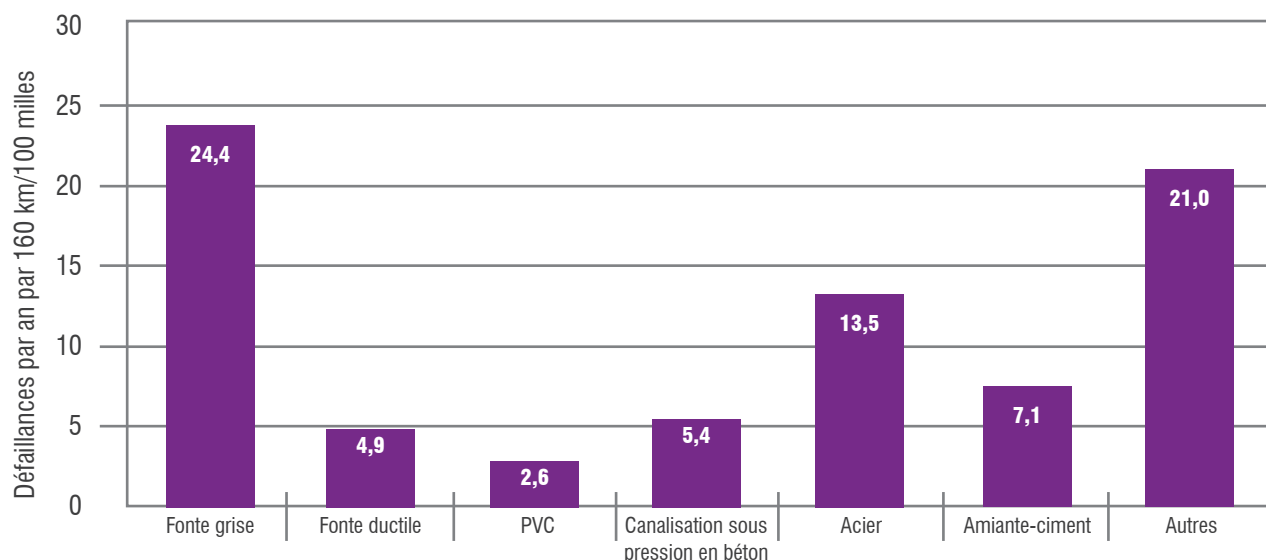
TUYAUX SOUS PRESSION

► Ruptures de canalisations

Les ruptures de canalisations sont une source de gaspillage, peuvent être dangereuses et sont coûteuses à réparer. Les tuyaux en PVC utilisés dans la distribution de l'eau ont des taux de rupture considérablement plus faibles que d'autres matériaux. Une étude montre qu'aux États-Unis, les tuyaux en PVC ont un taux moyen de ruptures de 2,6 par 160 km (100 milles) par an, contre 24,4 ruptures pour les tuyaux en fonte grise et 4,9 ruptures pour les tuyaux en fonte ductile, comme indiqué à la figure A.1.¹⁵¹ La même étude montre que, au Canada, les

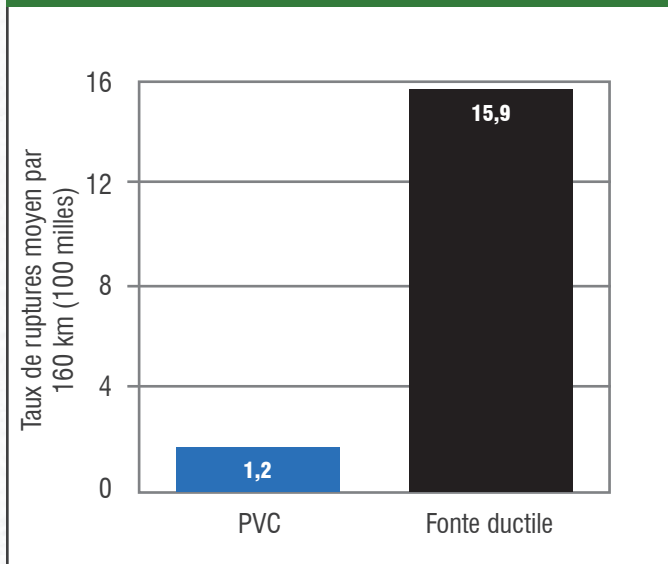
valeurs comparables sont de 0,7 rupture par 160 km (100 milles) par an pour les tuyaux en PVC, 35 pour les tuyaux en fonte grise et 15,2 pour les tuyaux en fonte ductile. Une étude par le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) a montré que le taux de rupture historique par 160 km (100 milles) des tuyaux en fonte ductile était de 15,87. Dans le même temps, les tuyaux en PVC ont un taux de rupture de 1,17 par 160 km (100 milles). Le rapport montre également que les tuyaux en fonte ductile ont un taux de rupture 13,57 fois plus élevé que les tuyaux en PVC. Cette différence dans les taux de rupture entraîne des différences importantes dans les coûts de réparation entre les canalisations en PVC et celles en fonte ductile, comme indiqué à la figure A.2. Des recherches subséquentes, réalisées en 1992, ont confirmé des taux de ruptures de 14,9 par 160 km (100 milles) pour les tuyaux en fonte ductile et de seulement 1,45 pour les tuyaux en PVC. En 1993, des données supplémentaires ont indiqué que les tuyaux en fonte ductile avaient des taux de ruptures de 15,7 par 160 km (100 milles), tandis que les tuyaux en PVC avaient des taux de ruptures de 0,8 rupture par 160 km (100 milles).¹⁵²

FIGURE A.1 : TAUX DE DÉFAILLANCE DES DIVERS MATÉRIAUX DE TUYAUX PAR 160 KM (100 MILLES) SUR UNE PÉRIODE DE 1 AN



Source : Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study." Utah State University Buried Structures Laboratory. Avril 2012.

FIGURE A.2 : TAUX DE RUPTURE DES TUYAUX EN PVC ET EN FONTE DUCTILE SELON NRC CANADA



Une enquête menée par le Laboratoire des structures enterrées de l'Université d'État de l'Utah a constaté que :¹⁵³

- ▷ L'âge moyen d'une canalisation défectueuse aux États-Unis et au Canada est de 47 ans.
- ▷ La cause de la défaillance des canalisations dépend du matériau des tuyaux.
- ▷ La corrosion ne provoque pas de défaillance des tuyaux en PVC.
- ▷ Les défaillances des tuyaux en PVC diminuent avec le temps.
- ▷ Les défaillances des tuyaux en fonte ductile augmentent avec le temps, en raison de la corrosion.

« Les taux de défaillance sont influencés par divers facteurs comme les conditions du sol, la profondeur d'installation, les charges internes (la pression de fonctionnement et les surpressions), les charges externes (le trafic et le gel), les changements de température et les conditions d'assise. »¹⁵⁴ Les tuyaux en PVC ont le plus faible taux de défaillance de l'industrie aux États-Unis et au Canada.¹⁵⁵

Les défaillances des tuyaux en fonte sont dues principalement à la corrosion. Selon une étude de l'AWWA Water Research Foundation de 2011, les tuyaux en fonte ductile avec des parois fines (représentant la majorité des canalisations en métal vendues), placés dans des sols moyennement corrosifs, ont une espérance de vie de seulement 11 à 14 ans.¹⁵⁶ « D'une part les sols corrosifs affectant 75 % de tous les services publics de l'eau aux États-Unis, et d'autre part l'épaisseur des parois des tuyaux en fonte ductile ayant considérablement réduit au cours des cent dernières années, la longévité des tuyaux en fonte ductile a chuté. »¹⁵⁷ L'AWWA Research Foundation confirme que la durée de vie opérationnelle des canalisations d'eau en PVC est

supérieure à 110 ans, tandis qu'une étude originale d'Europe estime la longévité des tuyaux en PVC à 170 ans.^{158 159} Par ailleurs, une nouvelle étude menée par le Laboratoire des structures enterrées de l'Université d'État de l'Utah confirme que les tuyaux en PVC sont durables et ont une durée de vie opérationnelle de plus de 100 ans.¹⁶⁰

► Perte d'eau dans les canalisations sous pression

L'existence de pertes d'eau dans les canalisations sous pression est connue depuis très longtemps et est prise en compte dans les réseaux de distribution d'eau. Les canalisations sujettes à la corrosion présentent des fuites en raison de tuyaux rongés et de joints qui fuient, ce qui crée des pertes d'eau non mesurées et entraîne des tranchées saturées d'eau. Dans le passé, des réparations n'étaient entreprises que lorsque les fuites étaient suffisamment graves pour créer un ruissellement sous pression au-dessus de la surface du sol ou causer une détérioration du revêtement de la chaussée. Malheureusement, il existe peu de documentation des taux historiques de fuite des tuyaux, qui les catégorisent en fonction des divers matériaux utilisés dans les systèmes de distribution d'eau. Il existe, cependant, une documentation des taux de défaillance des tuyaux en fonction des divers matériaux utilisés. L'étude *Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study* a été utilisée pour déterminer les volumes de pertes par 30 mètres (100 pieds) de canalisation dues aux tuyaux rompus.¹⁶¹ En se basant les taux de ruptures de canalisations par 160 km (100 milles) par an déterminés dans l'étude, la perte d'eau par 30 mètres (100 pieds) de canalisation a été calculée en faisant l'hypothèse d'un délai de 240 minutes avant l'isolement de la canalisation et d'un débit à peu près équivalent à une vitesse d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s). Le volume annuel de pertes dues à des ruptures de canalisations pour chaque matériau de tuyau a ensuite été converti en énergie intrinsèque sur une durée de vie de 100 ans en utilisant la valeur de 376 Wh/m³ (1 410 kWh/million de gallons) déterminée par l'étude, *Embodied Energy of Lost Water: Evaluating the Energy Efficiency of Infrastructure Investments*.¹⁶²

Les pertes d'eau liées à des ruptures de canalisations ont été prises en considération dans la présente étude pour les calculs de l'énergie intrinsèque des tuyaux sous pression. Les ruptures de canalisations peuvent présenter de grandes variations dans le volume des pertes d'eau en raison de variations dans la taille des ruptures et dans les délais entre la découverte des ruptures et l'isolement des canalisations. Bien qu'il existe de nombreuses variables à prendre en compte en ce qui concerne les fuites et les ruptures, aux fins de la présente étude, l'hypothèse a été faite que le débit d'écoulement était le même pour tous les types de tuyaux au sein d'une catégorie de pression, en se basant sur une vitesse d'écoulement pour les tuyaux en PVC de 0,6 m/s (2 pi/s). Comme énoncé précédemment, toutes les données concernant les taux de rupture de canalisations utilisées pour calculer la perte d'eau sont présentées sur la figure A.1. Les taux de rupture de canalisations utilisés dans la présente étude pour les tuyaux en fonte ductile sont conservateurs, comme illustré dans le tableau A.1 qui montre que d'autres études attribuent des taux de rupture beaucoup plus élevés pour les tuyaux en fonte ductile.^{163 164 165} Le tableau A.2 présente les données, les calculs et les résultats de l'énergie intrinsèque sur une durée de vie de 100 ans pour divers matériaux de tuyaux.

TABLEAU A.1 : ÉTUDES/ENQUÊTES SUR LES TAUX DE RUPTURE ET DE DÉFAILLANCE DE CANALISATIONS

Étude	Année	Méthodologie	Taux de défaillance			Limitations
			Tuyau en fonte grise	Tuyau en fonte ductile	Tuyau en PVC	
Rajani et McDonald	1992	21 réponses à une enquête menée au Canada	56,2	14,9	1,44	Diamètre, taille, âge des tuyaux, taux de défaillance pour chaque service public, analyse de régression des défaillances non fournis
	1993		58,7	15,7	0,8	
Folkman	2012	188 réponses à une enquête menée aux États-Unis et au Canada	24,4	4,9	2,6	Diamètre inférieur à 600 mm (24 pouces), taux de défaillance pour chaque service public non fournis
CUIRE	2012	21 réponses à une enquête menée aux États-Unis	49,3	9,5	S.O. *	Diamètre supérieur à 600 mm (24 pouces), taux de défaillance par année de service non fournis

* Le PVC n'a pas été inclus dans cette étude.



TABLEAU A.2 : VOLUME D'EAU PERDUE PAR AN ET ÉNERGIE INTRINSÈQUE DE L'EAU PERDUE SUR UNE PÉRIODE DE 100 ANS

Matériau des tuyaux	Taille/DR/PC du PVC	Débit (gal/min)	Durée d'écoulement de la rupture (min)	Taux de défaillance (nbre par an par 30 m/100 pieds)	Volume annuel des pertes (gallons par an par 30 m/100 pieds)	Énergie intrinsèque de l'eau traitée (kWh/Mgal)	Énergie intrinsèque des pertes d'eau sur 100 ans (kWh par 30 m/100 pieds)
PVC	200 mm (8 po)/18/235	312	240	0,000492	36,9	1 410	5,2
	600 mm (24 po)/25/165	2 730	240	0,000492	322,6	1 410	45,5
Fonte ductile	200 mm (8 po)/-/350	312	240	0,000928	69,5	1 410	9,8
	600 mm (24 po)/-/200	2 730	240	0,000928	608,0	1 410	85,7
PEHD	200 mm (8 po)/9,0/250	312	240	0,000492	36,9	1 410	5,2
	600 mm (24 po)/13,5/160	2 730	240	0,000492	322,6	1 410	45,5
PCCP	600 mm (24 po)/-/200	2 730	240	0,001023	670,0	1 410	94,5

► Canalisation sous pression : Calculs de l'énergie hydraulique

Pour effectuer les calculs concernant une infrastructure de canalisations souterraines sur une période de 100 ans, diverses hypothèses et méthodes ont été nécessaires. Les tableaux et figures ci-après reposent sur les hypothèses suivantes dans les calculs pour la comparaison des produits sous pression :

- ▷ Utiliser le diamètre intérieur moyen calculé pour chaque tuyau à comparer et calculer la section de flux de transport du tuyau.
- ▷ Calculer le débit pour le tuyau en PVC à comparer en se basant sur une vitesse d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s) dans le tuyau en PVC.
- ▷ En utilisant le débit d'écoulement calculé, déterminer la perte de charge dans le tuyau due aux frottements, exprimée en pieds par longueur de tuyau de 100 pieds, à l'aide de l'équation de Hazen-Williams, en basant le facteur C sur le taux annuel de détérioration du tuyau à comparer et en le réinitialisant lors des remplacements.
- ▷ Calculer la puissance hydraulique en fonction du débit et de la perte de charge.
- ▷ Déterminer la puissance nécessaire pour la pompe, en faisant l'hypothèse d'une efficacité de la pompe de 75 %.
- ▷ Calculer la puissance nécessaire pour le moteur, en faisant l'hypothèse d'une efficacité du moteur de 90 %.

- ▷ Calculer la puissance électrique nécessaire du moteur, en kilowatts.
- ▷ Calculer l'énergie électrique annuelle requise, en se basant sur le nombre total d'heures par année et la puissance requise (en kWh) par 30 m (100 pi) de longueur de tuyau.
- ▷ Calculer les coûts énergétiques annuels par 30 m (100 pi) de longueur de tuyau en utilisant l'hypothèse d'un coût de l'énergie initial de 0,07 \$/kWh, augmentant de 0,01 \$/kWh tous les 10 ans.
- ▷ Déterminer l'énergie totale nécessaire sur une durée d'utilisation de 100 ans, en ajoutant les besoins annuels en énergie.
- ▷ Déterminer le coût énergétique total sur une durée d'utilisation de 100 ans, en ajoutant les coûts énergétiques annuels.

Notez que des comparaisons ne peuvent pas être réalisées entre les catégories de pression des tuyaux en PVC parce que les débits sont basés sur le diamètre intérieur de chaque catégorie de pression spécifique des tuyaux. Le tableau A.3 présente l'énergie totale nécessaire et les coûts de pompage par 30 m (100 pieds), sur une durée d'utilisation de 100 ans, pour chaque tuyau. La figure A.3 présente graphiquement les résultats du calcul de l'énergie de pompage totale nécessaire, sur une durée d'utilisation de 100 ans, par 100 pieds de longueur de tuyau. La figure A.4 présente graphiquement les résultats du calcul des coûts de pompage, par 100 pieds de longueur de tuyau.

TABLEAU A.3 : CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE POMPAGE SUR 100 ANS, POUR 30 MÈTRES (100 PIEDS) DE TUYAU ET COÛT DE POMPAGE SUR 100 ANS, POUR 30 MÈTRES (100 PIEDS) DE TUYAU

Matériau des tuyaux	Taille et catégorie de pression de tuyaux comparables au PVC					
	235 psi / 200 mm (8 po)		165 psi / 200 mm (8 po)		165 psi / 600 mm (24 po)	
	kWh par 100 ans par 30 m/100 pieds	\$ par 100 ans par 30 m/100 pieds	kWh par 100 ans par 30 m/100 pieds	\$ par 100 ans par 30 m/100 pieds	kWh par 100 ans par 30 m/100 pieds	\$ par 100 ans par 30 m/100 pieds
PVC	12 700	1 500 \$	13 100	1 500 \$	31 500	3 600 \$
PEHD	25 400	2 900 \$	19 400	2 200 \$	46 800	5 400 \$
Fonte ductile	16 400	1 900 \$	20 200	2 300 \$	40 000	4 600 \$
PCCP	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	50 100	5 800 \$

Remarque : le tableau suppose le remplacement des tuyaux en PEHD après 50 ans, des tuyaux en fonte ductile après 50 ans et des tuyaux en béton précontraint (PCCP) après 75 ans.

FIGURE A.3 : CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE POMPAGE SUR 100 ANS, POUR 30 MÈTRES (100 PIEDS) DE TUYAU

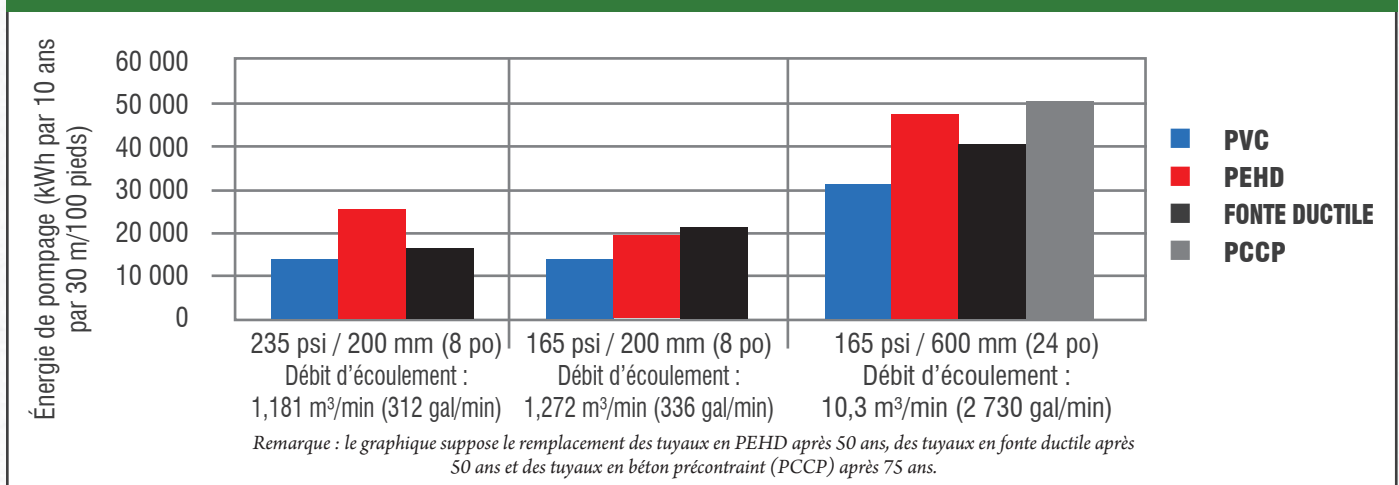
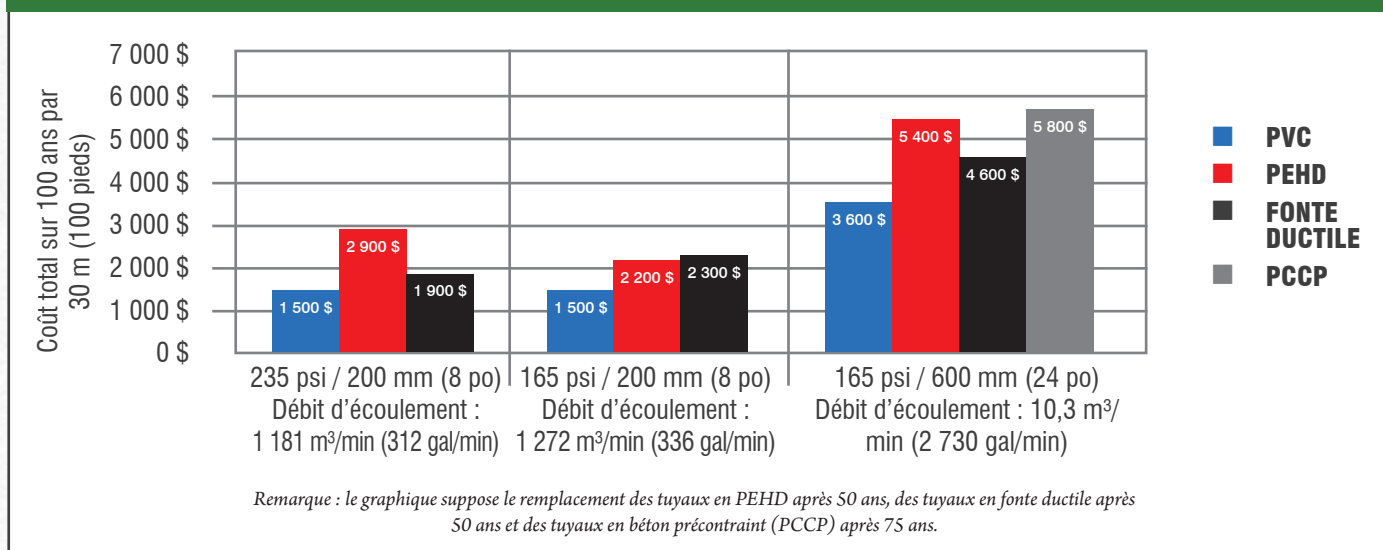


FIGURE A.4 : COÛT ÉNERGÉTIQUE DE POMPAGE SUR 100 ANS, POUR 30 MÈTRES (100 PIEDS) DE TUYAU



► Canalisation sous pression : Calcul de l'énergie intrinsèque totale

L'énergie de pompage sur la durée de vie prévue de 100 ans est une composante majeure de l'énergie intrinsèque totale d'une canalisation sous pression. Elle comprend l'énergie du berceau à la sortie d'usine, l'énergie de transport, l'énergie pour l'installation, l'énergie associée à toute protection éventuelle contre la corrosion, l'énergie de pompage sur toute la durée du cycle de vie, l'énergie requise pour le remplacement de la canalisation, le cas échéant, au cours du cycle de vie et l'énergie liée à l'eau perdue en raison de fuites et de réparations.

L'énergie requise par certaines phases du cycle de vie n'est pas facile à quantifier (par exemple, l'énergie nécessaire pour l'entretien et les réparations). Les énergies intrinsèques des tuyaux sous pression utilisés dans la comparaison sont basées sur la taille et la catégorie de pression des tuyaux. Les énergies intrinsèques totales, sur une durée de 100 ans, associées aux tuyaux sous pression utilisés dans la comparaison présentée dans la présente étude, sont résumées dans les tableaux A.4, A.5 et A.6. Les figures A.5, A.6 et A.7 illustrent les énergies intrinsèques totales, sur une durée de 100 ans, associées aux tuyaux sous pression.

TABLEAU A.4 : COMPARAISON DE L'ÉNERGIE INTRINSÈQUE SUR 100 ANS (EN MJ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS) DES TUYAUX EN PVC DR18 PC235 C900 DE 200 MM (8 POUCHES)

Activité d'un cycle de vie utile de 100 ans	Comparaison avec le PVC DR18 de 200 mm (8 pouces)		
	PVC DR18 PC235	PEHD 4710 DR9 PC250	Fonte ductile CL51 PC350
Du berceau à la sortie d'usine	23 300	42 600	50 900
Transport final et installation	4 100	4 700	5 300
Protection contre la corrosion	S.O.	S.O.	3 300
Totale du berceau à l'installation	27 400	47 300	59 500
Remplacement	S.O.	47 300	59 500
Énergie hydraulique sur 100 ans	45 700	91 400	59 000
Pertes d'eau sur 100 ans	19	19	35
Énergie intrinsèque totale pendant un cycle de vie de 100 ans	73 100	186 000	178 000

FIGURE A.5 : TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR18 DE 200 MM (8 POUCES) : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS

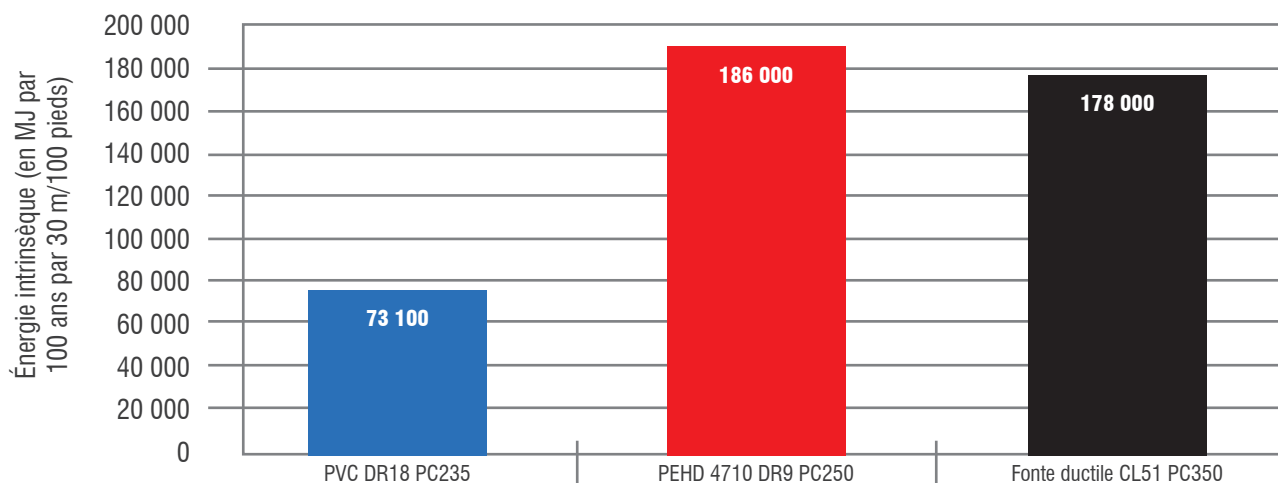


TABLEAU A.5 : COMPARAISON DE L'ÉNERGIE INTRINSÈQUE SUR 100 ANS (EN MJ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS) DES TUYAUX EN PVC DR25 PC165 C900 DE 200 MM (8 POUCES)

Activité d'un cycle de vie utile de 100 ans	Comparaison avec le PVC DR25 de 200 mm (8 pouces)		
	PVC DR25 PC165	PEHD 4710 DR13.5 PC160	Fonte ductile CL51 PC350
Du berceau à la sortie d'usine	15 900	29 600	50 900
Transport final et installation	4 000	4 400	5 300
Protection contre la corrosion	S.O.	S.O.	3 300
Totale du berceau à l'installation	19 900	34 000	59 500
Remplacement	S.O.	34 000	59 500
Énergie hydraulique sur 100 ans	47 000	70 000	72 700
Pertes d'eau sur 100 ans	19	19	35
Énergie intrinsèque totale pendant un cycle de vie de 100 ans	66 900	138 000	191 700

FIGURE A.6 : TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR25 DE 200 MM (8 POUCES) : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS

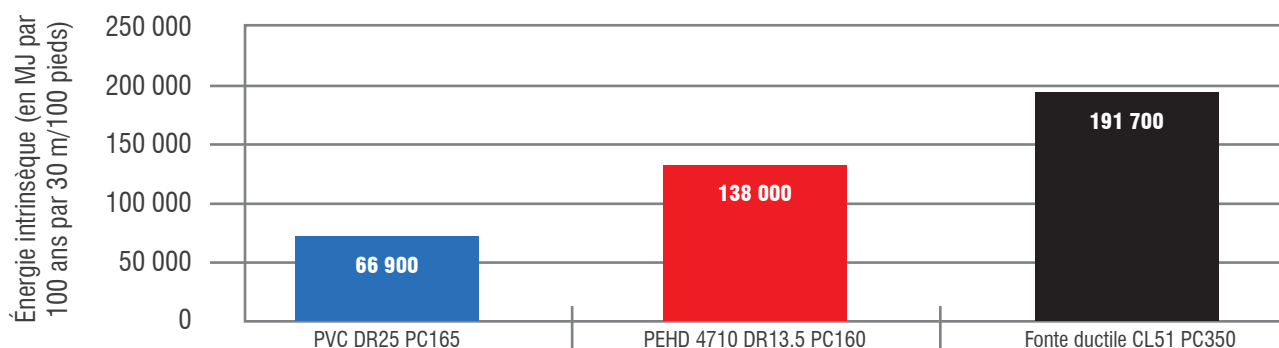
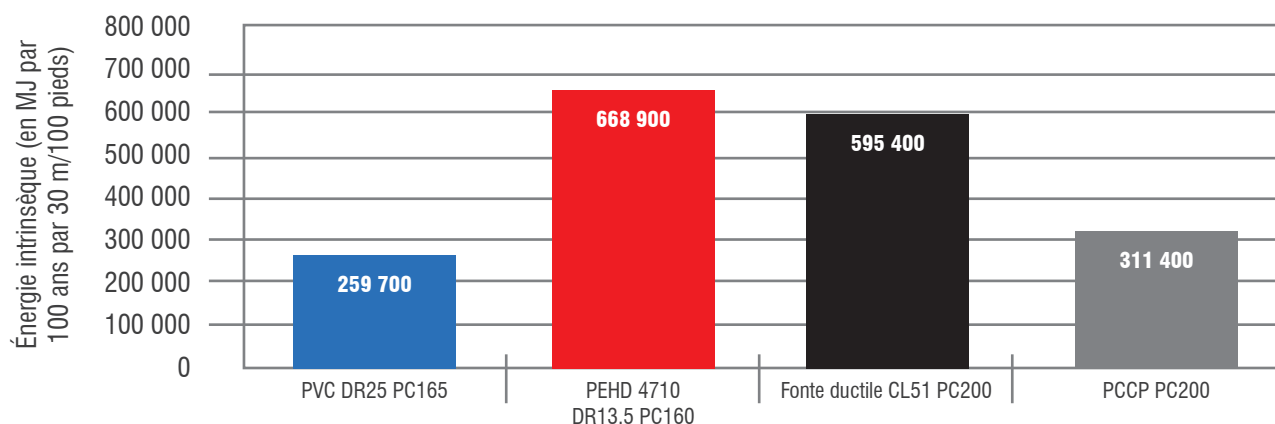


TABLEAU A.6 : COMPARAISON DE L'ÉNERGIE INTRINSÈQUE SUR 100 ANS (EN MJ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS) DES TUYAUX EN PVC DR25 PC165 C905 DE 600 MM (24 POUÇES)

Activité d'un cycle de vie utile de 100 ans	Comparaison avec le PVC DR25 de 600 mm (24 pouces)			
	PVC DR25 PC165	PEHD 4710 DR13.5 PC160	Fonte ductile CL51 PC200	PCCP PC200
Du berceau à la sortie d'usine	137 900	240 800	206 600	53 500
Transport final et installation	8 300	9 300	10 000	11 900
Protection contre la corrosion	S.O.	S.O.	8 900	S.O.
Totale du berceau à l'installation	146 200	250 100	225 500	65 400
Remplacement	S.O.	250 100	225 500	65 400
Énergie hydraulique sur 100 ans	113 300	168 500	144 100	180 300
Pertes d'eau sur 100 ans	160	160	310	340
Énergie intrinsèque totale pendant un cycle de vie de 100 ans	259 700	668 900	595 400	311 400

**FIGURE A.7 : TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR25 DE 600 MM (24 POUÇES) : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS**

TUYAU À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ

La capacité d'un tuyau à écoulement par gravité est déterminée par son débit d'écoulement, pour un diamètre donné, pour une pente donnée. Les comparaisons de capacité pour les tuyaux à écoulement par gravité ont été fondées sur la pente nécessaire pour atteindre une vitesse d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s). Pour chaque type de tuyau à écoulement par gravité, la pente utilisée pour la comparaison a été fixée de manière à obtenir une vitesse minimum d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s). Le tuyau présentant les moins bonnes caractéristiques d'écoulement, en d'autres termes le tuyau qui exige la pente la plus élevée pour atteindre une vitesse minimum d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s), a été utilisé comme base de comparaison pour tous les autres tuyaux à écoulement par gravité, pour chaque type de tuyau. Avec ses parois intérieures lisses, le tuyau en PVC a toujours présenté la plus grande capacité de débit d'écoulement, parmi tous les types de tuyaux, avec la pente déterminée. Dans certains cas, des tuyaux d'égout en PVC de plus petit diamètre ont présenté des débits d'écoulement similaires ou même supérieurs à ceux de produits concurrents de plus grand diamètre, ce qui permettrait de réaliser des économies en énergie intrinsèque et en coûts.

Les spécifications pour la conception de systèmes de canalisation à écoulement par gravité reposent souvent sur des tuyaux moins efficaces pour définir les valeurs minimales des coefficients de débit et de pente. Ceci a pour effet de réduire les avantages présentés par des matériaux plus performants, comme les tuyaux en PVC. Ces normes de conception moins efficaces, qui incluent des coefficients de Manning-Strickler plus élevés et des pentes minimales requises plus élevées, entraînent une des tuyaux de taille plus grande que nécessaire et augmentent inutilement les coûts des projets d'infrastructures souterraines.

► Calcul de l'énergie intrinsèque totale de tuyaux à écoulement par gravité

Le calcul de l'énergie intrinsèque totale sur 100 ans pour les tuyaux à écoulement par gravité comprend :

- ▷ Énergie du berceau à la sortie d'usine pour la fabrication des tuyaux
- ▷ Énergie de transport et d'installation
- ▷ Énergie associée à la protection des canalisations contre la corrosion
- ▷ Énergie si un remplacement est nécessaire pendant la durée du cycle de vie

Les valeurs de l'énergie intrinsèque totale sur 100 ans pour les tuyaux à écoulement par gravité utilisés dans la présente étude sont indiquées dans le tableau A.7 et montrées sur les figures A.8 et A.9.

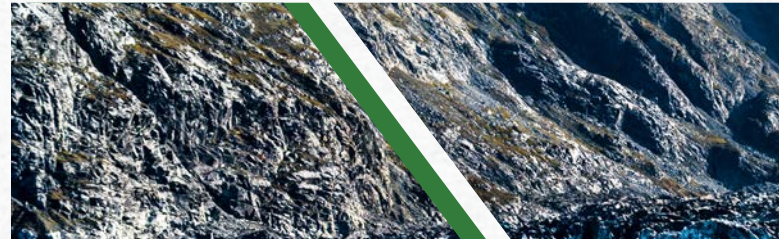


TABLEAU A.7 : COMPARAISON DE L'ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE DE TUYAUX SOUS PRESSION ET À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ SUR UNE DURÉE DE 100 ANS, Y COMPRIS LES REMPLACEMENTS DE TUYAUX

Taille et type de tuyau en PVC	Produits comparables	Norme	Énergie intrinsèque (en MJ par 30 mètres/100 pieds) sur une durée de 100 ans
PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 200 mm (8 pouces)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM F794	9 800
	Fonte ductile de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746	108 500
PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 600 mm (24 pouces)	PVC PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F794	57 400
	PP PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM 2736	102 900
	PEHD PS34 de 600 mm (24 pouces)	ASTM 2306	101 200
PVC PS46 SDR35 D3034 à paroi pleine de 200 mm (8 pouces)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM D3034	13 900
	Fonte ductile de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746	108 500
	Grès vitrifié (VCP) de 200 mm (8 pouces)	ASTM C700	38 400
PVC PS46 F679 à paroi pleine de 600 mm (24 pouces)	PVC PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F679	107 700
	Fonte ductile de 600 mm (24 pouces)	ASTM A746	376 000
	Grès vitrifié (VCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C700	193 800
	Béton non armé (NRCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C14	77 100
	PVC PS46 de 525 mm (21 pouces)	ASTM F679	83 100

Remarque : l'intérieur de toutes les canalisations d'égouts en fonte ductile doit être revêtu de mortier de ciment, conformément à la norme AWWA C104.

FIGURE A.8 : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE PRODUITS DE TUYAUX À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ DE 600 MM (24 POUÇES)

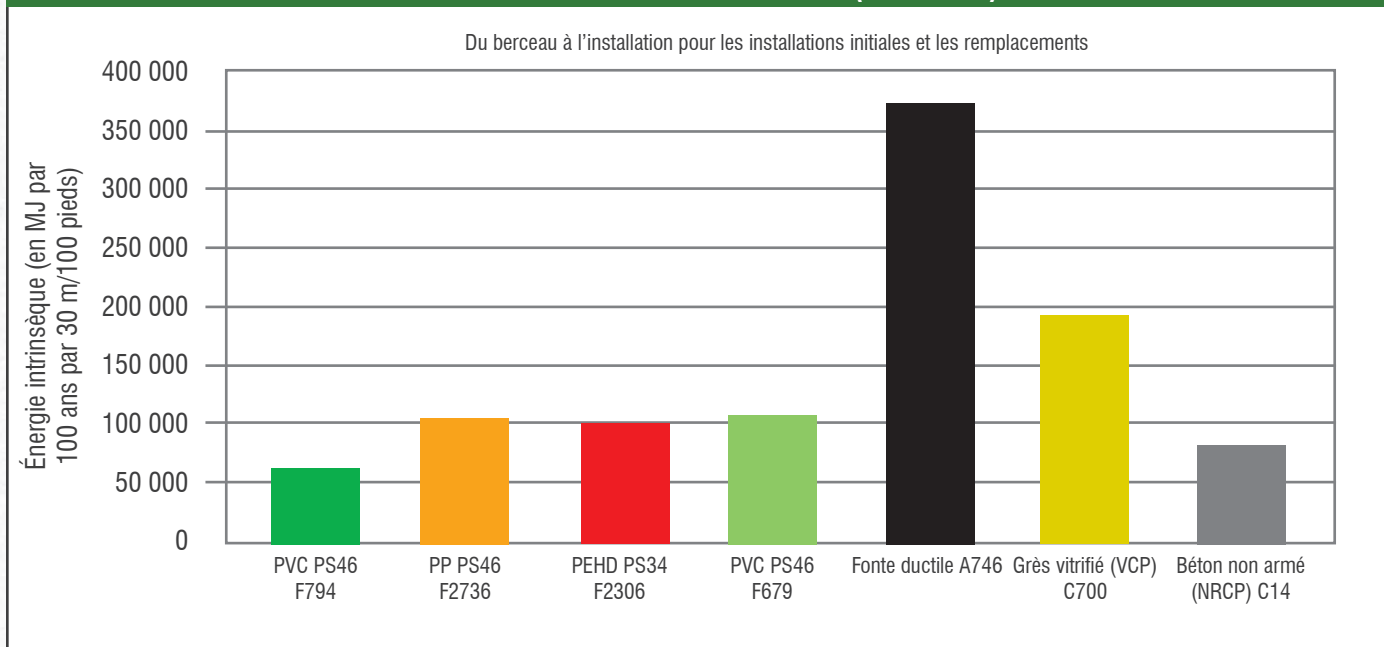
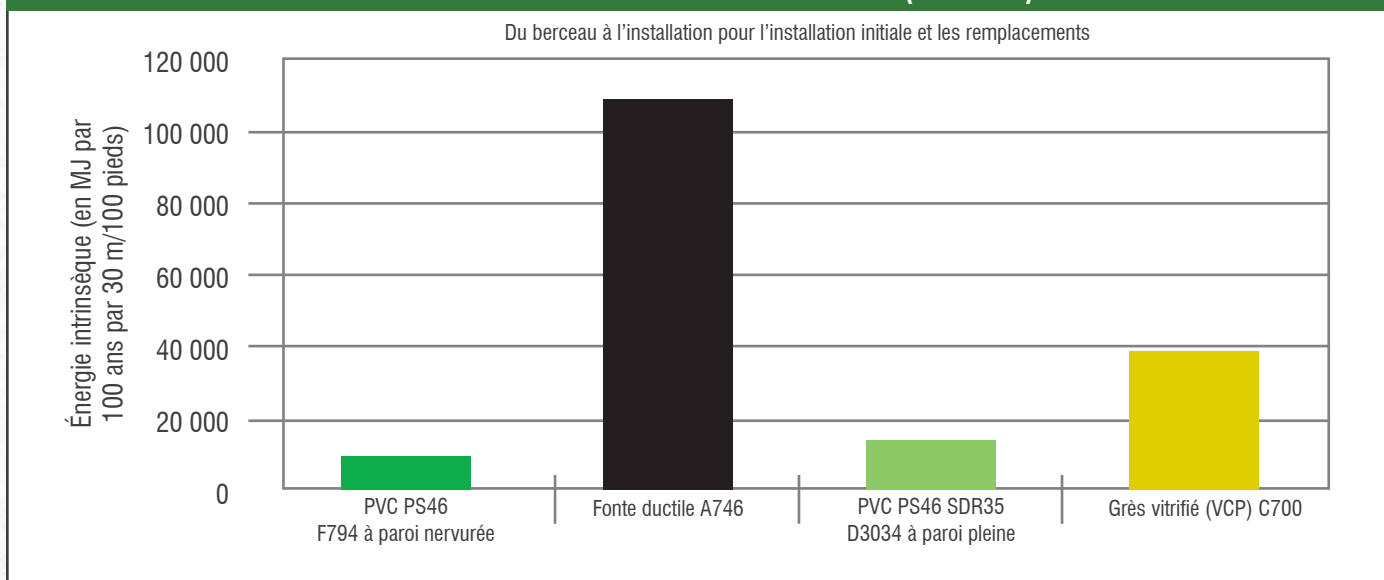


FIGURE A.9 : ÉNERGIE INTRINSÈQUE TOTALE SUR 100 ANS DE PRODUITS DE TUYAUX À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ DE 200 MM (8 POUÇES)



Les flux volumétriques des tuyaux utilisés pour la comparaison ont été calculés et comparés en utilisant la même pente que le tuyau requérant la pente la plus élevée pour atteindre une vitesse d'écoulement de 0,6 m/s (2 pi/s). En outre, pour les options de tuyaux de diamètre 600 mm (24 pouces), le tuyau en PVC de taille immédiatement inférieure a également été évalué.

Les capacités de flux d'écoulement des matériaux de tuyaux ont été examinées à l'aide de la procédure décrite ci-après. Les capacités basées sur la procédure sont indiquées dans le tableau A.8.

La figure A.10 montre que les tuyaux en PVC PS46 ASTM F794 à paroi nervurée de 200 mm (8 pouces) ont une plus grande capacité que les tuyaux en fonte ductile ASTM A746 de 200 mm (8 pouces). Le tuyau en fonte ductile de 200 mm (8 pouces) a une capacité presque 20 % moindre que les tuyaux à paroi nervurée en PVC de 200 mm (8 pouces), avec des pentes d'inclinaison identique.

La figure A.11 montre que les tuyaux en PVC ASTM F794 à paroi nervurée de 600 mm (24 pouces) ont une plus grande capacité d'écoulement que les produits de tuyaux compétiteurs à paroi nervurée PP ASTM F2736 de 600 mm (24 pouces) et PEHD ASTM F2306 de 600 mm (24 pouces). Les tuyaux en PP et PEHD ont une capacité respectivement 23 % et 21% moindre que les tuyaux à paroi nervurée en PVC de 600 mm (24 pouces), avec des pentes d'inclinaison identique. Dans le cadre de l'étude, de petits tuyaux en PVC ont été comparés aux produits de tuyaux compétiteurs de

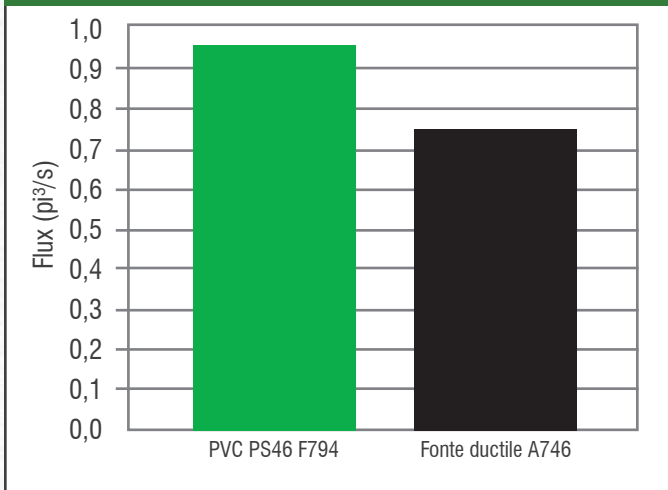
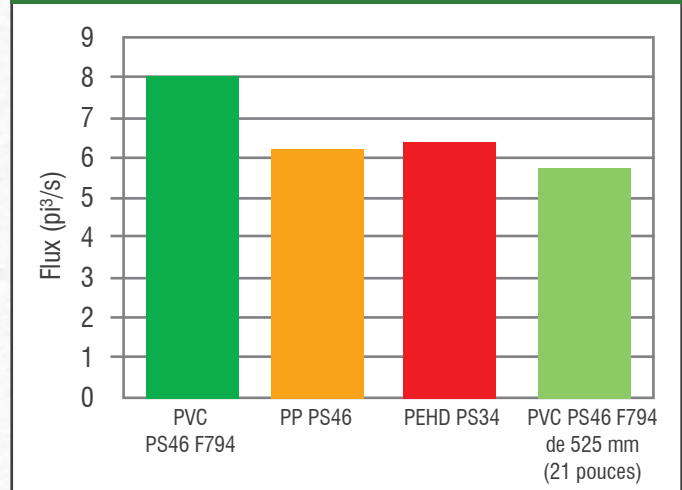
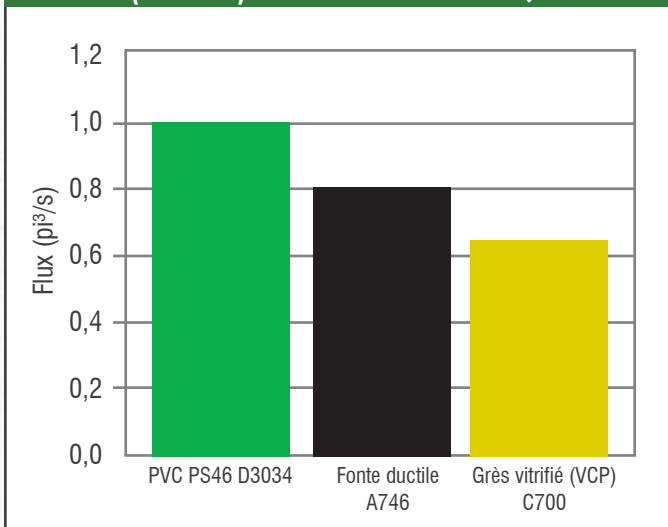
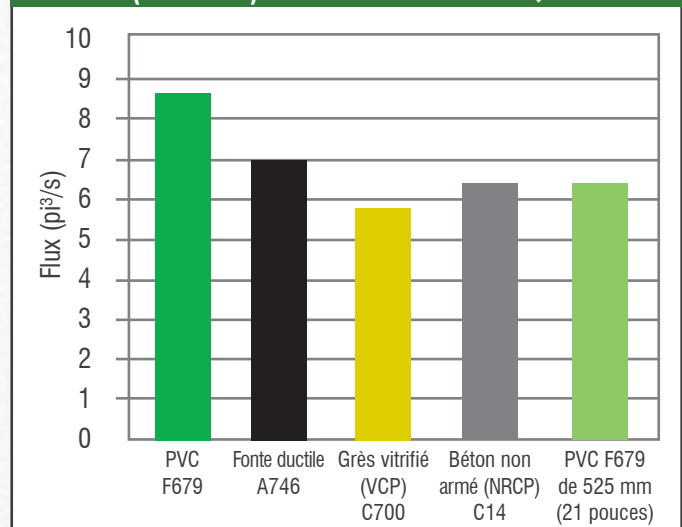
plus grande taille. Le tuyau à paroi nervurée en PVC de 525 mm (21 pouces) a une capacité légèrement inférieure à celle des tuyaux de PP et de PEHD, avec des pentes d'inclinaison identique. Dans les situations où le débit de conception est très proche de la capacité des produits en PP ou PEHD, un tuyau en PVC de taille plus petite pourrait satisfaire les exigences de débit tout en réalisant des économies en énergie intrinsèque et en coûts.

La figure A.12 montre la comparaison entre des produits de tuyaux à écoulement par gravité à paroi pleine de 200 mm (8 pouces). Comme le montre la figure A.12, et comme cela peut être calculé à partir du tableau A.8, les tuyaux à écoulement par gravité à paroi pleine de 200 mm (8 pouces) en PVC ASTM D3034 ont une capacité supérieure de 25 % que les tuyaux en fonte ductile de 200 mm (8 pouces), avec des pentes d'inclinaison identique. Le tuyau en PVC de 200 mm (8 pouces) a une capacité 56% supérieure à celle des tuyaux en grès vitrifié (VCP) de 200 mm (8 pouces), avec des pentes d'inclinaison identique. La taille de tuyau de 200 mm (8 pouces) est la taille minimum standard pour de nombreux systèmes d'égouts sanitaires dans tout le pays, parce qu'elle offre suffisamment d'espace pour les activités de nettoyage et d'entretien, tout en offrant une capacité suffisante pour la plupart des zones de développement résidentiel ou commercial. Dans les scénarios où le débit augmente en raison de la taille de la zone de collecte, la capacité de débit supérieure des tuyaux en PVC de 200 mm (8 pouces) peut être suffisante pour servir une zone de collecte plus grande, avant qu'il y ait un besoin d'augmenter le diamètre du tuyau pour satisfaire la capacité de débit supplémentaire.

TABLEAU A.8 : COMPARAISONS DU DÉBIT DANS LES TUYAUX À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ UTILISANT LA MÊME PENTE

Taille et type de paroi	Description du produit de tuyau	Norme	n	Pente (pi/pi)	Vitesse calculée (pi/s)	Flux calculé (pi³/s)	Diff. en Q (%)
Égout à paroi nervurée de 600 mm (24 po)	PVC PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F794	0,009	0,00067	2,6	7,98	0,0
	PP PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F2736	0,012	0,00067	2,0	6,17	-22,7
	PEHD PS34 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F2306	0,012	0,00067	2,0	6,32	-20,8
	PVC PS46 de 525 mm (21 pouces)	ASTM F794	0,009	0,00067	2,4	5,72	-28,3
Égout à paroi nervurée de 600 mm (24 po)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM F794	0,009	0,0032	2,8	0,94	0,0
	FONTE DUCTILE PC350 de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746	0,013	0,0032	2,0	0,76	-19,5
Égout à paroi pleine de 600 mm (24 po)	PVC PS46 SDR35 de 200 mm (8 pouces)	ASTM D3034	0,009	0,0035	2,9	1,00	0,0
	FONTE DUCTILE PC350 de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746	0,013	0,0035	2,1	0,80	-19,5
	Grès vitrifié (VCP) de 600 mm (8 pouces)	ASTM C700	0,013	0,0035	2,0	0,64	-35,4
Égout à paroi pleine de 600 mm (24 po)	PVC PS46 de 200 mm (24 pouces)	ASTM F679	0,009	0,00081	2,9	8,71	0,0
	FONTE DUCTILE PC250 de 600 mm (24 pouces)	ASTM A746	0,013	0,00081	2,1	7,01	-19,6
	Grès vitrifié (VCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C700	0,013	0,00081	2,0	5,80	-33,4
	Béton non armé (NRCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C14	0,013	0,00081	2,1	6,45	-25,9
	PVC PS46 de 525 mm (21 pouces)	ASTM F679	0,009	0,00081	2,7	6,36	-27,0

Remarque : l'intérieur de toutes les canalisations d'égouts en fonte ductile doit être revêtu de mortier de ciment, conformément à la norme AWWA C104.

FIGURE A.10 : COMPARAISON DES FLUX D'ÉCOULEMENT DANS DES TUYAUX À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ EN PVC À PAROI NERVURÉE DE 200 MM (8 POUCES) À ANGLES D'INCLINAISON ÉQUIVALENTS**FIGURE A.11 : COMPARAISON DES FLUX D'ÉCOULEMENT DANS DES TUYAUX À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ EN PVC À PAROI NERVURÉE DE 600 MM (24 POUCES) À ANGLES D'INCLINAISON ÉQUIVALENTS****FIGURE A.12 : COMPARAISON DES FLUX D'ÉCOULEMENT DANS DES TUYAUX À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ EN PVC À PAROI PLEINE DE 200 MM (8 POUCES) À ANGLES D'INCLINAISON ÉQUIVALENTS****FIGURE A.13 : COMPARAISON DES FLUX D'ÉCOULEMENT DANS DES TUYAUX À ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ EN PVC À PAROI PLEINE DE 200 MM (24 POUCES) À ANGLES D'INCLINAISON ÉQUIVALENTS**

La figure A.13 compare un tuyau en PVC ASTM F679 à d'autres produits à paroi pleine de 600 mm (24 pouces). Les tuyaux en PVC ont une capacité supérieure de 24 % à celle des tuyaux en fonte ductile, supérieure de 50 % à celle des tuyaux en grès vitrifié et supérieure de 35 % à celle des tuyaux en béton non armé (NRCP), avec des pentes d'inclinaison identique.

Sur des pentes d'inclinaison identique, un tuyau en PVC à paroi pleine de 525 mm (21 pouces) offre les capacités suivantes, comparativement à d'autres produits de 600 mm (24 pouces) :

- ▷ Une capacité inférieure de seulement 9 % par rapport aux tuyaux en fonte ductile de 600 mm (24 pouces)
- ▷ Une capacité environ 10 % supérieure à celle des tuyaux en grès vitrifié (VCP) de 600 mm (24 pouces)
- ▷ Une capacité inférieure de seulement 1 % par rapport aux tuyaux en béton non armé (NRCP) de 600 mm (24 pouces)

Un tuyau à écoulement par gravité en PVC peut avoir la même capacité qu'un produit de tuyau concurrent de plus grande taille, en raison de ses caractéristiques d'écoulement supérieures. Lors du dimensionnement de canalisations, les ingénieurs devraient examiner de plus près les capacités des tuyaux en PVC produits, étant donné leurs caractéristiques de conception.

Les tuyaux à écoulement par gravité n'utilisant pas d'énergie électrique, leur consommation d'énergie provient principalement de l'énergie intrinsèque du berceau à l'installation. Cette énergie, ainsi que l'énergie pour le remplacement éventuel des tuyaux pendant la durée de vie de 100 ans, peuvent être déterminées. Toutefois, il existe de nombreuses autres situations où les canalisations à écoulement par gravité nécessitent ou engendrent l'utilisation d'énergie. Parmi celles-ci, on notera (mais on ne pourra pas quantifier) les activités d'entretien et de traitement des flux d'infiltration.

► Flux d'infiltration

Certains matériaux de tuyaux peuvent avoir besoin d'utiliser de l'énergie pour traiter la surface et les eaux souterraines qui pénètrent dans les canalisations à cause de joints non étanches, de tuyaux rompus ou de la corrosion. L'eau d'infiltration peut atteindre plus de quatre fois le flux normal lorsqu'il pleut. Les infiltrations d'eau créent un besoin énorme en énergie intrinsèque supplémentaire, nécessaire pour surdimensionner les canalisations afin de pouvoir prendre en charge le débit supplémentaire, pour construire des capacités de stockage à même de stocker le débit supplémentaire, pour offrir une capacité de pompage accrue et pour traiter les eaux usées. Elles peuvent également entraîner des coûts supplémentaires en raison d'amendes, d'ordres administratifs et de frais d'amélioration capitalisés, afin d'empêcher les débordements d'eaux usées brutes. À ce jour, les travaux de recherche visant à lier les taux d'infiltration à des matériaux de tuyaux spécifiques n'ont pas été en mesure de quantifier la quantité énorme d'énergie supplémentaire requise en raison d'infiltrations. Les propriétés des tuyaux en PVC, telles que des joints qui ne fuient pas et la résistance à la corrosion, en font le choix logique pour des produits de tuyaux d'égout qui ne créeront pas de demande supplémentaire en raison d'infiltrations.

SOMMAIRE DE L'ÉNERGIE INTRINSÈQUE DE DIVERS MATÉRIAUX DE TUYAU

Le tableau A.9 présente l'énergie intrinsèque du berceau à la sortie d'usine (c.-à-d., des matières premières jusqu'à la fabrication, sans le transport du produit final et l'installation) de tuyaux en PVC de 30 mètres (100 pieds) de longueur, comparée à celles des matériaux de spécifications similaires analysés dans la présente étude. Bien que les résultats concernant chaque matériau soient obtenus de sources différentes et présentent une certaine variabilité dans la qualité de leurs données et dans les valeurs d'énergie intrinsèque du berceau la sortie d'usine pour les divers produits de tuyaux.

TABLEAU A.9 : RÉSUMÉ DES ÉNERGIES INTRINSÈQUES DE LA CRÉATION AU DÉPART DE L'USINE POUR LES TUYAUX EN PVC ET D'AUTRES MATÉRIAUX POTENTIELS POUR LES TUYAUX

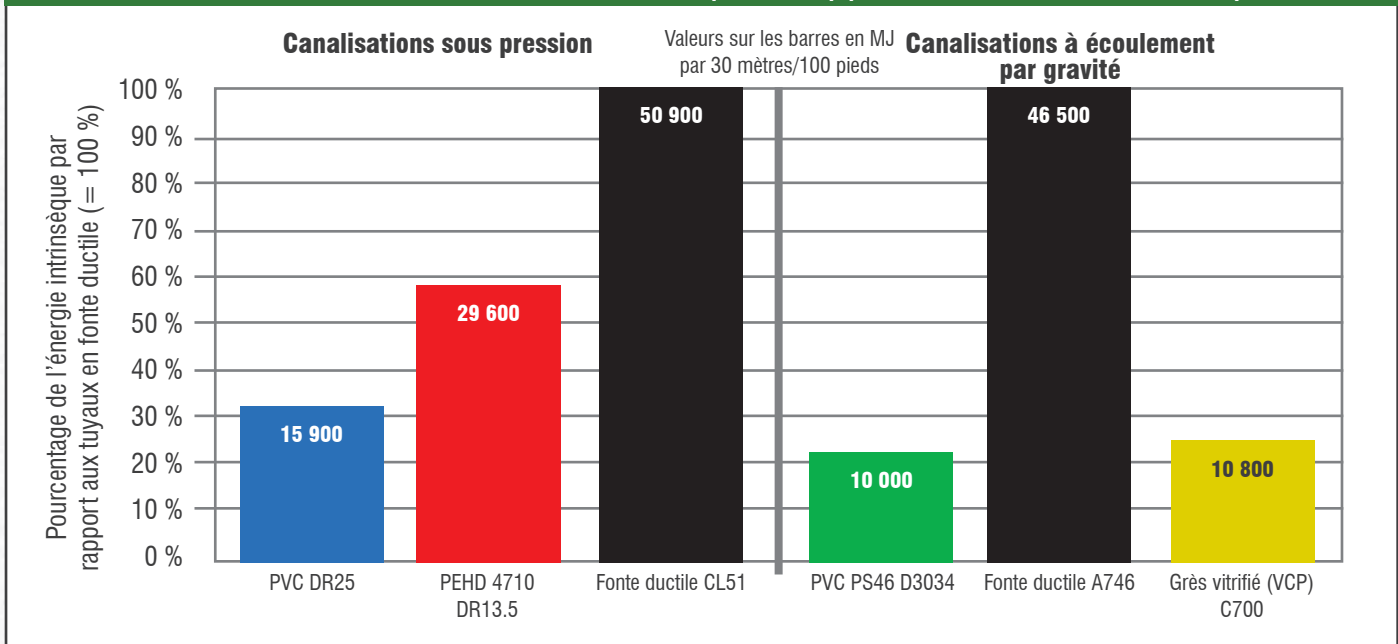
Taille et type de tuyau en PVC	Produits comparables	Norme	Énergie intrinsèque (en MJ par 30 mètres/100 pieds)
PVC DR18 PC235 C900 de 200 mm (8 pouces)	PVC DR18 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C900	23 300
	PEHD 4710 DR9 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C906	42 600
	Fonte ductile CL51 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C151	50 900
PVC DR25 PC165 C900 de 200 mm (8 pouces)	PVC DR25 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C900	15 900
	PEHD 4710 DR13.5 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C906	29 600
	Fonte ductile CL51 de 200 mm (8 pouces)	AWWA C151	50 900
PVC DR25 PC165 C905 de 600 mm (24 pouces)	PVC DR25 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C905	137 900
	PEHD 4710 DR13.5 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C906	240 800
	Fonte ductile CL51 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C151 AWWA C104	206 600
	PCCP PC200 de 600 mm (24 pouces)	AWWA C301	53 500
PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 600 mm (24 pouces)	PVC PS46 de 530 mm (24 pouces)	ASTM F794 AASHTO M304	49 700
	PP PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F2736	43 700
	PEHD PS34 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F2306	42 900
PVC PS46 F794 à paroi nervurée de 200 mm (8 pouces)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM F794 AASHTO M304	5 900
	Fonte ductile de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746	46 500
PVC PS46 SDR35 D3034 à paroi pleine de 200 mm (8 pouces)	PVC PS46 de 200 mm (8 pouces)	ASTM D3034	10 000
	Fonte ductile de 200 mm (8 pouces)	ASTM A746	46 500
	Grès vitrifié (VCP) de 200 mm (8 pouces)	ASTM C700	10 800
PVC PS46 F679 à paroi pleine de 600 mm (24 pouces)	PVC PS46 de 600 mm (24 pouces)	ASTM F679	98 600
	Fonte ductile de 600 mm (24 pouces)	ASTM A746	176 600
	Grès vitrifié (VCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C700	82 400
	Béton non armé (NRCP) de 600 mm (24 pouces)	ASTM C14	21 300

Remarque : l'intérieur de toutes les canalisations sous pression en fonte ductile doit être revêtu de mortier de ciment, conformément à la norme AWWA C104. L'intérieur de toutes les canalisations d'égouts en fonte ductile doit être revêtu de mortier de ciment, conformément à la norme AWWA C104.

La figure A.14 compare l'énergie intrinsèque des divers matériaux de tuyaux à l'énergie intrinsèque des tuyaux en fonte ductile, cette dernière étant fixée à 100 %, étant donné qu'elle représente l'énergie intrinsèque la plus élevée de toutes. L'énergie intrinsèque des tuyaux en PVC est compétitive par rapport à celle des tuyaux en fonte ductile et à d'autres matériaux de tuyaux. Les tuyaux sous pression en PVC DR25 de 200 mm (8 pouces) ont une énergie intrinsèque 69 % inférieure à celle des tuyaux en fonte ductile revêtue de mortier de ciment et 46 % inférieure à celle des tuyaux en PEHD. Si des tuyaux

de canalisations ont besoin d'être remplacés au cours du cycle de vie de 100 ans, l'énergie intrinsèque du matériau correspondant est augmentée en conséquence. L'énergie intrinsèque totale du berceau la sortie d'usine de tuyaux à écoulement par gravité de 200 mm (8 pouces) en PVC PS46 D3034 est de 83 % inférieure à celle des tuyaux en fonte ductile revêtue de mortier de ciment lorsque l'on prend en compte les remplacements nécessaires au cours du cycle de vie de 100 ans.

FIGURE A.14 : COMPARAISON DES VALEURS DE L'ÉNERGIE INTRINSÈQUE DE LA CRÉATION À LA SORTIE D'USINE POUR DES TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR25 DE 200 MM (8 POUCHES) (EN MJ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS)



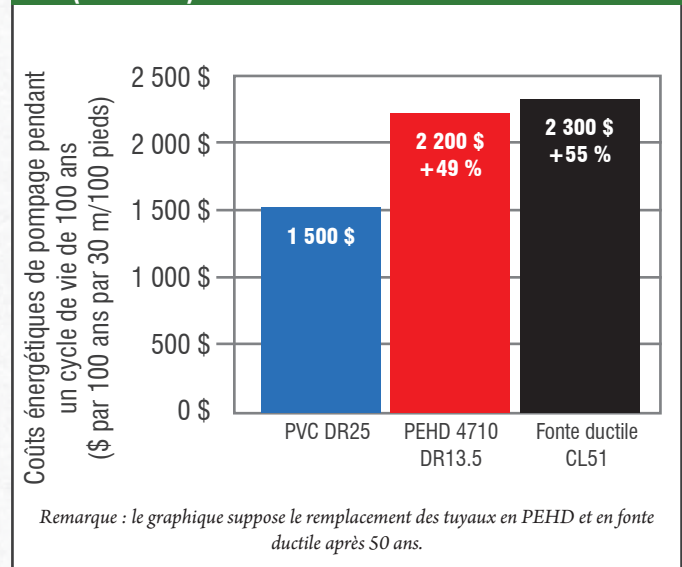
Remarque : l'énergie intrinsèque totale sur 100 ans comprend l'énergie de la création à la sortie d'usine, l'énergie pour les remplacements de tuyaux et l'énergie pour la protection contre la corrosion.

COMPARAISON DES ÉNERGIES DE POMPAGE PENDANT UN CYCLE DE VIE DE 100 ANS

Les systèmes de distribution de l'eau nécessitent d'importantes quantités d'énergie de pompage pour surmonter les forces de friction entre les parois des canalisations et l'eau qui s'écoule. L'énergie nécessaire pour pomper l'eau à travers des canalisations en PVC reste constante tout au long de la durée de vie des tuyaux, contrairement aux tuyaux en béton ou en métal. Cela permet des économies de coûts sur la durée totale du cycle de vie et réduit l'empreinte carbone par rapport aux matériaux qui nécessitent plus d'énergie de pompage au fil du temps en raison de l'augmentation de la rugosité de leurs surfaces intérieures à la suite de la corrosion et de la dégradation des parois.

Sur la figure A.15, les canalisations d'eau en PVC DR25 de 200 mm (8 pouces) ont des coûts d'énergie de pompage sur 100 ans, par 30 mètres (100 pieds) de tuyau, inférieurs, en raison de leur demande en énergie de pompage plus faible que les canalisations en PEHD et en fonte ductile. L'énergie nécessaire pour pomper l'eau à travers un réseau de canalisations sous pression sur la durée de vie des canalisations est une source importante d'impacts potentiels sur l'environnement.

FIGURE A.15 : COÛT DE L'ÉNERGIE DE POMPAGE DE TUYAUX ÉQUIVALENTS AUX TUYAUX EN PVC DR25 DE 200 MM (8 POUCHES) PENDANT UN CYCLE DE VIE DE 100 ANS



Remarque : le graphique suppose le remplacement des tuyaux en PEHD et en fonte ductile après 50 ans.

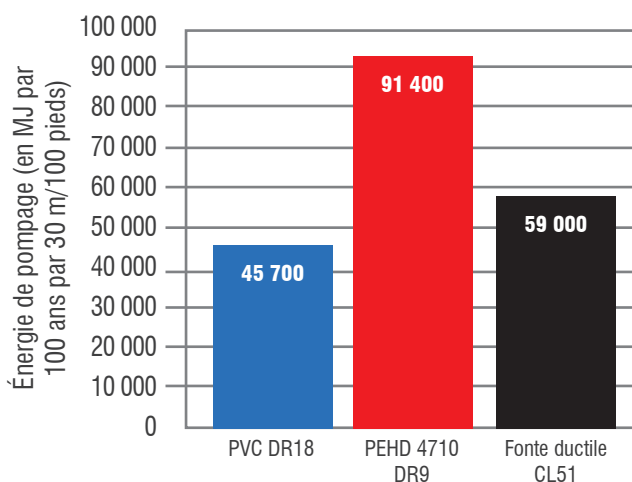
Les tuyaux en PVC ne sont pas sujets à la corrosion, contrairement aux tuyaux en fonte et en béton, ni à l'oxydation chimique qui affecte les tuyaux en PEHD. La corrosion et l'oxydation chimique augmentent les risques de défaillance des tuyaux et de pertes d'eau, et réduisent les avantages de durabilité pour les services publics de l'eau.

La corrosion affecte 75 % des services publics de l'eau.¹⁶⁶ La durabilité et la résistance à la corrosion d'une canalisation affectent grandement l'impact sur l'environnement tout au long du cycle de vie. Les tuyaux en fonte ductile peuvent durer à peine 11 à 14 ans dans des sols moyennement corrosifs, nécessitant des remplacements sur une période de 100 an.¹⁶⁷ Cela augmente l'impact sur l'environnement de l'énergie intrinsèque des tuyaux en fonte par un facteur pouvant atteindre 9 fois par rapport aux tuyaux en PVC.

L'énergie de pompage représente entre 24 et 75 % de l'énergie intrinsèque totale sur 100 ans, selon la taille et le matériau des tuyaux. Les parois intérieures lisses des tuyaux en PVC permettent de minimiser cet impact. Le fait que le PVC ne se corrode pas signifie que les tuyaux en PVC présentent, tout au long du cycle de vie du réseau de canalisations, une consommation énergétique de pompage et des coûts d'exploitation réduits par rapport aux tuyaux dont les matériaux sont sujets à la corrosion. En outre, les tuyaux en PVC ne sont pas soumis à une augmentation de la friction à l'intérieur des tuyaux et à l'augmentation de l'énergie de pompage au fil du temps, qui sont caractéristiques des tuyaux revêtus de mortier de ciment.

De plus en plus souvent, les services publics et les gouvernements locaux mettent en œuvre des stratégies visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre de leurs objectifs à long terme. Le traitement des eaux municipales et les réseaux de distribution d'eau nécessitent une quantité importante d'énergie pour déplacer l'eau. Les services publics de l'eau et de l'assainissement représentent souvent jusqu'à 40 % de la consommation totale d'énergie d'une municipalité.¹⁶⁸ Les tuyaux en PVC ont une énergie intrinsèque plus faible et des parois résistantes à la corrosion toujours bien lisses, ce qui aide les services publics et les administrations locales à minimiser l'énergie (et donc les GES) nécessaire pour exploiter leurs réseaux de distribution d'eau.

FIGURE A.16 : ÉNERGIE DE POMPAGE SUR 100 ANS DE TUYAUX ÉQUIVALENTS AUX TUYAUX DR18 DE 200 MM (8 POUCES)



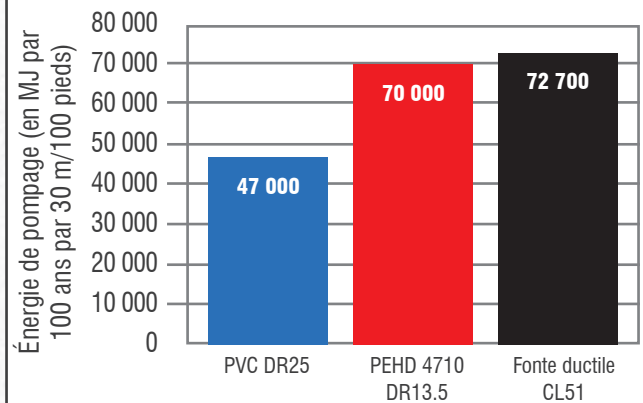
Remarque : le graphique suppose le remplacement des tuyaux en PEHD et en fonte ductile après 50 ans.

La perte de capacité de transport et les coûts de pompage plus élevés sont causés principalement par les effets de la corrosion des tuyaux en fonte, les fuites et la tuberculisation, plutôt que par des différences mineures entre les diamètres intérieurs des tuyaux en fonte et en PVC. Les tuyaux en PEHD, d'un autre côté, ont un plus petit diamètre intérieur que les tuyaux en fonte ductile ou en PVC, ce qui a un impact important sur les besoins en énergie de pompage au fil du temps.

La figure A.16 compare les tuyaux en PVC DR18 de 200 mm (8 pouces) avec d'autres tuyaux de la même catégorie de pression. La détérioration du revêtement intérieur en mortier de ciment et la corrosion des tuyaux en fonte ductile entraînent le besoin pour une plus grande énergie de pompage sur la durée de vie prévue de 100 ans que dans le cas des tuyaux en PVC. En raison de leur faible résistance à la traction, les tuyaux en PEHD ont des parois plus épaisses et un diamètre intérieur plus petit, ce qui se traduit par une section de flux de transport plus petite et une énergie de pompage sur toute la durée du cycle de vie plus élevée.

La figure A.17 montre la différence dans l'énergie de pompage sur toute la durée du cycle de vie nécessaire pour les tuyaux en PVC DR25 de 200 mm (8 pouces) par rapport aux tuyaux en fonte ductile et en PEHD. Encore une fois, la détérioration du revêtement

FIGURE A.17 : ÉNERGIE DE POMPAGE SUR 100 ANS DE TUYAUX ÉQUIVALENTS AUX TUYAUX PVC DR25 DE 200 MM (8 POUCES)



Remarque : le graphique suppose le remplacement des tuyaux en PEHD et en fonte ductile après 50 ans.

intérieur en mortier de ciment et la corrosion des tuyaux en fonte ductile et la section de flux de transport plus petite des tuyaux en PEHD entraînent une hausse des besoins en énergie de pompage sur toute la durée du cycle et du coût de ces matériaux.

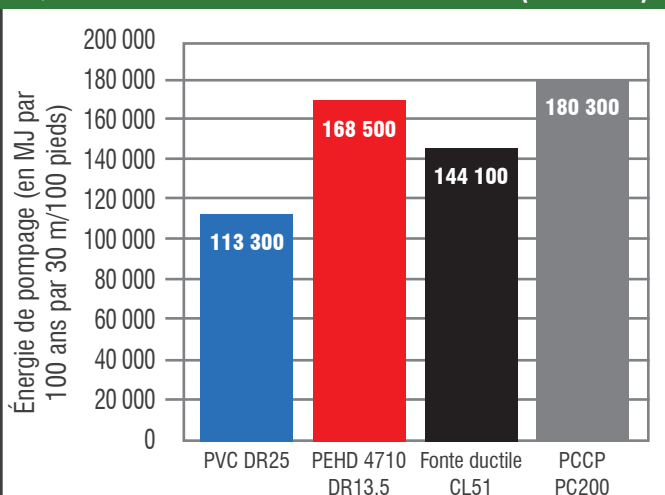
La figure A.18 compare des tuyaux en PVC DR25 de 600 mm (24 pouces) avec des tuyaux en fonte ductile, PEHD et béton précontraint (PCCP) de même catégorie de pression. Lorsque l'on prend en considération le diamètre et la détérioration du coefficient de frottement de tous les matériaux de tuyau, les tuyaux en PVC de 600 mm (24 pouces) constituent des choix clairs et durables en termes d'efficacité de l'énergie de pompage.

Les parois intérieures lisses, le grand diamètre intérieur et l'absence de détérioration du coefficient de frottement des tuyaux en PVC résultent en des processus plus durables qu'une simple énergie de pompage tout au long du cycle de vie. Les installations de pompage sont conçues pour la capacité à long terme des canalisations du système de distribution qu'elles supportent. Les tuyaux cylindriques en fonte ductile ou en béton précontraint (PCCP) peuvent avoir un plus grand diamètre intérieur initialement et un bon facteur de friction lorsqu'ils sont neufs, mais les installations de pompage ne sont pas conçues en se basant sur la capacité de nouvelles canalisations. Ils peuvent présenter une diminution de 30 % de leur coefficient de frottement au cours de leur durée de vie utile. Il peut en résulter une augmentation de 100 % de la puissance de pompage requise pour les canalisations plus anciennes, par rapport aux canalisations neuves.

Paramètres quantitatifs appliqués à l'analyse des tuyaux sous pression durant la phase d'utilisation

- ▷ La vitesse d'écoulement dans les tuyaux en PVC était de 0,6 m/s (2 pi/s)
- ▷ Les produits de tuyau compétiteurs ont été évalués en utilisant le même débit volumétrique
- ▷ Les diamètres réels ont été utilisés, en se fondant sur les normes
- ▷ Les pertes de charge par frottement ont été déterminées à l'aide de coefficients de Hazen-Williams réalistes
- ▷ La détérioration du facteur « C » pour chaque matériau de tuyau a été incluse
- ▷ L'énergie durant la phase d'utilisation a été déterminée en utilisant l'énergie de pompage pour le débit correspondant à la comparaison, sur une durée de 100 ans
- ▷ Les calculs de l'énergie intrinsèque ont inclus l'énergie du berceau à l'installation, l'énergie pour les remplacements, l'énergie de pompage sur 100 ans et l'énergie liée aux pertes d'eau sur 100 ans

FIGURE A.18 : ÉNERGIE DE POMPAGE SUR 100 ANS DE TUYAUX ÉQUIVALENTS AUX TUYAUX PVC DR25 DE 600 MM (24 POUÇES)



Remarque : le graphique suppose le remplacement des tuyaux en PEHD après 50 ans, des tuyaux en fonte ductile après 50 ans et des tuyaux en béton précontraint (PCCP) après 75 ans.

Le fait que le PVC ne se corrode pas signifie que les tuyaux en PVC présentent, tout au long du cycle de vie du réseau de canalisations, une consommation énergétique de pompage et des coûts d'exploitation réduits par rapport aux tuyaux dont les matériaux sont sujets à la corrosion.

► **Énergie de pompage totale pendant un cycle de vie de 100 ans : Coûts au fil du temps en utilisant des valeurs diverses de durée de vie des tuyaux**

Un examen des analyses d'ACV accessibles au public montre que les tuyaux en PVC ont des énergies intrinsèques plus faibles et des impacts environnementaux durant la phase d'utilisation plus faibles, comparés à d'autres tuyaux. L'énergie de pompage, cependant, est la plus grande composante de l'énergie intrinsèque totale, sur un cycle de vie de 100 ans, pour les matériaux de tuyaux. Par conséquent, l'efficacité de pompage au fil du temps est critique. Les figures A.19 et A.20 présentent les différences dans l'énergie de pompage de divers matériaux de tuyaux. La figure A.19 montre l'énergie de pompage de tuyaux de 600 mm (24 pouces), tout au long de leur durée de vie utile, comme déterminée dans la présente étude. La figure A.20 montre

l'augmentation en énergie de pompage au-delà de la durée de vie utile des tuyaux en matériaux sujets à la corrosion, comme la fonte ductile et le béton précontraint (PCCP). Les figures A.21 et A.22 montrent que l'utilisation d'un matériau de tuyau au-delà de sa durée de vie utile résulte en des coûts de pompage plus élevés. La présente étude a évalué la longévité des tuyaux en PEHD et en fonte à 50 ans et celle des tuyaux en PCCP à 75 ans.

Sur les figures A.20, A.21 et A.22, les barres correspondant à 50 ans et 75 ans prennent en compte l'installation de nouveaux tuyaux respectivement après 50 et 75 ans, dans la durée de vie prévue de 100 ans du système. Le coefficient de frottement des tuyaux est alors réinitialisé à la valeur correspondant à des tuyaux neufs. En ce qui concerne la barre correspondant à 100 ans, des tuyaux neufs ne sont pas installés, et le coefficient de frottement n'est pas réinitialisé au cours de la période de 100 ans.

FIGURE A.19 : ÉNERGIE DE POMPAGE SUR 100 ANS DE TUYAUX ÉQUIVALENTS AUX TUYAUX PVC DR25 DE 600 MM (24 POUÇES)

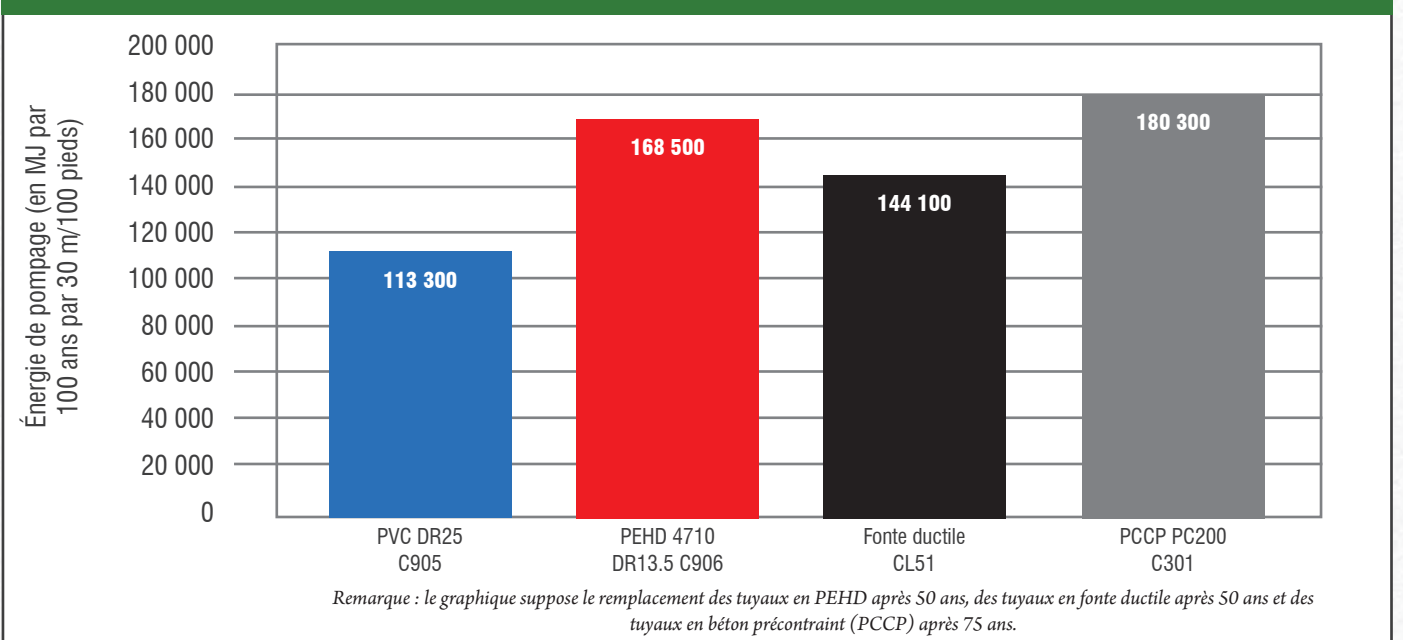


FIGURE A.20 : CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE POMPAGE SUR 100 ANS POUR DES TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR25 DE 600 MM (24 POUÇES) POUR DIFFÉRENTES VALEURS DE LA DURÉE DE VIE UTILE

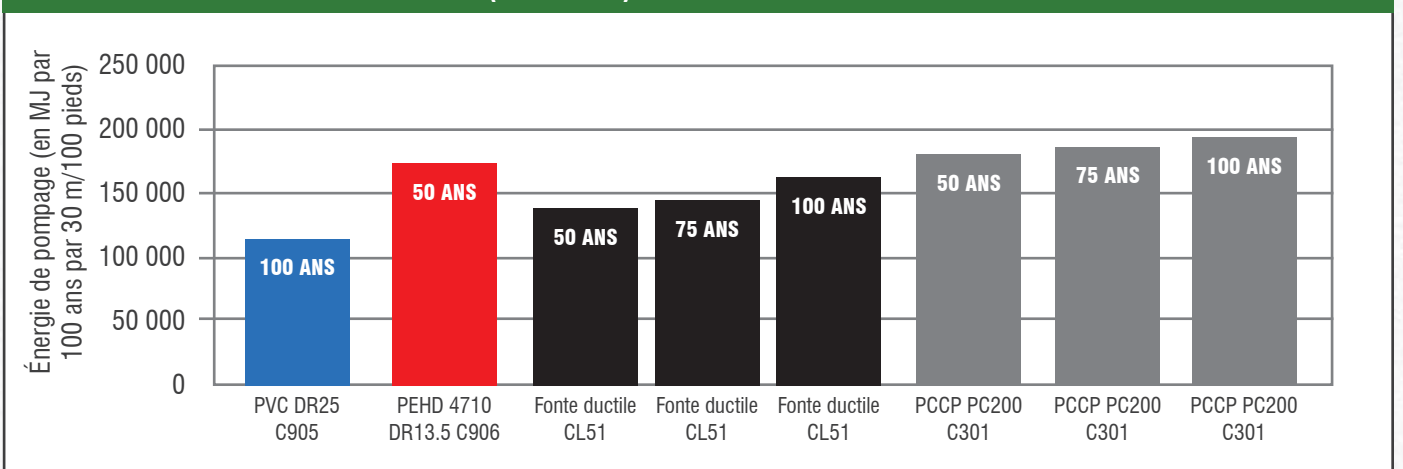
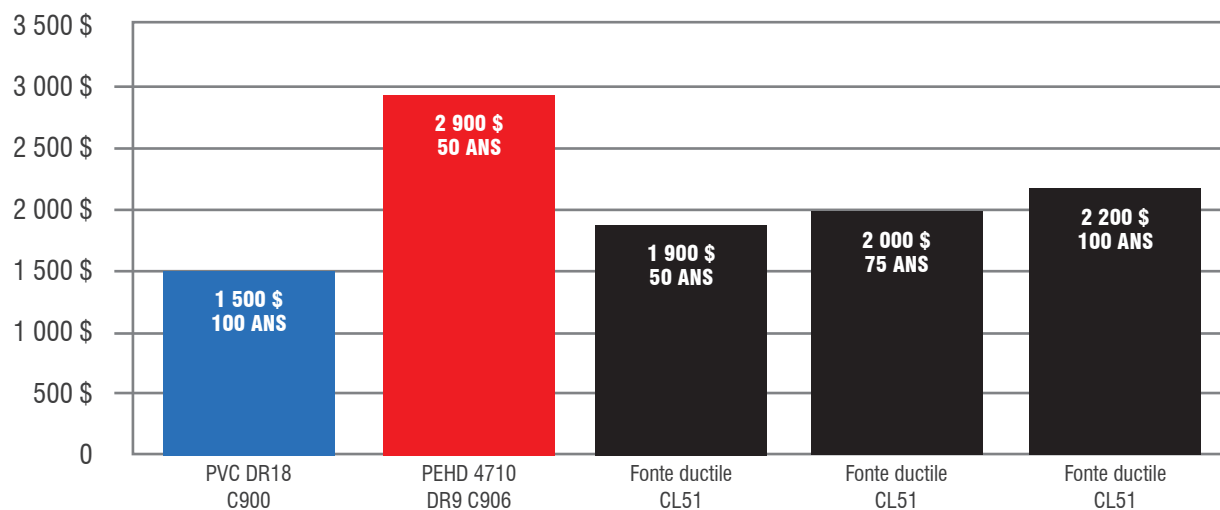
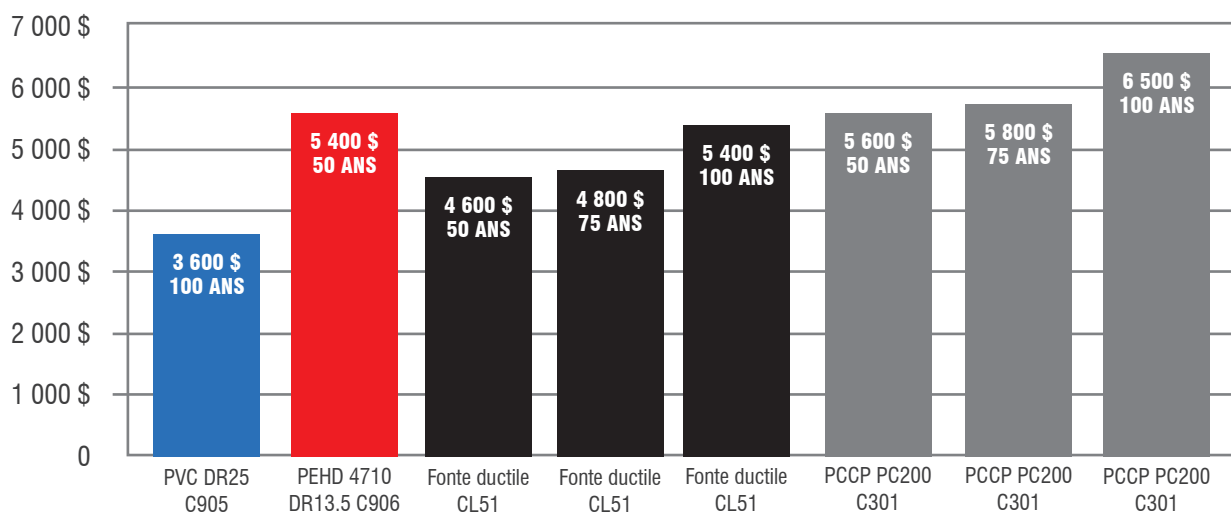


FIGURE A.21 : COÛTS ÉNERGÉTIQUES DE POMPAGE SUR 100 ANS POUR DES TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR18 DE 200 MM (8 POUÇES) POUR DIFFÉRENTES VALEURS DE LA DURÉE DE VIE UTILE (\$ PAR 30 MÈTRES/100 PIEDS SUR 100 ANS)**FIGURE A.22 : COÛTS ÉNERGÉTIQUES DE POMPAGE SUR 100 ANS POUR DES TUYAUX EN PVC ÉQUIVALENTS DR25 DE 600 MM (24 POUÇES) POUR DIFFÉRENTES VALEURS DE LA DURÉE DE VIE UTILE (\$ PAR 30 MÈTRES SUR 100 ANS)**

Les figures A.20, A.21 et A.22 utilisent des durées de vie utile des tuyaux différentes pour les tuyaux en fonte et en ciment, afin de fournir aux professionnels des services publics de distribution d'eau des comparaisons exactes entre les estimations de l'énergie de pompage et des coûts sur une période de 100 ans. Cela exige une redéfinition de la notion traditionnelle de durée de vie utile des tuyaux. La plus grande partie du temps où des tuyaux en béton ou en fonte sont considérés comme étant « en service », en fait, ils ne le sont pas, car leurs performances ne répondent pas aux prévisions. Pendant une bonne partie du temps où ils sont en service, ils sont sujets à des ruptures, à des pertes d'eau, à des problèmes de qualité de l'eau, ainsi qu'à des coûts d'entretien et d'exploitation plus élevés, en raison de la corrosion. Cela affecte l'efficacité de pompage de manière significative. À mesure que ces tuyaux vieillissent, leurs

parois intérieures deviennent plus rugueuses, augmentant les coûts de pompage. La dégradation de la paroi intérieure des canalisations peut commencer presque immédiatement après l'installation des tuyaux en fonte ductile ou en béton, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité du pompage, une consommation d'énergie plus élevée et des coûts de pompage plus élevés au fil du temps. Cela n'est pas le cas pour les tuyaux en PVC qui conservent un coefficient de frottement constant au cours de la période de 100 ans. Comme les tuyaux en fonte ou en ciment, qui pourraient se dégrader et ne pas fonctionner de manière adéquate après 50 ans, les tuyaux en PEHD, qui présentent pour leur part des problèmes de coefficient de sécurité, de fluage et d'oxydation, peuvent ne pas se comporter de manière adéquate tout au long de la durée de service de 50 ans, même s'ils maintiennent leur efficacité de pompage.^{169 170}

► Comparaisons des coûts tout au long du cycle de vie de 100 ans

Lorsque l'on considère l'ensemble des coûts d'achat et d'entretien de tuyaux, tout au long du cycle de vie, pour un service public de distribution d'eau, les tendances suivantes concernant les différents types de tuyaux ont été analysées pour une longueur de trente mètres (cent pieds) de tuyau, sur une période de 100 ans. Sachant que les services publics de distribution d'eau doivent entretenir des kilomètres et des kilomètres de canalisations, ces coûts sont aggravés et augmentent rapidement. Comparés à d'autres matériaux, le PVC offre des coûts globaux moindres lorsque l'on prend en compte une durée de vie de 100 ans d'un système d'eau. Parce que les tuyaux en PEHD et en fonte ductile peuvent ne pas durer 100 ans, il peut être nécessaire de les remplacer au cours du cycle de vie, ce qui augmenterait les coûts. Si le tuyau en fonte ductile n'est pas remplacé après que ses performances se dégradent considérablement, l'augmentation des coûts de pompage et d'entretien dus à la corrosion augmente les coûts totaux du système tout au long de son cycle de vie. Cette estimation ne tient pas compte des coûts d'entretien des matériaux des tuyaux, par exemple pour l'ajout de revêtements extérieurs ou intérieurs, d'atténuation cathodique et autres efforts visant à étendre la vie des tuyaux pour qu'ils durent leur durée de vie prévue de 100 ans.

ÉTUDE DES DÉFAILLANCES DES TUYAUX DE CANALISATIONS EN FONTE GRISE ET EN FONTE DUCTILE

Un service public de distribution d'eau de grande taille peut subir plus de 300 ruptures de canalisations par an. Une étude par l'université du Texas à Arlington a analysé 31 560 défaillances de sections de canalisations principales en fonte grise et en fonte ductile sur une période de 110 ans.¹⁷¹

► Fonte grise coulée en fosse

La plupart des tuyaux en fonte d'origine, appelés tuyaux en fonte grise coulée en fosse, connaissent aujourd'hui des défaillances liées à la corrosion, parce que les tuyaux en fonte grise coulée en fosse installés au début des années 1900 ont depuis longtemps atteint la fin de leur durée de vie utile. La fonte a fait ses débuts dans les années 1800, mais sa production en masse a réellement commencé en 1914.¹⁷² Les tuyaux en fonte ductile utilisés à l'origine utilisaient une méthode qui « joignait les tuyaux à emboîtement et bout uni à l'aide d'un cordon en plomb fondu ». ¹⁷³ Les joints en plomb ont été largement utilisés dans les joints pour tuyaux en fonte et existent encore aujourd'hui dans les réseaux de canalisations âgés de plus de 60 ans.¹⁷⁴ Une étude par un service public de distribution d'eau montre que des tuyaux en fonte grise coulée en fosse ont été installés à partir de 1872 jusqu'en 1945, avec un nombre important d'installations entre 1925 et 1931. L'analyse des défaillances a révélé que 3 611 défaillances correspondaient à des sections de canalisations qui étaient en service depuis plus de 75 ans, suivies par 1 818 défaillances correspondant à des sections de canalisations qui étaient en service depuis 50 à 75 ans, 1 676 défaillances correspondant à des sections de canalisations qui étaient en service depuis 25 à 50 ans et seulement 20 défaillances correspondant à des sections de canalisations qui étaient en service depuis moins de 25 ans. ¹⁷⁵

► Fonte grise

« L'utilisation de canalisations en fonte grise centrifugée a remplacé l'utilisation de canalisations en fonte grise coulée en fosse des années 1920 et a été largement employée à partir des années 1930. » ¹⁷⁶ La fonte grise centrifugée était plus mince et plus résistante que la fonte grise

coulée en fosse. Des revêtements intérieurs en mortier de ciment et de nouveaux composés de joints en leadite à base de soufre, c'est-à-dire en ciment à base de soufre plastifié, ont été introduits à la même époque. Les joints en leadite se sont avérés, au fil du temps, comme étant davantage sujets à la rupture et à la corrosion que le plomb. Des joints d'étanchéité en caoutchouc souple ont été introduits dans les années 1950 comme une avance technologique pour les joints de canalisations. ¹⁷⁷

« Les services publics de distribution d'eau ont installé des canalisations en fonte grise centrifugée de 1946 à 1964 et, avec un total de 17 364 réseaux, elles sont devenues, en peu de temps, plus fréquentes que les canalisations en fonte grise coulée en fosse. Des informations complètes sur les 9 683 défaillances de canalisations en fonte grise centrifugée sont disponibles. Compte tenu de ces défaillances, aucune canalisation n'a eu une durée de vie supérieure à 75 ans. 2 641 défaillances sont survenues dans des canalisations âgées entre 50 et 75 ans. La majeure partie des défaillances, 6 812, sont survenues dans des canalisations âgées entre 25 et 50 ans, et seulement 7 défaillances sont survenues dans des canalisations qui avaient moins de 25 ans. » ¹⁷⁸

► La durée de vie de la fonte ductile est inférieure à 50 ans

« Les tuyaux en fonte ductile ont été introduits dans l'industrie des tuyaux en 1948, produits commercialement à partir de 1955 et largement utilisés depuis 1979. Les réseaux utilisant des tuyaux en fonte ductile observés [par des services publics de distribution d'eau] datent des années 1953 à 1982. Compte tenu de ces défaillances, aucune canalisation n'a eu une durée de vie supérieure à 75 ans. 3 % des défaillances observées sont survenues dans des canalisations âgées de 50 à 75 ans, tandis que 79 % des défaillances observées sont survenues dans des canalisations âgées de 25 à 50 ans. Enfin, 18 % des défaillances observées sont survenues dans des canalisations âgées de moins de 25 ans. » ¹⁷⁹

« Du point de vue durée de vie utile, les canalisations en fonte grise coulée en fosse ont offert des performances meilleures que celles des canalisations en fonte grise centrifugée ou en fonte ductile. Les causes de défaillances des canalisations en fonte grise coulée en fosse sont dans l'ordre de fréquence : la corrosion, les ruptures transversales, les joints au plomb des tuyaux à emboîtement et bout uni, les ruptures de tuyau, les joints en leadite des tuyaux à emboîtement et bout uni. Dans le cas des canalisations en fonte grise centrifugée, les causes de défaillances sont dans l'ordre de fréquence : les ruptures transversales, la corrosion, les joints au plomb des tuyaux à emboîtement et bout uni, les ruptures de tuyau. Quelques défaillances dues à des joints de type mécaniques verrouillés ou à emboîtement automatique ont été également observées. La corrosion est la principale cause de défaillance dans les canalisations en fonte ductile, suivie par les ruptures transversales, puis les joints de type mécaniques verrouillés. » ¹⁸⁰

Selon les résultats des études de cas, les canalisations de 150 mm (6 pouces), 200 mm (8 pouces), 300 mm (12 pouces) et 400 mm (16 pouces) en fonte grise et en fonte ductile ont présenté le plus grand nombre de défaillances au cours de leur durée de vie utile de 25 à 50 ans. ¹⁸¹

« Les données disponibles sur les différents types de joints utilisés pour les 31 258 canalisations en fonte grise ou en fonte ductile combinées, montrent qu'une quantité incroyable de 25 977 joints étaient de type au plomb pour tuyaux à emboîtement et bout uni, représentant environ 83 % de tous les joints de canalisations d'eau pour services de distribution d'eau. » ¹⁸²

Ces résultats sont confirmés par d'autres enquêtes et études qui ont montré que l'âge moyen des défaillances de canalisations (ruptures

de tuyaux) était de 47 ans,¹⁸³ et ont confirmé que de nombreux services publics de distribution d'eau rapportent que leurs nouvelles canalisations en fonte ductile présentent des taux de défaillances comparables à leurs anciennes canalisations en fonte grise.

Des pays comme le Japon ont, par loi, fixé la durée de vie utile permise pour les canalisations de distribution d'eau en fonte à 40 ans, afin d'éviter les conséquences de la corrosion, les pertes d'eau, les problèmes de qualité de l'eau et de la santé publique.¹⁸⁴

► Les tuyaux en fonte ductile ont des parois plus minces

La durée de vie utile des tuyaux en fonte n'est pas la même que la durée pendant laquelle ils peuvent être dans le sol, c.-à-d., par exemple « la fin de leur vie physique ». Avant d'atteindre la fin de leur vie physique, les tuyaux en fonte peuvent avoir considérablement mis en péril la qualité de l'eau et accru les coûts d'utilisation et d'entretien de façon significative pour les services publics qui les exploitent. L'analyse économique et des performances d'un tuyau prend également en compte les fuites, qui augmentent les coûts de l'énergie de pompage et peuvent entraîner une dégradation de la qualité de l'eau. Des exemples récents continuent de démontrer que les canalisations en fonte âgées de 100 ans constituent un fardeau pour les collectivités, comme dans le cas où les pertes d'eau atteignent 80 %.¹⁸⁵

CORROSION DES TUYAUX EN FONTE, LA LIXIVIATION ET RISQUES POUR LA QUALITÉ DE L'EAU

Des recherches relatives à d'autres matériaux de tuyaux et sur la corrosion appuient les conclusions du présent rapport. L'impact environnemental potentiel du berceau à sortie d'usine des matériaux de tuyaux peut varier considérablement. De même, les caractéristiques de performance des tuyaux peuvent aussi varier considérablement tout au long de la durée de vie utile d'un réseau de distribution d'eau. Certains types de matériaux de tuyaux sont sujets à la corrosion interne au fil du temps. Une réaction électrochimique impliquant des composés métalliques est la principale cause de la corrosion interne. Cette corrosion augmente la rugosité de la surface intérieure des tuyaux, ce qui augmente la friction (voir figure A.23) et nécessite davantage d'énergie de pompage au cours de la vie utile du système.¹⁸⁶

► Une quantité plus importante de produits chimiques (inhibiteurs de corrosion) est utilisée dans l'eau potable lorsque des canalisations en fonte sont utilisées

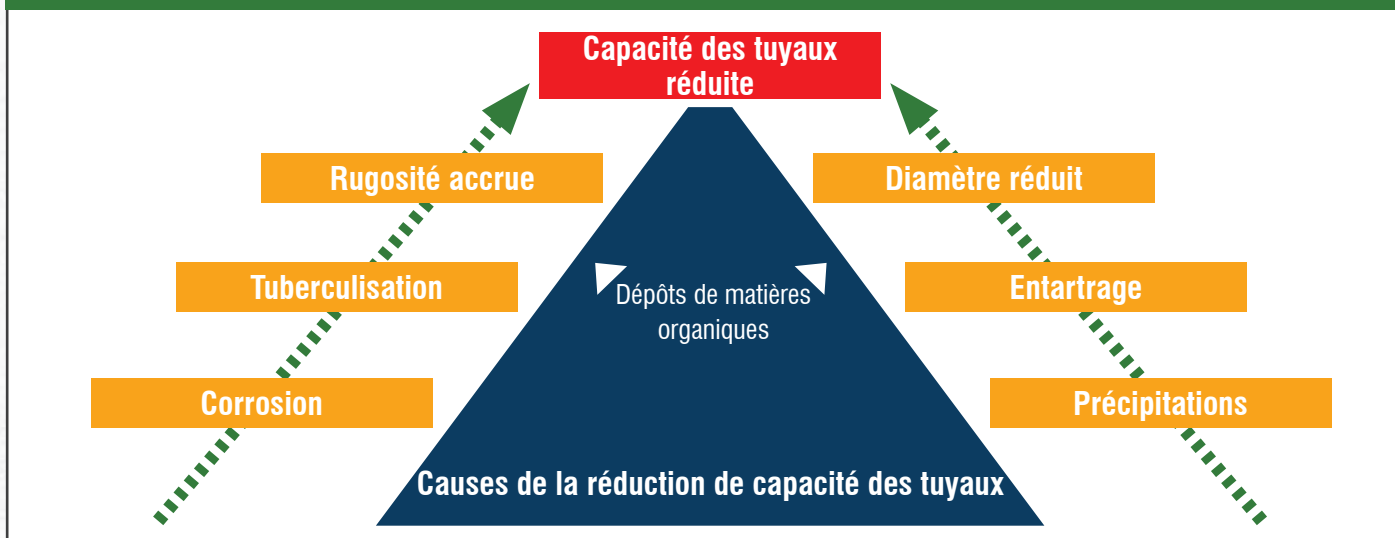
Les additifs chimiques utilisés pour contrôler la corrosion comportent des phosphates, des silicates et des composés qui affectent l'équilibre du système carbonaté (quantité de carbonates dans le système), tels que l'hydroxyde de calcium, l'hydroxyde de sodium, le bicarbonate de sodium et le carbonate de sodium. Les inhibiteurs de corrosion sont couramment utilisés pour traiter l'influence de la corrosion des additifs de traitement de l'eau acide.¹⁸⁷

► Les revêtements intérieurs en mortier de ciment sont une source potentielle de lixiviation de métaux lourds

Les infrastructures et équipements connexes du système de distribution d'eau peuvent réagir avec l'eau qu'ils fournissent, ainsi qu'avec l'environnement externe. Les matériaux à base de ciment comprennent les tuyaux en béton armé ou en béton précontraint, les revêtements intérieurs en mortier de ciment et les tuyaux en amiante-ciment. Deux composants généraux des matériaux à base de ciment sont les agrégats et le liant. Plusieurs types de dégradation des matériaux à base de ciment peuvent affecter le carbonate de calcium en présence d'eaux acides ou d'eaux agressives.^{188 189 190 191 192 193}

La lixiviation est un mécanisme qui peut entraîner la dégradation de l'eau distribuée. La lixiviation des revêtements intérieurs en mortier de ciment peut se produire en présence d'eaux douces, agressives, ou mal tamponnées. Dans des conditions statiques, les métaux comme l'aluminium, l'arsenic, le baryum, le chrome et le cadmium peuvent se lixivier des revêtements intérieurs en mortier de ciment, même lorsque des matériaux certifiés conformes à la norme NSF/ANSI 61 sont utilisés avant d'appliquer les revêtements.¹⁹⁴

FIGURE A.23 : CORROSION INTERNE ET TUBERCULISATION DE CANALISATIONS D'EAU : CAUSES ET IMPACTS SUR LES PERFORMANCES



Une étude réalisée en 1991 a étudié la dégradation des revêtements intérieurs en mortier de ciment neufs sous diverses conditions de qualité de l'eau.¹⁹⁵ Des essais sur le terrain ont démontré que de l'eau agressive peut entraîner la lixiviation des composés du ciment, causant une augmentation significative du pH, de l'alcalinité et de la teneur en calcium de la solution principale. Des études menées sur des canalisations revêtues de mortier de ciment en service depuis 10 à 20 ans ont démontré une dégradation du revêtement en mortier sous forme de lixiviation.¹⁹⁶ Les eaux qui ont une certaine teneur en ions, même faible, sont agressives pour l'hydroxyde de calcium contenu dans les ciments.¹⁹⁷ Cela signifie que l'eau fournie aux consommateurs n'a pas la qualité voulue, en raison d'un pH élevé, causé par la lixiviation d'hydroxyde de calcium. Cela entraîne également une perte graduelle de la capacité à protéger la fonte contre la corrosion. La perte de calcium rend le revêtement de protection contre la corrosion moins efficace, parce qu'elle fait baisser le pH dans la couche d'eau mince se trouvant entre le ciment et la paroi intérieure des canalisations.

du calcium sur le pH et de la lixiviation de l'aluminium à partir de ciment dans l'eau est plus important dans les tuyaux de petits diamètres. L'eau déminéralisée, qui est agressive contre le béton, peut entraîner des teneurs élevées en calcium, aluminium et chrome dans l'eau.²⁰¹

Une étude de 1999 a mis en jeu l'examen d'une canalisation de 2,2 km (7 200 pieds) de tuyaux en fonte ductile avec revêtement intérieur en mortier de ciment dans laquelle la teneur en aluminium dans l'eau avait augmenté de 5 µg/L à 690 µg/L au cours des 2 mois précédents.²⁰² Plus de deux ans plus tard, l'aluminium continuait à se lixivier du revêtement en ciment et à produire de l'eau avec plus de 100 µg/L d'aluminium. Cela a contribué à plusieurs maladies et à un taux de mortalité de 32 % dans un centre de dialyse. L'eau en contact avec les tuyaux était de l'eau de mer qui avait été dessalée puis traitée par filtration au charbon, fluoration et désinfection aux UV. L'eau était agressive (indice de Langelier maximum entre -0,5 et -1,5), douce (dureté en CaCO₃ de 15 à 20 mg/L) et faiblement alcaline (pas de données), avec un pH élevé (8,5 à 9,5). Les tuyaux avaient été revêtus de mortier en ciment à l'usine à l'aide d'un

Les matériaux en ciment contiennent une variété de substances chimiques inorganiques réglementées, dont beaucoup sont sujettes à la lixiviation. Une étude menée en 1998 a réalisé des essais en laboratoire pour déterminer la portée in situ de la lixiviation dans les tuyaux en fonte ductile revêtus de mortier de ciment Portland. Les tuyaux avaient été traités et séchés en conformité avec la norme ANSI/AWWA C602-89, et, par la suite, désinfectés en conformité avec la norme ANSI/AWWA C651-92. L'eau utilisée pour les essais était de l'eau du robinet normale, fournie par un service public de distribution d'eau du New Jersey. Dans des conditions statiques, du baryum, du cadmium et du chrome ont été lixiviés du revêtement intérieur à une teneur plus élevée que permise par les normes de qualité de l'eau potable.¹⁹⁸

La teneur élevée en aluminium dans le ciment est un facteur positif pour les propriétés de protection des revêtements intérieurs, mais, en même temps, peut entraîner des teneurs en aluminium plus élevées dans l'eau circulant à travers des canalisations en fonte grise fraîchement rénovées à travers des canalisations en fonte ductile neuves. L'application d'un revêtement en ciment peut également entraîner la lixiviation de l'aluminium.¹⁹⁹

L'aluminium présente des risques sérieux pour la santé des patients en hémodialyse. L'Union européenne fixe la teneur en aluminium maximale permise dans l'eau utilisée pour l'hémodialyse à 30 mg/L. L'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) a établi une plage de niveau maximal de contaminants secondaire pour l'aluminium entre 50 et 200 mg/L.²⁰⁰

Les eaux agressives, douces ou mal tamponnées (c.-à-d. à faible alcalinité) favorisent la lixiviation de l'aluminium à partir de matériaux cimentaires. Ce sont les mêmes conditions de qualité de l'eau qui favorisent la lixiviation du plomb et du cuivre. L'impact de la lixiviation

processus centrifuge rotatif. La gravité de la lixiviation est aussi fortement liée à la durée de contact entre l'eau et le revêtement en ciment.

Les services publics de distribution d'eau sont tenus de maintenir un niveau optimal de qualité de l'eau au niveau de l'admission dans le système de distribution et à plusieurs endroits dans le système de distribution, afin de réduire la lixiviation du plomb et du cuivre dans l'eau du robinet. Toutefois, lors d'analyses récentes à Flint, au Michigan, et d'études de lixiviation de plomb, l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) a découvert de nombreux cas, dans tous les États-Unis, où les services publics de distribution d'eau n'analysaient pas correctement la qualité de l'eau. Le Dr M. Edwards, de l'Université Virginia Tech, le scientifique qui a découvert les problèmes de lixiviation du plomb à Flint, a décrit les pratiques d'analyse de l'eau dans certaines parmi les plus grandes villes des États-Unis comme étant un « scandale ».²⁰³

Les inhibiteurs de corrosion aux polyphosphates attaquent également et amollissent les revêtements en ciment, ce qui accélère la lixiviation du ciment. « Ces inhibiteurs de corrosion peuvent également chélater et se complexer avec le calcium et l'aluminium solubles. »²⁰⁴

► Fer et manganèse en provenance des tuyaux en fonte

Il existe une inquiétude croissante au sujet des niveaux élevés de fer et de manganèse dans l'eau transportée par des systèmes de canalisations en fonte et il est clair que les niveaux de fer et de manganèse augmentent lorsque l'eau potable passe à travers des tuyaux en fonte corrodés.²⁰⁵ « L'excès de manganèse interfère avec l'absorption du fer alimentaire. L'exposition à long terme à

des niveaux excessifs peut entraîner une carence en fer... peut augmenter la croissance de bactéries dans l'eau. Des symptômes de toxicité semblables à ceux de la maladie de Parkinson (tremblements, raideurs musculaires) et l'excès d'apport de manganèse peuvent causer l'hypertension chez les patients de plus de 40 ans. Des augmentations significatives de la concentration en manganèse ont été trouvées chez les patients atteints d'hépatite grave et de post cirrhose hépatique, chez les patients dialysés et chez les patients souffrant de crises cardiaques. »²⁰⁶ Des concentrations élevées en manganèse sont également dangereuses pour les jeunes enfants et les femmes enceintes.²⁰⁷ « Le fer est un métal lourd potentiellement toxique. En excès, il peut causer le cancer, des maladies cardiaques et d'autres maladies. »²⁰⁸ Ainsi, il a été montré que la corrosion de la fonte augmente la dissolution du plomb dans l'eau.²⁰⁹ Un échantillon prélevé récemment à St Joseph, en Louisiane, a révélé une concentration de 230 fois le niveau maximal recommandé par l'EPA pour le fer dans l'eau potable.²¹¹



► Implications de la sélection de tuyaux

D'autres problèmes de qualité de l'eau résultent de l'utilisation de tuyaux en fonte ductile. Il existe une propension des revêtements intérieurs en mortier de ciment à se dégrader en présence d'eau agressive ou de hautes vitesses d'écoulement, et à se fissurer et à se rompre lors du taraudage de trous, de la flexion, de l'installation et du transport. La perte de revêtement intérieur entraîne un contact entre l'eau potable et la paroi des tuyaux en fonte ou des substrats, et il n'est pas possible d'analyser l'eau pour déterminer sa qualité et des risques potentiels pour la santé. Seul le revêtement en mortier de ciment à l'intérieur des tuyaux en fonte ductile est certifié à la norme NSF/ANSI 61, « Composants du système d'eau potable – Effets sur la santé », la paroi intérieure des tuyaux en fonte ne l'est pas. Par ailleurs, la tulipe des tuyaux en fonte ductile n'est pas revêtue, ce qui ajoute un certain risque pour la santé publique.

Contrairement aux tuyaux en béton et en fonte ductile, les tuyaux en PVC ne se corrodent pas à l'intérieur. L'utilisation d'énergie avec les tuyaux en PVC reste constante sur toute la durée de vie de 100 ans. En revanche, les tuyaux en fonte ductile subissent une dégradation de leurs parois intérieures et sont sujets à la corrosion, aux ruptures et aux fuites, ce qui augmente la consommation d'énergie et les coûts de pompage au fil du temps. Les tuyaux en fonte ductile ont également des coûts d'entretien, de réparation et de remplacement plus élevés. La plupart des canalisations d'eau n'ont pas des pressions très élevées et, par conséquent, n'ont pas besoin d'une force excessive pour surcompenser un système mal conçu ou mal utilisé. L'étude réalisée par l'Université d'État de l'Utah a rapporté que la pression moyenne dans les systèmes municipaux de distribution de l'eau en Amérique du Nord était de 531 kPa (77 psi) et que la plupart des réseaux de distribution de l'eau n'avaient pas besoin de force excessive pour leurs

canalisations.²¹² Les tuyaux en PVC présentent des taux de ruptures de canalisations inférieurs, moins de fuites et des coûts d'exploitation et d'entretien inférieurs, par rapport aux tuyaux en fonte ductile. Il en résulte que les tuyaux en PVC créent un environnement stable et durable pour la qualité de l'eau et protègent la santé publique.

Bien que l'association DIPRA revendique les avantages et les performances à long terme des tuyaux en fonte ductile d'une plus grande épaisseur, les tuyaux en fonte ductile sont beaucoup plus minces et sont sujets à la corrosion interne et externe. Des études ont montré que la longévité des tuyaux en fonte ductile était en chute libre en raison d'une réduction significative de l'épaisseur des parois des tuyaux en fonte ductile.²¹³ Les facteurs clés que les décideurs doivent prendre en compte lors de la sélection de matériaux de tuyaux sont la corrosivité du sol (les sols corrosifs affectent 75 % des infrastructures de l'eau aux États-Unis)²¹⁴ et l'agressivité de l'eau. Selon une étude de l'AWWA Water Research Foundation de 2011, les tuyaux en fonte ductile avec des parois fines (représentant la majorité des canalisations en métal vendues), placés dans des sols moyennement corrosifs, ont une espérance de vie de seulement 11 à 14 ans.²¹⁵ Les tuyaux qui présentent des défaillances prématurées à cause de la corrosion ne respectent pas l'environnement ou ni le développement durable. L'organisation NACE ne reconnaît pas l'enrobage des tuyaux en fonte ductile dans du plastique comme une mesure de contrôle de la corrosion.

► La corrosion du fer (eau rouge/rouillée) peut provoquer la lixiviation du plomb dans l'eau

En 2015, les Dr M. Edwards et Dr S. Masters de l'Université Virginia Tech ont publié un article intitulé *Increased Lead in Water Associated with Iron Corrosion* décrivant les analyses de l'eau.²¹⁶ L'article examine les réclamations de la part des consommateurs concernant les eaux rouges, les eaux « rouillées » et l'augmentation globale des teneurs en plomb. Les réclamations ont provoqué des tests intensifs sur le terrain, afin de trouver un lien éventuel entre une teneur plus élevée en particules de fer dans le système de distribution et les particules de plomb dans les tuyauteries des maisons. Cela a soulevé la question que, parfois, la corrosion du fer pourrait être fortement liée à la corrosion du plomb. Dans la mesure où la corrosion des tuyaux en fonte peut augmenter la libération de plomb, la réduction du plomb dans l'eau peut nécessiter des infrastructures de distribution de l'eau non corrosives ou de contrôler la corrosion du fer, contrairement aux approches actuelles qui se concentrent exclusivement sur la réduction de la solubilité du plomb.

Ils ont montré une forte corrélation entre le type d'eau, le pH et la présence de corrosion du fer ou du plomb. La libération de plomb était plus de 150 % plus élevée en présence de fer, ce qui s'explique probablement par la sorption ou la coprécipitation du plomb sur les particules de fer détachées. Des eaux riches en fer s'écoulent dans des canalisations contenant du plomb, absorbent le plomb, puis le libèrent dans l'eau du robinet chez les consommateurs.²¹⁷

► La corrosion du fer (eau rouge/rouillée) peut épuiser les désinfectants de l'eau

Les chlorures sont généralement considérés comme très corrosifs pour le fer. Par exemple, les chlorures présents dans les sels de voirie appliqués pendant l'hiver font rouiller le fer des carrosseries de voitures et des ponts. De nombreux services publics de distribution d'eau ajoutent un produit chimique inhibiteur de corrosion (orthophosphate) à l'eau

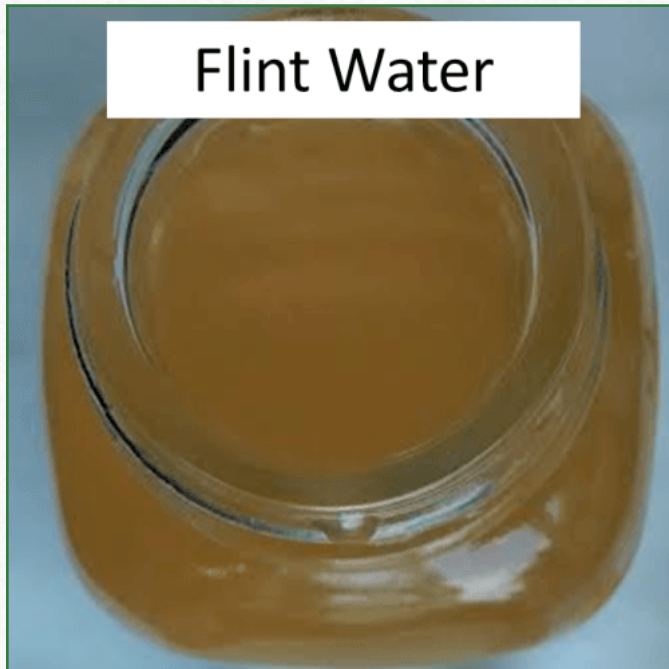
pour aider à réduire la corrosion des métaux comme le fer et le plomb. La corrosion du fer peut causer de sérieux problèmes lorsque les services publics de distribution d'eau essaient de satisfaire aux normes d'eau potable du gouvernement, parce que la corrosion du fer consomme le chlore, alors que le chlore est nécessaire pour assurer la salubrité de l'eau. Une teneur en fer dans l'eau élevée peut retirer les désinfectants comme le chlore, et permettre la croissance de bactéries nocives, qui peuvent causer des maladies telles que la maladie du légionnaire.²¹⁸ Le Dr M. Edwards, de l'Université Virginia Tech, soutient également que la corrosion dans les canalisations de distribution d'eau fournit des nutriments, comme le fer, qui sont une source de nourriture pour les agents pathogènes comme la légionella.²¹⁹

► Impacts sur la santé

L'exposition au plomb peut provoquer une série de conséquences sur la santé, en particulier chez les enfants de moins de 6 ans et chez les femmes enceintes. À Flint, dans le Michigan, entre 6 000 et 12 000 enfants ont été exposés à une eau potable avec une teneur élevée en plomb. L'exposition au plomb peut avoir un impact sur la capacité d'apprentissage ainsi que causer des problèmes de comportement.²²⁰

Du chlore est ajouté à l'eau afin d'empêcher la croissance de micro-organismes pouvant causer des maladies, et maintenir un résidu de chlore est la meilleure façon de protéger la santé du public contre les pathogènes.

FIGURE A.24 : LA CORROSION DU FER DONNE À L'EAU UNE COULEUR ROUGE/ROUILLÉE



Les municipalités souffrant de problèmes de corrosion et de contrôles chimiques insuffisants pourraient exposer leurs clients à d'éventuels problèmes de santé et de sécurité publiques, au-delà de la contamination par le plomb. L'épidémie de la maladie du légionnaire, dans la région de Flint, qui a tué 10 personnes et en a affecté 77 a vraisemblablement été causée par une absence de chlore résiduel dans les canalisations pour continuer le processus de désinfection.²²¹

Selon le Dr M. Edwards, le système de distribution d'eau de Flint n'ayant pas un niveau adéquat d'inhibiteurs de corrosion à l'intérieur de ses canalisations, les tuyaux en fonte ont lixivié des teneurs élevées en fer, créant des conditions propices pour la croissance de bactérie, ce qui aurait contribué à l'épidémie de la maladie du légionnaire.²²²

► Corrosion des tuyaux en fonte et problèmes de qualité de l'eau à Flint

La corrosion du fer donne à l'eau une couleur rouge/rouillée. À Flint, au Michigan, les résidents s'étaient plaints que l'eau avait une couleur rouge/rouillée. Reportez-vous à la figure A.24 pour un exemple d'eau potable affectée par la corrosion et à la figure A.25 pour des exemples de canalisations d'eau en fonte corrodées déterrées à Flint.²²³ La présence de fer dans l'eau peut rendre difficile pour les municipalités de respecter les normes gouvernementales, parce que la corrosion du fer consomme le chlore, ce qui rend le développement de bactéries dans l'eau plus probable. Il est possible que, avec le système de canalisations en fonte sans revêtement utilisé à Flint et la demande en eau relativement faible (en raison de la diminution de la population et de la perte d'activités industrielles), il soit très difficile de respecter les normes fédérales en matière de niveau minimum de chlore, indépendamment des mesures prises pour traiter l'eau.²²⁴ Reportez-vous à la figure A.26 pour un exemple de la diminution du niveau de chlore en fonction de l'exposition au fer.²²⁵

FIGURE A.25 : ÉCHANTILLONS DE TUYAUX EN FONTE CORRODÉS EN PROVENANCE DE FLINT, AU MICHIGAN



FIGURE A.26 : DÉCLIN DE LA TENEUR EN CHLORE DANS L'EAU DE LA RIVIÈRE FLINT EN PRÉSENCE ET EN ABSENCE DE FER



► Le pH de l'eau d'une source peut changer

Certaines eaux de source naturelle contenant du calcium et carbonate en présence de manganèse et de fer peuvent créer un film protecteur sur la surface de tuyaux en fonte. Cependant, la formation et la stabilité de ce film peuvent être facilement compromises en présence d'acides et produire une corrosion localisée.²²⁶ L'eau peut devenir acide de plusieurs façons, y compris par une augmentation de sa teneur en CO₂, lorsqu'elle est stagnante ou en présence de quantités excessives de chlore.²²⁷ L'eau peut subir une hydrolyse et former de l'acide chlorhydrique et de l'acide hypochloreux. Ce processus abaisse le pH, ronge tout revêtement protecteur sur une surface métallique et amorce une corrosion par piqûres. Les températures saisonnières, une diminution de consommation de l'eau et une évolution des conditions peuvent également provoquer de la corrosion.²²⁸

ÉTUDE DE CAS COMPARATIVE D'ACV DE TUYAUX D'ÉGOUT

Une étude indépendante a été publiée, basée sur des ACV, pour analyser la performance environnementale de quatre matériaux différents, utilisés pour les infrastructures de canalisations de transport d'eaux usées. Cette étude a été publiée en 2015 par Procedia Engineering et menée par l'Université de Purdue, *Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping Systems*.

« Une étude comparative de la phase utilisation pour des matériaux de tuyaux différents a été réalisée. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure A.27. La phase exploitation a été spécialement choisie pour l'étude parce que cette phase présente l'impact le plus important pour chacun des quatre types de matériaux. La figure révèle l'impact de la phase exploitation des quatre matériaux (fonte ductile, béton, polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) et PVC) sur les diverses catégories d'impacts environnementaux, qui sont représentées selon une échelle de pourcentage. La phase exploitation de tuyaux en fonte ductile a été déterminée comme étant la plus délétère, affectant dans une large mesure presque toutes les catégories, à l'exception de l'écotoxicité, qui a été affectée le plus par la phase exploitation de tuyaux en béton. En dépit du fait que la phase exploitation de tuyaux en fonte ductile a un impact négatif considérable sur la réduction de la couche d'ozone, comme du polystyrène est utilisé dans la production de tuyaux en PRFV et que des hydrochlorofluorocarbones (HCFC) sont générés au cours du processus, la phase exploitation de tuyaux en PRFV est considérée comme la phase ayant l'impact le plus sérieux sur la catégorie réduction de la couche d'ozone. La production de tuyaux en PRFV et en PVC affecte également l'environnement, mais pas autant que la fonte ductile.¹²²⁹

Parmi les quatre types de tuyaux analysés par l'Université de Purdue, la fonte ductile présente l'impact sur l'environnement et sur la santé le plus significatif, tandis que le PVC présente l'impact le plus faible, comme le montre la figure A.28. En particulier, la fonte ductile a obtenu le score le plus élevé parmi tous les matériaux dans la production de substances carcinogènes. Cette étude est cohérente avec les résultats de la présente *Analyse du cycle de vie des canalisations d'eau potable et d'égouts en PVC et analyse de durabilité des matériaux de tuyaux*.

FIGURE A.27 : GRAPHIQUE DE CARACTÉRISATION DE LA COMPARAISON DU CYCLE DE VIE POUR TOUS LES MATÉRIAUX DE TUYAUX

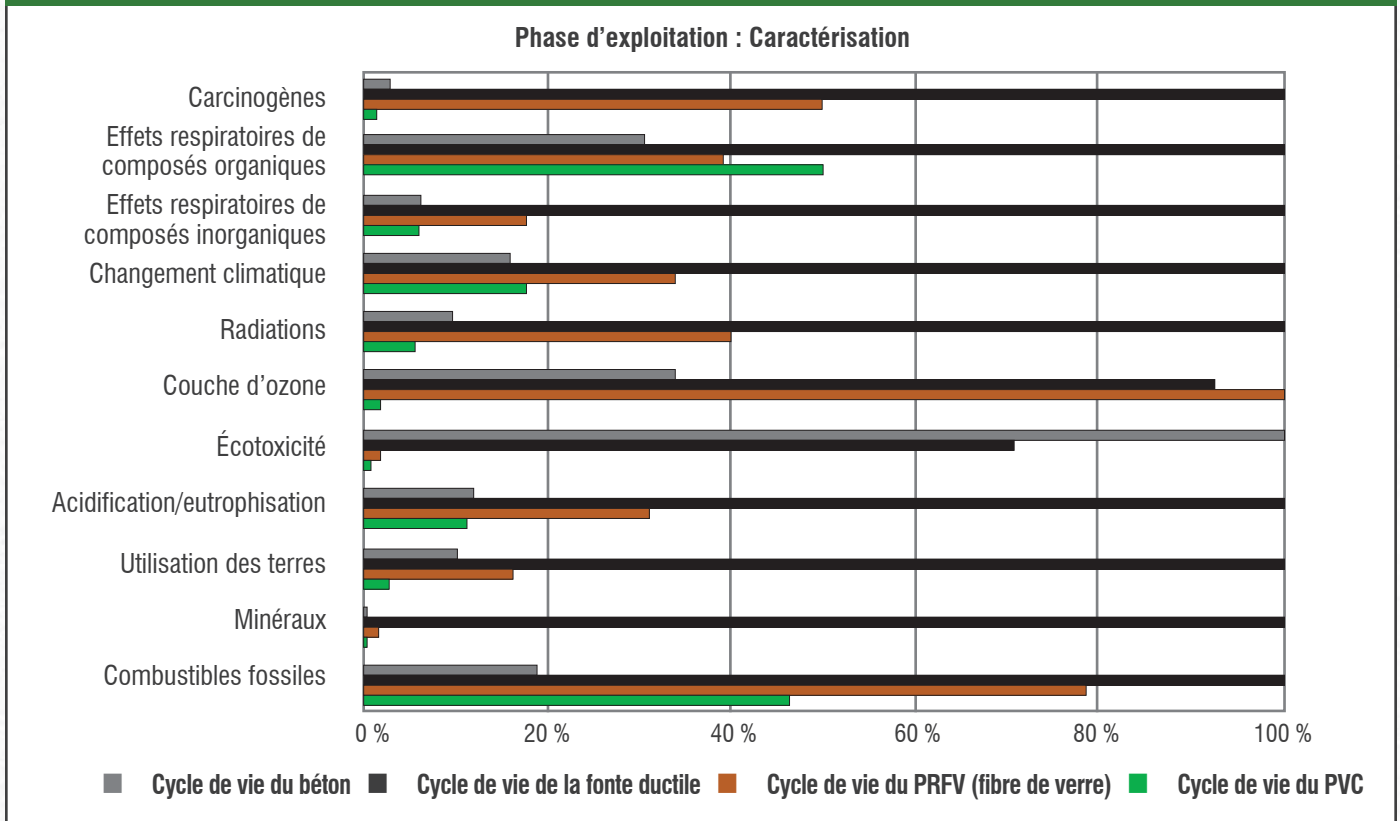
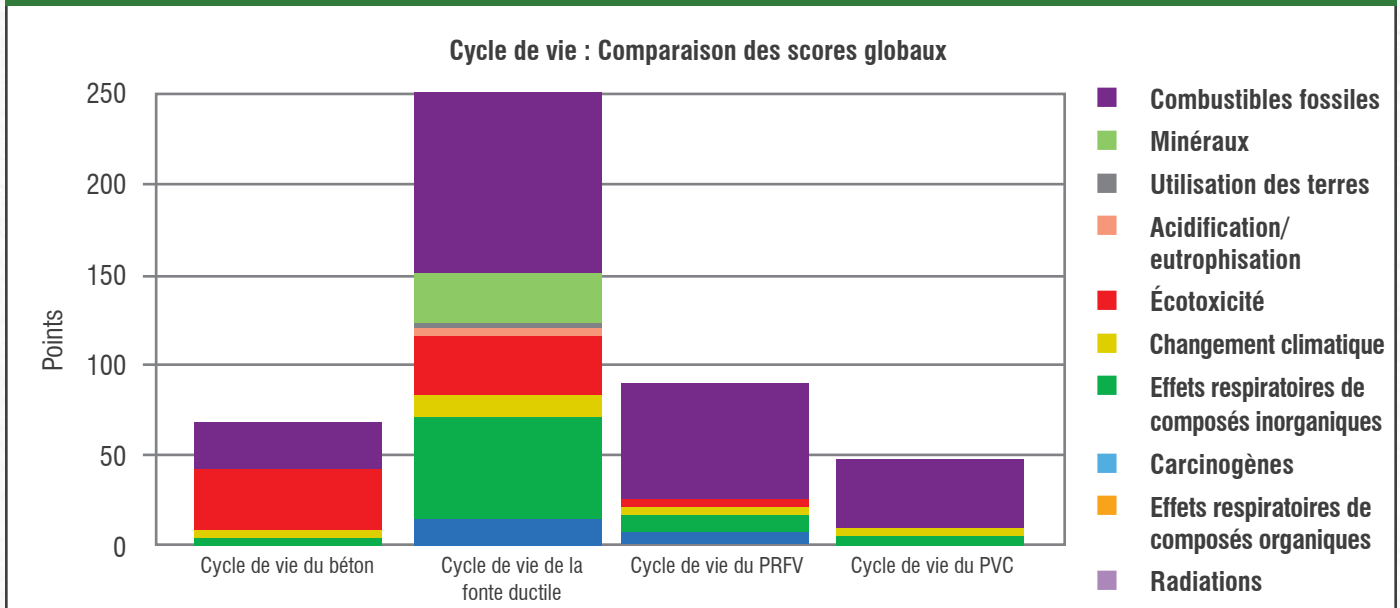


FIGURE A.28 : GRAPHIQUE DES SCORES GLOBAUX DE LA COMPARAISON DU CYCLE DE VIE POUR LES DIVERS MATÉRIAUX DE TUYAUX



RÉFÉRENCES

- 1 U.S. Environmental Protection Agency. "A Handbook for Water and Wastewater Utilities." <http://water.epa.gov/infrastructure/sustain/upload/EPA-s-Planning-for-Sustainability-Handbook.pdf>.
- 2 U.S. Environmental Protection Agency. National Water Program: Climate Change; Actions for 2015. June 2015. Washington, DC.
- 3 NSF International. "Environmental Product Declaration." Accordance with ISO 14025. May 15, 2015. p. 22.
- 4 U.S. Environmental Protection Agency. "Permeation and Leaching." *AWWA*. (2002). p. 10.
- 5 Walter, R. K., Lin, P. H., Edwards, M., Richardson, R. E. "Investigation of Factors Affecting the Accumulation of Vinyl Chloride in Polyvinyl Chloride Piping Used in Drinking Water Distribution Systems." *Water Research* 45, no. 8 (2011): 2607-2615.
- 6 Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). "Toxicological Profile for Vinyl Chloride." *U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service*. (2006). p. 188.
- 7 "Buried No Longer: Confronting America's Water Infrastructure Challenge." *AWWA*. Denver, CO. (2012).
- 8 Anderson, R. "Municipal Procurement: Procurement Process Improvements Yield Cost-Effective Public Benefits." *U.S. Conference of Mayors*. Washington, DC. (2013).
- 9 Burn, S., Davis, P., Schiller, T., Tiganis, B., and Tjandraatmadja, G. "Long-Term Performance Prediction for PVC Pipes." *AWWA Research Foundation*. (2005).
- 10 Alferink, F., Janson, L. E., Holloway, L., "Old PVC-U Water Pressure Pipes: Investigation into Design and Durability." PVC 1996 Conference Proceedings, 42C382 Institute of Materials, Brighton, England, April 1996, pp. 87-96.
- 11 Kirby, P. C. "PVC Pipe Performance in Water Mains and Sewers." Int. Conference on Underground Plastic Pipe. ASCE. New Orleans, LA. March 1981.
- 12 Folkman, S. "Expected Life of PVC Pipe." Letter to Albert Thomas, Bharadwaj R. K. Mantha, and Carol C. Menassa. *Utah State University*. July 22, 2016. http://static1.squarespace.com/static/56748c1d25981d39eaa27bed/t/57aa38072e69cf19b9780c38/1470773256007/Expected_Life_of_PVC_Pipe.pdf.
- 13 Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S." *National Taxpayers Union*. (April 2013).
- 14 Water Main Break Clock. <http://www.watermainbreakclock.com/>.
- 15 "U.S. Municipal Water Infrastructure: Utility Strategies & CAPEX Forecasts, 2016-2025." <http://bluefieldresearch.com/research/municipal-water-capex/>. (Accessed July 15, 2016).
- 16 Uni-Bell PVC Pipe Association. "Handbook of PVC Pipe Design and Construction." *Industrial Press, Inc*. December 2012.
- 17 This Introduction is Based on International Standards in the ISO-14040 Series, Environmental Management – Life Cycle Assessment.
- 18 UL Environment. "Addendum Product Category Rules for Preparing an Environmental Product Declaration for PCR: Piping Systems for use for Sewage and Storm Water (Under Gravity)." Version 2. June 10, 2014.
- 19 NSF International. "NSF International Verifies First Environmental Product Declaration for PVC Water and Sewer Pipes." May 19, 2015. <http://www.nsf.org/newsroom/nsf-international-verifies-first-environmental-product-declaration-for-wate>.
- 20 Athena Sustainable Materials Institute. "LCA, LCI, LCIA, LCC: What's the Difference?" <http://www.athenasmi.org/resources/about-lca/whats-the-difference/>. (Accessed November 30, 2014).

- 21** Water Environment & Reuse Foundation. "Life Cycle Costing." <http://simple.werf.org/simple/media/LCCT/index.html>. (Accessed November 30, 2014).
- 22** Marangoni, A. "PVC Products Competitiveness. A Total Cost of Ownership Approach." Brussels, Belgium. 2011.
- 23** UL Environment. "Piping Systems for Use for Sewage and Storm Water (Under Gravity)." *The Norwegian EPD Foundation*, with Addendum v2. September 2012. Addendum June 2014.
- 24** Iplex Pipelines. "Environmental Product Declaration (EPD) PVC Pressure Pipes." Compliance in Accordance with ISO 14025 and EN 15804 Version 1.10." Approval Date June 12, 2015.
- 25** IPCC Press Release. September 27, 2013. http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/press_release_ar5_wgi_en.pdf.
- 26** Vinyl Siding Institute. "Environmental Product Declaration. Vinyl Siding Industry Average." Accordance with ISO 14025.
- 27** Krock, R., Middleton, G. "The Role of PVC Resins in Sustainable Design." *The Vinyl Institute*. ANTEC 2013.
- 28** Krock, Middleton. p. 2760.
- 29** "An Inventory of Sources and Environmental Releases of Dioxin-Like Compounds in the U.S. for the Years 1987, 1995, and 2000 (Final, Nov. 2006)." *U.S. Environmental Protection Agency*. Washington, DC, EPA/600/P-03/002F.
- 30** Davidson, Lee. "U.S. Magnesium Still 'Worst Polluter.'" *Deseret News*. January 22, 2003. <http://www.deseretnews.com/article/960632/US-Magnesium-still-worst-polluter.html?pg=all>. (Accessed July 2, 2016).
- 31** NAS Review Draft Dioxin Reassessment. Chapter 7. https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/dioxin/nas-review/pdfs/part1_vol1/dioxin_pt1_vol1_ch07_dec2003.pdf. (Accessed December 3, 2013).
- 32** Oehme, M., Manø, S., Bjerke, B. "Formation of Polychlorinated Dibenzofurans and Dibenzo-P-Dioxins by Production Processes for Magnesium and Refined Nickel." *Chemosphere* 18, no. 7-8 (1989): 1379-1389.
- 33** UNEP. "Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional PoPs under Article 5 of the Stockholm Convention." January 2013. <http://toolkit.pops.int/Publish/Downloads/UNEP-POPS-TOOLKIT-2012-En.pdf>.
- 34** Wilson, Alex. "What USGBC's PVC Report Means for GreenSpec." *Building Green*. April 5, 2007. <https://www.buildinggreen.com/op-ed/what-usgbc-pvc-report-means-greenspec>. (Accessed December 13, 2013).
- 35** "TRI Data and Tools." *Toxics Release Inventory (TRI) Program*. <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-data-and-tools>.
- 36** "National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Iron and Steel Foundries." April 22, 2004. p. 21906.
- 37** Jones, A. J. "The Industrial Ecology of the Iron Casting Industry." *PhD diss., Massachusetts Institute of Technology*. (2007). <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39876/181655903-MIT.pdf?sequence=2>.
- 38** Cannon, F., et. al., "Use of Advanced Oxidation Technology for Emissions and Materials Reduction at Foundries." *U.S. Environmental Protection Agency*. (2005).
- 39** U.S. Environment Protection Agency. "Emission Factors for Iron Foundries—Criteria and Toxic Pollutants." 1990. EPA-600/2-90-044.
- 40** U.S. Environment Protection Agency. "Compilation of Air Pollutant Emissions Factors: Stationary Point and Area Sources AP 42." 5th Edition. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>. (Accessed January 28, 2015).
- 41** Munoz, G. R., Marta A. P. "Pollution Prevention and Management Strategies for Dioxins in the New York/New Jersey Harbor." *New York Academy of Sciences*. 2006; Dwain Winters. Dioxin Policy Project. EPA Headquarters.
- 42** "Guidance for the Identification and Control of Safety and Health Hazards in Metal Scrap Recycling." *Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor*. Washington, DC. (2008). <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3348-metal-scrap-recycling.pdf>.
- 43** "General Procedure for Removing Mercury Switches from Vehicles." General Scrap Partnership. (2008). <http://generalscrappartnership.com/mercury%20bounty/Mercury%20Switches%20in%20Vehicles.pdf>.
- 44** Jones, A. J. "The Industrial Ecology of the Iron Casting Industry." *PhD diss., Massachusetts Institute of Technology*. (2007). <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39876/181655903-MIT.pdf?sequence=2>.

- 45 “The Manufacturing Process.” Duktus. <http://www.duktus.com/en/the-world-of-ductile-cast-iron-pipes/the-manufacturing-process.html>. (Accessed January 28, 2015).
- 46 Hoss, G. “How it’s Made: Ductile Iron Pipe.” Season 7, Episode 5. Discovery Channel. 2007.
- 47 Eppich, R. E. “Energy Use in Selected Metalcasting Facilities - 2003.” U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. May 2004.
- 48 VinylPlus. “PVC Recycling Technologies.” p. 11, 19. <http://www.vinylplus.eu/uploads/Modules/Documents/2015-04-20-pvc-recycling-brochure---english.pdf>.
- 49 Welling, S., Sinha, S., Baird, G. M., Feeney, C., Galleher, J., Rothermich, T., Sorenson, E. “Cost Information for Drinking Water Pipelines Synthesis Report.” *Water Environment Research Foundation*. (2013).
- 50 Verlaan, Peter. “30% ‘Installation Time’ Saving When Using a Plastics Sewer System.” Proceedings of the 17th Plastic Pipes Conference – PPXVII. Chicago, IL. September 2014. http://www.thinkpipethinkpvc.com.au/images/pdfs/17_Plastic_Pipe_Conference/Zoran_DAVIDOVSKI_Sewer_Installation_Time__Comparing_PVC_with_concrete_1.pdf. (Accessed January 13, 2016).
- 51 Stahmer, M. W., Whittle, A. J. “Long Term Performance of PVC Pressure Pipes in a Large Rural Water Supply Scheme.” Plastics Pipes XI Conference. Munich, Germany. September 2001.
- 52 Whittle, A. J., Tennakoon, J. “Predicting the Residual Life of PVC Sewer Pipes.” *Plastics, Rubber and Composites* 34, no. 7 (2005): 311-317.
- 53 Rockaway, T.D, et al. “Performance of Elastomeric Components in Contact with Potable Water.” *AWWA Research Foundation*. (2007).
- 54 U.S. Environmental Protection Agency. “Using DWSRF Funds for Transmission and Distribution Infrastructure Needs.” February 2003.
- 55 Water Environment & Reuse Foundation. “Overview – What is ‘Remaining Effective Life?’” <http://simple.werf.org/simple/media/RELT/index.html>.
- 56 Cityworks. “Asset Management.” <http://www.cityworks.com/products/what-is-cityworks/asset-management/>.
- 57 The Institute for Public Procurement. “Public Procurement Practice: Performance Based Contracting.” 2012. <http://www.nigp.org/docs/default-source/New-Site/global-best-practices/performancebased.pdf?sfvrsn=2>.
- 58 Narasimhan H., Chew M.Y.L. “Integration of Durability with Structural Design: an Optimal Life Cycle Cost Based Design Procedure for Reinforced Concrete Structures.” *Construction and Building Materials* 23, no. 2 (2009): 918-929.
- 59 Farshad, M. “Plastic Pipe Systems: Failure Investigation and Diagnosis.” Vol. 407. *Elsevier*. 2011.
- 60 St. Clair, A. M. “Development of a Novel Performance Index and a Performance Prediction Model for Metallic Drinking Water Pipelines.” *Virginia Polytechnic Institute and State University*. (2013).
- 61 Beale, D., Tran, D., Gould S., Lane, B., Marlow, D. “Practical Tool for Deciding Rehabilitation Techniques for Cast Iron Pipes – Literature Review.” *Water Research Foundation and CSIRO*. (2011).
- 62 Folkman, S. “PVC Pipe Longevity Report: Affordability & The 100+ Year Benchmark Standard. A Comprehensive Study on PVC Pipe Excavation’s, Testing & Life Cycle Analysis.” *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2014).
- 63 Hulsmann, T., Nowack, R. “70 Years of Experience with PVC Pipes.” Worldwide Pipe Symposium. Milan, Italy. (2004).
- 64 Whittle, A. J., Tennakoon, J. “Predicting the Residual Life of PVC Sewer Pipes.” *Plastics, Rubber and Composites* 34, no. 7 (2005): 311-317.
- 65 Alferink, F., Guldbaek, E., Grootoonk, J. “Old PVC Gravity Sewer Pipes: Long Term Performance.” Plastics Pipes IX Conference Proceedings. Edinburgh, Scotland. (1995). p. 40-51.
- 66 Thomson, J. C. “An Examination of Innovative Methods used in the Inspection of Wastewater Systems.” *Water Environment & Reuse Foundation*. (2004). p. ES-9.
- 67 “Optimizing Public Agency Purchasing Power.” *National Association of Clean Water Agencies (formerly the Association of Metropolitan Sewerage Agencies when the report was published) and Water & Wastewater Equipment Manufacturers Association*. Washington, DC. https://www.wwema.org/files/optimizing_public_agency_purchasing_power.pdf.

- 68** Masters, S., Edwards, M. "Increased Lead in Water Associated with Iron Corrosion." *Environmental Engineering Science* 32, no. 5 (2015): 361-369.
- 69** Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study." *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 70** Brailey, D., Jacobs, A. "Energy Management in the Waterworks Industry." *Journal of New England Water Works Association* 94, no. 3 (1980).
- 71** Folkman S., Rice J., Sorenson, A., Braithwaite, N. "Survey of Water Main Failures in the United States and Canada." *Journal American Water Works Association* 104, no. 10 (2012): 70-79.
- 72** Cohen, B. R. "Fixing America's Crumbling Underground Water Infrastructure." *Competitive Enterprise Institute*. (2012). p. 6.
- 73** Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes." *The University of Texas at Arlington*. (2012). p. 58.
- 74** National Research Council. "Review of the Bureau of Reclamation's Corrosion Prevention Standards for Ductile Iron Pipe." *National Academies Press*. (2009).
- 75** Rajani, B., Kleiner, Y., Krys, D. "Long-Term Performance of Ductile Iron Pipes." *Water Research Foundation*. (2011). p. 103.
- 76** "Coatings Manual. Appendix A: Basics on Corrosion in Wastewater Collection and Treatment Systems: The Corroding Environments and Materials." *Hampton Roads Sanitation District*. <http://www.hrsd.com/pdf/Coatings%20Manual/2011/APPENDIX%20A.pdf>. (Accessed July 1, 2016).
- 77** Bueno, S. M. "What Lies Underground? Trenchless Technology Polls Municipalities on Sewer Pipe Usage." *Trenchless Technology 2010 Pipe Materials Guide*. (2010): P8-11. http://www.trenchlessonline.com/pdfs/2010_Pipe_Materials_Guide.pdf.
- 78** Anderson, R. "Municipal Procurement: Procurement Process Improvements Yield Cost-Effective Public Benefits." *U.S. Conference of Mayors*. Washington, DC. (2013).
- 79** "pH -- Water Properties." U.S. Geological Survey. <http://water.usgs.gov/edu/ph.html>.
- 80** Krieger, Nick. "What Makes Flint River Water So Corrosive?" *Fix the Mitten*. September 27, 2015. <http://www.fixthemitten.com/blog/what-makes-flint-river-water-so-corrosive>.
- 81** Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes." *The University of Texas at Arlington*. (2012). p. 14.
- 82** Cochran, T. "Report Prepared for the Conference of Mayors Winter Leadership Meeting Regarding the Flint Water Crisis." *U.S. Conference of Mayors*. February 18, 2016.
- 83** "Detroit Water Master Plan." Appendix H. *Great Lakes Water Authority*. 2015. http://www.glwater.org/wp-content/documents/procurement/masterplan_freshwater/task_c_appendix_h/C-Factor_Projections.pdf.
- 84** St. Clair, A. M. "Development of a Novel Performance Index and a Performance Prediction Model for Metallic Drinking Water Pipelines." *Virginia Polytechnic Institute and State University*. (2013).
- 85** "Detroit Water Master Plan." Appendix H. *Great Lakes Water Authority*. 2015. http://www.glwater.org/wp-content/documents/procurement/masterplan_freshwater/task_c_appendix_h/C-Factor_Projections.pdf.
- 86** American Water Works Service Co., Inc. "Deteriorating Buried Infrastructure Management Challenges and Strategies." *U.S. Environmental Protection Agency*. Washington, DC. (May 2002). p. 4.
- 87** IPEX. "Hydraulics of PVC Pipe." *Technical Information Bulletin*.
- 88** Neale, L. C., Price, R. E. "Flow Characteristics of PVC Sewer Pipe." *Journal of the Sanitary Engineering Division* 90, no. 3 (1964): 109-132.
- 89** Uni-Bell PVC Pipe Association. "Handbook of PVC Pipe Design and Construction." *Industrial Press, Inc*. December 2012.
- 90** "M23 PVC Pipe – Design and Installation." *American Water Works Association*. Second Edition. 2002.
- 91** St. Clair, A. M. "Development of a Novel Performance Index and a Performance Prediction Model for Metallic Drinking Water Pipelines." *Virginia Polytechnic Institute and State University*. (2013).

- 92** Recio, J., Guerrero, P., Ageitos, M., Narvaez, R. "Estimate of Energy Consumption and CO₂ Emission Associated with the Production, Use and Final Disposal of PVC, HDPE, PP, Ductile Iron and Concrete Pipes." *Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya*. (December 2005). <http://www.pvc4pipes.com/images/pdfs/Univ-Catalunya-pipes-energy-study-2005.pdf>.
- 93** St. Clair, A. M. "Development of a Novel Performance Index and a Performance Prediction Model for Metallic Drinking Water Pipelines." *Virginia Polytechnic Institute and State University*. (2013).
- 94** Piratla, K. R., Ariaratnam, S. T., Cohen, A. "Estimation of CO₂ Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project." *Journal of Management in Engineering* 28, no. 1 (2011): 22-30.
- 95** Du, F., Woods, G. J., Kang, D., Lansey, K. E., Arnold, R. G. "Life Cycle Analysis for Water and Wastewater Pipe Materials." *Journal of Environmental Engineering* 139, no. 5 (2012): 703-711.
- 96** Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S." *National Taxpayers Union*. (April 2013).
- 97** Baird. p. 8.
- 98** Meland, I. S. "Durability of Mortar Linings in Ductile Iron Pipes." *National Research Council Canada*. (1999).
- 99** American Concrete Pressure Pipe Association. "Lessons Learned from Iron Pipe – Volume 6." (unpublished).
- 100** Spickelmire, W. "Corrosion Control Considerations for Ductile Iron Pipe – A Consultant's Perspective." *National Association of Corrosion Engineers*. International 57th Annual Appalachian Underground Corrosion Short Course. (May 2012); Prosser, M. E., Speight, V. L., Filion, Y. R. "Life-Cycle Energy Analysis of Performance-Versus Age-Based Pipe Replacement Schedules." *Journal American Water Works Association* 105 (2013): E721-E732.
- 101** Romanoff, M. "Exterior Corrosion of Cast-Iron Pipe." *Journal American Water Works Association* 56, no. 9 (1964): 1129-1143. <http://www.awwa.org/publications/journal-awwa/abstract/articleid/29324541.aspx>; Romanoff, M. "Results of National Bureau of Standards Corrosion Investigations in Disturbed and Undisturbed Soils." Technical Bulletin No. 86. Presented at the Twelfth Annual Appalachian Underground Corrosion Short Course. (1967).
- 102** Gerhold, W. F. "Corrosion Behavior of Ductile Cast-Iron Pipe in Soil Environments." *Journal American Water Works Association* 68, no. 12 (1976): 674-678. <http://www.awwa.org/publications/journal-awwa/abstract.aspx?articleid=10214>.
- 103** Bonds, R. W., Barnard, L. M., Horton, A. M., Oliver, G. L. "Corrosion and Corrosion Control of Iron Pipe: 75 Years of Research." *Journal American Water Works Association* 97, no. 6 (2005): 88-98. <http://www.awwa.org/publications/journal-awwa/abstract.aspx?articleid=15256>.
- 104** American Concrete Pressure Pipe Association. "Lessons Learned from Iron Pipe." Volumes 1-6. (unpublished).
- 105** Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S." *National Taxpayers Union*. (April 2013).
- 106** Anderson, R. "Municipal Procurement: Procurement Process Improvements Yield Cost-Effective Public Benefits." *U.S. Conference of Mayors*. Washington, DC. (2013).
- 107** Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S." *National Taxpayers Union*. (April 2013).
- 108** Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes." *The University of Texas at Arlington*. (2012). p. 59.
- 109** Rossum, J. "Prediction of Pitting Rates in Ferrous Metals from Soil Parameters." *Journal American Water Works Association*. (June 1969). p. 305.
- 110** O'Day, D. K. "Organizing and Analyzing Leak and Break Data for Making Main Replacement Decisions." *Journal American Water Works Association*. November 1982. p. 589.
- 111** O'Day.
- 112** Spickelmire, W. "Corrosion Control Considerations for Ductile Iron Pipe – A Consultant's Perspective." *National Association of Corrosion Engineers*. International 57th Annual Appalachian Underground Corrosion Short Course. (May 2012).
- 113** Schramuk, J., Rash, V. "Cathodic Protection for a New Ductile Iron Water Transmission Main." *Materials Performance* 44, no. 10 (2005): 20-24.

- 114** Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S." *National Taxpayers Union*. (April 2013).
- 115** MacLeod, S. P. "Evaluating the Impact of Climate Change Mitigation Strategies on Water Distribution System Design and Optimization." Appendix A. *Queens's University*. (2010).
- 116** Smart Certified. "Ductile Iron Pipe." <http://mts.sustainableproducts.com/DIP%20SMaRT%20Summary%20Sheet-1.pdf>.
- 117** Spirinckx, C., Karolien, P., Hannes, P. "Life Cycle Assessment of a PVC-U Versus Ductile Iron Pipe Systems for Water Distribution." *VITO*. (December 2013).
- 118** Recio J, Guerrero P, Ageitos M, Narvaez R. "Estimate of Energy Consumption and CO₂ Emission Associated with the Production, Use and Final Disposal of PVC, HDPE, PP, Ductile Iron and Concrete Pipes." *Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya* (December 2005). <http://www.pvc4pipes.com/images/pdfs/Univ-Catalunya-pipes-energy-study-2005.pdf>.
- 119** University of Sheffield. "Leaky Pipes can Allow Contaminants Into our Drinking Water." *ScienceDaily*. June 7, 2015. www.sciencedaily.com/releases/2015/06/150607214248.htm. (Accessed February 18, 2016).
- 120** Adam, David. "The Unheralded Polluter: Cement Industry Comes Clean on its Impact." *The Guardian*. October 12, 2007. <http://www.theguardian.com/environment/2007/oct/12/climatechange>. (Accessed April 15, 2014).
- 121** Marceau, M. L., Nisbet, M. A. "Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete." *Portland Cement Association*. (July 2007).
- 122** Chilana, L. "Carbon Footprint Analysis of a Large Diameter Water Transmission Pipeline Installation." *The University of Texas at Arlington*. (May 2011).
- 123** Baitz, M. et al. "Life Cycle Assessment of PVC and of Principal Competing Materials." Commissioned by the European Commission. (July 2004).
- 124** Romer, A., Ellison, D., Bell, G., Clark, B. "Failure of Prestressed Concrete Cylinder Pipe." *AWWA Research Foundation and U.S. Environmental Protection Agency*. (2008).
- 125** Hassinen, J., Lundbäck, M., Ifwarson, M., Gedde, U. W. "Deterioration of Polyethylene Pipes Exposed to Chlorinated Water." *Polymer Degradation and Stability*, 84(2): 261-267. (2004).
- 126** Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum." (August 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%208-08.pdf>. (Accessed March 15, 2016).
- 127** "MSS PE Pipe – Design and Installation." *American Water Works Association*. First Edition. 2006.
- 128** Rozental-Evesque, M., Geoffray, D., Jacq, P., Rabaud, B. "The Polyethylene Sustainable Life-Cycle[®], How To Improve Polyethylene Longevity?" *Suez-Environnement*.
- 129** Krishnaswamy, P., Shim, D. J. "A Review of Service Life Prediction Models for High Density Polyethylene Piping for Nuclear Safety-Related Applications." *Engineering Mechanics Corporation of Columbus*. <http://www.nrc.gov/docs/ML1025/ML102500337.pdf>.
- 130** Krishnaswamy, P. "Summary Report on Task 2 – Evaluate the Acceptability of Existing Applicable Standards." *Engineering Mechanics Corporation of Columbus*. (October 2007). <http://www.nrc.gov/docs/ML1427/ML14273A451.pdf>.
- 131** Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum." (August 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%208-08.pdf>. (Accessed March 15, 2016).
- 132** Rabaud, B., et. al. "What is the Risk of Plastic Pipe Long-Term Degradation on Water Quality?" *Plastics Pipes XVI*. Barcelona, Spain, September 2012.
- 133** Martel, K., Klewicki, K. "State of the Science: Plastic Pipe." *Water Research Foundation*. (2016).
- 134** Hassinen, J., Lundbäck, M., Ifwarson, M., Gedde, U. W. "Deterioration of Polyethylene Pipes Exposed to Chlorinated Water." *Polymer Degradation and Stability*, 84(2): 261-267. (2004).
- 135** Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum." (August 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%208-08.pdf>. (Accessed March 15, 2016).

- 136** Rabaud, B., Rozental-Evesque, M., “Interactions Between Polyethylene Water Pipes and Disinfectants Used in Drinking Water Treatments: How to Characterize the Ageing?” In Proceedings of Eurocorr Conference, Edinburgh, Scotland, September 7 – 11. (2008).
- 137** Abolmaali, A., Mothari, A. “Evaluation of HDPE Pipelines Structural Performance.” *The University of Texas at Arlington*. (2010).
- 138** Hammond, G., Jones, C. “Inventory of Carbon and Energy.” Version 2.0. *University of Bath*. (January 2011).
- 139** Franklin Associates. “Cradle-to-Resin Life Cycle Inventory Results for PP Resin.” (2010).
- 140** S & K Engineers. “City College of San Francisco Ocean Campus Infrastructure Final Project Proposal.” (August 2014).
- 141** Hammond, G., Jones, C., Lowrie, F., Tse, P. “Inventory of Carbon & Energy: ICE.” Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering. *University of Bath*. (2008).
- 142** Casey, T. “Removing Roots from a Sewer System.” *Public Works*. (September 1989): 134-135.
- 143** Hollands, B. “The Underground Infrastructure Crisis: Rebuilding Water and Sewer Systems without a Flood of Red Ink.” *National Taxpayers Union*. Issue Brief 176. (2010). p. 4; “When Nature Attacks: Tree Roots, Earth, and Ground Water Damage.” King5 News. February 20, 2017. <http://www.king5.com/life/home-garden/home-appreciation/when-nature-attacks-tree-roots-earth-and-ground-water-damage/410208408>. (Accessed February 21, 2017).
- 144** Anderson, R. “Municipal Procurement: Procurement Process Improvements Yield Cost-Effective Public Benefits.” *U.S. Conference of Mayors*. Washington, DC. (2013).
- 145** U.S. Energy Information Administration. “FAQ: How Much Electricity Does an American Home Use?” <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=97&t=3>.
- 146** NSF International. “NSF 375 - Sustainability Assessment for Water Contact Products.” (April 2016).
- 147** “SMaRT Consensus Sustainable Product Standards.” The Institute for Market Transformation to Sustainability. http://mts.sustainableproducts.com/SMaRT_product_standard.html. (Accessed on April 29, 2014).
- 148** Abolmaali, A., Mothari, A. “Evaluation of HDPE Pipelines Structural Performance.” *The University of Texas at Arlington*. (2010).
- 149** Carollo Engineers. “Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum.” (August 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%2008-08.pdf>. (Accessed March 15, 2016).
- 150** Iplex Pipelines. “Environmental Product Declaration (EPD) PVC Pressure Pipes.” Compliance in Accordance with ISO 14025 and EN 15804 Version 1.10.” Approval Date June 12, 2015.
- 151** Folkman, S. “Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study.” *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 152** Rajani B., McDonald S. “Water Main Break Data for Different Pipe Materials for 1992 and 1993.” Report No. A-7019.1. *National Research Council of Canada*. Ottawa. (1995).
- 153** Folkman, S. “Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study.” *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012). p. 18.
- 154** Paradkar, A. B. “An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes.” *The University of Texas at Arlington*. (2012). p. 61.
- 155** Folkman, S. “Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study.” *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 156** Rajani, B., Kleiner, Y., Kryz, D. “Long-Term Performance of Ductile Iron Pipes.” Water Research Foundation. (2011). p. 103.
- 157** Baird, G. M. “Reforming Our Nation’s Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S.” *National Taxpayers Union*. (April 2013).
- 158** Burn, S., Davis, P., Schiller, T., Tiganis, B., Tjandraatmadja, G. “Long-Term Performance Prediction for PVC Pipes.” *AWWA Research Foundation*. (2005).
- 159** Hulsman, T., Nowack, R. “70 Years of Experience with PVC Pipes.” Worldwide Pipe Symposium. Milan, Italy. (2004).

- 160** Folkman, S. "PVC Pipe Longevity Report: Affordability & The 100+ Year Benchmark Standard. A Comprehensive Study on PVC Pipe Excavation's, Testing & Life Cycle Analysis." *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2014).
- 161** Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study." *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 162** Aubuchon, C., Roberson, J. A. "Embodied Energy of Lost Water: Evaluating the Energy Efficiency of Infrastructure Investments." *Proceedings of the Water Environment Federation* 2013, no. 3 (2013): 573-584. http://www.analysisgroup.com/uploadedfiles/content/insights/publishing/2013_aubuchon_economicsofwater.pdf. (Accessed September 10, 2016).
- 163** Rajani B., McDonald S. "Water Main Break Data for Different Pipe Materials for 1992 and 1993." Report No. A-7019.1. *National Research Council of Canada*. Ottawa. (1995).
- 164** Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study." *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 165** Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes." *The University of Texas at Arlington*. (2012). p. 62.
- 166** Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study." *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 167** Rajani, B., Kleiner, Y., Krys, D. "Long-Term Performance of Ductile Iron Pipes." *Water Research Foundation*. (2011). p. 103.
- 168** U.S. Environmental Protection Agency. "Water & Energy Efficiency." <https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/water-and-energy-efficiency>. Last Updated September 14, 2012. (Accessed April 29, 2015).
- 169** AWWA C906-15 Polyethylene (PE) Pressure Pipe and Fittings, 4 In. Through 65 In. (100 mm Through 1,650 mm), for Waterworks.
- 170** Carollo Engineers. "Evaluating the Compatibility of Chemical Disinfectants with Plastic Pipe Materials Used for Potable Water Distribution Technical Memorandum." (August 2008). <http://hdpeoxidation.com/Carollo%20Study%20on%20HDPE-PVC%20Pipe%20-%20Disinfectant%20Oxidation%2008-08.pdf>. (Accessed March 15, 2016).
- 171** Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes." *The University of Texas at Arlington*. (2012). p. 57.
- 172** Paradkar. p. 57.
- 173** Paradkar. p. 14-15.
- 174** "Aging Infrastructure and Corrosion: Background Information on Distribution System Areas of Concern." AWWA. http://www.safedinkingwater.com/community/usepa_111402/buried_infrastructure.pdf. (Accessed February 10, 2012).
- 175** Paradkar, A. B. "An Evaluation of Failure Modes for Cast Iron and Ductile Iron Water Pipes." *The University of Texas at Arlington*. (2012). p. 57.
- 176** Paradkar. p. 57.
- 177** Paradkar. p. 14.
- 178** Paradkar. p. 57-58.
- 179** Paradkar. p. 58.
- 180** Paradkar. p. 58-59.
- 181** Paradkar. p. 58.
- 182** Paradkar. p. 58.
- 183** Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study." *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 184** "10% of Japan's Water Pipes Past Service Life." The Mainichi. <http://mainichi.jp/english/articles/20151231/p2a/00m/0na/006000c>.
- 185** Koziol, John. "Ground Broken on \$6m Water, Sewer Project in Colebrook." *Union Leader*. July 24, 2016. <http://www.unionleader.com/article/20160725/NEWS0606/160729821>.
- 186** Grigg, N. S. "Secondary Impacts of Corrosion Control on Distribution System and Treatment Plant Equipment." *Water Research Foundation*. (2010).

- 187** “Fluoridation of Drinking Water and Corrosion of Pipes in Distribution Systems Fact Sheet.” Center for Disease Control and Prevention. <http://www.cdc.gov/fluoridation/factsheets/engineering/corrosion.htm>. (Accessed July 10, 2016).
- 188** Meland, I. S. “Durability of Mortar Linings in Ductile Iron Pipes.” *National Research Council Canada*. (1999).
- 189** Neville, A. “Effect of Cement Paste on Drinking Water.” *Materials and Structures* 34, no. 6 (2001): 367-372.
- 190** Gonzales, S., Lopez-Roldan, R., Cortina, J. L. “Presence of Metals in Drinking Water Distribution Networks Due to Pipe Material Leaching: A Review.” *Toxicological & Environmental Chemistry* 95, no. 6 (2013): 870-889.
- 191** Dąbrowski, W., Buchta, R., Mackie, R. I. “Impact of Water Blending on Calcium Carbonate Equilibrium in Water Distribution Systems.” *Journal of Environmental Engineering* 130, no. 9 (2004): 1059-1062.
- 192** Dell’Orso, M., Teresa, M., Antonio, E. P., Luigi, P. “Evaluation of the Leachability of Heavy Metals from Cement-Based Materials.” *Journal of Hazardous Materials* 227 (2012): 1-8.
- 193** Leroy, P., Schock, M., Wagner, I., Holtschulte, H. “Internal Corrosion of Water Distribution Systems.” *AWWARF and TZW*. (1996).
- 194** U.S. Environmental Protection Agency. “Permeation and Leaching.” *AWWA*. (2002). p. 11.
- 195** Douglas, B.D., Merrill, D.T. “Control of Water Quality Deterioration Caused By Corrosion of Cement-Mortar Pipe Linings.” *Water Research Foundation*. (1991).
- 196** Meland, I. S. “Durability of Mortar Linings in Ductile Iron Pipes.” *National Research Council Canada*. (1999).
- 197** ACIPCO. “Linings.” June 12, 2002.
- 198** Guo, Q., Toomuluri, P. J., & Eckert Jr, J. O. “Leachability of Regulated Metals from Cement-Mortar Linings.” *American Water Works Association*. Journal 90, no. 3 (1998): 62.
- 199** Berend, K., Trouwborst, T. “Cement-Mortar Pipes as a Source of Aluminum.” *Journal American Water Works Association* 91, no. 7 (1999): 91-100.
- 200** Berend, Trouwborst.
- 201** Zielina, M., Dabrowski, W., Radziszewska-Zielina, E. “Cement Mortar Lining as a Potential Source of Water Contamination.” *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 8, no. 10 (2014): 723-726. <http://waset.org/publications/9999592/cement-mortar-lining-as-a-potential-source-of-water-contamination>. (Accessed March 15, 2015).
- 202** Berend, K., Trouwborst, T. “Cement-Mortar Pipes as a Source of Aluminum.” *Journal American Water Works Association* 91, no. 7 (1999): 91-100.
- 203** Milman, O., Glenza, J. “At Least 33 US Cities Used Water Testing ‘Cheats’ Over Lead Concerns.” <http://www.theguardian.com/environment/2016/jun/02/lead-water-testing-cheats-chicago-boston-philadelphia>. (Accessed June 2, 2016).
- 204** U.S. Environmental Protection Agency. “Permeation and Leaching.” *AWWA*. (2002). p. 12.
- 205** Henderson, Derrion. “Water Concerns Led to DNR Investigation in Leadwood, MO.” *KFVS 12*. February 7, 2017. <http://www.kfvs12.com/story/34450337/water-concerns-led-to-dnr-investigation-in-leadwood-mo>. (Accessed February 17, 2017).
- 206** Busch, E. B. “The Clinical Effects of Manganese (Mn).” *Townsend Letter for Doctors & Patients*. <http://www.tldp.com/issue/180/Clinical%20Effects%20of%20Mn.html>.
- 207** Department of Public Health. “Manganese in Drinking Water.” http://www.ct.gov/dph/lib/dph/drinking_water/pdf/manganese.pdf
- 208** “Iron’s Dangers.” Ray Peat. <http://raypeat.com/articles/articles/iron-dangers.shtml>. (Accessed February 17, 2017).
- 209** Jerome, Sara. “Are the Dangers of Iron in Water Being Ignored.” *Water Online*. May 11, 2016. <https://www.wateronline.com/doc/are-the-dangers-of-iron-in-water-being-ignored-0001>. (Accessed February 17, 2017).
- 210** Panko, Ben. “Scientists Now Know Exactly How Lead Got Into Flint’s Water.” *Smithsonian*. February 3, 2017. <http://www.smithsonianmag.com/science-nature/chemical-study-ground-zero-house-flint-water-crisis-180962030/>.
- 211** Moore, Katie. “Presence of Iron in Local Water Supplies Could Cause Health Problems.” <http://www.wvltv.com/news/local/investigations/katie-moore/presence-of-iron-in-local-water-supplies-could-cause-health-problems/170571490>. (Accessed September 10, 2016).

- 212** Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study." *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 213** Baird, G. M. "Reforming Our Nation's Approach to the Infrastructure Crisis: How Competition, Oversight, and Innovation Can Lower Water and Sewer Rates in the U.S." *National Taxpayers Union*. (April 2013).
- 214** Folkman, S. "Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study." *Utah State University Buried Structures Laboratory*. (2012).
- 215** Rajani, B., Kleiner, Y., Krysz, D. "Long-Term Performance of Ductile Iron Pipes." *Water Research Foundation*. (2011). p. 103.
- 216** Masters, S., Edwards, M. "Increased Lead in Water Associated with Iron Corrosion." *Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Tech*. (2015). <http://online.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/ees.2014.0400>.
- 217** Friedman, M. J., Hill, A. S., Reiber, S. H., Valentine, R. L., Larsen, G., Young, A., Korshin, G. V., Peng, C. Y. "Assessment of Inorganics Accumulation in Drinking Water System Scales and Sediments." *Water Research Foundation*. (2010).
- 218** Jerome, Sarah. "Are the Dangers of Iron in Water Being Ignored?" *Water Online*. http://www.wateronline.com/doc/are-the-dangers-of-iron-in-water-being-ignored-0001?user=834389CB-56AB-4701-B514-394828D32B3B&vm_tId=1902307&utm_source=et_10759433&utm_medium=email&utm_campaign=WOL_05-17-2016&utm_term=834389CB-56AB-4701-B514-394828D32B3B&u. (Accessed July 1, 2016).
- 219** Greene, Jay. "McLaren Flint Blasts Michigan Health Department Over Legionnaires' Outbreak." *Crain's Detroit Business*. February 16, 2017. <http://www.craigslist.com/article/20170216/NEWS/170219873/mclaren-flint-blasts-michigan-health-department-over-legionnaires>. (Accessed February 23, 2017).
- 220** Cochran, T. "Report Prepared for the Conference of Mayors Winter Leadership Meeting Regarding the Flint Water Crisis." *U.S. Conference of Mayors*. February 18, 2016.
- 221** Cochran.
- 222** Ganim, Sara. "Flint Water Crisis Likely the Cause of Deadly Legionnaires Outbreak." *CNN*. March 30, 2017. <http://www.cnn.com/2017/03/30/health/legionnaires-disease-flint-water-crisis-study/>. (Accessed March 31, 2017).
- 223** Roy, Siddhartha. "Why is it Possible That Flint River Water Cannot be Treated to Meet Federal Standards?" *Flint Water Study*. <http://flintwaterstudy.org/tag/drinking-water/> (Accessed June 2, 2016).
- 224** Roy.
- 225** Roy, Siddhartha. "Why is it Possible That Flint River Water Cannot be Treated to Meet Federal Standards?" *Flint Water Study*. <http://flintwaterstudy.org/tag/drinking-water/>. (Accessed June 2, 2016).
- 226** El Din, A. M. Shams. "The Problem of "Red Waters": A New Approach to its Solution." *Desalination* 60, no. 1 (1986): 75-88.
- 227** Reynaud, A. "Corrosion of Cast Irons." in *Shreir's Corrosion*, T. J. A. Richardson, Ed., vol. 3, Chapter 2, pp. 1737-1788, 2010.
- 228** Volk, C., Dundore, E., Schiermann, J., LeChevallier, M. "Practical Evaluation of Iron Corrosion Control in a Drinking Water Distribution System." *Water Research* 34, no. 6 (2000): 1967-1974.
- 229** Vahidi, E., Jin, E., Das, M., Singh, M., Zhao, F. "Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping Systems." *Procedia Engineering* 118 (2015): 1177-1188.



Sustainable**Solutions**
CORPORATION



Sustainable**Solutions**
CORPORATION

155 Railroad Plaza, Suite 203

Royersford, PA 19468 USA

T: +1 610 569 1047

F: +1 610 569 1040

www.SustainableSolutionsCorporation.com

