

Tuyaux de polyéthylène haute densité: veille technologique, propriétés mécaniques et étude de vieillissement.

Par Jean-Michel Benoit¹, Denis Rodrigue², Josée Bastien³ et Josée Brisson¹,

Départements de chimie¹, génie chimique² et génie civil³, Faculté des sciences et de
génie, 1045 Avenue de la Médecine, Université Laval, Québec, Québec G1V 0A6

Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec

Janvier 2013

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec et a été financée par la Direction de la recherche et de l'environnement

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

Collaborateurs:

du Service des matériaux d'infrastructures, Direction du laboratoire des chaussées

Christine Duchesne, M.Sc. Chimiste
Alain Hovington, ing.
Claude Nazair, ing. (chargé de projet)

du Service de la conception des structures, Direction des structures

Christian Poirier, ing. M.Sc.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Jean-François Rioux-Dubé, Pierre Audet et Rodica Plesu, du Centre de recherche sur les matériaux avancés et du Département de chimie de l'Université Laval (CERMA) pour leur assistance lors de mesures de spectroscopie infrarouge et RMN, analyse enthalpique différentielle et diffraction des rayons X.

Nous remercions également Mathieu Tomassin (professionnel de recherche), René Malo (technicien expert) et Serge Plamondon (aide technique), du Département de génie civil, Université Laval, pour leur expertise et leur assistance lors de la mise au point du montage pour les tests mécaniques, ainsi que pour les mesures et l'analyse des résultats de tests mécaniques.

Serge Lamontagne, t.t.p.p et Dave Brindle, t.t.p., du Service des matériaux d'infrastructures, Direction du laboratoire des chaussées du ministère des Transports, sont également remerciés pour leur assistance lors des campagnes d'échantillonnage sur le terrain à Ste-Marie de Blanford et à Baie Ste-Catherine.

Finalement, nous tenons à souligner l'apport des collaborateurs du ministère des Transports du Québec, soit, du Service des matériaux d'infrastructures, Direction du laboratoire des chaussées, Christine Duchesne, M.Sc. chimiste, Alain Hovington. ing., Claude Nazair, ing. (chargé de projet) et du service de la conception des structures, Direction des structures, Christian Poirier, ing. M.Sc., pour leurs commentaires, suggestions et pour les discussions fructueuses au cours de ce projet.

Sommaire

Lors de ce travail, une veille technologique sur les tuyaux de polyéthylène haute densité (PEHD), a d'abord été effectuée afin de cerner les principaux facteurs affectant le vieillissement des tuyaux de polyéthylène haute densité.

La seconde étape du projet a consisté en une série de mesures sur deux types de tuyaux, soit les tuyaux à joints vissés (ou profilés) et ceux à doubles parois fabriqués en polyéthylène haute densité. Les mesures ont été effectuées selon les principales normes en vigueur, soient les normes pour rigidité de tuyaux (pipe stiffness ou PS) ASTM F2306 et BNQ 3624-120 et la norme pour la constante de rigidité annulaire (ring stiffness constant, RSC) ASTM F894, pour deux diamètres de tuyaux, soient 24 pouces (600 mm) et 48 pouces (1200 mm). Ces mesures ont permis de mettre en évidence les différences entre les normes, tant au niveau de la vitesse de mesure (taux de charge), de la taille (longueur) des éprouvettes mesurées et du taux de déformation maximum. Les propriétés mécaniques (norme BNQ 3624-120) d'une section de tuyaux neufs, ou éprouvette, ayant subi des cycles gel-dégel ont également été mesurées. Aucun effet des cycles gel-dégel n'a pu être observé sur les propriétés mécaniques de ces tuyaux neufs. Une troisième partie du travail a consisté en une étude du vieillissement accéléré en laboratoire de morceaux de tuyaux. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier par réflexion totale interne atténuée a été sélectionnée pour l'étude. Le montage utilisé était sensible aux premiers deux micromètres de la surface. La veille technologique a permis de conclure que cette mesure est suffisante, puisque le vieillissement décroît de façon régulière au fur et à mesure que l'on pénètre dans la paroi du tuyau, et que le vieillissement d'une très mince couche à la surface des tuyaux est responsable de ruptures prématurées selon le modèle du «stress corrosion cracking». Selon ce modèle, la couche dégradée se craquèle, et les craquelures se propagent sur l'épaisseur entière de la paroi du tuyau, conduisant à la rupture de celui-ci. Ce phénomène étant accéléré par les tensions subies par le tuyau, on ne peut exclure la possibilité d'une accélération de ce processus de rupture lors des cycles gel-dégel par action sur ces craquelures, ce qui n'a pu être vérifiée expérimentalement lors de ce projet, faute de temps.

Finalement, une comparaison entre les échantillons vieillis en laboratoire et les échantillons prélevés sur des tuyaux en place dans le réseau routier depuis une dizaine d'années (provenant d'un tuyau à joints vissés et d'un tuyau doubles parois) a été effectuée.

Synthèse des conclusions et recommandations

La première étape, soit la veille technologique, a permis de mettre en évidence les facteurs les plus susceptibles d'affecter le vieillissement des tuyaux de drainage routiers, soient les rayons UV, les solutions le chlorure de sodium provenant des sels de déglçage et le nitrate de sodium présents dans les engrais chimiques épandus sur les terres agricoles.

Dans la seconde étape, des mesures de propriétés mécaniques de tuyaux de deux tailles différentes (600 et 1200 mm de diamètre) et de deux types différents (à joints vissés ou profilés et à doubles parois), tous deux en polyéthylène haute densité. Une comparaison des mesures a permis de mettre en évidence une meilleure répétabilité pour les tuyaux à joints vissés, en particulier pour le plus petit diamètre mesuré. Une comparaison des propriétés mécaniques RSC et PS a permis de montrer que l'utilisation d'une équation proposée dans la norme ASTM F894 permet de passer d'une valeur à l'autre. Cependant, ce passage exige de mesurer, pour le type de tuyaux désiré et le diamètre désiré, une série d'échantillons, afin de déterminer avec plus de précision les paramètres de l'équation permettant de transformer les mesures obtenues à l'aide d'une norme vers une équivalence dans l'autre norme. En utilisant les paramètres approximatifs proposés par la norme pour le polyéthylène haute densité, des écarts de 8 à 20% étaient observés, ces écarts étant plus grands pour les tuyaux à doubles parois de 24 pouces de diamètre.

Finalement, dans une troisième étape du travail, une comparaison entre les échantillons vieillis en laboratoire et les échantillons prélevés sur des tuyaux en place dans le réseau routier depuis une dizaine d'années (provenant d'un tuyau à joints vissés et d'un tuyau doubles parois) a été effectuée. Celle-ci a permis d'établir que le vieillissement continu en laboratoire était environ trois fois plus rapide que le vieillissement sur le terrain. Suite à l'observation d'un important vieillissement en surface de ces tuyaux, mais à l'absence de craquelures en surface, et par comparaison avec des données de la littérature sur l'apparition des craquelures, il est proposé de limiter à 50 ans la durée de vie projetée des tuyaux en PEHD jusqu'à ce que des données plus précises sur le temps d'apparition des craquelures et sur l'effet des cycles gel-dégel sur les tuyaux craquelés soient disponibles.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE	4
SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	5
TABLE DES MATIÈRES	6
LISTE DES TABLEAUX	10
LISTE DES FIGURES.....	13
ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES	16
1. INTRODUCTION.....	18
2. PRÉSENTATION DU POLYÉTHYLÈNE ET DE SES PARTICULARITÉS.....	19
2.1 Structure du polyéthylène.....	19
2.2 Quelques propriétés typiques des polyéthylènes	22
2.3 Avantages et inconvénients du PEHD dans les applications routières	27
3. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES.....	29
3.1 Effet de la température sur les propriétés mécaniques des polymères	31
3.2 Équivalence et superposition temps-température	32
3.3 Résistance à l'abrasion	34
4. MÉCANISMES DE RUPTURE	35
4.1 Rupture ductile (région A)	36
4.2 Rupture fragile (région B)	37
4.3 Rupture fragile chimique (région C)	39
5. NORMES DE MESURES DE RIGIDITÉ DES TUYAUX.....	40

5.1 Comparaison des différentes normes	40
5.2 Transformation entre les valeurs obtenues par les essais de type PS et RSC	41
6. MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA DURÉE DE VIE DES TUYAUX.....	45
6.1 Norme d'extrapolation de 50 ans	47
6.1.1 Module flexionnel à long terme (ASTM 790)	48
6.1.2 Résistance à la traction à long terme (ASTM D638-Type IV; FM5-575) (ATM D2837)	48
6.1.3 Résistance à la fissuration (SCR) (ASTM F2136; FM 5-572, 5-573)	48
6.1.4 Dégradation oxydative (OIT) (ASTM D3895)	49
6.2 SCC et ESCR (ASTM D1693)	49
7. FACTEURS INFLUENÇANT LE VEILLISSEMENT DES TUYAUX.....	50
7.1 Mécanisme de dégradation	51
7.2 Présence d'additifs	52
7.3 Vieillissement mécanique	53
7.4 Vieillissement thermique	54
7.5 Vieillissement par exposition à l'air	54
7.6 Vieillissement chimique	54
7.6.1 L'eau à différents pH	55
7.6.2 Les produits chimiques purs ou en solution dans l'eau	56
8. NOUVELLE TENDANCES	59
8.1 Utilisation de résines recyclées	59
8.2 Études de propagation de fissures.....	60
8.3 Présence de contaminants provenant des tuyaux	60
8.4 Méthodes d'analyse du vieillissement des tuyaux.....	61
8.5 Vieillissement de l' UPEHD	62
8.6 Modélisation	62
9. CONCLUSIONS PARTIELLES SUR LA VEILLE TECHNOLOGIQUE	63
10. MÉTHODES UTILISÉES POUR LES TESTS MÉCANIQUES.....	65

11. MÉTHODES UTILISÉES POUR LES TESTS DE VEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉS	71
11.1 Préparation des échantillons vieillis.....	71
11.2 Méthode de caractérisation	73
11.2.1 Spectroscopie infrarouge par réflexion totale atténuée (ATR- FTIR).....	73
11.2.2 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC).....	77
11.2.3 Microcopie électronique à balayage	78
11.2.4 Résonance magnétique nucléaire solide	79
11.3 Prélèvement d'échantillons sur le terrain.....	80
12. RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LES ESSAIS MÉCANIQUES	81
12.1 Préparation des tuyaux de type Soleno.....	81
12.1.1 Mesures selon la norme ASTM F2306	83
12.1.2 Mesures selon la norme BNQ 3624-120.....	86
12.1.3 Mesures selon la norme ASTM F894	90
12.2 Tuyau de type Weholite.....	93
12.2.1 Mesures selon la norme ASTM F2306	94
12.2.2 Mesures selon la norme BNQ 3624-120.....	96
12.2.3 Mesures selon la norme ASTM F894	99
12.3 Comparaison des deux types de tuyaux	101
12.4 Test de rigidité annulaire (PS).....	105
12.5 Essai de rigidité circonférentielle (RSC).....	112
12.6 Passage de RSC à PS et vice-versa selon l'équation proposée norme dans la norme ASTM F894	118
12.7 Test mécanique sur tuyau vieilli par gel/dégel.....	126
12.8 Recommandation sur le choix de la norme à utiliser pour les mesures de tuyaux	128
12.8.1 Conditions de mesures utilisées dans les normes	128
12.8.2 Facteurs à considérer pour le choix de la rigidité minimale d'un tuyau de plastique	129
12.8.3 Comparaison des valeurs obtenues dans les normes et définition des valeurs minimales	132

13. CONCLUSIONS PARTIELLES SUR LES TESTS MÉCANIQUES.....	138
14. RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LE VIEILLISSEMENT	140
14.1 Vieillissement étudié par spectroscopie infrarouge	140
14.1.1 Présence de plusieurs mécanismes distincts et parfois concurrents.	147
14.1.2 Corrélation entre le vieillissement observé à la surface et le vieillissement en profondeur.	147
14.1.3 La difficulté à corréler le vieillissement accéléré en laboratoire au vieillissement réel sur le terrain.....	148
14.2 Observation, par microscopie électronique à balayage, de la surface de tuyaux	152
14.3 Effet de la dégradation sur les propriétés mécaniques des tuyaux.	157
14.3.1 Effet de la dégradation sur les propriétés du matériau dégradé.....	158
14.3.2 Effet d'une mince couche de produit dégradé sur les propriétés du tuyau.	159
15. CONCLUSIONS PARTIELLES SUR LE VIEILLISSEMENT	164
16. RECOMMANDATIONS	165
17. CONCLUSION	167
Annexe 1 - Exemples de calcul	169
Annexe 2 - Tableaux des valeurs de propriétés mécaniques calculées à partir des expériences de déformation et détails des paramètres utilisés	173
Annexe 3 - Mesure des tuyaux.....	182
Annexe 4 - Spectres infrarouge des échantillons vieillis en laboratoire et prélevés sur le terrain	195
Annexe 5 - Lieu et position de cueillette des échantillons sur le terrain.....	200
Annexe 6 - Photos d'échantillons prises sur le terrain	203
BIBLIOGRAPHIE.....	206

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques propriétés du polyéthylène et du polypropylène (données tirées de la référence 4, sauf lorsque le numéro de la référence est indiqué spécifiquement dans le tableau.....	26
Tableau 2 : Comparaison des principales normes de mesures de propriétés mécaniques de tuyaux (PS indiquant un test de rigidité de tuyau ou <i>pipe stiffness</i> et RSC constantes de rigidité circonférentielle ou <i>ring stiffness constant</i>)	42
Tableau 3 : Paramètres des tests de rigidité utilisés en fonction des différentes normes pour les tuyaux de 24 et 28 pouces (600 et 1200 mm) de diamètre.....	70
Tableau 4 : Listes des agents et temps de vieillissement utilisés à 80°C.	71
Tableau 5 : Liste des solutions de vieillissement utilisées.	72
Tableau 6 : Attribution, selon la littérature, des principales bandes observées en spectroscopie infrarouge sur les échantillons de PEHD vieillis (les bandes présentes sur les échantillons non vieillis sont indiquées en gras).....	76
Tableau 7: Tableau comparatif des exigences de rigidités des conduites en PEHD et polypropylène en fonction des différentes normes en vigueur.....	106
Tableau 8 : Résumé des résultats de rigidité et des normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120.....	107
Tableau 9 : Valeurs de PS pour les tuyaux 24 pouces de Weholite à 5% de déformation.	108
Tableau 10 : Valeurs de PS pour les tuyaux 24 pouces de Soleno à 5% de déformation.....	109

Tableau 11 : Valeurs de PS pour les tuyaux 48 pouces de Weholite à 5% de déformation.	110
Tableau 12 : Valeurs de PS pour les tuyaux 48 pouces de Soleno à 5% de déformation.	111
Tableau 13 : Valeur de rigidité de tuyau (PS) correspondant aux diverses valeurs de RSC de la norme F894 pour les deux tailles de tuyau mesurées.	113
Tableau 14 : Résumé des résultats expérimentaux et de la norme ASTM F894.	113
Tableau 15 : Valeurs de RSC pour les tuyaux 24 pouces de Weholite à 3% de déformation.	114
Tableau 16 : Valeurs de RSC pour les tuyaux 24 pouces de Soleno à 3% de déformation.	115
Tableau 17 : Valeurs de RSC pour les tuyaux 48 pouces de Weholite à 3% de déformation.	116
Tableau 18 : Valeurs de RSC pour les tuyaux 48 pouces de Soleno à 3% de déformation.	117
Tableau 19 : Comparaison du transfert d'une valeur de PS à RSC et vice-versa pour un tuyau de Soleno d'après ASTM F894. (24 pouces).....	121
Tableau 20 : Comparaison du transfert d'une valeur de PS à RSC et vice-versa pour un tuyau de Weholite d'après ASTM F894. (24 pouces).....	122
Tableau 21 : Comparaison du transfert d'une valeur de PS à RSC et vice-versa pour un tuyau de Soleno d'après ASTM F894. (48 pouces).....	123
Tableau 22 : Comparaison du transfert d'une valeur de PS à RSC et vice-versa pour un tuyau de Weholite d'après ASTM F894. (48 pouces).....	124

Tableau 23 : Calcul des valeurs de constantes servant à transformer les valeurs de PS en RSC à partir des données expérimentales mesurées dans le présent travail.....	125
Tableau 24 : Comparaison des valeurs mesurées par les méthodes ASTM F2306 et BNQ 3624-120 dans la présente étude	133
Tableau 25 : Tableau récapitulatif des valeurs limites de PS ou RSC fixées par divers organismes et équivalent tel que calculé en utilisant la constante proposée dans les normes (K = 6,67)	137
Tableau 26 : Comparaison des index (ou rapports d'absorbance) des bandes infrarouge observées après différents vieillissements accélérés.	144
Tableau 27 : Comparaison des index des principales bandes infrarouge pour les échantillons prélevés sur le terrain.....	145

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma réactionnel simplifié de la polymérisation du polyéthylène.....	19
Figure 2 : Schéma de la structure chimique d'un polyéthylène typique avec deux ramifications en rouge.	20
Figure 3: Différentes géométries de ramifications de polymères (dessins tirés du livre de Ehrenstein G. W. et Montagne).....	21
Figure 4 : Structure chimique du polypropylène. (PP).....	22
Figure 5 : Courbe de traction-allongement d'un polymère semi-cristallin idéalisé, d'après Cowie.....	30
Figure 6 : Courbe traction-allongement d'un polymère amorphe, le polyméthacrylate de méthyle, en fonction de la température, tiré du livre de Painter et Coleman.	31
Figure 7 : Les trois modes de rupture du PEHD en fonction du stress et du temps.	35
Figure 8 : Amincissement de la paroi et déchirure dans le sens circonférentiel.	37
Figure 9 : Déformation longitudinale/ grande déchirure.	37
Figure 10 : Fissuration avancée d'un tuyau de PEHD.	38
Figure 11 : Mécanisme de dégradation radicalaire du PE sous l'effet de l'oxygène.....	52
Figure 12 : Schéma du montage permettant d'effectuer les tests de rigidité.	66
Figure 13 : Serre qui maintient l'éprouvette.	68
Figure 14 : Déformation de 20% effectué pour un essai selon la norme BNQ 3624-120.....	69
Figure 15 : Exemples d'échantillons utilisés pour le vieillissement, en bas à gauche la poudre pour le vieillissement accéléré, en haute à droite, une section de tuyau Weholite et en base à droite une section de tuyau Soleno.	72

Figure 16 : Schéma d'un accessoire ATR typique, tel que décrit par un document de la compagnie Perkin-Elmer.	74
Figure 17 : Spectre infrarouge de 4000 à 750 cm^{-1} d'un échantillon de PEHD ayant subi un vieillissement accéléré à 80°C dans une solution piranha pour 64 heures.....	75
Figure 18 : Endotherme de fusion mesuré en DSC pour des échantillons ayant subi différents vieillissements à 80°C, pendant 64 heures dans une solution piranha et pendant 3 jours (3J) ou 17 jours (17J) dans une solution de NaCl 5%.....	78
Figure 19 : Décomposition par transfert de relaxation en RMN solide pour un échantillon vieilli par solution piranha et pour un échantillon non vieilli (blanc).....	79
Figure 20 : Tuyaux à paroi extérieure annelée (Solenio).....	82
Figure 21 : Charge en fonction de la déformation pour un tuyau Soleno effectué selon la norme ASTM F2306. a) tuyaux de 24", b) tuyaux de 48", c) 24" et 48" où la déformation est en pourcentage.....	85
Figure 22 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Soleno effectué selon la norme BNQ 3624-120 à 5% de déformation. a) 24", b) 48", c) 24" et 48" où la déformation est en pourcentage.....	88
Figure 23 : Déplacement de 20% d'une section de tuyau Soleno selon la norme BNQ 3624-120. a) 24" et b) 48".....	89
Figure 24 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Soleno effectué selon la norme ASTM F894 à 3% de déformation. a) 24", b) 48", c) 24" et 48" en pourcentage de déformation.....	92
Figure 25 : Tuyau à paroi extérieure lisse ou à joints vissés (Weholite).....	93
Figure 26 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Weholite effectué selon la norme ASTM F2306. a) 24", b) 48", c) 24" et 48" où la déformation est en pourcentage.	95

Figure 27 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Weholite effectué selon la norme BNQ-3624-120. a) 24", b) 48", c) 24" et 48" où la déformation est en pourcentage. 97

Figure 28 : Déplacement de 20% d'une section de tuyau Weholite selon la norme BNQ 3624-120. a) 24" et b) 48"..... 98

Figure 29 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Weholite effectué selon la norme ASTM F894 pour une déformation de 3%. a) 24", b) 48", c) 24" et 48" où la déformation est en pourcentage..... 100

Figure 30 : Charge en fonction du déplacement moyen pour des tuyaux Soleno et Weholite effectué selon la norme ASTM F2306. a) 24" et b) 48"..... 102

Figure 31 : Charge en fonction du déplacement moyen pour des tuyaux Soleno et Weholite effectué selon la norme ASTM F2306 en bleu et rouge et hors-norme en vert et rose. 104

Figure 32 : Les résultats obtenus au test BNQ 3624-120 pour des sections de tuyaux ayant subi des cycles de gel/dégel..... 127

Figure 33 : Photographies prises par microscopie électronique à balayage de quelques échantillons représentatifs.de tuyaux Soleno..... 154

Figure 34 : Photographies prises par microscopie électronique à balayage d'un échantillon.de tuyau Weholite..... 156

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

°	Degré
°C	Degré Celsius
A	Facteur exponentiel
AASHTO	American Association of Highway and Transportation Officials
ABS	Acrylonitrile-butadiène-styrène
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATR	Réflexion totale atténuée
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
cm ⁻¹	Longueur d'onde
DSC	Calorimétrie différentiel à balayage
Ea	Énergie d'activation
ESCR	Environmental Stress Cracking
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
FSTM	Florida Sampling Methods
g/cm ³	Masse volumique (densité)
g/mol	Masse molaire
HLMI	High load melt index
Hz	Hertz (s ⁻¹)
Ip	Indice de polydispersité
ISO	Organisation International de norme
k	Constante de vitesse
kN	kilo Newton
LDPE	Polyéthylène basse densité
LLDPE	Polyéthylène basse densité linéaire
M	Molaire
MAS 13C NMR	Spectroscopie RMN du carbone 13 à l'angle magique
MDPE	Polyéthylène de densité moyenne
mg/L	milligramme par litre (ppm)

MI	Melt index
min	minute
mm	millimètre
M_n	Masse en nombre
M_w	Masse en moyenne en poids
N	Newton
OIT	Dégradation Oxydative
PB	Polybutène
PET	Polyéthylène téréphtalate
PE	Polyéthylène
PEHD/HDPE	Polyéthylène haute densité
PEX	Polyéthylène réticulé
pH	Potentiel d'hydrogène
pi	Pied
po	Pouce
PP	Polypropylène
PS	Rigidité circonférentielle ou annulaire – Pipe Stiffness
PVC	Chlorure de polyvinyle
SCC	Stress corrosion crackling
SCG	Slow crack growth resistance
SCR	Résistance à la fissuration
T	Température
T_f	Température de fusion
TGA	Thermogravimétrie
T_g	Température de transition vitreuse
T_r	Température de référence
UPEHD	Ultra haute densité polyéthylène (UHMWPE)
VLDPE	Très basse densité polyéthylène

1. INTRODUCTION

Le présent rapport fait le point sur les travaux entrepris dans le cadre du contrat 850796076, activité R 683.1, dossier numéro 4502-10-RC03, intitulé : 'Étude sur la rigidité et la durabilité des tuyaux en polyéthylène de haute densité (i.e. PEHD) utilisés au MTQ'. Il est donc essentiellement constitué en une veille technologique couvrant :

- 1) Une revue de la littérature faisant ressortir les points principaux soulevés par les différents auteurs ayant trait à l'utilisation de tuyaux de PEHD dans les applications de tuyaux pour drainage routier,
- 2) Une comparaison théorique des tests de rigidité pour les tests de tuyaux de plastique (ASTM, AASHTO, ISO, etc.),
- 3) Une revue de la littérature sur les tests de durabilité utilisables pour ces tuyaux

Le but de ce projet est de fournir de l'information et des recommandations au ministère des Transports du Québec, quant à l'utilisation de tuyaux en plastique. En effet, des produits en plastique sont de plus en plus proposés par les manufacturiers pour les tuyaux de drainage routier (ponceaux). Ceux-ci sont relativement nouveaux sur le marché : leur apparition date d'environ 50 ans en Europe, mais seulement environ 20 ans au Québec. Ils présentent de nets avantages en termes de poids et, par conséquent de facilité d'installation, et ne présentent pas le problème de rouille qui existe pour les tuyaux d'acier. Cependant, leur vieillissement est accéléré en présence de rayonnement UV, d'hydrocarbures, de chlore et de divers autres produits chimiques. Ce vieillissement entraîne la formation de fissures dans les tuyaux de plastique. Pour le moment, il est difficile de prévoir leur durée de vie, en particulier dans le climat québécois, où les cycles de gel-dégel créent des contraintes mécaniques supplémentaires sur le matériau.

La présente revue de la littérature couvrira donc, tout d'abord, un bref survol des particularités des matières plastiques et de leurs propriétés mécaniques, et notamment celles du polyéthylène haute densité (ou PEHD). Suivra ensuite une revue de la littérature des mécanismes de rupture et des facteurs qui influencent celle-ci. La comparaison des tests proposés par diverses normes pour évaluer les tuyaux de plastique, leurs différences et leurs points communs, fera l'objet d'une section spécifique. Les méthodes d'estimation de la durée de vie des tuyaux seront ensuite discutées et les conclusions des principaux auteurs sur ce sujet rappelées. Suivra une

revue de la littérature sur le vieillissement du polyéthylène haute densité, mettant en exergue les principaux facteurs influençant ce vieillissement. Finalement les tendances observées dans la littérature dans les dernières années, et en particulier la problématique de l'utilisation de résines recyclées, seront abordées

2. PRÉSENTATION DU POLYÉTHYLÈNE ET DE SES PARTICULARITÉS

2.1 Structure du polyéthylène

Les polymères sont des matières organiques obtenues par réaction chimique entre un très grand nombre de courtes unités ou 'monomères'. Ces unités peuvent être différentes entre elles, comme dans le cas des protéines, ou identiques, comme dans le cas du polyéthylène téréphtalate ou PET.

Le polyéthylène est synthétisé par ouverture de la double liaison de l'éthylène, tel qu'illustré dans la Figure 1.

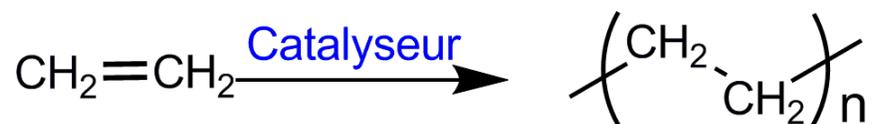


Figure 1 : Schéma réactionnel simplifié de la polymérisation du polyéthylène

Par contre, cette image est une simplification, puisqu'il arrive, en cours de polymérisation que des défauts de structure apparaissent, défauts principalement constitués par des ramifications illustrés dans la Figure 2.

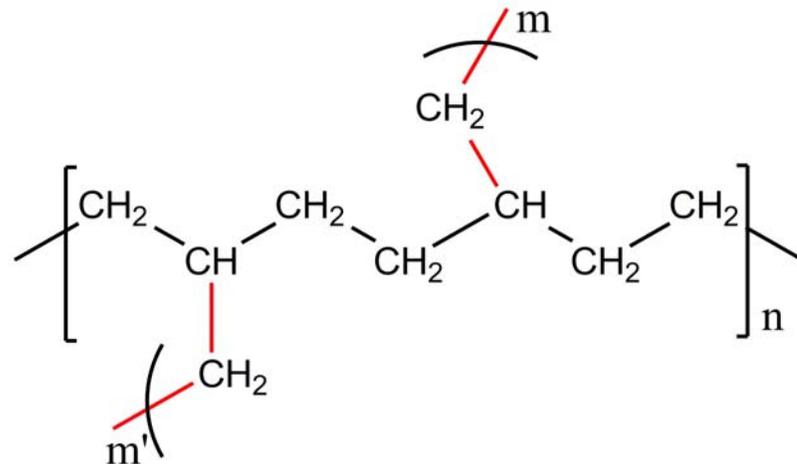


Figure 2 : Schéma de la structure chimique d'un polyéthylène typique avec deux ramifications en rouge.

Selon la méthode de fabrication utilisée (catalyseur, température, etc.), on peut donc obtenir des polyéthylènes de taux de ramification (ou même géométrie de ramification) très divers, variant du polymère linéaire au polymère avec ramifications courtes ou longues, tel qu'illustré sur la Figure 3. La présence de ramifications nuit à la régularité des chaînes, et provoque une diminution de la cristallinité. Un polyéthylène **linéaire** ou ayant peu de points de ramification sera plus cristallin. Et comme la forme cristalline est plus dense que la forme amorphe, on qualifiera donc celui-ci de **polyéthylène haute densité** ou **high-density polyethylene (PEHD)**.

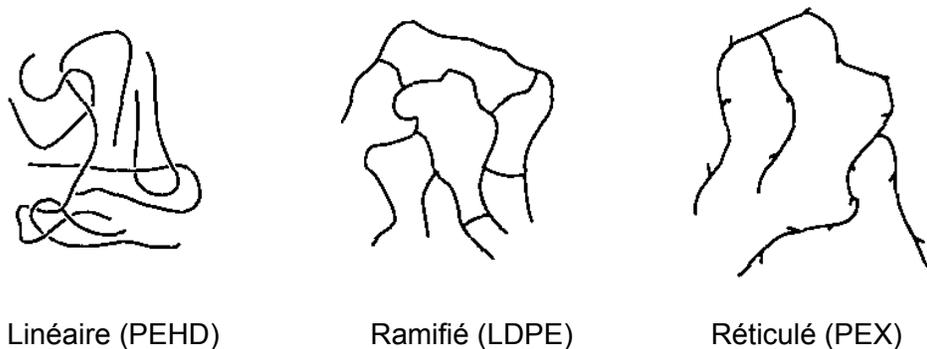


Figure 3: Différentes géométries de ramifications de polymères (dessins tirés du livre de Ehrenstein G. W. et Montagne).¹

Le **polyéthylène de basse densité**, ou **LDPE pour *low-density polyethylene***, aura donc à l'inverse un taux de ramification élevé. Le **polyéthylène de densité moyenne (MDPE)** est caractérisé par, on l'aura deviné, des taux de ramification intermédiaires.

Le **polyéthylène linéaire de basse densité ou LLDPE (*linear low density polyethylene*)**, est à la fois linéaire et amorphe, en raison de la présence d'un second monomère (du butène, de l'hexène ou de l'octène généralement) distribué aléatoirement au sein des chaînes. Le **VLDPE** ou ***very low density polyethylene*** est beaucoup moins utilisé, et est similaire au LLDPE, la différence principale entre les deux étant une densité plus faible due à un plus grand nombre de ramifications dans le VLEPE.

Outre le taux de ramification, la longueur des chaînes est un second facteur important pouvant varier selon le mode de synthèse. Le PEHD et le LDPE ont typiquement des masses molaires de 40,000 à 100,000 g mol⁻¹. Il existe cependant des résines à masse moléculaire encore plus élevée, qu'on appelle **UPEHD** OU **UHMWPE (*ultrahigh molecular weight polyethylene*)**. Le UHMWPE n'est pas utilisé à notre connaissance dans le domaine des tuyaux, fort probablement en raison de son coût élevé.

On retrouve aussi sur le marché des tuyaux de **polyéthylène réticulé ou PEX**. Les réticulations sont des liaisons chimiques entre les chaînes polymères, constituant un

réseau tridimensionnel. Ce réseau confère des propriétés élastiques au polyéthylène, qui entre donc dans la catégorie des élastomères. Il permet aussi d'éviter, au-dessus de la température de fusion, que le polymère devienne liquide, les liaisons de réticulations maintenant la structure tridimensionnelle de l'objet manufacturé. Le PEX est utilisé dans certains tuyaux pour eau potable, où il peut être utilisé pour l'eau chaude. De plus, son élasticité caoutchoutique permet de s'assurer de l'étanchéité des joints sans avoir recours à une colle ou à un autre produit chimique.² Par contre, comme il s'agit d'un polymère réticulé, et qu'essentiellement chaque pièce est, à la limite, une seule molécule, il n'est pas possible de fondre le PEX, ce qui entraîne des problèmes de recyclage de ce polymère.

On retrouve aussi des tuyaux d'une autre polyoléfine qui est apparentée au polyéthylène, et qui a des propriétés chimiques très semblables, mais des propriétés thermiques et mécaniques complètement différentes. C'est le polypropylène, abrégé PP, de structure chimique illustrée à la Figure 4.

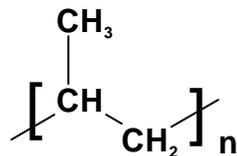


Figure 4 : Structure chimique du polypropylène. (PP)

On remarque dans la structure du PP la présence d'une très courte ramification, qui n'est cependant pas distribuée au hasard comme dans le PE mais est régulièrement espacée le long de la chaîne, puisque présente sur le monomère de départ, le propylène. Finalement, des tuyaux sont aussi fabriqués avec du chlorure de polyvinyle (PVC), du polybutylène (PB) et de la résine acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS)³, mais à notre connaissance, ceux-ci ne sont pas utilisés pour le drainage routier.

2.2 Quelques propriétés typiques des polyéthylènes

On retrouve dans le Tableau 1 quelques caractéristiques des polyéthylènes. À titre de comparaison, le polypropylène se retrouve aussi dans ce tableau. Il est à noter que les propriétés thermiques présentées sont celles de polymères ayant de hautes

masses moléculaires (souvent autour de 10^4 à 10^5 g mol⁻¹). À plus faible masse, les températures de transition thermique, les principales étant la température de transition vitreuse, T_g , et la température de fusion T_f diminuent généralement. De plus, ces propriétés peuvent être affectées par le type de défauts présent dans un lot donné. Il en est de même pour la cristallinité et c'est pourquoi ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. On relie souvent masse moléculaire et propriétés à la durabilité. C'est ainsi que la force à long terme, résistance (*toughness*), ductilité et endurance à la fatigue augmentent avec la masse moléculaire, d'où l'importance de ce paramètre pour la durabilité des tuyaux. ⁴

Il faut aussi noter que les polymères sont rarement constitués d'une seule longueur de chaîne, et se caractérisent donc par une **masse moléculaire moyenne**, (moyenne en nombre, M_n et en masse, M_w , M_w étant toujours supérieur ou égal à M_n) et par une distribution de masse. L'**indice de polydispersité** I_p est une mesure courante de cette distribution, et est donné par :

$$I_p = \frac{M_w}{M_n}$$

Une valeur unitaire dénote un polymère mono disperse (contenant des chaînes toutes exactement de même longueur). Plus cet indice est élevé, plus les chaînes sont de longueurs diverses et plus la polydispersité est grande, des valeurs courantes se situant souvent autour de 3 ou 4. La polydispersité influence aussi les propriétés mécaniques. Les échantillons monodisperses sont plus réguliers et cristallisent plus rapidement, ce qui conduit à des pièces obtenues sans distorsion gauche (*warpage*). Par ailleurs, la polydispersité a pour conséquence d'améliorer la résistance à l'impact, la processabilité et la résistance à la croissance lente de craquelures aussi connue sous l'expression *slow crack growth resistance* (SCG). L'utilisation de distributions bimodales (avec deux tailles de chaînes distinctes) est de plus en plus courante et permet d'obtenir à la fois de bonnes propriétés mécaniques, assurées par la présence de longues chaînes, et une bonne faculté de mise en œuvre (*processibility*), celle-ci étant plus facile à faible masse et donc à faible viscosité. Ce type de résine est aussi très résistant à la croissance lente de craquelures (SCG) ce qui est intéressant pour les applications de tuyaux.

Ces propriétés sont peu utilisées pour la caractérisation des plastiques en ingénierie, où on préfère souvent utiliser la viscosité de la résine dans sa forme liquide (au-dessus du point de fusion) ou viscosité à l'état fondu (*melt viscosity*). À cette valeur

est relié l'**indice de fluidité** (*melt flow rate*) qui correspond à la quantité de polymère qui passe dans un orifice de taille donnée, au cours d'une période prédéterminée de temps, à une température et une force choisies. On utilise aussi souvent l'indice de fluidité à chaud (***melt index***), abrégé **MI**, qui est la mesure de l'indice de fluidité sous une charge de 47,6 lb (21,6 kg) à 374°F (190°C).³ Ce paramètre, plus facile à mesurer expérimentalement et plus facilement relié au comportement de la résine lors de la mise en forme, est inversement proportionnel à la masse moléculaire moyenne, bien que ce paramètre soit aussi influencé par la polydispersité de la résine. Pour les résines de très haute masse molaire, cette mesure est souvent remplacée par le HLMI ou *high load melt index*, aussi appelé 'échelle 10X'. On remarque une grande variabilité pour ce paramètre, qui est varié fortement en fonction de la masse molaire, et en est une mesure indirecte.

La **température de transition vitreuse, ou T_g** (*glass transition temperature*), est une transition du second ordre associée à l'apparition d'un changement drastique dans les propriétés mécaniques de tous les polymères. Sous la transition vitreuse, le polymère est cassant, vitreux. Ceci est attribué aux faibles mouvements que les chaînes peuvent avoir à ces températures. Tout choc conduit alors à un dommage localisé, soit le bris de liaisons chimiques. Il en résulte des fractures dites fragiles, tel qu'il en sera question dans la section 4.2. Par ailleurs, au-dessus de la transition vitreuse, des mouvements de grandes amplitudes apparaissent au sein des chaînes polymères. Lors d'un choc, il sera possible d'absorber l'énergie via ces mouvements de chaîne, et ainsi de déformer le plastique au lieu de le casser. On parle alors de propriétés caoutchouteuses, et de rupture ductile. La valeur de T_g du polyéthylène varie considérablement en fonction de la méthode de mesure et des caractéristiques de la résine, mais se situent autour de -120°C. Pour le polypropylène, cependant, la température de transition vitreuse est beaucoup plus élevée, soit d'environ -13°C.⁵ On peut en conclure que ce matériau, aussi utilisé pour les tuyaux de drainage routier, devrait résister beaucoup moins bien à la rigueur des hivers québécois.

Une seconde température importante, la **température de fusion ou T_f** , est le point où les cristaux disparaissent au profit d'une phase 'liquide' amorphe. Cette température est d'environ 140°C pour le polyéthylène. Cette température est influencée par la valeur de la masse molaire et la présence de défauts au sein de la chaîne, de même que par l'histoire thermique de l'échantillon.

La **masse volumique** des polymères (communément appelée **densité**) est aussi rapportée dans le Tableau 1. On remarque que les valeurs de la masse volumique dans ce tableau sont toutes assez faibles (entre 0,910 et 0,959 g/cm³), si on compare aux valeurs pour l'acier ductile (environ 7,8 g/cm³) ou pour le béton (environ 2,6 g/cm³). Des valeurs faibles de masse volumique constituent un avantage pour des applications de grandes dimensions, comme celle des tuyaux de drainage routier. On note aussi une grande diversité de densités des divers types de polyéthylène, d'où sont tirées leurs appellations LDPE, MDPE et PEHD. Les définitions de ces divers types de polyéthylène sont d'ailleurs liées à des critères de masse volumique dans la norme ASTM D3350, qui remplace l'ancienne norme ASTM D1248.⁴

Le **coefficient d'expansion (ou dilatation) thermique** est particulièrement important pour les applications de drainage routier, puisque celui-ci nous renseigne sur les changements de dimension accompagnant les variations de température. Un grand coefficient de dilatation thermique caractérise les polyéthylènes et les polypropylènes, tout comme la plupart des matériaux polymères. Ceci se traduira par des changements de dimensions lors des cycles de gel-dégel, contribuant aux tensions présentes sur les tuyaux en place dans le sol. En découle un vieillissement physique qui a été très peu étudié. À titre de comparaison, le coefficient de dilatation thermique de l'acier est environ dix fois plus faible⁵ que celui du polyéthylène haute densité.

Tableau 1 : Quelques propriétés du polyéthylène et du polypropylène (données tirées de la référence 4, sauf lorsque le numéro de la référence est indiqué spécifiquement dans le tableau.

	T _g	T _f	Densité	Coefficient de dilatation thermique	Indice de fluidité à chaud (MI)
	°C	°C	g/cm ³	× 10 ⁵ K ⁻¹	
LDPE	de -125 à -78	de 136 à 141	0.910 – 0.940 ⁴	10	0,16 - 29,9
LLDPE			0,910 - 0,925 ⁴	---	
MDPE			0,926 - 0,940 ⁴	---	
PEHD			0,941 - 0,959⁴	13	
UPEHD			0.930 – 0.935 ⁴	---	
PEX			---	---	
PP	-13	171-174	0,932-0,943	6,5 (de -30 à 0°C) 20,5 (de 0 à 30°C) 14,5 (de 30 à 60°C)	0,39 - 22,8
Acier ductile ⁶	---	1410	7,1	de 1,1 à 1,4 selon la microstructure	

Lorsque les chaînes polymères sont de structure très régulière, cette régularité permet la **crystallisation** d'une partie du polymère, qui est alors semi-cristallin. C'est le cas du polyéthylène haute densité, où il y a peu de points de ramification pour venir perturber l'ordre. La cristallinité améliore fortement les propriétés mécaniques, et est donc préférable pour les applications de drainage routier. Les polymères dont les chaînes sont de structure trop irrégulière pour pouvoir cristalliser sont dits amorphes.

2.3 Avantages et inconvénients du PEHD dans les applications routières

Les principaux avantages invoqués pour l'utilisation du PEHD pour les applications routières sont ⁷:

- Un grand volume manufacturé, et donc une bonne disponibilité du matériau de base
- Le faible coût de revient du PEHD, bien que celui-ci ait tendance à augmenter avec le coût du pétrole puisqu'il en est dérivé.
- La possibilité de donner, par moulage, des formes très diverses
- Un design polyvalent, permettant la fabrication de tuyaux à assemblage rapide
- La faible masse des tuyaux de PEHD liée à la faible masse volumique du matériau, tel que discuté dans la section 2.2
- La grande flexibilité du PEHD, puisque c'est un matériau plastique au-dessus de sa transition vitreuse
- La facilité de relier des tuyaux entre eux, en utilisant une combinaison de chaleur et pression
- Une résistance à l'abrasion

Par contre, on relève les désavantages suivants dans la littérature;

- Un coefficient de dilatation thermique élevé, et donc des changements de dimensions importants avec la température.⁸
- La nécessité de préparer une assise (*bedding*) adéquate. Celle-ci permet de gérer la grande déformation des tuyaux reliée au coefficient de dilatation thermique du PEHD, en permettant la répartition des charges. La durée de vie est donc fortement dépendante d'une bonne installation, car sinon, la répartition inégale des charges crée des points où il y a accumulation de tension et fracture rapide du tuyau, parfois à l'intérieur de 1 à 16 ans.⁸

- Une durée de vie sensible aux cycles de gel-dégel, où les cycles de gel-dégel vont faire travailler l'assise autour du tuyau.
- Un vieillissement prononcé sous la lumière ultraviolette
- Des propriétés mécaniques moins bonnes que d'autres matériaux utilisés dans le drainage routier. Par exemple on note, par rapport aux tuyaux en acier ductile (*ductile iron*)⁹, un éclatement hydrostatique (*hydrostatic burst*) plus facile, une résistance à la traction (*tensile strength*), une résistance à long terme à l'écrasement (*long term crushing load*) et une résistance au choc (*impact strength*) moins grandes.

3. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

L'utilisation des polymères comme matériaux dans de nombreuses applications structurales a motivé l'étude de leurs propriétés mécaniques. De nombreux types de sollicitation ont été étudiés (traction, compression, cisaillement, etc.). Dans le cadre des applications de tuyaux pour drainage routier, ce sont les sollicitations en compression ou, inversement, en traction qui sont les plus intéressantes. Des méthodes spécifiques de mesures pour les tuyaux ont été développées et répertoriées dans des normes (ASTM ou autres). Cependant, certains concepts de base méritent d'être rappelés avant d'aborder l'étude de ces normes, puisqu'ils permettront de mettre en évidence les particularités des polymères et l'importance relative des divers paramètres compris dans les normes.

Il faut aussi noter que la réponse des matériaux viscoélastiques n'est pas immédiate, et certaines propriétés mécaniques, tel les modules dynamiques G' et G'' ou la tangente delta, s'intéressent particulièrement à ces délais. Cependant, dans le domaine des tuyaux de plastiques, les paramètres mécaniques des matériaux les constituant, soit le PEHD dans le cas discuté ici, sont les suivants :

- Le module en flexion (ou flexionnel), défini par la norme ASTM D790. Ce paramètre, utilisé principalement pour la caractérisation des résines, correspond au module mesuré lorsqu'un échantillon est appuyé à ses deux extrémités et qu'une charge est appliquée au centre à une vitesse spécifiée. Cette valeur est principalement affectée par le taux de cristallinité, bien que d'autres facteurs telle la masse moléculaire ou la polydispersité l'influence également.
- La résistance à la croissance lente de craquelure ou SCR (*slow cracking resistance*), norme ASTM F1473 ou D1693
- La classification de force hydrostatique, norme ASTM D2837, qui est cependant peu pertinente pour les tuyaux de drainage.
- La résistance à la traction (*tensile strength at yield*), définie par la norme ASTM D638. Cette valeur est l'un des paramètres les plus utilisés pour comparer la résistance de différents matériaux, et est mesurée lors d'essais en traction. Elle donne la force nécessaire pour mener l'échantillon à la rupture. Or, le mode de rupture du plastique est très différent de celui des métaux.

Il est à noter que les normes citées ci-dessus correspondent à celles caractérisant la résine polymère. Des normes distinctes existent pour la caractérisation des tuyaux eux-mêmes.

Une courbe typique d'étirement est présentée à la Figure 5. On remarque que, lors de l'application d'une contrainte, le matériau se déforme d'abord linéairement : c'est la zone de déformation élastique. L'aire sous cette zone permet d'évaluer l'énergie requise pour briser l'échantillon dans le mode fragile. Cette zone couvre en général environ 2% de déformation pour le polyéthylène à température de la pièce. Pour l'acier ductile, la pente, qui correspond au module de Young, est supérieure à celle du polyéthylène par un facteur d'environ 250.⁶

Lorsqu'un polymère est au-dessus de la température de transition vitreuse, décrite dans la section 2.2, cette zone linéaire est suivie par une zone de déformation non-linéaire, le matériau se déforme de façon réversible dans les élastomères, ou non réversibles dans les matériaux plastiques comme le PEHD. L'aire sous cette portion de courbe correspond à l'énergie absorbée par le matériau pour créer les changements de conformation et de morphologie ayant permis la déformation, et correspond à l'énergie de rupture ductile.

Finalement, une rupture survient, mettant fin à la courbe de déformation. Il a été démontré que la force à la rupture et la résistance à long terme (*long-term strength*) ne sont pas reliées, et donc dans la pratique, la force à la rupture est moins intéressante pour l'étude du PEHD utilisé dans les tuyaux. Cependant, le pourcentage de déformation avant rupture est relié à la ductilité du PEHD lorsque soumis à une force pour une longue période. Ce paramètre est donc utilisé pour la sélection de résines dans des applications de tuyaux sous pression.⁴

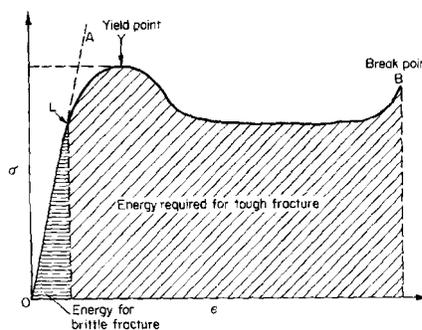


FIGURE 12.6. Idealized stress-strain curve. The slope of line OA is a measure of the true modulus.

Figure 5 : Courbe de traction-allongement d'un polymère semi-cristallin idéalisé, d'après Cowie¹⁰

3.1 Effet de la température sur les propriétés mécaniques des polymères

La zone de déformation non-linéaire, ou zone de déformation plastique, peut couvrir de 300 à 2000% de déformation pour le polyéthylène, la plage de déformation occupée avant la rupture étant fortement fonction de la température de l'essai, tel qu'on peut le voir à la Figure 6, qui représente les propriétés du poly(méthacrylate de méthyle), un polymère amorphe. On remarque que la température provoque un second changement majeur dans les propriétés de ces matériaux, soit un changement de la pente de la zone linéaire, qui correspond à un changement dans le module d'élasticité ou module de Young. C'est la zone où on s'attend à ce que des tuyaux soient sollicités. On peut donc s'attendre à des **changements de propriétés mécaniques en fonction de la température, ce qui illustre à nouveau les difficultés qu'on peut rencontrer pour valider la durée de vie d'un tuyau de plastique au Québec.**

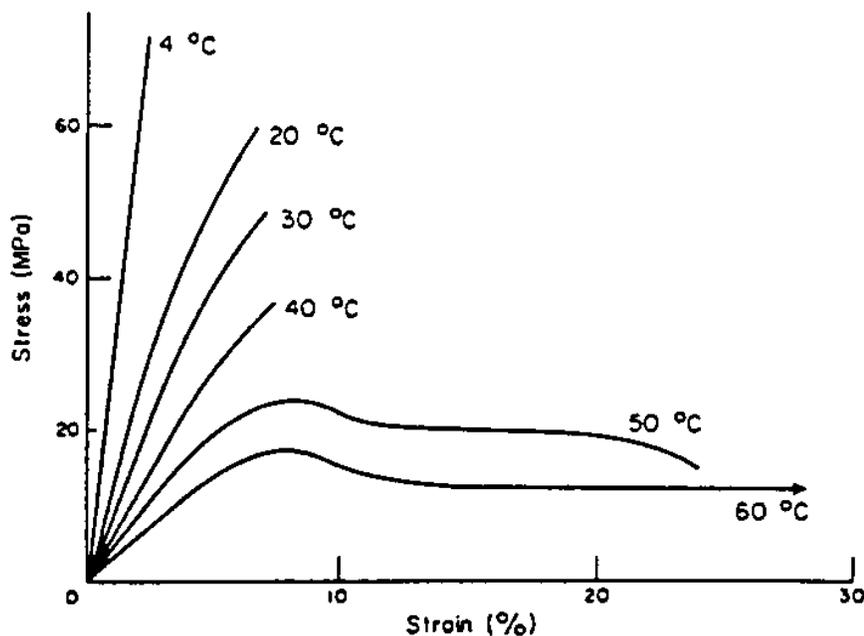


Figure 6 : Courbe traction-allongement d'un polymère amorphe, le polyméthacrylate de méthyle, en fonction de la température, tiré du livre de Painter et Coleman.¹¹

Malheureusement, très peu de données sont disponibles dans la littérature pour le PEHD à basse température (en-dessous de la température ambiante). Pour le

moment, seulement le travail de Mano *et al.* rapporte des modules de flexion pour la plage de 0 à 100°C, mais ne rapportent malheureusement pas de valeurs à plus basse température¹². Les tendances semblent indiquer que le module ne varie pas de façon appréciable lors de diminutions subséquentes de température. Malgré ceci, comme le rapporte le guide de conception de Marley Pipe Systems, l'infiltration d'eau dans le PEHD à des températures sous zéro cause des fractures et des déformations permanentes qui réduisent de beaucoup la durée de vie des conduites.¹³ Ce paramètre reste donc l'une des plus importantes inconnues pour prédire le comportement des tuyaux au Québec.

3.2 Équivalence et superposition temps-température

Le comportement largement viscoélastique des plastiques fait en sorte que la température, mais aussi le temps, influencent tous deux les propriétés mécaniques. Ce phénomène, largement étudié, a donné naissance aux théories de superposition temps-température, permettant de mieux comprendre les propriétés des polymères.

Lors de l'application d'une force, les chaînes polymères du matériau doivent se déplacer les unes par rapport aux autres pour permettre la déformation du matériau. Ceci fait en sorte que la rapidité à laquelle on applique une contrainte (donc la vitesse de déformation), influence les propriétés enregistrées. À déformation lente, les chaînes ont le temps de se déplacer les unes par rapport aux autres, et il y aura déformation du matériau et non rupture. Par contre, lorsque la déformation est rapide, les chaînes n'ont pas le temps de se déplacer, les forces se concentrent sur des liaisons chimiques et il y a bris de celles-ci : le matériau cède. La température a un effet similaire à une diminution de vitesse: plus la température est élevée, plus la déformation du matériau est facile, les mouvements atomiques étant plus rapides. Le matériau se déforme sans se casser. À basse température, la vitesse de déplacement des atomes constituant les chaînes est trop faible pour que le matériau puisse se déformer avant qu'il y ait rupture.

Ce phénomène a été étudié, et le concept d'équivalence temps-température bien établi. Ce concept est utilisé dans les études de vieillissement, et particulièrement pour les évaluations de fluage et de relaxation de contrainte, puisqu'on peut simuler ce qui se passerait à température constante pour une longue période de temps en effectuant des mesures en une courte période de temps à plus haute température. Les courbes de propriétés mécaniques enregistrées à différentes températures peuvent ensuite être

combinées pour fabriquer une courbe maîtresse (*master curve*) par translation le long de l'axe logarithmique de temps.¹⁴ On peut aussi utiliser cette approche pour transformer des mesures prises à vitesses différentes et ainsi les comparer entre elles, ce qui est particulièrement utile pour comparer les tests mécaniques de constantes de rigidité circonférentielle (*ring stiffness*) et de rigidité du tuyau, dont les normes exigent des vitesses de chargement (déformation) différentes, tel que détaillé à la section 5.

Williams, Landel et Flory ont proposé que les propriétés mécaniques des polymères enregistrées à différentes températures ou différents temps de déformation puissent être représentées par une courbe maîtresse, un simple coefficient de translation permettant de passer d'une température à l'autre.

Le coefficient de translation a_T est relié à la température par l'équation de William-Landel-Flory ou WLF;

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}$$

où T est la température des données, T_r une température de référence (la température de transition vitreuse est souvent utilisée comme température de référence) et C_1 et C_2 sont des constantes pour un polymère donné.

Cette équation fonctionne très bien avec la plupart des polymères amorphes, et les valeurs de C_1 et C_2 sont peu différentes d'un système à l'autre, si bien qu'il existe des valeurs 'universelles' de 17,44 et 51,6, respectivement pour $T_r = T_g$, de petites variations dans ces paramètres existant en fonction de la nature du polymère.¹⁴ Elle n'est cependant valide que pour une plage de température entre T_g et $(T_g + 100^\circ\text{C})$. Pour des températures plus élevées, il faut utiliser l'équation d'Arrhénius qui s'écrit comme :

$$a_T = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right]$$

où E_a est l'énergie d'activation et R la constante des gaz.

Par contre, en présence de la phase cristalline, ces deux équations ne sont pas applicables. Or, le PEHD est un polymère fortement cristallin, et il a été démontré que l'équation de WLF ne fonctionnait pas pour celui-ci.¹⁵ Des équations empiriques à plusieurs paramètres de translation sont alors nécessaires, tel qu'utilisés dans les normes d'extrapolation décrites à la section 6.

3.3 Résistance à l'abrasion

L'un des problèmes fréquemment rencontrés dans les applications de drainage est l'abrasion due aux roches, sable ou autre objets pouvant se déplacer dans les tuyaux.

Il est connu que le polyéthylène est environ de trois à cinq fois plus résistant à l'abrasion que les tuyaux d'acier.¹⁶ Ceci est en partie attribuable au caractère plastique du PEHD, les particules ayant tendances à rebondir sur la surface au lieu de fracturer et fractionner le matériau. À cet égard, les tuyaux de PEHD sont donc de beaucoup supérieurs aux tuyaux métalliques.

Cependant, il faut noter que toute mesure de ce paramètre est en général difficile. Il n'existe d'ailleurs plus de norme ASTM de résistance à l'abrasion, cet organisme ayant renoncé à tenter de normaliser ce type de mesures. Ceci est en grande partie dû au fait que divers paramètres influencent l'abrasion, dont la taille des particules, leur concentration, la viscosité du liquide porteur, pour n'en nommer que quelques-uns.

Une étude est détaillée parue en 2000 sur les propriétés à l'érosion de tuyaux d'égout en PEHD et a montré les excellentes qualités anti-érosion de ceux-ci.¹⁷

4. MÉCANISME DE RUPTURE

Suite à l'application d'une force, les tuyaux peuvent briser selon divers mécanismes. Les mécanismes par lesquels les ruptures se produisent varient selon la plage de température par rapport à la T_g , mais aussi selon l'état de vieillissement du tuyau. En effet, la T_g varie en fonction de la masse molaire des chaînes, qui sont affectées par le vieillissement, ce qui explique en grande partie l'effet de celui-ci sur le mécanisme de rupture, bien que le vieillissement puisse aussi provoquer des changements morphologiques affectant aussi ces mécanismes.

Trois modes principaux de rupture ont été identifiés dans la littérature, et sont schématisés à la Figure 7. Les modes de rupture et l'effet de l'installation sur celle-ci font partie des principaux sujets d'étude dans la littérature récente.^{7, 18,19,20,21,22,23,24,25,26}

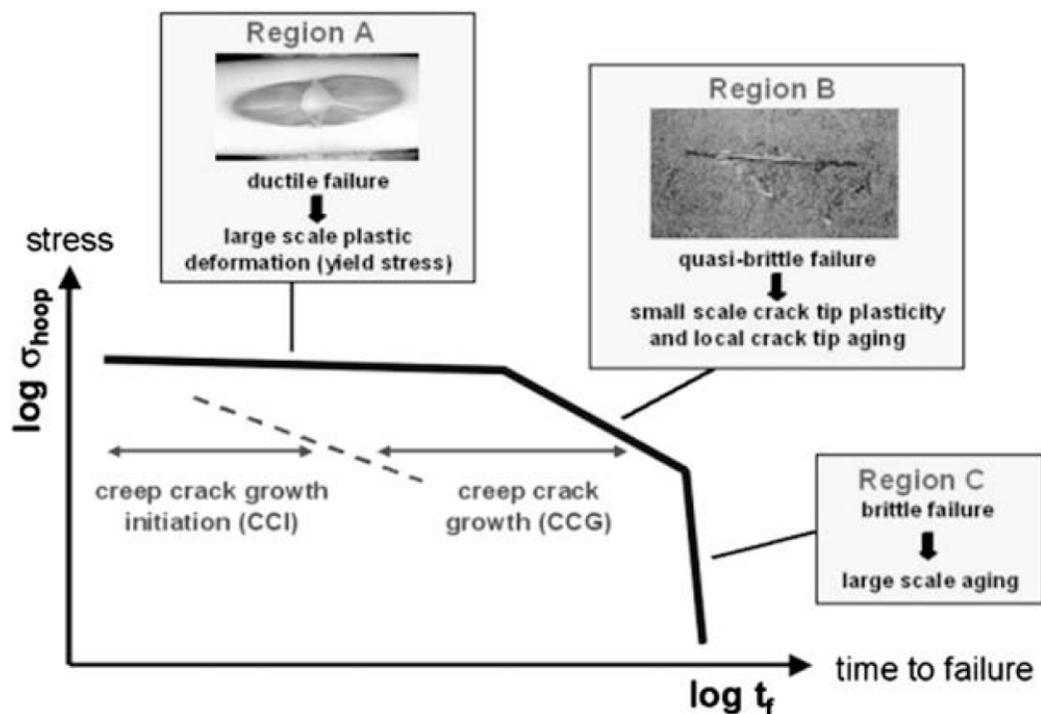


Figure 7 : Les trois modes de rupture du PEHD en fonction du stress et du temps.²⁷

4.1 Rupture ductile (région A)

Le mécanisme de rupture ductile est défini comme l'expansion irréversible causée par une contrainte importante se produisant à un endroit où l'épaisseur de la pièce (ici un tuyau) est plus faible.⁷ Ce genre de rupture se produit généralement suite à une surcharge sur le matériel mais peut également survenir lors de la fabrication de la pièce. Les dommages ductiles ne sont pas seulement présents lors de la rupture de la pièce, et induisent souvent des modifications dans les propriétés mécaniques du matériau.

Du point de vue physique, ce genre de dommage est représenté par une dislocation atomique faisant apparaître des cavités qui entraînent la déformation du matériel. Du côté mécanique, c'est l'introduction d'une faiblesse dans un plan où la contrainte engendrée est supérieure à la limite élastique du matériau.²⁸

La plupart du temps, ce genre de déformation est macroscopique et les changements sont facilement perceptibles : ce sont de larges déformations qui apparaissent lentement. Il existe de nombreuses façons par lesquelles elles peuvent se manifester telle la striction, la flexion, les renflements ou amincissements des parois, les fractures, etc.^{29,30} On peut en voir deux exemples tiré de la littérature dans les Figures 8 et 9.

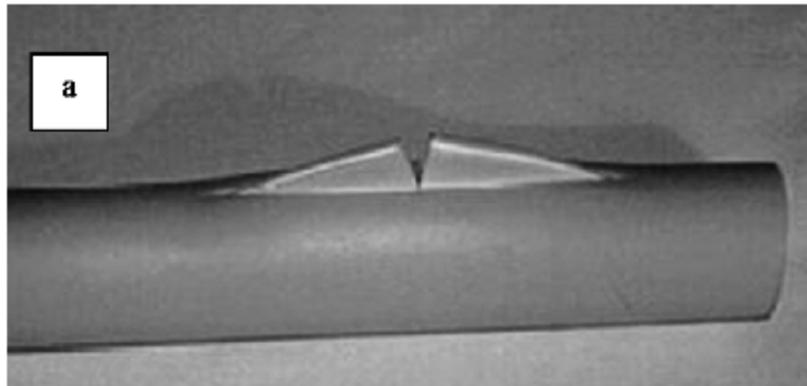


Figure 8 : Amincissement de la paroi et déchirure dans le sens circonférentiel.²⁸

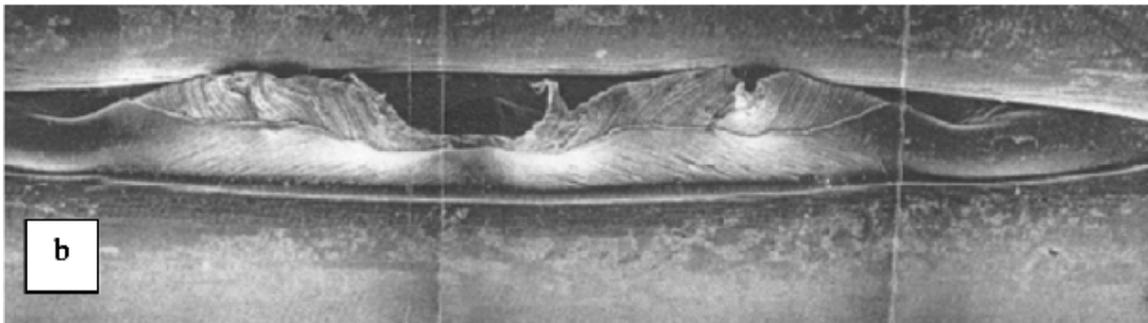


Figure 9 : Déformation longitudinale/ grande déchirure.³¹

4.2 Rupture fragile (région B)

La rupture fragile d'un matériau se définit comme la rupture d'un système suite à l'application constante d'une faible contrainte.²⁸

Le phénomène est microscopique : les forces appliquées font apparaître des microfissures dans le matériau. L'accumulation de ces microfissures, généralement indétectables à l'œil nu, entraîne éventuellement la rupture. Lorsque le phénomène se

déclenche, il est généralement très rapide comparativement à la rupture ductile.^{7,29} Un exemple est présenté à la Figure 10.

Plusieurs facteurs contribuent à l'apparition de ruptures fragiles et doivent être tenus en compte lors de la conception ainsi que l'installation des tuyaux. On compte parmi ces facteurs la présence de structure cristalline, ainsi que la rigidité du matériau. Sur le plan de l'installation, on doit tenir compte de la vitesse de déformation, du nombre et du type de contraintes appliquées sur le tuyau.

Les polymères viscoélastiques sont bien connus pour briser selon ce mode de rupture, et on ne peut généralement pas éviter la formation de microfissures dans le polyéthylène. Par contre, une conception adéquate du tuyau donne à celui-ci une durée de vie de plusieurs années.²⁷

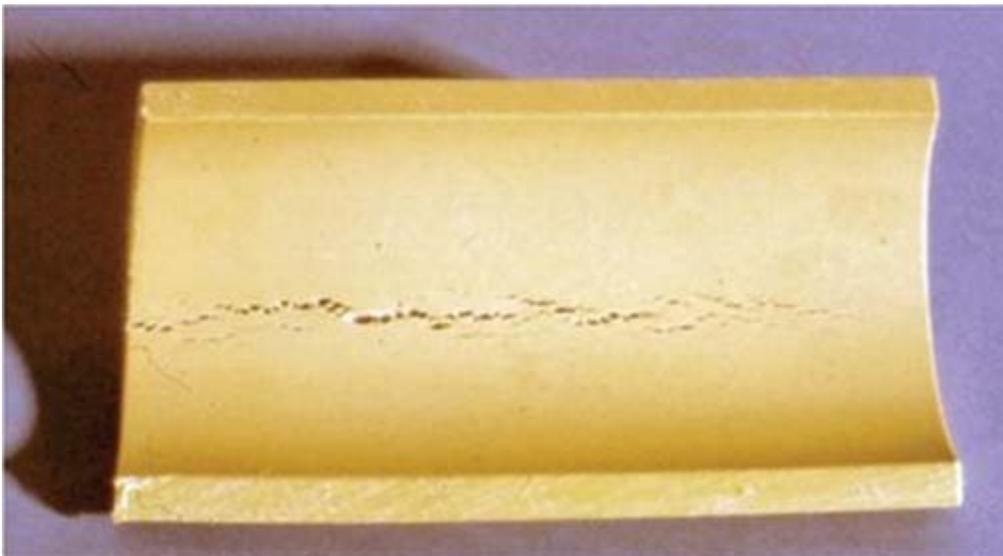


Figure 10 : Fissuration avancée d'un tuyau de PEHD.²⁸

4.3 Rupture fragile chimique (région C)

La rupture fragile chimique ressemble beaucoup à la rupture fragile. Ces manifestations sont aussi difficiles à détecter, car microscopiques et donc souvent invisibles à l'œil nu. Ce genre de rupture survient suite à une dégradation du matériau de départ, en raison d'une exposition thermo-oxydative prolongée qui vient fragiliser ou dégrader le matériau. Les facteurs de dégradation de ce type seront discutés à la section 7.

Visuellement, les changements sont très semblables, peu importe l'agent ayant causé la dégradation, bien que le mécanisme de dégradation et le mode de propagation peuvent varier selon l'agent en question.

Le vieillissement est bien connu pour causer du «*stress corrosion cracking*» (SCC) : une colonie de craquelures apparaît sur une couche de surface du tuyau exposé à une combinaison de stress mécanique et d'un environnement chimique agressif.^{32,33} Ce mécanisme a récemment fait l'objet de modèles mathématiques tel qui sera décrit dans la section 7.

L'existence d'une mince couche dégradée en surface a été associée à la rupture prématurée de conduite d'eau ayant subi un vieillissement thermique par ce mécanisme.³⁴

5. NORMES DE MESURE DE RIGIDITÉ DES TUYAUX

5.1 Comparaison entre les normes

Les principales normes existant pour la mesure de propriétés mécaniques de tuyaux de drainage sont rapportées dans le Tableau 2. On distingue deux types principaux de normes :

- 1) Les normes à partir desquelles sont évaluées les rigidités des tuyaux (*pipe stiffness* ou PS)
- 2) Les normes de constantes de rigidité circonférentielle (*ring stiffness constant* ou RSC).

Les normes nord-américaines (ASTM et BNQ) utilisent des mesures impériales, alors que les normes européennes (ISO) utilisent évidemment des mesures métriques. Cependant, dans le tableau, les équivalences impériales sont indiquées pour des fins de comparaison. Il est à noter que ce tableau a été établi pour les deux diamètres de tuyaux étudiés ici, soit les tuyaux de 600 et de 1200 mm de diamètre. Selon la norme appliquée, certains paramètres de mesure peuvent varier avec le diamètre du tuyau, tel la vitesse de déformation, la taille de la plaque, et la longueur du tuyau.

On remarque d'abord que plusieurs tests se réfèrent directement à la norme ASTM D 2412, et sont donc identiques. Les paramètres changeant le plus entre les diverses normes sont :

- la précharge

- la **vitesse de déformation**. Celle-ci peut varier par un facteur 10 et plus : elle est de 0,5 po/min dans la norme ASTM D2412, pour atteindre 2 po/min dans ASTM F894. Or, tel que discuté dans la section 3.2 sur l'équivalence temps-température, les propriétés des résines changent en fonction de la vitesse de déformation. Ce paramètre constitue donc une différence importante entre les divers tests. De plus, pour un même type de tuyau, la vitesse de déformation exigée par la norme peut aussi varier en fonction du diamètre du tuyau.

- la **déformation maximale** à appliquer, qui varie de 3% à 5%. Pour le polyéthylène, on se situe sous toute vraisemblance dans la zone linéaire de la déformation selon les normes employées, ce qui sera vérifié avec les données expérimentales.

-la longueur de la plaque et celle du tuyau, les deux étant interdépendantes et variant avec le diamètre du tuyau à mesurer.

5.2 Transformation entre les valeurs obtenues par les essais de types PS et RSC

Il est possible de transformer les valeurs obtenues par les deux tests en appliquant d'abord une correction d'unités (puisque, dans le cas du test de rigidité, on utilise des livres-force par pied, alors que dans le test de *ring stiffness*, l'unité est la livre- force par pouce par pouce). Un facteur peut tenir compte approximativement de l'utilisation de vitesses différentes, partant du principe de superposition temps-température. Celui-ci peut aussi tenir compte de la différence de valeur de pourcentage de déformation effectuée lors de l'essai, différente dans les deux normes. Ceci conduit aux deux expressions suivantes, tel qu'indiqué dans la norme ASTM F894 :

$$RSC = \frac{PS \times Dm}{6.67}$$

$$PS = \frac{C \times 8.337 \times RSC}{Dm}$$

où Dm est le diamètre moyen en pouces. PS est la valeur de rigidité du tuyau et C une constante pour un polymère donné, la norme proposant une valeur de 0,8 pour le PEHD.

Cependant, compte tenu des diverses approximations effectuées, la **précision de cette transformation reste à établir à partir de mesures expérimentales.**

**Tableau 2 : Comparaison des principales normes de mesures de propriétés
 mécaniques de tuyaux (PS indiquant un test de rigidité de tuyau ou *pipe stiffness* et RSC
 constantes de rigidité circonférentielle ou *ring stiffness constant*)³⁵⁻⁴⁰**

	ASTM F2306	ASTM F894	ASTM D2412	ISO 9969	BNQ 3624-120	CSA B182.8
	PS	RSC	PS	RSC	PS	PS
Température de conditionnement (°C)	ASTM D2412	ASTM D2412	23±2	23±2	ASTM D2412	ASTM D2412
Humidité relative (%)			50±5	---		
Temps de conditionnement des éprouvettes			4h/40h*	24h		
Épaisseur de la plaque			≥1/4 po (6mm)	---		
Longueur de la plaque			au moins aussi long que l'éprouvette	au moins aussi long que l'éprouvette		
Largeur de la plaque			6 po (150mm) de chaque côté de plus que la surface de contact	1 po (25mm) de chaque côté de plus que la surface de contact		
Précharge			En contact avec le minimum de force pour tenir le tout en place	45 N (600 mm) 90 N (1200mm)**		

Tableau 2 : Comparaison des principales normes de mesures de propriétés mécaniques de tuyaux (suite)

	ASTM F2306	ASTM F894	ASTM D2412	ISO 9969	BNQ 3624-120	CSA B182.8
Vitesse de déformation	ASTM D2412	2 po (50,8mm)/ min	0,50± 0,02 po/min (12,5±0,5 mm/min)	20±1 mm/min (3/4po±1/32) / min (600mm) 36±2 mm/min (3/8po± 1/32)/min (1200)**	12,5 mm/min et <5min***	ASTM D2412
Déformation à atteindre	ASTM D2412	3%	5%	3%	5% et 20%***	
Positionnement des échantillons	1. épaisseur minimum à 9h/3h 2. +45° 3. +90°	ASTM D2412	1. ligne de base ou épaisseur minimum à 12h 2. +35° 3. +70°	1. ligne de base ou épaisseur minimum à 12h 2. +120° 3. +240°		
Nombre de spécimens par échantillon	3	3	3	3	3 et 1***	

Tableau 2 Comparaison des principales normes de mesures de propriétés mécaniques de tuyaux (suite et fin)

	ASTM F2306	ASTM F894	ASTM D2412	ISO 9969	BNQ 3624-120	CSA B182.8
Longueur de l'échantillon	2 pi (600mm) ou 1 fois le diamètre (plus petit des 2)	---	6 ±1/8 po (150 ± 3mm)	1 pi (300 mm) (tuyau ≤1500mm)**	Au moins aussi long que son diamètre**	Au moins aussi long que son diamètre
Longueur de l'échantillon (diamètre ≤ 48 pouces)	---	4 pi (1200mm) ou 2X le diamètre (plus petit des 2)	---	---	---	---
Longueur de l'échantillon (diamètre > 48 pouces)	---	6 pi (1800mm) ou une fois le diamètre (plus petit des 2)	---	---	---	---
Résultante de longueur par échantillon (600mm)	600 mm (2 pi)	1200 mm (4 pi)	150 mm (6 po)	300 mm (1 pi)	600 mm (2 pi)	600 mm (2 pi)
Résultante de longueur par échantillon (1200mm)	600 mm (2 pi)	1200 mm (4 pi)	150 mm (6 po)	300 mm (1 pi)	1200 mm (4 pi)	1200 mm (4 pi)

Les valeurs avec ** correspondant à des valeurs qui peuvent varier en fonction du diamètre du tuyau.

Les valeurs avec *** correspondent à un même test spécifique à la norme BNQ.

6. MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA DURÉE DE VIE DES TUYAUX

Il faut d'abord préciser qu'à l'heure actuelle, à notre connaissance, aucun tuyau en polyéthylène n'a été utilisé pour une durée de 50 ans ou plus dans des applications de drainage routier. En contrepartie, les diverses compagnies qui fabriquent les tuyaux de PEHD spécifient des durées de vie de 50 ans et parfois même 100 ans. Il faut comprendre que ces chiffres sont basés sur des calculs d'extrapolation à partir de normes internationales et non sur des mesures en temps réel. De plus, selon un document du Plastics Pipe Institute, ces valeurs correspondent à des valeurs minimales de force et de module de flexion initialement mesuré pour les tuyaux de gaz sous pression.⁴¹ Ils ne sont donc pas nécessairement adaptés à des applications où les tuyaux de drainage routier sont soumis aux rayons du soleil ou en contact avec de l'eau (cycles de gel et dégel) et divers sels dissouts dans l'eau. Les tests utilisés afin de pouvoir calculer ces extrapolations permettent surtout un certain contrôle de qualité des tuyaux en polyéthylène et ils n'ont pas pour but d'assurer hors de tout doute la durée de vie d'un tuyau. En effet, la durée de vie réelle d'un tuyau sera influencée par un très grand nombre de facteurs qui varient de région en région (type de sol, pH, contaminants, température, etc) selon l'endroit où ils sont installés. On peut, à cet égard, citer un extrait d'un article de 2007 présenté par J.M. Kurdziel, directeur du service technique et du marketing de la compagnie ADS et E.F Palermo, président d'un organisme de consultant, le Palermo Plastic Pipe Consulting, dans le congrès TRB 2007 Annual Meeting, au sujet du *Rate Process Method* ou RPM, très utilisé pour estimer la durée de vie des tuyaux :

«The RPM provides the means for not only validating the long-term performance capacity for corrugated HPDE pipe, but it provides a basis for assessing the manufacturer's quality assurance and quality control program. After establishing the RPM coefficients, an appropriate single-point elevated temperature stress rupture test may be established for quality purposes.

Mathematically, these RPM projections are sound. They are, however, not absolute and are subject to various experimental errors, unknown deviations and judgment factors. The calculations from the RPM equation are used in conjunction with other known mechanical, performance, and design factors specifically, relating to corrugated HDPE pipe to validate the service life projection for these applications.»⁴²

Le RPM est une méthode d'extrapolation de la durée de vie par élévation de la température (donc une méthode basée sur le concept de superposition temps-température, voir section 3.2) où les modes de défaillance sont constitués de cassures et fissures. Selon la norme ASTM D 1598, la méthode doit être évaluée à l'aide de 18 à 20 échantillons, à des températures et pressions diverses. Comme mentionné dans la citation, ce test n'est pas absolu, étant donné qu'il peut y avoir des erreurs expérimentales, des fluctuations inconnues et que les données sont sujettes à l'interprétation. Ce qui est particulièrement important dans cette citation, c'est l'utilité proposée de ce test. En effet, il permettrait de faire la projection de la durée de vie du matériau à long terme s'il est utilisé avec d'autres tests, mais il sert davantage comme source de contrôle de qualité permettant au gens de l'industrie de se donner des points de repère pour leur produit. Comme on peut le voir, même des intervenants proches des compagnies de fabrication de tuyaux sont conscients des limitations des méthodes d'extrapolation de durée de vie.

Ces matériaux, comme vu dans la section précédente, ont différents mécanismes de rupture. L'évaluation de ceux-ci est basée sur plus d'une trentaine d'années de recherche et d'utilisation de ces tuyaux et, comme on le verra dans les paragraphes qui suivent, l'étude de leur durée de vie a beaucoup évolué durant cette période de trente ans.

Initialement, une relation linéaire entre le logarithme du temps de défaillance (*failure time*) et le logarithme de la contrainte appliquée dans les modes de rupture ductile, était à l'origine de la norme ASTM (ASTM D-2837-69). Cette relation implique d'utiliser des contraintes élevées pour simuler des temps de service longs. Toutefois, à faible contrainte, tel que rencontré sur le terrain, le mode de rupture est fragile alors qu'à contrainte élevée, tel qu'effectué avec cette norme, le mode de rupture est généralement ductile. Un questionnement persistait donc quant à la validité des résultats obtenus à long terme.

Dans les années 1990, deux groupes de chercheurs, ceux de Popelar (qui a démontré que le WLF n'était pas applicable au PEHD ¹⁵) et de Brown ⁴³ ont proposé des méthodes basées sur la construction d'une courbe maîtresse, comme dans la méthode de WLF. Popelar a proposé une méthode de correction basée sur une équation linéaire (à deux paramètres) au lieu d'une constante, alors que Brown a proposé une correction en fonction de l'inverse de la température absolue. Des travaux subséquents ont montré

que ni l'une ni l'autre des ces méthodes n'était réellement applicables aux courbes de temps de défaillance en fonction de la contrainte.

C'est donc seulement vers le début des années 2000 que des normes ont été proposées, les normes ASTM D 2837 et ISO 9080.⁴⁴ Celles-ci utilisent, respectivement, des relations linéaires à trois ou quatre paramètres pour les deux modes de rupture. En raison du nombre élevé de paramètres, ces tests requièrent un nombre élevé de mesures expérimentales.

6.1 Norme d'extrapolation de 50 ans

Les extrapolations selon les normes ASTM D 2837 et ISO 9080 sont effectuées de façon très similaire et varient principalement au niveau du nombre de mesures nécessaires pour effectuer les calculs d'extrapolation des propriétés mécaniques sur une plage de temps plus longue, soit de 25 ou de 50 ans. Les tests sont effectués indépendamment, afin de permettre à différents modes de rupture de se produire. Puis, utilisant des méthodes statistiques, chacun des mécanismes de rupture est inclus. Les tests doivent être effectués sur un peu plus d'un an (10000 heures), ce qui permet de faire une projection sur 50 ans. On parle de trois paramètres dans le cas de la norme ASTM D 2837 alors que quatre paramètres doivent être utilisés dans le cas de la norme ISO 9080. Ces normes permettent l'extrapolation par un facteur de 100 pour un échantillon vieilli à une température supérieure à 50°C.

Pour être valide, un certain nombre de ruptures doivent apparaître tout au cours du vieillissement, et la durée de chaque test est précisée dans chacune des normes. Pour ASTM D 2837, trois ruptures doivent se produire entre 10 et 1000 heures, trois entre 1000 et 6000 heures, trois après 6000 heures et au moins une après 10000 heures.

Les tests qui doivent être effectués afin d'être comptés parmi les paramètres de ces normes sont les suivants : un test de module flexionnel à long terme (*long-term flexural modulus*), de résistance à la traction à long terme (*long-term tensile strength*), de résistance à la fissuration (*stress cracking resistance*) et finalement un test de dégradation oxydative (*oxydation degradation*). L'extrapolation consiste à pousser une équation connue au-delà de ces résultats expérimentaux connus dans des domaines où les valeurs sont inconnues en supposant qu'elles gardent la même tendance. Dans le cas de ces deux normes, l'extrapolation est basée sur l'équation d'Arrhenius où la

température est dépendante de la constante de vitesse de réactions. L'équation simplifiée d'Arrhenius est donnée par:

$$k = Ae^{-E_a/RT}$$

où k représente la constante de vitesse de réaction, A est un facteur pré-exponentiel, R est la constante des gaz parfaits, T est la température et finalement E_a est l'énergie d'activation.⁴⁵

6.1.1 Module flexionnel à long terme (ASTM 790)

Une norme ASTM 790 existe pour ce paramètre, ainsi qu'un équivalent ISO. Le module flexionnel ou *flexural modulus* est le rapport du *stress to strain* en déformation flexible ou en d'autres mots cela consiste à soumettre un matériau à une sollicitation de façon à le faire fléchir. On mesure la valeur du module entre 0 et 2% de déformation.

6.1.2 Résistance à la traction à long terme (ASTM D638-Type IV; FM5-575)(ATM D2837)

Ce test doit être effectué selon ASTM D 638-Type IV ou un équivalent ISO. Le test consiste à appliquer une contrainte de traction sur le matériau. On soumet le matériau à une traction croissante sans qu'il y ait déformation plastique de celui-ci. La tête de chargement qui se déplace et qui permet d'appliquer la force nécessaire est déplacée à une vitesse de 50 mm/min selon cette norme. Cinq essais sont nécessaires pour s'assurer de la validité statistique des données en raison de la variation de la valeur de résistance à la traction en fonction du type de fissuration survenant lors de l'essai. Malheureusement, aucun de ces tests ne s'intéresse à la caractérisation de la surface, où pourtant le vieillissement est concentré.

6.1.3 Résistance à la fissuration (SCR) (ASTM F2136; FM 5-572, 5-573)

Cette norme regroupe plusieurs tests permettant de cerner l'ensemble des paramètres relié à l'information recherchée. Le NCHRP Report 429 divise ce test en trois parties.⁸ La procédure est utilisée par le Florida Department of Transportation et est décrite dans le **Florida Sampling and Testing Methods (FSTM)**, test FM 5-572.⁴⁶ Par contre, les mesures sont prises à plusieurs endroits sur le tuyau, ce qui fait changer légèrement la procédure utilisée. La procédure A du test est employée à la doublure

(liner), la procédure B à la jonction entre la doublure et l'ondulation (corrugation) et finalement la procédure C lorsque l'on mesure le tuyau dans son profil longitudinal. La procédure C peut également être effectuée par le test ASTM D 638 Type IV.

6.1.4 Dégradation oxydative (OIT) (ASTM D3895)

Le test consiste à mesurer le temps nécessaire pour engendrer une réaction exothermique à haute température selon des paramètres bien définis. On utilise la méthode de calorimétrie différentielle à balayage ou DSC pour mesurer les variations de chaleur absorbée ou dégagée par l'échantillon, ce qui indique l'apparition de transitions thermiques tel T_g ou T_f , mais aussi, à partir de 200°C, l'apparition de réactions chimiques qui se traduisent par des pics exothermiques dans la courbe de chauffage.

6.2 SCC et ESCR (ASTM D1693)

Il n'existe aucune norme permettant de faire l'extrapolation à long terme pour la rupture fragile chimique. Il en existe par contre certaines permettant de l'étudier à court terme. Les tests de «*stress corrosion cracking*» (SCC) et de *Environmental Stress Cracking* (ESCR) sont conçus à cet effet.⁴⁴ Les échantillons soumis au test ESCR sont placés dans une solution de 10% d'Igepal, un détergent, à une température de 50°C. Des encoches sont aussi effectuées à la surface de l'échantillon afin d'accélérer le vieillissement. L'apparition de fissures est surveillée régulièrement au cours des 24 heures que dure le test.

7. FACTEURS INFLUENÇANT LE VIEILLISSEMENT DES TUYAUX

Avec le temps, il est bien connu que les propriétés des plastiques se dégradent. Plusieurs mécanismes sont associés au vieillissement du PEHD, et en particulier le gonflement, la formation de microfissures et la plastification^{47, 48}, ceux-ci étant souvent coexistants.⁴⁹ Les tuyaux de PEHD sont reconnus pour leur excellente résistance à l'eau, aux solutions aqueuses de toutes sortes et à la plupart des solvants organiques.⁵⁰ Comparativement à un tuyau d'acier, le PEHD ne rouille pas ou ne subit pas de dégradation facilement visible dans l'eau ou dans l'air. Ils sont aussi très résistants à l'abrasion. Leur résistance est donc nettement supérieure à celle de l'acier à plusieurs égards.

Cependant, on ne peut conclure que ces produits n'ont aucun effet sur le PEHD à long terme. La variation de température agit sur la forme cristalline, permettant aux cristaux d'augmenter en taille et en nombre suite au phénomène de recuit (*annealing*), ainsi que sur le coefficient d'expansion thermique. Pour le polyéthylène, ce coefficient d'expansion est très important (environ 10 fois plus élevé que celui de l'acier, tel qu'indiqué dans la section 2.2).⁵¹

Le rayonnement de type UV, certains agents chimiques ainsi que des températures élevées auront tendance à favoriser la **dégradation chimique par voie radicalaire**. En effet, les chaînes de polymères sont sensibles à la présence de radicaux libres, qui engendrent des réactions chimiques menant à des scissions de chaînes, des combinaisons de chaînes ou l'introduction de défauts (ramifications ou groupements chimiques supplémentaires). Ces changements viennent fragiliser le polymère, conduisant à une diminution des propriétés mécaniques et à l'apparition de microfissures qui pourront se propager et conduire à des ruptures.

Pour cette raison, les manufacturiers ajoutent des **stabilisants**, qui sont des molécules piégeant les radicaux libres, ce qui empêche ceux-ci d'attaquer le polymère. Cependant, une fois que tous ces additifs ont réagi, les nouveaux radicaux libres finiront par affecter le polymère et ses propriétés. Ces agents ne font donc que retarder le processus de vieillissement. De plus, ceux-ci viennent compliquer l'évaluation de ce vieillissement puisqu'il y a invariablement une période de latence avant que l'effet des divers agents se fasse sentir sur les propriétés des tuyaux.

Une période de latence ou d'induction, difficile à évaluer existe donc avant que le vieillissement ne commence réellement. La durée de cette période est difficile à prédire, d'autant plus qu'on ignore généralement la nature et la quantité des additifs présents dans le polymère. Les fabricants de tuyaux l'ignorent souvent eux-mêmes, ces additifs étant généralement ajoutés dans les billes de polymère par le fournisseur.

Pour les polymères, certains facteurs peuvent minimiser ou ralentir les phénomènes de dégradation. La masse molaire, la distribution de masse (ou polydispersité) ainsi que le nombre de ramifications entrent en jeu. L'ensemble de ces facteurs est relié au taux de cristallinité du polymère, qui varie aussi avec la température.^{29,52,53} Une diminution de chacun de ces facteurs entraîne généralement une augmentation de la cristallinité. Une augmentation de la température au-dessus de la température de transition vitreuse (tout en restant en-deçà du point de fusion) va, par effet de recuit, aussi augmenter la cristallinité. En effet, les chaînes ont alors l'énergie et le mouvement nécessaire pour se réorganiser lentement au sein du solide et tendre vers l'état le plus stable, soit la phase cristalline. Or, bien que la cristallinité augmente généralement certaines propriétés mécaniques tel le module de Young, un trop haut taux de cristallinité du polymère peut nuire aux bonnes performances du tuyau en diminuant la rigidité du matériau.^{33,54,55} Au chapitre 3 du *Handbook of Polyethylene Pipe*, on retrouve un tableau de variation des propriétés physico-chimiques en fonction d'autres propriétés.⁴

Par contre, plus la masse moléculaire est grande, plus, dans la phase amorphe, les chaînes sont enchevêtrées, ce qui améliore le module de Young des polymères et leur confère donc une meilleure résistance mécanique. Une faible masse molaire, une grande distribution de masse et un trop grand nombre de ramifications diminuent donc grandement les propriétés mécaniques du PEHD.

Les sections suivantes viendront décrire brièvement les principaux mécanismes de dégradation et l'effet de divers agents chimiques ou physiques sur le vieillissement du PEHD, tel que rapporté dans la littérature.

7.1 Mécanisme de dégradation

La synthèse du polyéthylène est effectuée via un mécanisme radicalaire, qui est aussi responsable de la dégradation du polymère. Selon les agents radicalaires présents, le mécanisme peut varier, mais comporte toujours trois étapes : l'initiation, où

un radical est formé sur la chaîne de polymère, la propagation de ce radical par réaction avec d'autres chaînes ou d'autres molécules présentes dans le milieu, et finalement la terminaison, qui se produit lorsque deux radicaux libres se rencontrent et se combinent. Quelques exemples de ces diverses étapes sont rapportés dans la Figure 11.

1) Initiation



2) Propagation



3) Terminaison



Figure 11 : Mécanisme de dégradation radicalaire du PE sous l'effet de l'oxygène.⁵⁶

La dégradation radicalaire se produit principalement à la surface des tuyaux, suite à l'effet des agents chimiques ou à l'exposition aux UV du soleil. Cependant, l'augmentation de température peut aussi donner naissance à des radicaux libres ailleurs dans la pièce moulée.

7.2 Présence d'additifs

Lors de la fabrication des tuyaux, des additifs sont incorporés au polyéthylène⁵⁷. Il en existe une multitude, ayant des fonctions très variées. Trois types visent à améliorer la durée de vie des tuyaux ou autres pièces : des stabilisateurs UV, des antioxydants et des fongicides⁵⁸. Les deux premiers types, réagissant avec les radicaux libres ou avec la source de radicaux, finissent par être entièrement consommés, et le vieillissement reprend alors de manière normale. La quantité et le type de stabilisateurs utilisés tient largement de 'recettes' maison, et varient beaucoup d'un fabricant à l'autre. Les quantités sont aussi variables, puisqu'un excès aura un effet néfaste sur les propriétés mécaniques, agissant comme agent plastifiant et abaissant la température de

transition vitreuse, ou tout simplement se mélangeant mal, provoquant des défauts qui causent des ruptures prématurées.

Les antioxydants ne peuvent éliminer complètement la dégradation par oxydation, mais en retarde grandement la vitesse en interférant avec la propagation des radicaux formés lors de l'oxydation chimique. Certains permettent de terminer la réaction radicalaire en chaîne (anti-oxydants primaires), d'autres provoquent la décomposition des peroxydes formés par réaction avec l'oxygène (antioxydants secondaires). Les principaux sont des phénols, des amines, des thioesters et des phosphites, chacun ayant leurs avantages et leurs inconvénients.

Les rayons ultraviolets sont connus pour provoquer une dégradation graduelle de tous les polymères. Afin de diminuer les effets des rayons UV, les fabricants ajoutent de 2 à 3% de noir de carbone, qui vient bloquer la pénétration des rayons UV. Shelton indique qu'il a été démontré que ceci permet au PEHD de maintenir ses propriétés pour une période de plus de 50 ans.⁵⁹ La présence du noir de carbone est intégrée à la norme ASTM D3350, '*Standard Specification of Polyethylene Plastic Pipe and Fitting Materials*'.

Une seconde méthode de protection contre les rayons UV est l'ajout de stabilisants UV, ce qui permet la fabrication de tuyaux d'une couleur autre que le noir. La protection qu'offrent ces stabilisants est cependant limitée dans le temps, puisque ceux-ci réagissent avec les rayons UV et sont donc consommés au fur et à mesure. Il n'y a cependant aucun avantage à utiliser des tuyaux de couleur autre que le noir pour le drainage routier, puisque ces tuyaux seront nécessairement moins durables, en particulier les extrémités exposées à l'air libre et donc au soleil. La partie enfouie, elle, ne devrait subir aucun changement majeur relié aux rayons UV puisqu'elle n'est pas exposée au soleil.

7.3 Vieillissement mécanique

Certaines études ont proposé que le polyéthylène vieillisse suite à l'application de **contraintes mécaniques**, mais ce mode de vieillissement est mal établi.^{60,61,62,68}

7.4 Vieillissement thermique

Le vieillissement thermique du polyéthylène, particulièrement important lors de la fusion et donc rapide et omniprésent pendant la mise en œuvre des tuyaux, est une problématique bien connue, qui a été étudiée par de nombreux auteurs.^{61, 63-68}

Cependant, les températures auxquelles sont exposés les tuyaux de drainage ne favorisent pas ce type de dégradation qui restera marginal pour les applications routières.

7.5 Vieillissement par exposition à l'air

L'oxygène présent dans l'air est une source importante de vieillissement dans le cas des tuyaux de polyéthylène. L'oxygène est une molécule oxydante qui a tendance à créer des radicaux libres. Cette tendance est particulièrement grande à haute température et en présence de rayons ultraviolets. Pour cette raison, il y aura naturellement vieillissement des tuyaux exposés à l'air. Ce vieillissement sera donc diminué lorsque le tuyau est enfoui, seule une paroi étant alors exposée à l'air, ou encore l'hiver en raison de la diminution de la température.

Un exemple de mécanisme de vieillissement est donné à la Figure 11. Le mécanisme est souvent complexe, mais on sait qu'il conduit à la scission des chaînes ainsi qu'à des réactions de réticulation.⁶⁸ Les réactions de scission de chaînes sont particulièrement dommageables puisqu'elles entraînent une diminution de la masse molaire et, à long terme, une diminution des performances mécaniques du tuyau.

7.6 Vieillissement chimique

Divers agents chimiques peuvent faire vieillir prématurément les tuyaux. Deux modes d'action distincts existent. Le premier est un mode de dégradation chimique par réaction radicalaire ou par oxydation, comme dans le cas des rayons UV⁶⁹ ou de l'oxygène.

Le second effet possible de contaminants chimiques est l'absorption par le PEHD, conduisant à une diminution de la température de transition vitreuse et/ou au gonflement du matériau, entraînant une diminution notable des propriétés mécaniques

des matériaux, allant jusqu'à provoquer l'affaissement du tuyau. Le polymère devient alors plus élastique, et il y a diminution de diverses propriétés mécaniques tel le module de rigidité et le module de Young, conduisant à une fracture plus facile des tuyaux.⁴ Une liste des produits chimiques pouvant dissoudre ou corrodé le PEHD est disponible sur le site du Plastics Pipe Institute.⁷⁰

Pour prévenir ou du moins retarder la dégradation chimique par voie radicalaire, des stabilisants sont donc utilisés. Or, tout comme dans les cas des stabilisants contre les rayons UV, cette protection est limitée dans le temps, et ne fait que retarder l'apparition des dégradations. Il y a donc, ici aussi, un délai entre la présence d'agents chimiques oxydants et la dégradation des matériaux, délai qui est fonction de la quantité de stabilisants ajoutés à la résine de départ.

De plus, la nature même des stabilisants peut favoriser une protection contre un agent chimique ou un autre, puisque le mode d'action de chaque stabilisant (il en existe des centaines dans le domaine des plastiques) est souvent différent. Cependant, on utilise souvent des composés qui réagissent avec les sites hydroperoxydes créés par l'oxydation avec l'air ou l'eau.

Les produits connus pour affecter le polyéthylène sont l'eau à différents pH ainsi que les produits chimiques, purs ou en solution dans l'eau.

7.6.1 L'eau à différents pH

L'eau peut avoir un effet de vieillissement sur les tuyaux. Il a été démontré par Henry, Ruaya et Garton que le vieillissement du LDPE était trois fois plus rapide dans l'eau que dans l'air.^{71,72} Cette conclusion est confirmée par les travaux de Massey *et al.*⁷³ De plus, ce groupe a aussi démontré que le pH de l'eau influençait la vitesse de dégradation du LDPE.⁷⁴ Ces chercheurs ont effectué des analyses d'oxydation thermique entre 75 et 92°C de LDPE dans des solutions de sels sodiques et de tampons à divers pH. Bien que le polymère étudié soit le LDPE et non le PEHD la similarité chimique entre les deux (ils ne diffèrent que par le nombre de points de ramification) est telle qu'il est très fortement probable que le PEHD se comporte de la même façon. Ceux-ci ont d'ailleurs démontré que des résultats similaires de dégradation étaient obtenus avec plusieurs polyoléfinés, soit le PEHD, le LDPE, le XLPX et le PP, bien que le PEHD soit moins facilement dégradé, du moins dans les conditions étudiées, que le LDPE. Ceci est probablement attribuable à la moins forte pénétration de l'eau dans

les zones cristallines en raison de la plus grande densité de celles-ci et donc du plus petit volume libre qui y est présent.

Henry, Ruaya et Garton ont aussi démontré que les pH acides retardaient l'apparition d'oxydation thermique du polyéthylène pour la gamme de pH étudiée, qui variait de 3 à 7.⁷⁴ À pH plus bas, il est cependant connu que le polyéthylène se détériore rapidement. Ils ont aussi démontré que les pH basiques ont un effet catalytique sur la dégradation.

Le pH des pluies au Québec, est acide. Il se situait entre 4,3 et 4,8, selon la région, (moyenne sur 5 ans, entre 1996 et 2000, selon le site d'Environnement Canada).⁷⁵ Les sols sont généralement peu alcalins, et les eaux de drainage sont donc généralement modérément acides. Ce facteur devrait donc contribuer à diminuer l'oxydation du polyéthylène et à augmenter sa durée de vie dans certaines régions.

Dans d'autres régions, on rencontre des problèmes de drainage minier acide suite à l'exposition de minéraux sulfurés, par exemple la pyrite, à l'oxygène de l'air. Ce problème est particulièrement important dans les anciennes mines où le pH des eaux peut alors descendre à des valeurs en-dessous de 1, mais apparaissent parfois sur les sites de constructions, tel celui de l'aéroport de Halifax⁷⁶, ou la construction of Interstate 99 près de State College, en Pennsylvanie⁷⁷. À ces pH, tous les types de tuyaux (acier, béton, polyéthylène) vieillissent prématurément. Il est difficile de savoir, à l'heure actuelle, quel matériau résistera le mieux dans de telles conditions.

Par contre, il est connu depuis 1960 que l'eau peut causer la dissolution de certains stabilisants ajoutés au polyéthylène, ce qui aurait pour conséquence une diminution du temps de vie des tuyaux.⁷⁸ L'effet réel de l'eau est donc difficile à évaluer autrement qu'expérimentalement, mais il reste que l'eau seule ne sera vraisemblablement pas le plus important facteur de vieillissement des tuyaux.

7.6.2 Les produits chimiques purs ou en solution dans l'eau

Certains réactifs peuvent oxyder la matière organique et créer des radicaux libres conduisant à la diminution de la masse molaire et à une dégradation des propriétés mécaniques. La plupart des agents oxydants se retrouve cependant dans des procédés industriels et ont peu de chance de se retrouver sur des routes, sauf en cas de déversements accidentels. Cependant, certains oxydants se retrouvent plus souvent dans l'eau près des routes.

- Les **nitrate**s, qui constituent l'apport d'azote dans les engrais chimiques utilisés en agriculture. Ceux-ci sont d'ailleurs assez oxydants pour être utilisés pour la fabrication de bombes artisanales.
- Le **chlore gazeux**, introduit dans l'eau par les municipalités dans le but de détruire les microorganismes qui s'y trouveraient, ainsi que dans l'eau des piscines, pour la même raison. Il est cependant présent dans de faibles concentrations (une valeur de 1,0 mg/L est conseillée pour le système de distribution en eau potable)⁷⁹ et, de plus, le chlore s'évapore presque entièrement après 24 heures. Il a été démontré que le chlore diminuait la durée des tuyaux de polyéthylène.^{80,81} Le dommage causé par ces composés est probablement faible dans le cas des tuyaux de drainage routier, les concentrations étant beaucoup plus faibles que dans les tuyaux de distribution d'eau potable.
- Les **acides concentrés**, qu'on retrouve généralement seulement dans les procédés commerciaux ou dans des laboratoires (acide nitrique 95-98%, aqua regia, acide sulfurique fumant, phénol 90%, l'acide perchlorique 10%)

D'autres substances ne semblent pas réagir elles-mêmes avec le plastique, mais accélèrent la dégradation oxydative en présence d'eau, d'oxygène ou d'un oxydant par un processus vraisemblablement catalytique. Les substances connues pour avoir un tel effet sont principalement :

- Les **sels de sodium**, particulièrement présents dans les routes du Québec en hiver en raison de l'épandage de sels déglaçants.^{71, 82} Une concentration de 0,01M à 0,1 M en NaCl avait comme effet non seulement d'accélérer la dégradation mais aussi de diminuer le temps d'induction avant dégradation.^{83,84,85}
- Les **sels de métaux de transition**, tel les sels de cuivre ou de fer^{86,87,88} normalement absents des routes, sauf en cas de déversements accidentels.

Finalement, dans les substances provoquant le **gonflement**, on retrouve :

- Les **hydrocarbures aromatiques** (benzène, nitrobenzène, toluène, naphthalène, térébenthine, etc.), qu'on retrouve comme dégraissants dans les environnements industriels mais aussi dans diverses entreprises. Un déversement accidentel pourrait donc abimer les tuyaux à proximité du déversement.
- **Certains solvants chlorés** tel le trichloroéthylène, le dichlorure de propylène, le perchloroéthylène, ou le chlorure d'éthyle, qui ne sont généralement pas présents dans des milieux autres qu'industriels
- **les hydrocarbures aliphatiques, les huiles et leurs dérivés.** ^{89, 90}

8. NOUVELLES TENDANCES

La revue de la bibliographie dégage les principales tendances de la recherche dans les dernières années. Elle se centrera sur les applications pour tuyaux, ou sur les articles s'y rapportant, et exclus certains travaux sur le PE n'ayant pas rapport avec ces applications.

8.1 Utilisation de résines recyclées

Un nombre important de brevets ont été pris, principalement par des compagnies chinoises, sur l'utilisation de polymères recyclés pour la fabrication de tuyaux⁹¹⁻⁹⁷. Malheureusement, ces brevets sont tous publiés en langue étrangère, et il a été impossible de se les procurer. Quelques travaux ont aussi été publiés en anglais sur l'utilisation de résine recyclée, incluant des études de l'effet de ces résines sur les propriétés mécaniques des tuyaux.^{98,99} Or, l'utilisation de résines recyclées est fortement limitée dans les standards ASTM bien établis. En effet, le recyclage du PEHD se fait par fusion, et celle-ci entraîne inévitablement une diminution des longueurs de chaîne par dégradation thermique, et donc une dégradation des propriétés mécaniques des résines. De plus, les résines recyclées ayant déjà subi de la dégradation thermique, elles contiennent généralement plus de groupements hydroperoxydes et peroxydes, rendant ces résines plus susceptibles à la dégradation et diminuant la durabilité des plastiques recyclés.¹⁰⁰⁻¹⁰²

Or, la présence de résine recyclée est difficile à repérer. La façon la plus facile est d'observer la couleur de la résine vierge utilisée pour fabriquer les tuyaux : toute présence de coloration indique la présence de résine recyclée. Une fois le noir de carbone ajouté aux tuyaux dans le but de protéger des rayons UV, il est impossible d'utiliser cette évaluation visuelle. Bien que certains chercheurs aient proposé l'utilisation de méthodes¹⁰³ pour déterminer la présence de résine recyclée, cette méthode n'a pas encore été validée. De plus, en raison du nombre de facteurs affectant les propriétés thermiques des résines, il nous semble peu probable que cette méthode soit efficace. Il y a donc un besoin évident pour une méthode analytique permettant de repérer la présence de résine recyclée, surtout lorsque les fabricants étrangers

essaieront de pénétrer le marché nord-américain, ce qui risque de se produire dans les prochaines années si ce n'est déjà fait.

8.2 Études de propagation de fissures

Un certain nombre d'articles a aussi été publié sur la propagation de microfissures et les mécanismes s'y rattachant. De nombreux groupes sont actifs dans ce domaine, et la compréhension théorique de la propagation de fissures s'améliore constamment.

8.3 Présence de contaminants provenant des tuyaux

Une préoccupation grandissante pour la présence de contaminant dans l'eau apparaît dans la littérature récente¹⁰⁴. En effet, plusieurs additifs sont aussi introduits pour diminuer la dégradation radicalaire du polymère, tel que discuté précédemment, pour faciliter la mise en forme, pour diminuer la température de transition vitreuse, pour agir comme agent de renfort, ou pour améliorer les propriétés optiques (pigments) ou interfaciales (agents antistatique, antifricition), etc. Ceux-ci sont généralement stables et se dissolvent peu dans l'eau. Ils étaient traditionnellement considérés comme étant absents de l'eau, ou du moins en trop faibles quantités pour que cela ne pose des problèmes de santé. Cependant, les connaissances en toxicité des produits chimiques s'améliorent continuellement, aussi même de petites quantités peuvent s'avérer plus toxique que prévu. On peut par exemple penser au cas des phtalates ajoutés dans divers polymères (mais non dans le polyéthylène), qui sont venus sur la sellette dernièrement. Une nouvelle Loi a été votée en 2010, limitant à 0,1% leur quantité dans les jouets au Canada¹⁰⁵. On peut aussi penser au cas des bouteilles de polycarbonates, qui ont été boycottées par les consommateurs en raison de la présence potentielle de bisphénol A, provenant soit de la dégradation thermique, soit de monomères n'ayant pas réagit lors de la polymérisation. Jusqu'en 2008, la U. S. Food and Drug Administration (FDA) indiquait que les bisphénols étaient sans danger, mais depuis, de nouveaux travaux ont montré qu'ils avaient des effets potentiels sur le cerveau et sur la prostate des bébés et des fœtus, et qu'ils étaient des disrupteurs endocriniens.¹⁰⁶⁻¹⁰⁸

Il n'est donc pas surprenant que les tuyaux utilisés pour l'alimentation en eau potable soient de plus en plus l'objet d'études sur la présence de contaminant provenant des

tuyaux. Des articles de Whelton, Dietrich et Gallagher font état de travaux récents sur la diffusion de contaminants dans des tuyaux utilisés pour l'eau potable^{109,110}, alors que d'autres s'intéressent à la mise au point de méthodes pour déterminer et quantifier les contaminants relargués par les tuyaux de PE.^{111, 112}

Cette problématique ne touche actuellement pas les tuyaux de drainage routier. Il convient cependant de poursuivre la veille technologique à cet égard, surtout si on considère un temps de vie de 25, 50 ou même 100 ans pour certains tuyaux. En effet, la Loi sur la qualité de l'environnement du Québec ne date que de 1972.¹¹³ Il est probable que les Lois seront de plus en plus sévères, et la nature et la quantité de contaminants permis, même dans des tuyaux de drainage routiers, pourrait devenir une problématique importante dans le futur.

8.4 Méthodes d'analyse du vieillissement des tuyaux

Diverses méthodes ont été utilisées dans la littérature scientifique pour étudier le vieillissement du polyéthylène. Le groupe de Henry et de Garton a principalement utilisé la spectroscopie infrarouge, qui permet d'observer et quantifier l'apparition de groupements cétone, acide et hydroxyles suite à la dégradation radicalaire du produit, et la spectroscopie demeure l'une des méthodes de base dans l'analyse de la dégradation du PE.^{62,103}

L'analyse enthalpique différentielle (*differential scanning calorimetry* ou DSC), est aussi souvent utilisée, de même que l'analyse thermogravimétrique.¹⁰³ L'analyse thermogravimétrique (TGA)¹⁰³ et la pyrolyse¹¹⁴ ont aussi été utilisées. Cette dernière a entre autre permis de relier la structure moléculaire à la durée de vie des tuyaux, parfois en conjugaison avec des méthodes de spectroscopie de masse pour analyser les produits de pyrolyse.^{115,116}

La microscopie électronique à balayage est abondamment utilisée pour l'étude des microfissures.¹¹⁷⁻¹²⁰ Un groupe a utilisé la spectroscopie XPS pour analyser la dégradation en surface du PE.⁷³

La spectroscopie RMN solide du carbone 13 à angle magique (*MAS ¹³C NMR spectroscopy*) a aussi été utilisée pour étudier les produits de dégradation thermique.¹²¹

L'utilisation de mesures viscosimétriques, et les valeurs de MI ou *melt flow index* qui en découlent, ont aussi été utilisées pour étudier de temps d'induction de l'oxydation.¹²² Elles ont été suggérées comme une mesure de comparaison des

matériaux dont sont constitués ces tuyaux, puisque ce paramètre est proportionnel à la masse molaire. Ceci a cependant été mis en doute en raison de la faible sensibilité de la méthode et du nombre élevé de paramètres qui l'influence.¹⁰³ De plus, tel que discuté dans la section 2.2, comme la polydispersité et plusieurs autres facteurs influencent aussi les valeurs de MI, et comme cette proposition n'a pas encore été appuyée par d'autres travaux, il est à notre avis prématuré d'utiliser ce paramètre pour la comparaison de tuyaux, surtout en l'absence d'autres mesures.

8.5 Vieillissement de l'UPEHD

Plusieurs travaux ont été publiés récemment sur le vieillissement de l'UPEHD. Ce polymère n'est pas utilisé pour les tuyaux, cependant les méthodes d'analyse du vieillissement peuvent être utilisées, dans certains cas, pour le PEHD.

Par exemple, Fouad a observé par DSC l'apparition de pics qu'il attribue à une cristallisation lors du vieillissement, effectué sur une période allant jusqu'à 6 ans.¹²³

8.6 Modélisation

Une certaine quantité des travaux retrouvés dans la littérature porte sur la modélisation de différents paramètres physico-chimiques du polyéthylène. Des sujets tels que le «*stress corrosion cracking*»³³ et la propagation de fissure¹²⁴ ont fait l'objet de simulations, ce qui permet de mieux comprendre les facteurs influençant ces modes de rupture. La simulation est aussi proposée pour prédire la durée de vie du matériau,^{124,125} alors que certains chercheurs proposent des méthodes par éléments finis pour modéliser la mise en forme et les propriétés résultants des tuyaux.¹²⁶ Un inventaire complet des travaux de modélisation ne sera pas fait ici, ceux-ci dépassant le cadre du travail proposé. Rappelons que les données simulées doivent toujours être validées à l'aide de mesures expérimentales afin de s'assurer de la validité du modèle, et que plusieurs études dans ce domaine sont encore à un stade exploratoire.

9. CONCLUSIONS PARTIELLES DE LA VEILLE TECHNOLOGIQUE

Le polyéthylène possède des propriétés mécaniques et chimiques très intéressantes pour les applications de tuyau de drainage. Sa faible densité, sa bonne résistance chimique et ses propriétés thermiques et mécaniques en font un candidat de choix pour ce type d'application, et il n'est pas étonnant de voir ce matériau prendre de plus en plus de place sur le marché.

Par contre, il reste encore beaucoup à faire pour mieux connaître la durée de vie des tuyaux de PEHD. Malgré leur grande résistance aux agents chimiques, et malgré le fait que, visuellement, aucune dégradation n'est observée pour le PE, on sait que ce polymère vieillit lentement, et que ce vieillissement peut conduire à la fissuration ou à l'affaissement des tuyaux. Or, le vieillissement chimique de ces tuyaux est encore mal connu, en particulier en présence de sels ou d'engrais, deux produits présents en bonnes quantités près du réseau routier québécois. La seconde partie de ce projet s'intéressera d'ailleurs spécifiquement à cet aspect.

De plus, très peu de données sont disponibles sur les propriétés mécaniques du PEHD à basse température, ce qui est particulièrement étonnant pour un matériau aussi utilisé. Or, au Québec, les tuyaux subissent des changements de température à la fois fréquents et importants. Les rares travaux publiés laissent croire que les propriétés mécaniques seraient peu affectées par les basses températures, ce qui serait cependant intéressant de quantifier. Par contre, les cycles gel-dégel pourraient induire de la fatigue dans le matériau, et provoquer l'apparition de fissures prématurées. Or, aucune étude ne s'est intéressée à la fatigue reliée aux cycles gel-dégel à notre connaissance. Cet aspect sera abordé brièvement dans la suite du projet, par le biais de mesures sur des échantillons vieillis dans les laboratoires du ministère des Transports du Québec, mais mériterait une étude plus en profondeur, ce qui n'est malheureusement pas prévu dans le projet présent.

Cette absence de connaissance sur l'effet de la température nous porte à demeurer prudent pour l'utilisation du polyéthylène au Québec, et particulier dans les régions où les températures sont très froides, au Nord du Québec. Par contre, dans le Sud du Québec, et sous réserve des travaux encore à venir sur le vieillissement et sur l'inspection de tuyaux en place, tel que prévu dans la seconde partie du projet, l'utilisation de tuyaux de PEHD pour des applications de drainage routier est nettement intéressante.

Rappelons que, outre les études de vieillissement, l'étude comparative des propriétés mécaniques (RSC vs PS) sera aussi complétée et incluse dans le rapport final.

À ceci, une note doit être ajoutée sur la nécessité de garder active une veille technologique sur les résines recyclées, qui risquent d'apparaître tôt ou tard dans les tuyaux de PEHD. En effet, ces résines semblent beaucoup étudiées par les chercheurs chinois et coréens, et il est inévitable qu'elles finissent par se retrouver dans les tuyaux en Amérique du Nord. Or, en présence de noir de carbone, elles sont très difficiles à repérer, mais causent un vieillissement prématuré. Il serait fortement souhaitable que de nouvelles méthodes pour en repérer la présence soient développées.

Finalement, la question de l'effet de ces tuyaux sur la qualité de l'environnement pourrait survenir dans les années à venir. Actuellement, les tuyaux pour l'alimentation en eau potable font l'objet d'études. L'évaluation des normes à cet égard ne semble pas se diriger rapidement vers un resserrement, mais on ne peut l'exclure sur un horizon de 25 ou 50 ans.

10. MÉTHODES UTILISÉES POUR LES TESTS MÉCANIQUES

Des tuyaux à joints vissés Weholite ont été gracieusement fournis par la compagnie KWH Pipe, et des tuyaux à doubles parois par la compagnie Soleno. Le tuyau est tout d'abord mesuré à l'aide d'un gallon à mesurer de grande précision (division au 1/32 de pouce). Des sections ou éprouvettes sont découpées à des longueurs et selon des spécifications variant avec le diamètre des tuyaux et la norme utilisée, soit dans ce cas-ci les normes ASTM D2412, ASTM F2306, ASTM F894 ou BNQ 3624-120.

Pour l'un des deux types de tuyaux, soit le type «crêtes et vallons» ou à doubles parois, commercialisé par la compagnie Soleno, la longueur effective de l'éprouvette pourra différer de celle spécifiée par les normes. En effet, lorsque la longueur minimale requise par la norme est mesurée, la coupe sera effectuée dans un vallon. Si la mesure coïncide avec une crête, on coupera au prochain vallon. Un exemple est proposé dans la norme ASTM F2306.

Les éprouvettes des deux types de tuyaux sont conditionnées au moins 24 heures avant les essais mécaniques. Pour ce faire, les échantillons sont entreposés dans la pièce où auront lieu les essais mécaniques, afin d'assurer une homogénéité des températures et taux d'humidité, tel que requis par la norme ASTM D2412 et exigé, par les autres normes qui s'y réfèrent.

Avant chacun des essais, l'éprouvette est inspectée afin de détecter des défauts qui pourraient influencer les résultats des essais, puis son diamètre est mesuré selon trois axes différents à l'aide d'un gallon à mesurer de grande précision. L'axe où le diamètre du tuyau est le plus faible correspond à l'orientation de référence ou 0°, et deux autres orientations sont considérées par rapport à cette position de référence, soient les positions à 35° et 70° de celle-ci, tel que définit par la norme. La longueur exacte de l'éprouvette est aussi mesurée, dans trois mêmes orientations. Finalement, l'épaisseur de l'éprouvette est mesurée à l'aide d'un vernier ($\pm 0,01$ mm) à huit endroits différents du périmètre afin de déterminer l'épaisseur minimale. Le point le plus mince est indiqué clairement sur le tuyau à l'aide de marqueur blanc «Sharpie Paint», car il sera utilisé comme point de référence pour situer et placer l'éprouvette à l'intérieur du montage de l'essai mécanique.

a)



b)

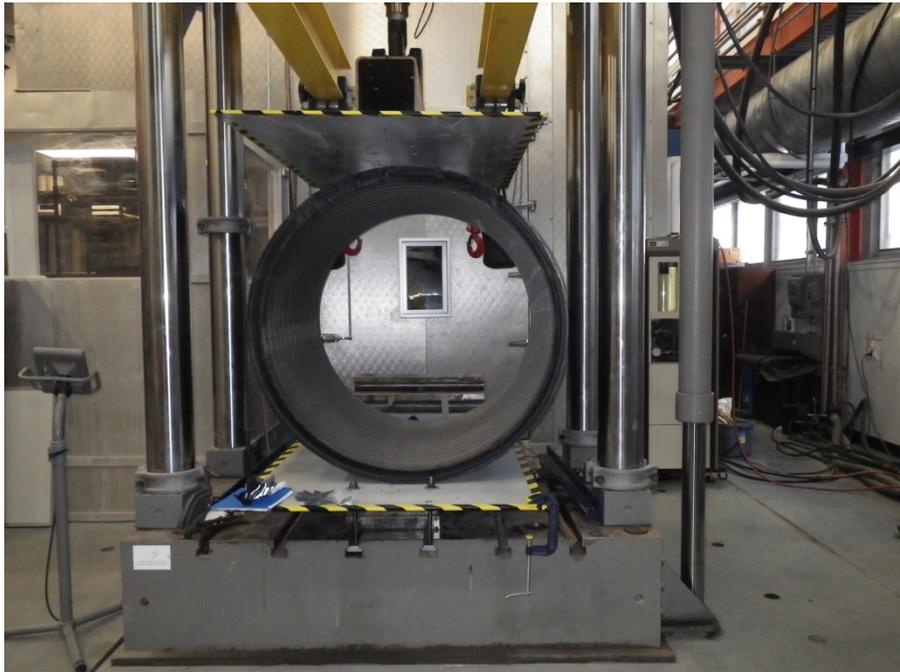


Figure 12 : Schéma du montage permettant d'effectuer les essais de rigidité.

a) Vue globale du montage

b) Vue latérale avec tuyau de 48'' de diamètre

L'éprouvette est ensuite insérée dans l'un des montages utilisés pour les essais de rigidité montré à la figure 12. Le montage utilisé pour les tuyaux de 24 pouces de diamètre, indiqué à la figure 12a, est constitué de deux plaques d'acier de dimension suffisante pour satisfaire les normes en vigueur. Le déplacement de la plaque supérieure est contrôlé par deux vérins tandis qu'un capteur de force permet de connaître la charge appliquée sur la plaque et associée à un mouvement vertical donné. On mesure donc simultanément la charge et le déplacement moyen de la tête des vérins. La figure 12 b) est consacrée au montage pour les tuyaux de 48 pouces, la principale différence étant qu'un seul vérin est utilisé plutôt que deux pour déplacer la plaque supérieure. Dans les deux cas, la charge ainsi que le déplacement vertical de la plaque supérieure sont enregistrés et relayés à un système d'acquisition de données. Cette acquisition s'effectue à une fréquence de 4 Hz.

Avant le début du chargement, l'échantillon est inséré entre les deux plaques, et une charge minimale maintenant l'échantillon en place est appliquée à l'aide de la plaque supérieure, tel que décrit dans la norme ASTM D2412.

La figure 12 permet de noter la présence, de deux tiges bleues qui serviront de guide de sécurité ainsi que deux serres métalliques de couleur grise ayant pour but de maintenir ponctuellement l'échantillon lors de l'essai. Les serres disposées aux extrémités de l'échantillon sur 1 po² uniquement, ne gênent en rien la déformation de l'éprouvette et sont requis pour des raisons de sécurité afin d'empêcher tout déplacement latéral de l'échantillon s'il venait à glisser latéralement et ainsi éviter tout accident (figure 13). Les tiges métalliques apparaissant en bleu sur la figure 12 sont disposées de part et d'autre de l'échantillon sans toutefois toucher à ce dernier.



Figure 13 : Serre qui maintient l'éprouvette.

Lors des essais mécaniques dits de rigidité, chaque éprouvette ne subit qu'un seul chargement. Puisque chaque norme nécessite trois essais, trois éprouvettes différentes sont alors requises. La norme BNQ 3624-120 demande toutefois un essai supplémentaire (et par conséquent une éprouvette additionnelle) qui engendre une déformation finale de l'éprouvette de 20 % de son diamètre en moins de 5 minutes. (Figure 14) Une vitesse de déplacement du plateau supérieur du montage de 30 mm/min a donc été utilisée pour les tuyaux de 600 mm de diamètre et de 50,8 mm/min pour ceux de 1200 mm de diamètre. Suite à l'essai, l'éprouvette était retirée du montage et un examen visuel était réalisé afin de constater l'absence/présence de défauts visibles qui auraient pu être provoqués lors de l'essai. Dans le cadre de cette étude, aucun défaut (blanchiment, fissure ou autres) n'a été observé quel que soit l'essai réalisé. Dans tous les cas, l'éprouvette reprenait sa forme initiale après quelques minutes, suite à la relaxation du polyéthylène. L'ensemble des paramètres principaux associés aux essais mécaniques sont présentés au tableau 3.

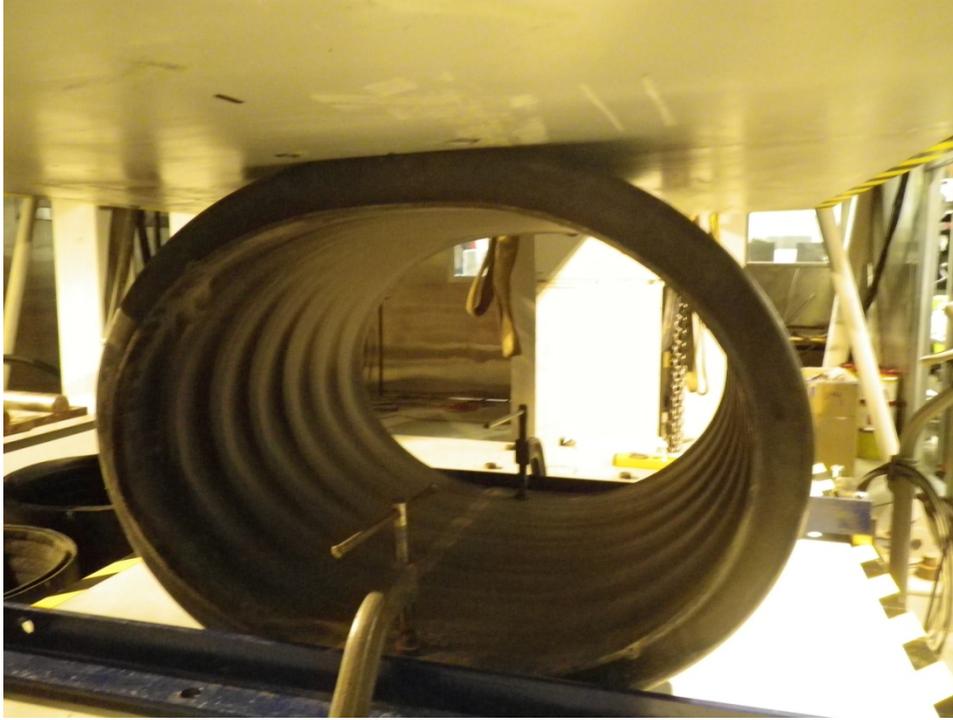


Figure 14 : Déformation de 20% effectué pour un essai selon la norme BNQ 3624-120.

Tableau 3 : Paramètres des essais de rigidité utilisés en fonction des différentes normes pour les tuyaux de 24 et 48 pouces (600 et 1200 mm) de diamètre.

	ASTM D2412	ASTM F894	ASTM F2306	BNQ 3624-120
Force de précharge	En contact avec la charge minimale pour tenir le tout en place	Selon ASTM D2412	Selon ASTM D2412	Selon ASTM D2412
Vitesse de chargement	0,50± 0,02 po (12,5±0,5 mm)/min	2 po/min (50,8mm/min)	Selon ASTM D2412	12,5 mm/min (<5min) *
Déformation calculée (pourcentage du diamètre)	5%	3%	Selon ASTM D2412	5% (20%)*
Positionnement des échantillons	1. ligne de base ou épaisseur minimum à 12h 2. +35 degrés 3. +70 degrés	Selon ASTM D2412	1. épaisseur minimum à 9h/3h 2. +45 degrés 3. +90 degrés	Selon ASTM D2412
Nombre d'éprouvettes par norme	3	3	3	3 (1)*

* Les valeurs entre parenthèses se réfèrent au quatrième essai de la norme BNQ, où une déformation de 20% du diamètre de l'éprouvette est requise.

11. MÉTHODES UTILISÉES POUR LES TESTS DE VEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉS

Les modes de vieillissement utilisés ont été choisis suite à la veille technologique décrite dans la section 7.

11.1 Préparation des échantillons vieillis

Les échantillons ont été vieillis selon 2 méthodes. Une première méthode de vieillissement était accélérée en plaçant du tuyau réduit en poudre grossière dans un bain à 80°C pendant une période de temps variable. Les résidus de coupe ont été utilisés dans ce cas, et on peut en voir un exemple à la Figure 15. Ce vieillissement était effectué en variant l'agent chimique utilisé. Une liste des agents et des temps de vieillissement utilisés apparaît dans le Tableau 4. La solution piranha désigne une solution préparée en mélangeant, des proportions volumiques 3 :1, de l'acide sulfurique concentré (18 M) à du peroxyde d'hydrogène 30%, et constitue donc une solution ayant un pouvoir oxydant très fort.

Tableau 4 : Listes des agents et temps de vieillissement utilisés à 80°C.

Solution de Vieillissement	Temps d'exposition
Piranha	64 heures
NaCl 5%	3 jours
NaCl 5%	7 jours
NaCl 5%	14 jours
NaCl 5%	28 jours
NaNO ₃ 5%	7 jours

Ces échantillons avaient pour but de déterminer rapidement quelle méthode de caractérisation serait assez sensible pour déceler des changements par l'action des différents agents de vieillissement.

La seconde méthode de vieillissement n'est pas accélérée, et est effectuée à température de la pièce sur de petits morceaux de tuyaux des deux types, qui sont montrés à la figure 15. Ils avaient des dimensions approximatives de 1 po X 2 po. Différents agents chimiques ont été employés pour le vieillissement de ces morceaux. Pour chacun des agents, cinq échantillons Weholite et cinq Soleno ont été utilisés. Le

tableau 5 contient la liste de tous les agents chimiques utilisés pour faire vieillir le polyéthylène.

Finalement, trois sections de tuyau Soleno de deux pieds par deux pieds ont été immergées dans une solution saline de NaCl 5%.

Tableau 5 : Liste des solutions de vieillissement utilisées.

Eau distillée	pH12
pH2	NaNO ₃ 5 ppm
pH4	NaNO ₃ 50 ppm
pH6	NaNO ₃ 0,5%
pH8	NaCl 5%
pH10	NaCl (saturé)

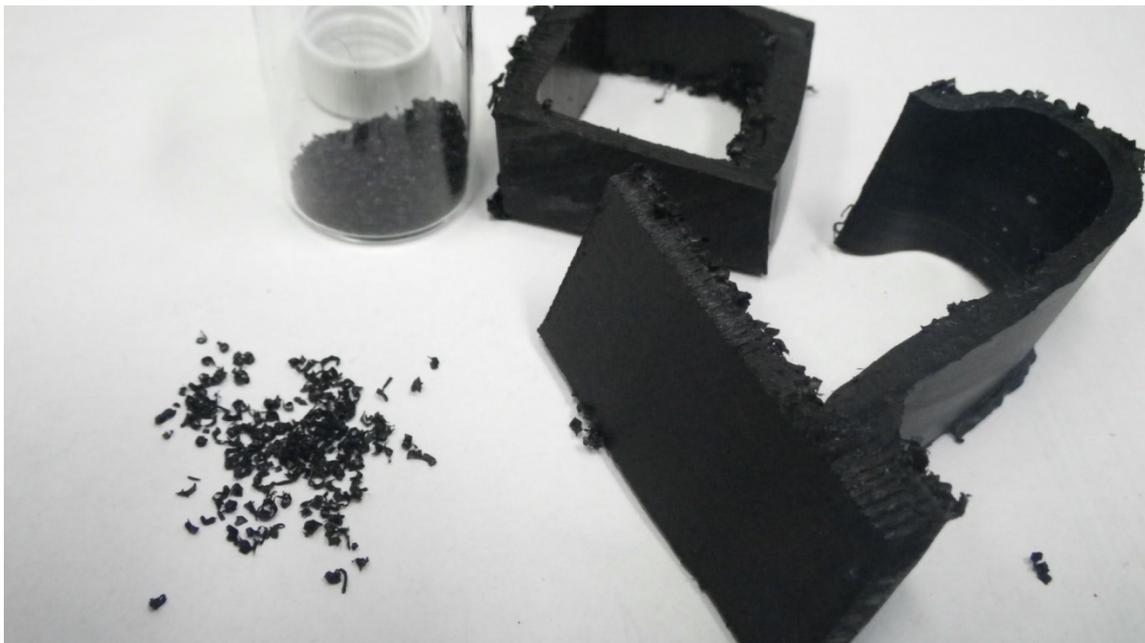


Figure 15 : Exemples d'échantillons utilisés pour le vieillissement, en bas à gauche la poudre pour le vieillissement accéléré, en haut à droite, une section de tuyau Weholite et en bas à droite une section de tuyau Soleno.

11.2. Méthode de caractérisation

11.2.1 Spectroscopie infrarouge par réflexion totale atténuée (ATR-FTIR)

La spectroscopie infrarouge à réflexion totale atténuée est une méthode très utile pour suivre l'évolution du vieillissement à la surface des tuyaux en polyéthylène. Elle utilise des longueurs d'onde de l'infrarouge moyen, et mesure l'absorption d'une partie de cette lumière par les groupements chimiques du matériau d'origine et les groupements chimiques supplémentaires induits par le vieillissement. Cette méthode est sensible uniquement à la surface du matériau, et pour le montage utilisé, à environ les deux premiers micromètres de celle-ci. Il est ainsi possible de voir facilement un changement de fonctionnalité à la surface du matériau suite à l'action d'agents physico-chimiques. Ce type de mesures est très rapide, et on obtient des résultats après quelques minutes seulement. La reproductibilité est excellente et ne varie pas d'un utilisateur expérimenté à l'autre. Le signal peut parfois être de mauvaise qualité si l'échantillon est en mauvais contact avec le cristal sur lequel la lumière infrarouge est réfléchi, mais ce cas de figure est très facile à repérer et à régler en ajustant l'échantillon et en reprenant le spectre.

L'appareil utilisé est un spectromètre de la compagnie ThermoElectron Madison Wi. Le modèle en question est le spectromètre infrarouge Thermo-Nicolet Magna 850 à transformée de Fourier. Le modèle Thermo-Nicolet Magna 760 a également été utilisé pour certaines mesures. Ces appareils sont équipés d'un détecteur MCT (tellure de mercure-cadmium) refroidi à l'azote liquide et d'une lame séparatrice en bromure de potassium recouverte de germanium. La région spectrale utilisée couvre l'infrarouge moyen, soit de 750 à 4000 cm^{-1} . Tous les spectres sont effectués avec un compte de 128 interférogrammes à une résolution de 4 cm^{-1} . Les spectres ont été acquis et traités en utilisant le logiciel OMNIC de la même compagnie. La partie la plus importante de l'appareil est le module ajouté qui permet de faire de la réflexion totale atténuée (ATR). L'accessoire est un Golden-GateTM de la compagnie Specac Ltd. (Londres, Royaume-Uni) qui permet la réflexion totale atténuée sur un cristal de diamant.

La figure 16 montre le concept de l'ATR. La lumière infrarouge est d'abord envoyée sur le diamant en contact avec l'échantillon. Elle est réfléchi à l'intérieur du diamant, mais une partie de l'onde se disperse à la surface du matériau en contact avec le diamant. Cette onde évanescence sera en partie absorbée par le matériau à des longueurs d'ondes spécifiques et caractéristiques des groupements chimiques de celui-

ci. L'onde sera donc ainsi atténuée par l'interaction avec le matériau. L'onde atténuée est mesurée par le détecteur du spectroscope, et on obtient ainsi le spectre d'absorption du matériau étudié dans l'infrarouge.

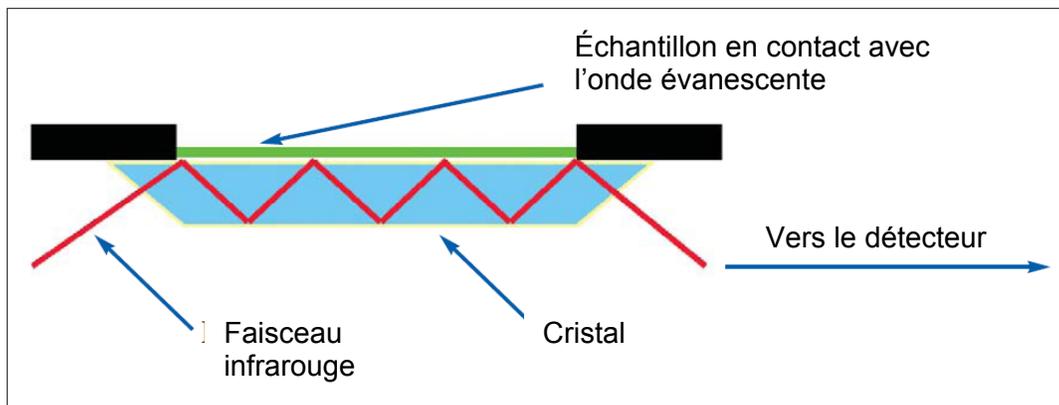


Figure 16 : Schéma d'un accessoire ATR typique, tel qu'adapté d'un document de la compagnie Perkin-Elmer.¹²⁷

Le vieillissement du polyéthylène entraîne des changements connus à des régions spécifiques du spectre infrarouge. À la figure 17, deux spectres infrarouge sont présentés : en mauve le spectre témoin d'un échantillon de PEHD non vieilli et en rouge un échantillon vieilli de façon accéléré à 80°C dans une solution piranha pendant 64 heures. Trois changements sont facilement observables sur cette figure. Tout d'abord, on peut apercevoir l'apparition d'une large bande associée à des vibrations de valence d'une fonction alcool (O-H) centrée à 3370 cm^{-1} . Ensuite, entre 1700-1750 cm^{-1} , retrouve principalement dans les échantillons vieillis de nouvelles des vibrations de valence de fonctions carbonyles (C=O). Ces deux fonctions étaient absentes du polyéthylène de départ. Comme on peut le remarquer, le vieillissement est en grande partie causé par l'action de l'oxygène, qui oxyde la surface.

Finalement, entre 1040 et 1170 cm^{-1} , on note la présence de bandes vinyloxydes (C=C) qui peuvent aussi apparaître suite au vieillissement. Ces fonctions sont reliées à l'effet de radicaux libres, et peuvent se produire en absence d'oxygène. Un tableau plus complet des différentes vibrations causées par le vieillissement du PEHD par divers agents chimiques est présenté au tableau 6. Ce tableau regroupe les assignations spectrales de différents auteurs pour ces vibrations. L'intensité relative de ces bandes

par rapport à une bande liée à un groupement chimique de PEHD non vieilli (les bandes à 2850 cm^{-1} , dues aux vibrations de valence des groupements CH_2 , par exemple) permet de faire un suivi semi-quantitatif du vieillissement chimique d'un échantillon.

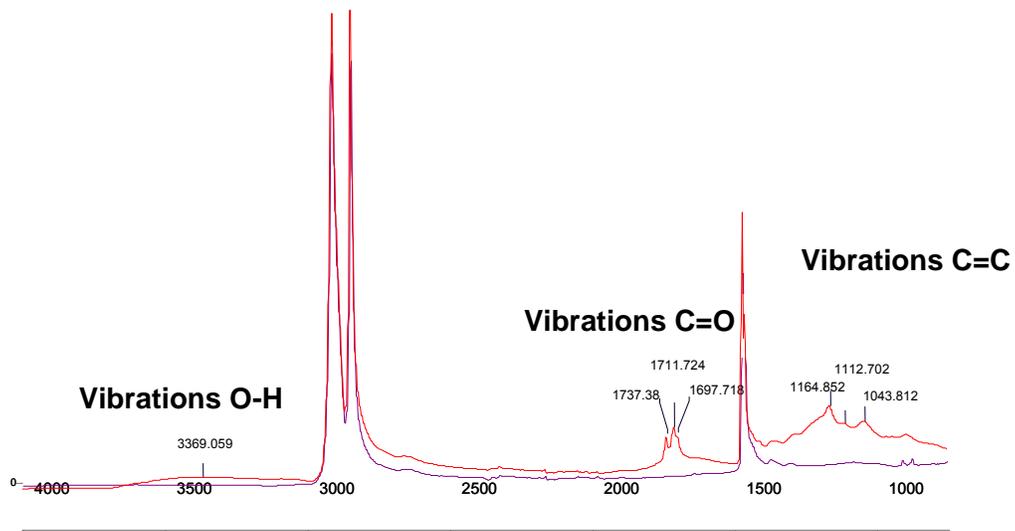


Figure 17 : Spectre infrarouge de $4000\text{ à }750\text{ cm}^{-1}$ d'un échantillon de PEHD ayant subi un vieillissement accéléré à 80°C dans une solution piranha pour 64 heures.

Tableau 6 : Attribution, selon la littérature, des principales bandes observées en spectroscopie infrarouge sur les échantillons de PEHD vieillis (les bandes présentes sur les échantillons non vieillis sont indiquées en gras).

Longueur d'onde (cm ⁻¹)	Attribution	Groupe fonctionnel	Référence
3555-3430	ν (O-H)	R-O-O-H	34,128
3370-3380	ν (O-H)	-OH	34,128
3310	ν (O-H)	-OH	128
2900	ν (C-H)	-CH₂-	
1780-1785	ν (C=O)	Lactone ou ester peroxyde	128,129,130
1745	ν (C=O)	Ester	34,128
1738-1732	ν (C=O)	R-CO-OR' (R et R' insaturés) Ester, aldéhyde,	34,129,130,131,132
1725	ν (C=O)	Cétones	34,128
1715-1720	ν (C=O)	R-CO-OR', R et R' alkyls Cétones	128,129,130,131,132
1700-1710	ν (C=O)	Acide carboxylique	128,130,133
1685	ν (C=O)	Cétone insaturée en α	34
1678	ν (C=C)	R'CH=CHR trans	131
1653	ν (C=C)	R'CH=CHR cis	131
1645	ν (C=C)	Vinyle insaturé	128
1636	ν (C=C)	-C=C- d'un groupe vinyle	131
1590-1610	ν (C=O)	-COONa en milieu alcalin	133
1542		Bande non assignée	
1473-1446	δ (CH ₃) δ (CH ₂) balancement	-CH ₃ -CH ₂ -, standard interne	34,134
1410	δ (CH₂) cisaillement	-CH₂-	
1380	δ (CH ₃)	-CH ₃	131
1368	δ (CH ₂)	-C(CH ₃) ₃ Bande de référence	131 135
1360	δ (CH ₃) symétrique	-CO-CH ₃	131
1310	δ (CH ₂) 'wagging'	-CH ₂ -	131
1246		Bande non assignée	
1200	ν (C-O)	-C-O	132
1170		C-O-C de groupes réticulés	34
1117	ν (C-C) + δ (C-C-H)	-CH(CH ₃) ₂	131
1142	δ (CH ₂) 'wagging'	-CH ₂ -	131
1068	ν (C-O)	-CHOH- adjacent à insaturations	131,132
1035	ν (C-O)	Acides, alcools, ou autres	
990	δ (CH ₂) hors plan	RCH=CH ₂	131
965	δ (CH) hors-plan	RCH=CHR' trans, R et R' alkyl	131
908-909	δ (C=C-H) hors-plan	RCH=CH₂ caractéristique des groupes vinyle	131,135,136

11.2.2 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

Cette méthode permet de mesurer les transitions thermiques d'un matériau (transition vitreuse ou fusion, ainsi que le taux de cristallinité). L'information désirée doit être obtenue durant le premier cycle de fusion de l'échantillon, car une fois le point de fusion passé, l'histoire thermique du polymère est effacée. Or, le point de fusion et le taux de cristallinité sont tous deux fonctions de cette histoire thermique. La méthode utilisée consistait donc à chauffer l'échantillon de 50°C à 180°C à un taux fixe de 10°C/min. Une masse de 6 mg a été utilisée dans tous les cas.

L'appareil utilisé pour effectuer l'analyse enthalpique différentielle ou DSC est le DSC823e de la compagnie Mettler Toledo. Il est utilisé avec le logiciel STARe. L'échantillon est déposé dans une capsule d'aluminium, et l'indium est utilisé comme référence. Les valeurs des points de fusion sont prises comme étant les valeurs maximales de l'endotherme de fusion.

Deux paramètres sont importants : le déplacement du pic de fusion ainsi que l'intensité de celui-ci. Ces changements permettent d'évaluer une forme de vieillissement chez les polymères, puisque lors du vieillissement, il y a souvent scission des chaînes, qui favorise la cristallisation, augmentant donc l'intensité relative du pic de fusion. Cependant, les polymères de courtes chaînes conduisent à des cristaux qui sont moins stables, le bout de chaîne augmentant l'entropie du système, et la température de fusion peut aussi diminuer.

Malheureusement, comme on peut le remarquer à la figure 18, la méthode s'est avérée peu sensible pour percevoir un changement significatif entre les divers échantillons testés. Les échantillons testés sont les mêmes qu'en infrarouge au tableau 5. Un déplacement très faible de la température de fusion par rapport au blanc ne permet pas de retenir cette méthode. Même si à première vue, il semble que l'intensité puisse nous donner un indice sur le vieillissement. La mesure est dépendante de la masse de produit utilisé et dans ce cas-ci il est pratiquement impossible d'obtenir la même masse entre chaque essai.

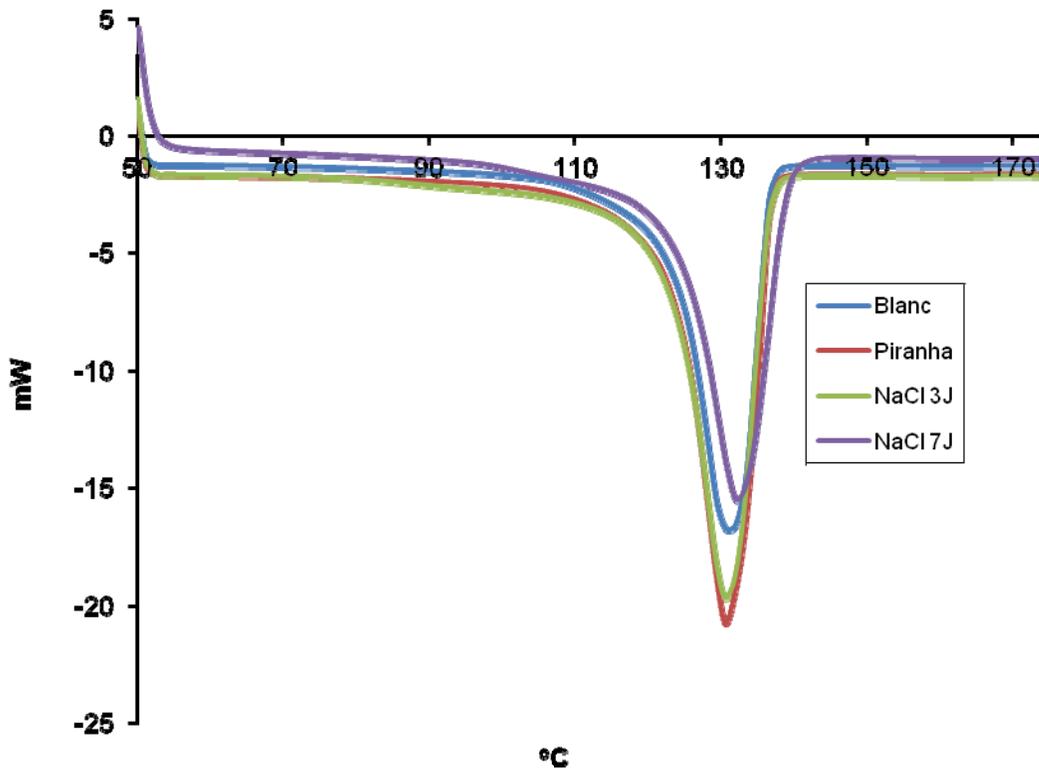


Figure 18 : Endotherme de fusion mesuré en DSC pour des échantillons ayant subi différents vieillissements à 80°C, pendant 64 heures dans une solution piranha et pendant 3 jours (3J) ou 17 jours (17J) dans une solution de NaCl 5%

11.2.3 Microscopie électronique à balayage

Des petits morceaux de tuyau (environ 3 mm de largeur par 3 cm de longueur) ont été découpés et couverts d'un dépôt d'or-palladium, pour un tuyau Soleno neuf et un tuyau Weholite neuf ainsi que pour des échantillons prélevés sur le terrain. Des photographies ont ensuite été enregistrées à l'aide d'un microscope à balayage JEOL, modèle JSM840A muni d'un détecteur d'électrons secondaires, opérant à une tension d'accélération de 15kV.

11.2.4 Résonance magnétique nucléaire solide

Les mesures ont été effectuées en mesurant la relaxation du paramètre T_2 à l'aide d'un spectromètre RMN 400 MHz pour les composés solides de la compagnie Bruker Biospin Ltd, On, Canada. Les échantillons (poudres) étaient placés dans un rotor de 4 mm tournant à 10 Hz à l'angle magique. Une séquence «Hahn-Echo» a été utilisée avec un retard d'écho accru de 100 ms à 40 ms avec un délai de 20 ms. Chaque spectre a été enregistré avec 16 balayages.

La résonance magnétique nucléaire (RMN) solide mesure un déplacement spécifique à un environnement chimique. Cette technique peut être utilisée pour mesurer la relaxation d'un polymère. Le paramètre de relaxation spin-spin ou T_2 mesuré RMN solide est directement relié à la morphologie. Cette relaxation est fonction de la taille des chaînes, du taux de cristallinité, et de la présence de liaisons de réticulation qui peuvent être produites lors du vieillissement. Un essai a donc été effectué pour vérifier si cette méthode permettrait d'obtenir une information complémentaire sur le vieillissement des échantillons. La décroissance du signal due au transfert de relaxation, qui permet de mesurer le paramètre de relaxation spin-spin, est rapportée à la figure 19 pour un échantillon vieilli par la méthode piranha et pour un échantillon initial. Comme on le voit à cette figure, les deux courbes sont parfaitement superposables, indiquant que cette méthode n'est pas assez sensible pour détecter l'effet du vieillissement du PEHD. Elle a donc été écartée.

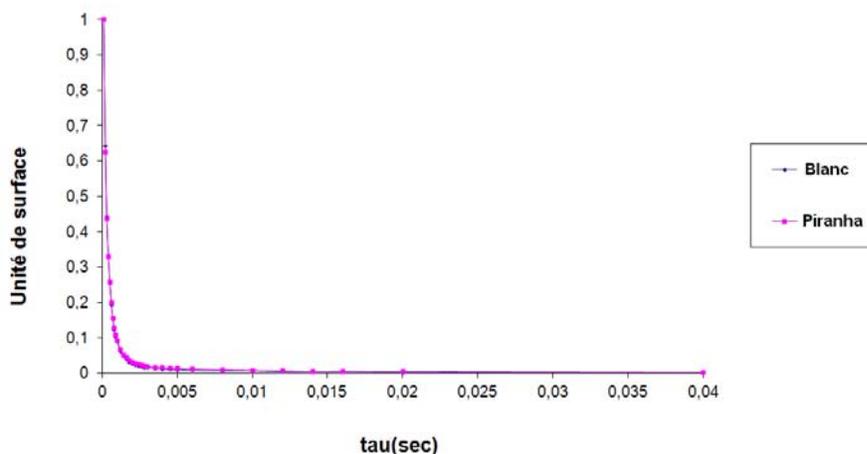


Figure 19 : Décomposition par transfert de relaxation en RMN solide pour un échantillon vieilli par une solution piranha et pour un échantillon non vieilli (blanc).

11.3 Prélèvement d'échantillons sur le terrain

Deux déplacements ont été effectués sur le terrain, avec l'aide du ministère des Transports du Québec, afin de prélever des échantillons vieillis sur le terrain. Dans les deux cas, les échantillonnages ont été effectués en essayant de conserver l'intégrité physique du tuyau et en essayant de limiter les dommages, et lorsque possible, un calfeutrant a été appliqué.

Un premier échantillon, de type Weholite, a été prélevé à Baie Ste-Catherine, à un ponceau situé au kilomètre 558,6 sur la route 138 (RTSS 138-08-222-000C chainage 5+997), le 12 décembre 2011. Ce tuyau avait été mis en place, d'après l'information du Ministère, en 2000.

Un second tuyau, de type Soleno, a été échantillonné le 3 février 2012 à Ste-Marie de Blandford (route 263, à 2771 m de l'intersection). Malheureusement, à cette date, le tuyau était rempli de glace jusqu'à la moitié de sa hauteur, aussi n'a-t-il pas été possible d'effectuer un échantillonnage aussi complet. Après avoir dégagé une partie du tuyau en retirant la neige à la pelle, un échantillon a été prélevé sur la surface supérieure, au bord externe du tuyau, et un échantillon a été prélevé le plus bas possible sur le pourtour externe du tuyau. Ce tuyau avait été mis en place, d'après l'information du ministère, en 2003.

Des photographies et des plans indiquant où les échantillons ont été prélevés sur les tuyaux apparaissent dans les annexes 5 et 6. Une série plus complète de photographies a été transmise à Claude Nazair, du ministère des Transports du Québec, suite à l'échantillonnage.

12. RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LES ESSAIS MÉCANIQUES

Les résultats des essais de rigidité ont été obtenus en suivant la méthodologie proposée par les normes, tel qu'indiqué dans la section *10.1 Méthode utilisée pour les essais mécaniques*. Les résultats obtenus ainsi que les observations menées sur les différentes éprouvettes sont présentés à l'annexe 3. Cette annexe présente, pour chacune des éprouvettes soumises aux essais, la longueur, et diamètre ainsi que les épaisseurs mesurées à différents endroits de leur périmètre, tel que requis par les normes. Chaque éprouvette mesurée est identifiée par un numéro, et sont indiqués, dans chaque cas, la température de l'éprouvette lors du test, sa position dans l'appareil et les numéros des photos qui sont liées à celle-ci et au test s'il y a lieu.

Les résultats émanant des essais mécaniques seront discutés aux paragraphes qui suivent. Tout d'abord seront présentés ceux associés aux tuyaux de type Soleno, pour chacune des normes, suivis de ceux associés aux les tuyaux de type Weholite. Ensuite, le calcul des paramètres PS et le RSC seront discutés. Ces valeurs permettront ensuite d'estimer des valeurs de rigidité annulaire et de constantes de rigidité circonférentielle tel que proposer par la norme ASTM F894.

12.1. Préparation des tuyaux de type Soleno

La première étape de la mesure des tuyaux est la coupe d'éprouvettes de longueur respectant les normes. Or, cette découpe dépend de la forme des tuyaux et du diamètre de ceux-ci, en particulier dans le cas de tuyaux de type Soleno. En effet ceux-ci sont constitués d'une double paroi pour laquelle la paroi externe n'est pas de diamètre constant mais variable, qui vient toucher la paroi interne à intervalles réguliers, tel qu'observé dans la Figure 20.



Figure 20 : Tuyaux à paroi extérieure annelée (Solen).

Pour les tuyaux de 24 pouces de diamètre, la coupe n'a pas été faite à exactement 24 pouces ou 48 pouces de longueurs. La coupe a plutôt été repoussée de quelques pouces afin d'atteindre le prochain vallon, résultant en une éprouvette d'un peu plus de 2 pieds (24 pouces), soit d'environ 27 pouces en moyenne. Cette longueur d'éprouvette a été utilisée pour les tests ASTM F2306 et BNQ 3624-120. Le même phénomène d'ajustement de la longueur a dû être utilisé pour la norme ASTM F894, résultant en des éprouvettes d'environ 51 pouces de longueur plutôt que 48 pouces. Bien sûr, cette augmentation aura un impact sur le rapport de la charge totale en fonction du déplacement moyen et l'analyse des résultats en tiendra compte.

Dans les cas des tuyaux de 48 pouces de diamètre, le même principe de coupe a été appliqué sachant que la longueur de l'éprouvette requise peut varier selon les normes utilisées dans cette étude. Dans le cas des normes ASTM F2306 et ASTM F894, la longueur de l'éprouvette requise est la même pour les diamètres de 24 ou 48 pouces. Par contre, cette longueur augmente de 24 pouces à 48 pouces pour la norme BNQ 3624-120.

Lorsque la découpe des éprouvettes est terminée, leurs extrémités sont légèrement sablées pour enlever toute irrégularité et possibilité de blessures pour le personnel. Les éprouvettes sont alors conditionnées pour un minimum de 24 heures à la même température et au même taux d'humidité que le laboratoire d'essai, tel que requis par les normes.

12.1.1 Mesures selon la norme ASTM F2306

La norme ASTM F2306 exige que, trois éprouvettes soient assujetties à un déplacement total correspondant à 5% du diamètre interne. Lors de l'essai, la première éprouvette était positionnée de façon à ce que son épaisseur minimale soit coaxiale avec l'axe de chargement sur la plaque supérieure du montage. L'éprouvette suivante était positionnée de façon à subir une rotation à 45 degrés de cet axe en sens horaire (par rapport à l'épaisseur minimale) et finalement la dernière éprouvette de cette série était positionnée à 90 degrés de l'axe initial, toujours en sens horaire. Le graphique a) de la figure 21 a) présente la courbe charge déplacement nécessaire à l'atteinte d'un déplacement final correspondant à une distance de 5 pourcent du diamètre interne soit environ 30mm (5x610mm/100). Puisqu'il s'agit d'éprouvettes de 24 pouces de diamètre interne (610mm), et que deux vérins ont été utilisés lors des essais, le graphique fait état de la combinaison des deux charges soit la charge totale. Pour les essais avec des éprouvettes de 48 pouces de diamètre, bien qu'un seul vérin ait été utilisé, les graphiques feront néanmoins état de la charge totale pour éviter toute confusion.

Le graphique a) de la figure 21 permet d'observer quelques points intéressants sur le comportement des éprouvettes à doubles parois de 24 pouces de diamètre. Le déplacement moyen imposé à l'éprouvette est dû à une charge totale qui croît, tel qu'on pouvait s'y attendre. Aucune rupture d'éprouvettes n'a été observée à l'intérieur de la plage de déplacement imposé. De plus, aucune modification macroscopique (zone de blanchissement, de stress, craquelure) n'a été observée sur les éprouvettes déformées.

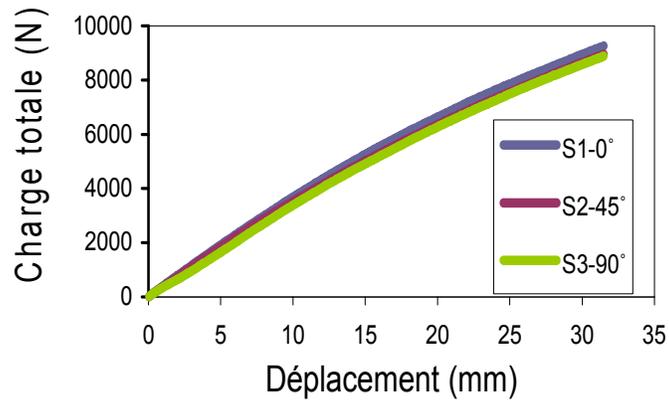
Il est également possible de remarquer qu'en début de déformation, soit pour environ les premiers 5%, une relation linéaire est observée en fonction de la charge totale, mais une déviation à la linéarité est ensuite observée, comportement qui est habituel avec les polymères. Cette déviation rendra toute comparaison et transformation des paramètres mécaniques (PS et RSC) d'une norme à l'autre difficile, voire impossible. Si on compare les essais réalisés avec trois différentes portions (éprouvettes) d'un même tuyau, on observe certaines variations, reflétant à la fois la précision de la méthode d'essai et des variations au sein du tuyau lui-même (fluctuations d'épaisseur, de longueur de l'éprouvette, etc). Une erreur d'environ 3% a été déterminée, suivant la méthode statistique de Student avec un seuil de probabilité de 95%, à partir de l'écart-type observé pour trois essais.

Avant les mesures, la plaque avait tendance à se déplacer légèrement par rapport à la forme du tuyaux. On a donc dû appliquer une légère précharge, ce qui a pour résultat de déplacer les valeurs de charge sur l'ordonnée. Ce même problème était observé pour les deux types de tuyaux, en dépit de leur flexibilité différente. Ceci était particulièrement visible pour le montage à un vérin, pour lequel il y a une plus grande erreur et des fluctuations plus importantes dans les mesures. Une correction de ces valeurs a été appliquée de façon à ramener l'ordonnée à l'origine à zéro sur les courbes présentées dans tous les graphiques contenant des valeurs sur les tuyaux de 48 pouces de diamètre. Cette plus faible stabilité de la plaque entraîne aussi de petits glissements lors de la déformation, qui se traduisent par des oscillations légères et sporadiques de la charge en cours d'essai..

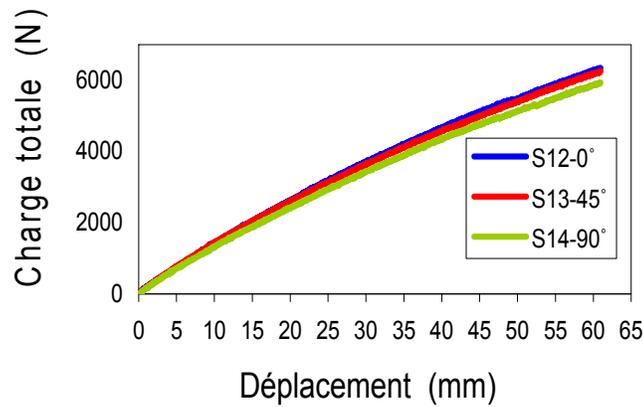
Dans le cas de la norme ASTM F2306, tel que mentionné précédemment, un changement de diamètre (augmentation de 24 pouces à 48 pouces) n'entraîne pas de modification de la longueur de l'éprouvette et l'essai est réalisé avec la même vitesse de chargement. Par conséquent, la courbe charge-déplacement obtenue pour des diamètres de 48 pouces est très semblable à celle des échantillons de diamètre de 24 pouces. On observe la même allure générale de la courbe tout au long de l'essai. La dispersion des résultats semble être légèrement plus élevée, ce qui est attribué à l'utilisation d'un seul vérin ou d'un plus grand diamètre d'éprouvette. L'erreur sur la mesure augmente de 1% (24 po) à environ 3-4% (48 po).

La figure 21 c) propose une comparaison des résultats obtenus pour les deux diamètres d'éprouvette. On peut constater que, pour un même taux de déformation (déplacement/diamètre interne, en pourcentage), la charge nécessaire est moins grande pour déformer l'éprouvette de 48 pouces de diamètre que pour celle de 24 pouces de diamètre. À 5% de déformation, près de 9 kN sont nécessaires pour déformer l'éprouvette de 24 pouces alors que seulement 6 kN sont requis pour celle de 48 pouces : un écart substantiel de 3 kN. La structure à doubles parois ou à paroi extérieure annulée est donc moins rigide pour les tuyaux de 48 po de diamètre.

a)



b)



c)

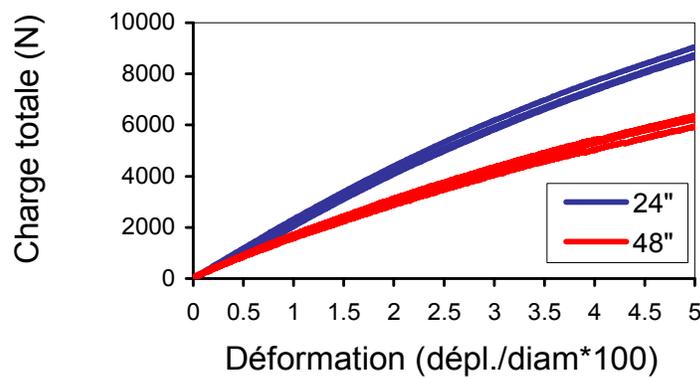


Figure 21 : Charge en fonction de la déformation pour un tuyau Soleno effectué selon la norme ASTM F2306. a) tuyaux de 24", b) tuyaux de 48", c) 24" et 48" où la déformation est en pourcentage.

12.1.2 Mesures selon la norme BNQ 3624-120

Les paramètres généraux pour la réalisation d'essais conformes à la norme BNQ 3624-120 sont très semblables à ceux réalisés selon la norme ASTM F2306. On peut donc s'attendre à des résultats très semblables.

Les deux méthodes ne diffèrent qu'en ce qui a trait au positionnement des 2^e et 3^e éprouvettes. En effet celles-ci sont soumises à une rotation de 35 degrés et 70 degrés plutôt qu'à une rotation de 45 et 90 degrés, tel que décrit précédemment. De plus, pour les éprouvettes de 48 pouces de diamètre, bien que la vitesse de chargement soit identique, la longueur requise des éprouvettes passe de 24 à 48 pouces. Les courbes de la charge en fonction du déplacement, présentées à la figure 22 a) et b), montrent bien que le comportement est très similaire à celui observé pour la norme ASTM F2306.

En effet, des similitudes sont observées tant au niveau de la charge nécessaire pour déformer les éprouvettes qu'au niveau des variations entre les essais. Ces résultats permettent donc de confirmer la reproductivité des essais. Ces informations tendent aussi à confirmer que le positionnement des éprouvettes (rotation) dans l'appareil n'a que très peu d'influence sur la charge nécessaire pour déformer les éprouvettes.

La norme BNQ 3624-120 requiert une éprouvette additionnelle de même dimension, mais qui est soumise à un déplacement maximal correspondant à 20% du diamètre interne de l'éprouvette plutôt que de 5%, tel que pour les essais précédents. L'essai doit se dérouler en moins de cinq minutes. Une vitesse de charge a ainsi été fixée à 30 mm/min pour les éprouvettes de 24 pouces de diamètre et à 50,8 mm/min pour celles de 48 pouces de diamètre, comme mentionné dans la section 10.1. Lors de cet essai, et malgré la plus forte déformation, aucune détérioration physique n'a été remarquée (blanchiment, fissures ou autres).

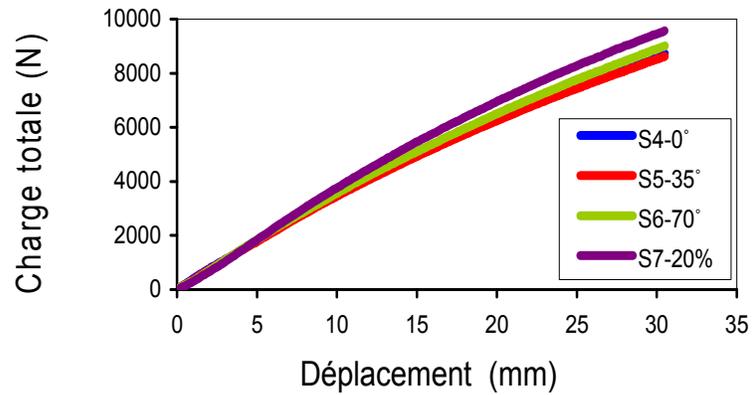
La courbe de comportement charge-déplacement correspondant à un déplacement maximal de 20% du diamètre interne est présentée, en couleur violet, sur les graphiques a et b figure 22. On remarque que la charge nécessaire pour déformer l'éprouvette est, à partir d'un déplacement de 5 mm, légèrement supérieure à celle obtenue pour les trois autres essais, effectués à 5% de déformation maximale. Ceci est attribué à l'utilisation d'une vitesse de déformation supérieure (30 mm/min et 50,8 mm/min par rapport à 12,5 mm/min). Ce phénomène est typique des plastiques dont

le comportement est variable en fonction de la vitesse de déformation viscoélastique, tel que discuté dans la section 3. Une vitesse de déformation plus rapide ne donne pas le temps aux chaînes polymères de se réorganiser en relaxant. On obtient donc une conformation de chaîne, au niveau moléculaire, de plus haute énergie, ce qui a donc nécessité plus d'énergie. Ce facteur est plus important que celui des fluctuations d'épaisseur ou de longueur pour des éprouvettes.

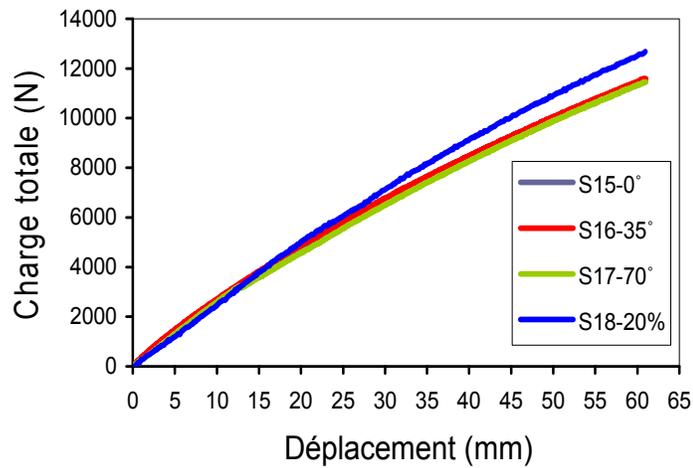
La figure 22 c), compare les résultats obtenus pour les deux les diamètres sous essai. Contrairement à la figure 21 c), la déformation des éprouvettes de 48 pouces de diamètre nécessite une charge supérieure par rapport aux éprouvettes de 24 pouces de diamètre. Cette situation est facilement attribuable à l'écart de longueur entre les deux types d'éprouvette. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la norme BNQ 3624-120, requiert des longueurs d'éprouvette différentes selon que leur diamètre est de 24 ou 48 pouces, alors que leur longueur est constante lorsque la norme ASTM F2306 est utilisée. Dans le cas présent, les éprouvettes de 48 pouces de diamètre nécessitent maintenant près de 12 kN pour une déformation atteinte de 5%, ce qui est le double de la valeur obtenue pour la norme ASTM F2306. Les éprouvettes étant du double de la longueur, les valeurs obtenues sont ainsi proportionnelles à la longueur de l'échantillon dans la zone linéaire de déformation. Ces résultats montrent clairement que la longueur de l'éprouvette est l'un des facteurs les plus importants dans ce type d'essai.

La figure 23, ne permet pas la comparaison aisée des deux diamètres d'éprouvettes amener à 20 % de déformation. En effet, il est très difficile de comparer ces deux essais entre eux car plusieurs variables expérimentales sont différentes, soit la vitesse, la longueur et le diamètre de l'éprouvette. On peut par contre observer que le système ne se déforme pas de façon linéaire au-delà d'un déplacement de 25 mm environ et 50 mm pour les éprouvettes de 48 pouces de diamètre, ce qui correspond à une déformation d'environ 4%.

a)



b)



c)

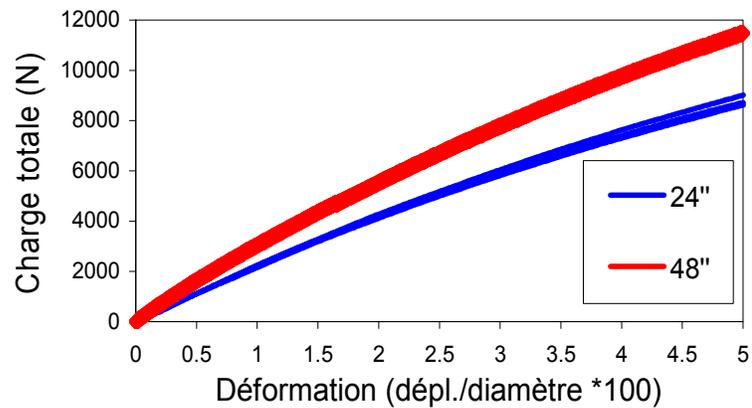
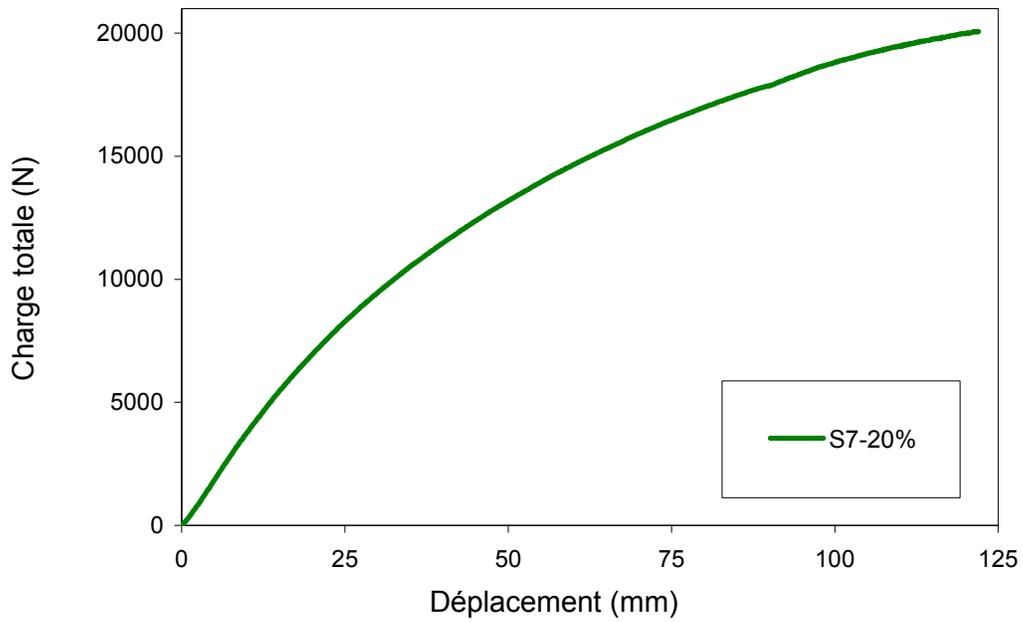


Figure 22 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Soleno effectué selon la norme BNQ 3624-120 à 5% de déformation. a) 24", b) 48", c) 24" et 48" où la déformation est en pourcentage.

a)



b)

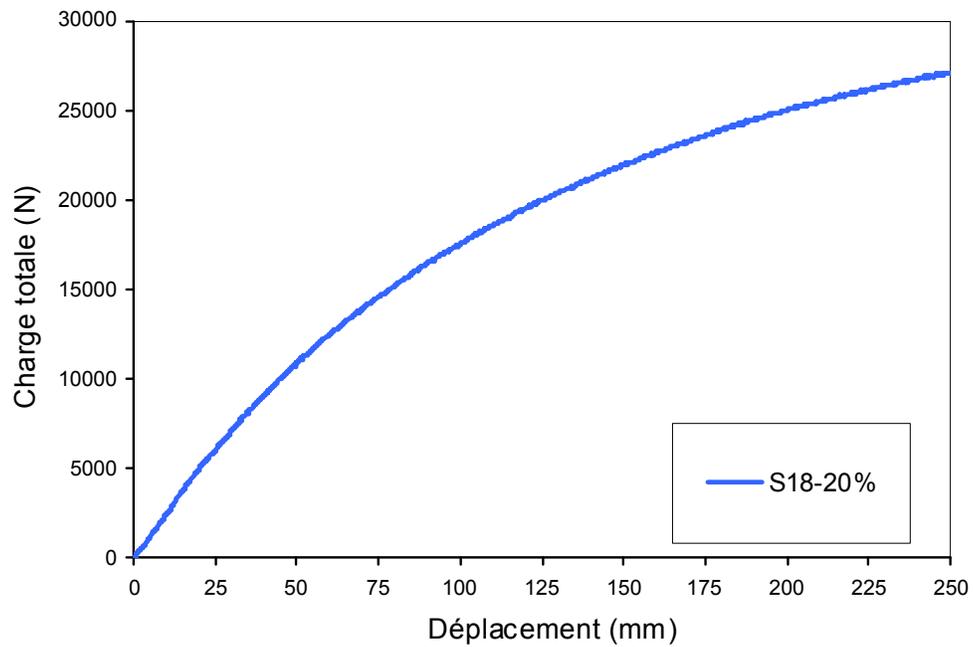


Figure 23 : Déplacement de 20% d'une section de tuyau Soleno selon la norme BNQ 3624-120. a) 24" et b) 48".

12.1.3. Mesures selon la norme ASTM F894

Dans le cas de la norme ASTM F894, la vitesse de chargement et la longueur de l'éprouvette sont totalement différentes des deux normes précédentes. La vitesse de chargement est de 50,8 mm/min et la longueur de l'échantillon est d'environ 51 pouces. Ces paramètres sont les mêmes pour les deux diamètres d'éprouvettes à l'étude. La position des éprouvettes est la même que celle requise pour la norme BNQ 3624-120 (soit celle de ASTM D2412, c'est-à-dire une rotation de 0°, 35 et 70 degrés). En conformité avec cette norme, le déplacement maximal imposé correspond à une déformation de 3% du diamètre interne de l'éprouvette. Cette norme est prévue pour déterminer des valeurs de constantes de rigidité circonférentielle (RSC). D'ailleurs ses conditions d'essai sont incompatibles avec le calcul des valeurs de rigidité annulaire (PS) tel que proposé pour les autres normes. Les courbes obtenues pour la norme ASTM F894 sont présentées à la figure 24 a) et b). L'erreur sur ces courbes, tel que calculée à partir de l'écart-type entre les différents échantillons (test de Student), est d'environ 8% pour les éprouvettes de 24 pouces de diamètre et de 9% pour les autres. Cette norme conduit donc à des fluctuations plus importantes de mesures de la charge. Ceci est imputable à la combinaison de deux facteurs. Premièrement, les mesures sont effectuées à plus faible déformation, c'est-à-dire dans un intervalle de charge pour laquelle l'erreur instrumentale relative est plus grande. On remarque d'ailleurs que cette norme conduit aux plus grands pourcentages de variations aussi bien pour les tuyaux de type Soleno que pour ceux de type Weholite. Le deuxième facteur est celui de la plus grande variabilité apparente des tuyaux de type Soleno, variabilité probablement reliée au mode de fabrication. À cet égard, on remarque que c'est systématiquement les éprouvettes de type Soleno qui présentent un plus grand pourcentage de variation pour chacune des normes. La combinaison des deux facteurs, dans le cas spécifique de cette norme, conduit à une variation d'environ 8% pour les éprouvettes de type Soleno, variations qui constituent les plus grandes variations observées de toutes les mesures effectuées dans la présente étude.

La comparaison des courbes des figures 21 a) et 22 a) relatives aux éprouvettes de 24 pouces de diamètres, permet de conclure que, pour un même déplacement en millimètres, plus du double de la charge a été nécessaire pour déformer l'éprouvette

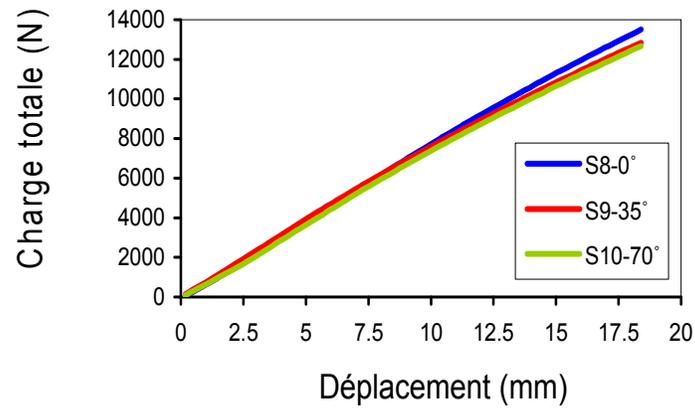
dans les conditions de la norme ASTM F894 que pour les conditions des normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120.

Dans le cadre de la norme BNQ 3624-120, un essai avait été fait avec une vitesse de 30mm/min, vitesse intermédiaire entre celle de la norme ASTM F2306 (12,5 mm/min) et de la norme ASTM F894 (50,8 mm/min), mais n'avait résulté qu'en une faible augmentation de la charge requise. Cette constatation permet de conclure que la principale cause de cette augmentation de la charge est donc la longueur de l'échantillon, qui est passée de 27 po à 51 po. Pour une longueur d'échantillon ayant presque doublée, la charge augmente, à toute fin pratique, du double également. Ainsi pour une déformation d'environ 18 millimètres, plus de 12 kN ont été nécessaires, alors que dans les deux autres normes (ASTM F2306 et BNQ 3624-120), un peu plus de 6 kN étaient nécessaires à pareil déplacement. Il semble donc que la longueur de l'échantillon soit le facteur ayant l'influence la plus probante sur la mesure.

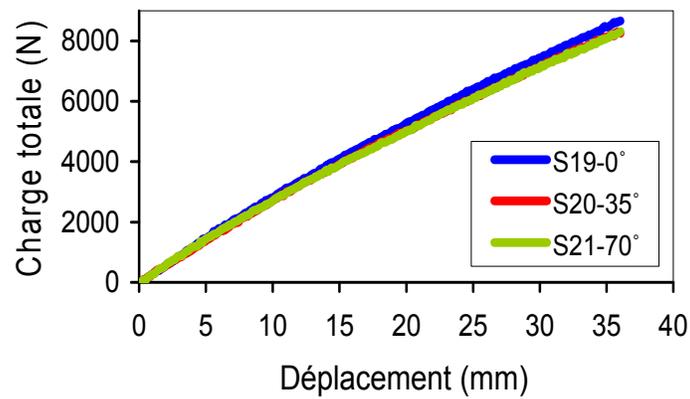
Tel que mentionné précédemment, il s'avère impossible de faire le même genre de comparaison pour les éprouvettes de 48 pouces de diamètre car la longueur des échantillons et la vitesse de chargement changent selon les normes en cause.

La figure 24 c), permet la comparaison des courbes charge-déplacement pour les deux diamètres d'éprouvettes à l'étude. Tout comme constaté avec la norme ASTM F2306, ici les valeurs de charge obtenues pour les éprouvettes de 24 pouces de diamètre sont supérieures à celles obtenues pour les éprouvettes de 48 pouces de diamètre. Dans les conditions de la norme ASTM F894, un écart de seulement 4,3 kN sépare les valeurs des charges correspondantes à 3% de déformation.

a)



b)



c)

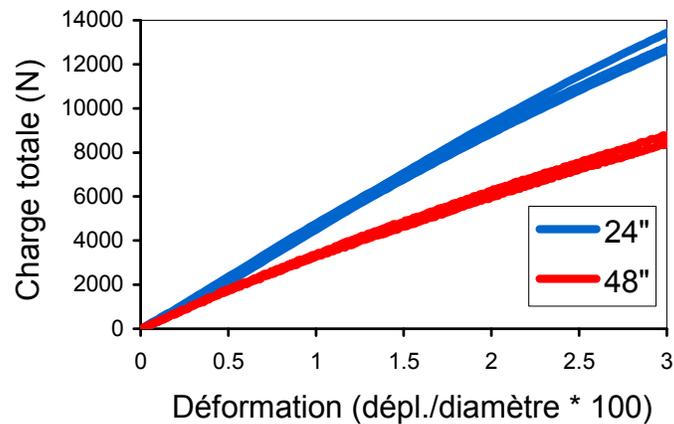


Figure 24 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Soleno effectué selon la norme ASTM F894 à 3% de déformation. a) 24", b) 48", c) 24" et 48" en pourcentage de déformation.

12.2 Tuyau de type Weholite

Les tuyaux de type Weholite sont à joints vissés. Leur paroi est rigide, puisque constituée d'une section assez épaisse de polyéthylène enroulée hélicoïdalement (Figure 25). En raison de leur homogénéité, contrairement au tuyau de type Soleno, les tuyaux Weholite ont donc été coupés à longueur constante, tel que le requiert les normes. En raison de l'épaisseur plus importante de la paroi, une coupe droite est difficile à réaliser. Par conséquent on obtient de plus grandes variations de longueurs entre les échantillons, pour un même diamètre de tuyau.



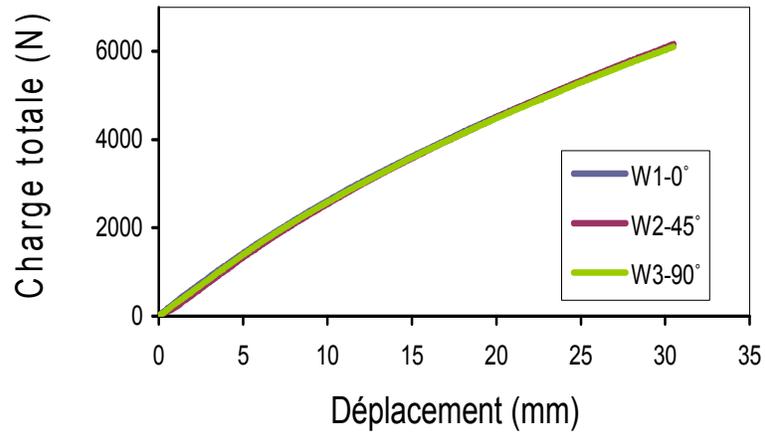
Figure 25 : Tuyau à paroi extérieure lisse ou à joints vissés (Weholite).

12.2.1. Mesures selon la norme ASTM F2306

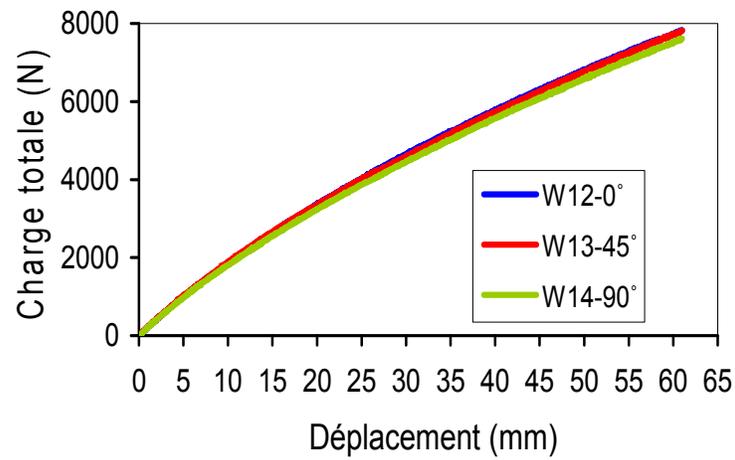
Les résultats obtenus selon la norme ASTM F2306 sont présentés à la figure 26. On remarque d'abord que les résultats sont très reproductibles pour les éprouvettes de 24 pouces de diamètre (a) et un peu moins pour ceux associés aux éprouvettes de 48 pouces de diamètre (b), ce qui est attribué à une moins bonne stabilité du montage utilisé dans le deuxième cas. Dans tous les cas, les courbes de déplacement moyen en fonction de la charge totale sont, à toutes fins pratiques, superposées. Il y a donc peu de variation entre les valeurs obtenues pour les trois essais, l'erreur déterminée par le test de Student pour une probabilité de 95%, est de moins de 1% pour les éprouvettes de 24 pouces de diamètre et d'environ 4% pour celles de 48 pouces de diamètre. Il est donc possible de conclure que les faibles variations d'épaisseur et de longueur des éprouvettes affectent peu les résultats obtenus.

Contrairement aux résultats obtenus pour les éprouvettes de type Soleno pour la même norme (ASTM F2306), les éprouvettes de 48 pouces de diamètre nécessitent une plus grande charge pour se déformer (figure 26 c). Ceux-ci étant constitués d'une paroi plus épaisse que les éprouvettes de 24 pouces de diamètre, la plus grande charge nécessaire à leur déformation semble donc liée à leur conception. Toutefois, la différence d'intensité de la charge nécessaire pour obtenir 5% de déformation entre les diamètres différents d'éprouvette n'est pas très importante, soit d'environ 1,6 kN (6,2 kN – 7.8 kN).

a)



b)



c)

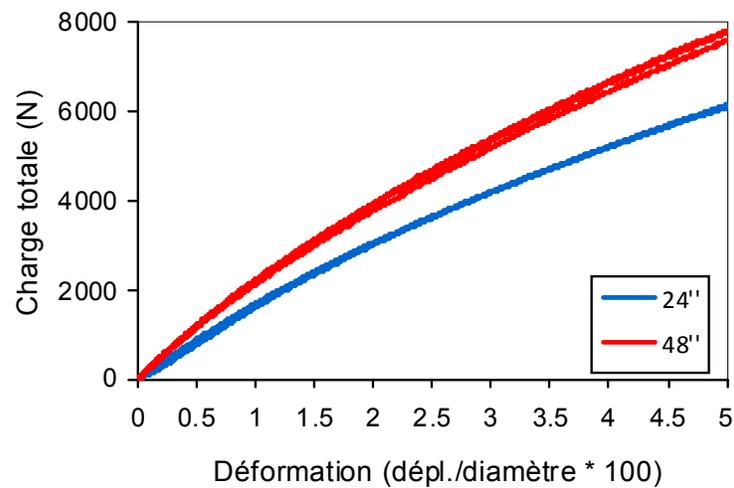


Figure 26 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Weholite effectué selon la norme ASTM F2306. a) 24'', b) 48'', c) 24'' et 48'' où la déformation est pourcentage.

12.2.2 Mesures selon la norme BNQ 3624-120

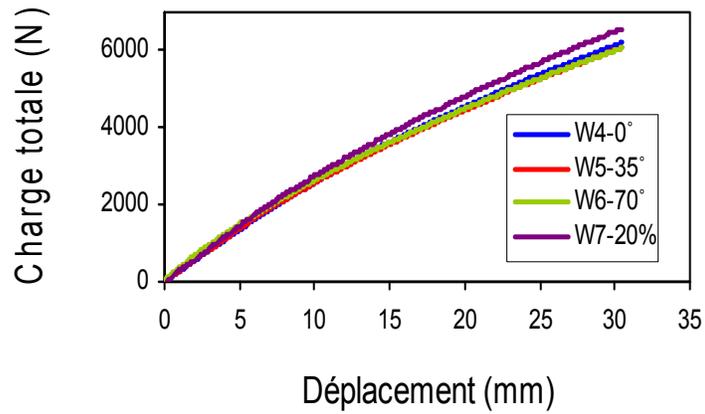
Les courbes charge-déplacement obtenues en conformité à la norme BNQ 3624-120 sont présentées à la figure 27 a) et b). Une courbe se distingue des autres, de couleur mauve, et correspond à un déplacement maximal atteint de 20% du diamètre interne de l'échantillon, pour une vitesse de chargement 30 mm/min pour les éprouvettes de 24 pouces de diamètre et de 50,8 mm/min pour celles de 48 pouces de diamètre. Les autres courbes de ces mêmes graphiques sont, comme dans le cas de la norme précédente, pratiquement superposés en a) alors qu'en b) on observe une certaine fluctuation tel que mentionné précédemment. Les valeurs obtenues sont à tout fin pratique les mêmes, à l'intérieur de l'erreur expérimentale, à celles obtenues pour le test ASTM F2306 pour les tuyaux de 24 pouces étant donné que les mêmes paramètres étaient utilisés. Cependant, on ne peut effectuer une telle comparaison pour les tuyaux de 48 pouces, divers paramètres changeant entre les normes dans ce cas.

Dans le cas de l'éprouvette déformée à 20%, on note, en a), une valeur plus élevée de la charge totale pour un même déplacement moyen, ce qui est attribuable à la vitesse de chargement différente utilisée, tel que discuté dans la section 12.1.2. Suite aux essais, aucune modification permanente des éprouvettes n'a été notée, tout comme dans le cas des essais réalisés sur les éprouvettes de type Soleno. L'éprouvette déformée à 20% a repris sa forme initiale, à toutes fins pratiques, après un peu plus d'une heure. Toutefois, l'effet de la vitesse de chargement semble être un peu moins marqué que ce qu'il a été observé pour le même essai sur des éprouvettes de type Soleno.

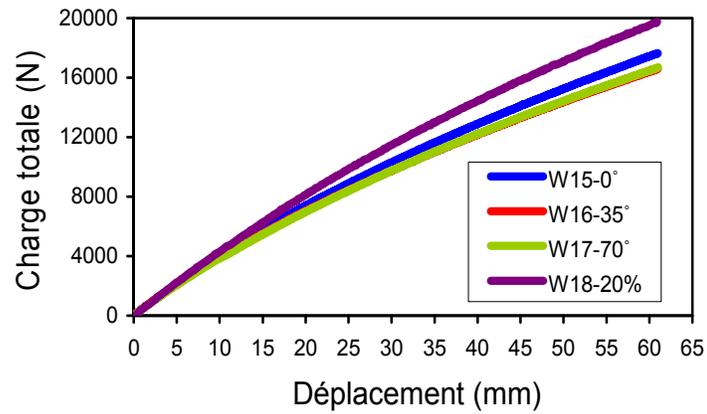
Dans l'ensemble, les mêmes conclusions sont également applicables à la figure 27 b) pour les éprouvettes de plus grand diamètre. Par contre, dans ce cas-ci, l'effet de la vitesse est plus marqué, ce qui semble normal car la différence de vitesse de chargement est plus élevée entre les essais typiques à 5% de déformation (12,5 mm/min) et ceux exigés à 20% de déformation (50,8 mm/min).

Les courbes charge-déplacement associées aux déformations de 20% sont également présentées à la figure 28. Elles possèdent globalement la même allure que celles associées aux éprouvettes de type Soleno pour le même essai.

a)



b)



c)

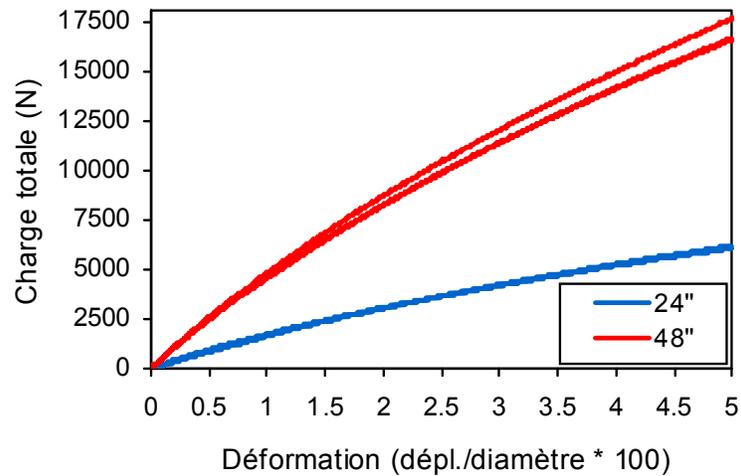
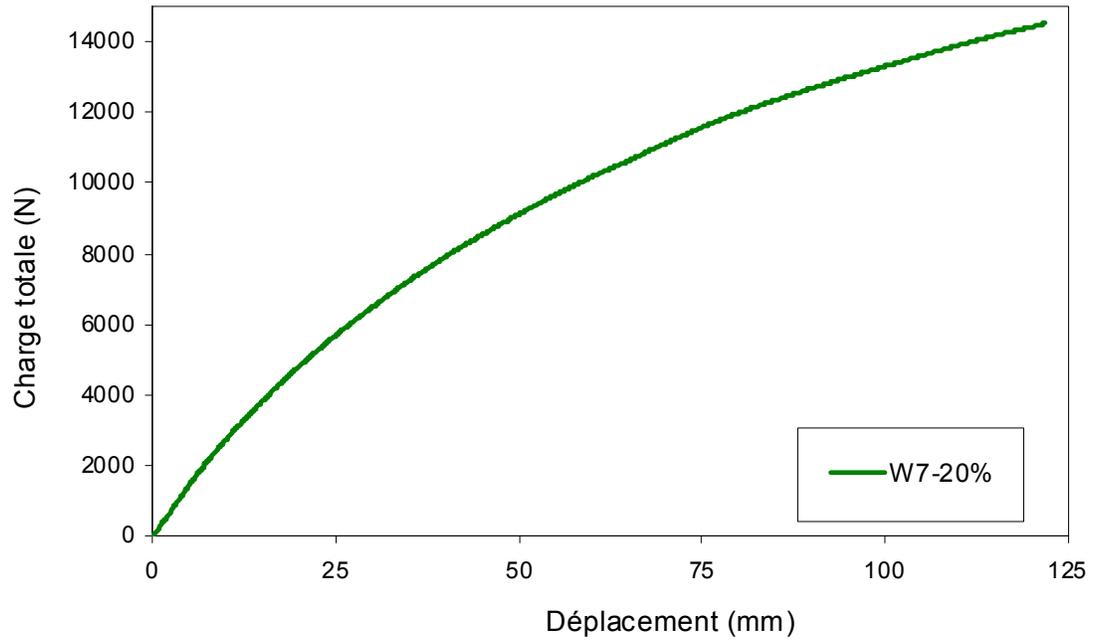


Figure 27 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Weholite effectué selon la norme BNQ 3624-120. a) 24'', b) 48'', c) 24'' et 48'' où la déformation est en pourcentage.

a)



b)

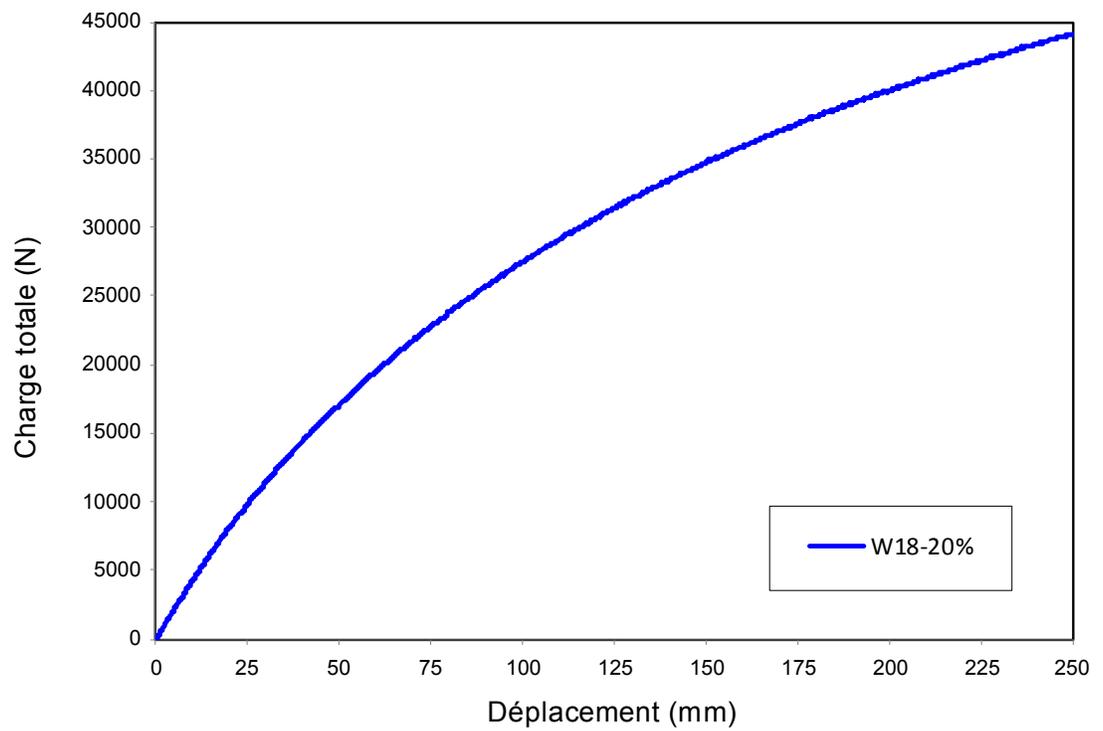


Figure 28 : Déplacement de 20% d'une section de tuyau Weholite selon la norme BNQ 3624-120. a) 24" et b) 48".

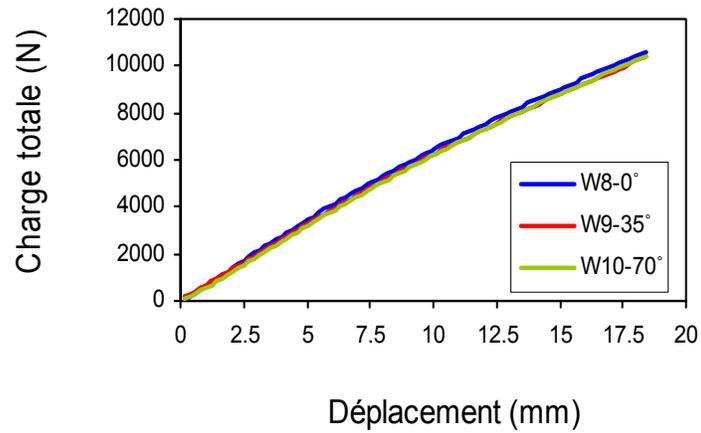
12.2.3 Mesures selon la norme ASTM F894

Les résultats présentés à la figure 29 a) et b) correspondent à ceux obtenus en conformité avec la norme ASTM F894. Encore une fois, les courbes se superposent bien, indiquant une faible variabilité des résultats d'un échantillon à l'autre pour les éprouvettes de 24 pouces de diamètre alors que le même genre de fluctuation de l'appareil est observé pour les résultats associés aux éprouvettes de 48 pouces de diamètre. Les résultats concordent avec ceux obtenus précédemment pour les essais effectués dans des conditions expérimentales similaires, soit pour les éprouvettes de type Soleno. Les valeurs obtenues de 10,3 kN, rapportées dans le tableau 15 a), sont plus élevées que celles obtenues en utilisant les normes ASTM F2306 et BNQ 3623-120, ce qui est attribué à l'utilisation d'une éprouvette plus longue et aussi à une vitesse de chargement plus élevé.

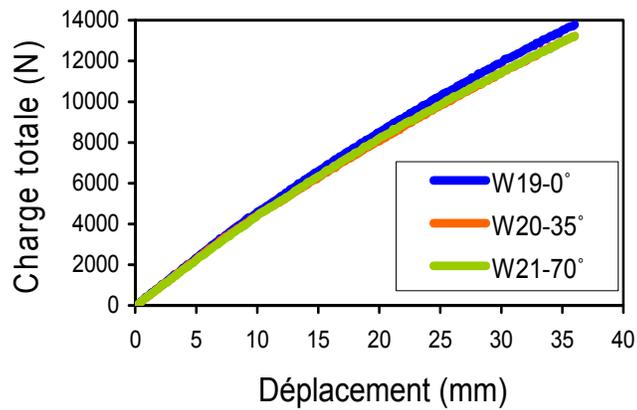
Les essais effectués en utilisant cette norme semblent moins reproductibles. Les variations observées sont de l'ordre de 3%, (alors que celles-ci étaient de moins de 1% pour les normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120) pour les éprouvettes de petit diamètre. Tandis que cette variation est du même ordre de grandeur pour les éprouvettes de 48 pouces de diamètre.

Lorsque les résultats associés aux éprouvettes des deux diamètres sont comparés, la tendance est la même que celle observée pour les éprouvettes de type Weholite. Bien sûr, l'écart entre les charges nécessaires pour produire une même déformation n'est pas le même. Selon la norme ASTM F894, l'écart est de 3,2 kN (10,3 kN – 13,5kN) pour un déplacement correspondant à 3% du diamètre interne.

a)



b)



c)

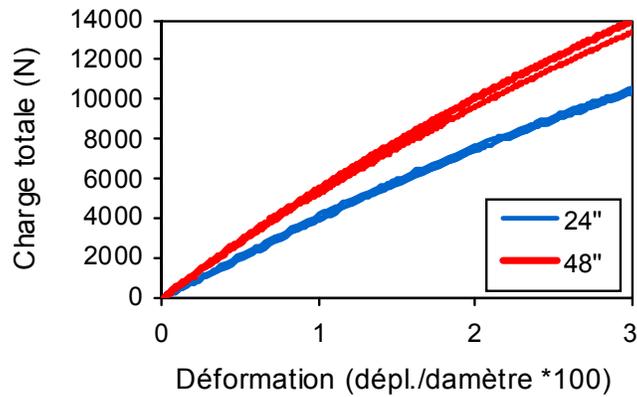


Figure 29 : Charge en fonction du déplacement pour un tuyau Weholite effectué selon la norme ASTM F894 pour une déformation de 3%. a) 24", b) 48", c) 24" et 48" où la déformation est en pourcentage.

12.3 Comparaison des deux types de tuyaux

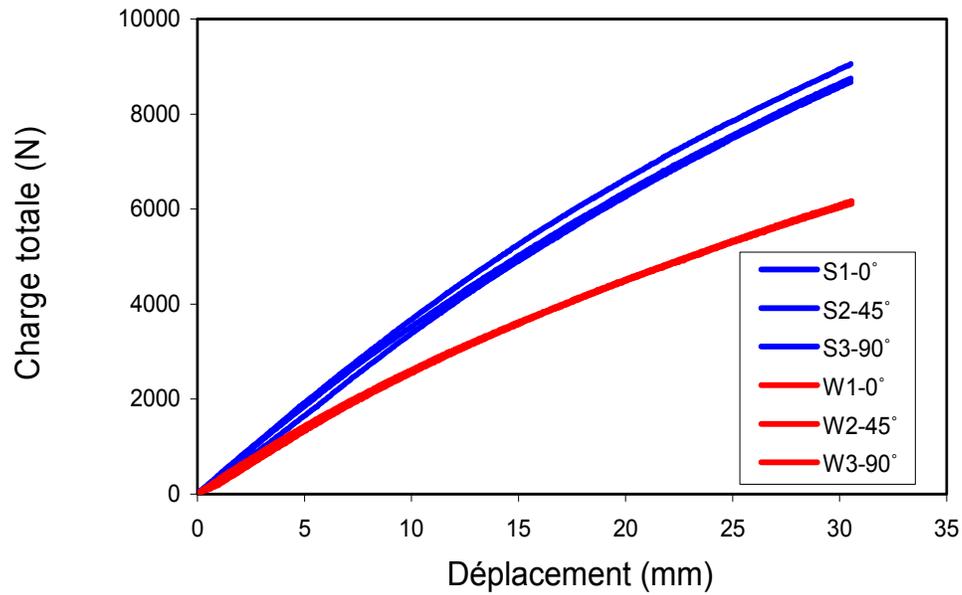
Même si, à la base, les tuyaux à simple et doubles parois sont manufacturés pour remplir les mêmes fonctions, leur design est complètement différent, ce qui leur confère un comportement mécanique très distinct. Les deux tuyaux sont faits de polyéthylène haute densité non recyclé, mais aucune mesure, dans cette étude, n'a été effectuée pour vérifier si le grade utilisé est comparable, et donc si leur masse molaire, leur polydispersité et leur pourcentage de ramifications sont similaires. De plus, aucune information n'est disponible sur les additifs utilisés dans chaque cas et leurs concentrations respectives, ce qui serait particulièrement pertinent dans le cas des additifs ajoutés.

La figure 30 regroupe les résultats, conformes à la norme ASTM F2306, pour les deux types d'éprouvettes (Solenio et Weholite) pour les diamètres de 24 pouces (figure 30 a) et de 48 pouces (figure 30 b). Cette figure, présentée à titre d'exemple, permet de dégager des constatations qui sont similaires à celles basées sur les autres normes à l'étude. Sur la figure, les traits en rouge représentent les résultats associés aux éprouvettes de type Weholite et ceux en bleu sont associés aux éprouvettes de type Soleno.

L'examen des courbes de la figure 30 a conduit à deux constatations. D'abord, on remarque une meilleure résistance à l'application de la charge pour les éprouvettes de type Soleno. Il est aussi évident qu'il est plus facile de prévoir le comportement mécanique des éprouvettes de type Weholite, puisque ce comportement semble plus reproductible.

À la figure 30 b), on constate essentiellement les mêmes observations mais, cette fois-ci, pour les éprouvettes de types différents. C'est ainsi que pour ce diamètre (48 pouces), et pour deux lots spécifiques, les éprouvettes de type Weholite possèdent une meilleure résistance à la charge que celles de type Soleno. Dans ce cas-ci, la reproductibilité est similaire pour les deux types d'éprouvettes (Solenio et Weholite).

a)



b)

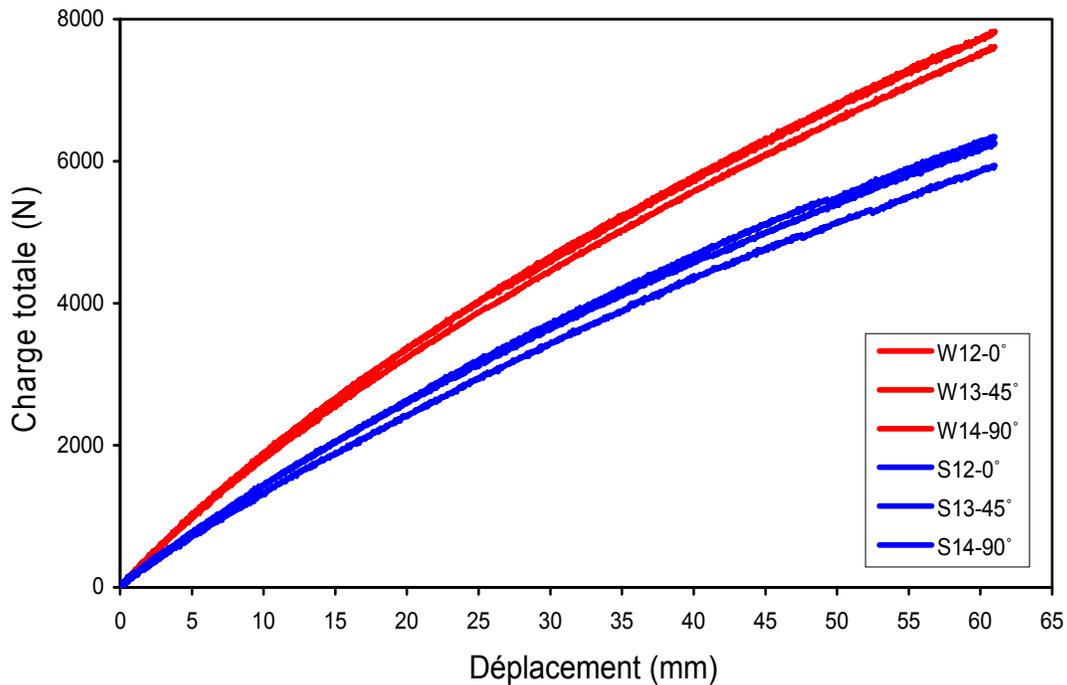


Figure 30 : Charge en fonction du déplacement moyen pour des tuyaux Soleno et Weholite effectué selon la norme ASTM F2306. a) 24'' et b) 48''.

Un des facteurs qui pourrait être invoqué pour expliquer ces différences est l'utilisation de tuyaux légèrement plus longs dans le cas des doubles parois en raison de l'obligation de couper dans un vallon. Il était peu probable que des différences de quelques pouces puissent, à elles seules, expliquer les grands écarts entre les propriétés mécaniques des deux types de tuyaux. Pour s'en assurer, un test dit 'hors-norme' a été effectué en s'assurant de n'avoir qu'une seule variable, et donc en utilisant des tuyaux de même longueur. Une éprouvette de Weholite a ainsi été coupée à la même longueur (et donc à une longueur plus élevée que celle requise par la norme) qu'un tuyau de Soleno coupé selon la norme ($\approx 27,5$ pouces). La vitesse de charge utilisée a été celle de la norme ASTM F2306. L'éprouvette témoin de Soleno, qui permet de s'assurer que les conditions sont similaires que celles des tests précédents, avait une longueur moyenne de 27,4 pouces alors que celle de Weholite était de 28,1 pouces. Les mesures effectuées sont rapportées à la figure 31, et comparées à celles qui avaient été effectuées selon la norme, tel que rapporté précédemment à la figure 30. La courbe en vert représente l'échantillon témoin Soleno et en rose l'éprouvette de 28 pouces de Weholite. À même longueur, la force nécessaire pour déformer l'éprouvette est toujours supérieure pour les tuyaux de Soleno, mais par contre l'écart est plus faible et ne peut expliquer les résultats précédents. L'écart entre les deux tuyaux est d'environ 30% dans les tests reliés aux normes et il est passé à 15% avec le test hors-norme. L'écart reste plus ou moins le même entre 3 et 5 % de déformation, ces mesures étant effectuées dans la zone dite linéaire. On peut donc conclure qu'une différence réelle entre les propriétés mécaniques de ces échantillons existe, les tuyaux doubles parois (Solenos par exemple) ayant une meilleure résistance à la déformation que ceux à joints vissés.

Cependant, ceci n'indique pas nécessairement que les tuyaux à joints vissés soient moins performants sur le terrain, puisque seulement le PS et le RSC ont été mesurés par ces normes. Or, les tuyaux doubles parois semblent posséder, selon des observations qualitatives, une meilleure flexibilité. Ils sont de plus nettement plus légers, ce qui est un atout lors de la manutention et de l'installation. Il ne faut pas oublier non plus que même si un tuyau performe moins bien dans ces mesures (PS et RSC), il n'en reste pas moins qu'ils respectent les normes.

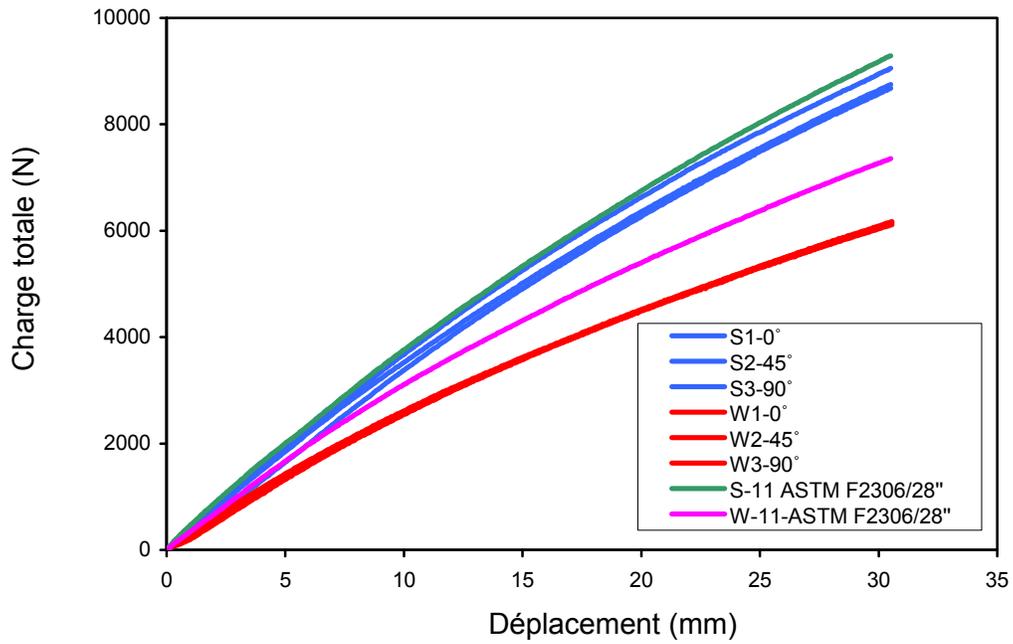


Figure 31 : Charge en fonction du déplacement moyen pour des tuyaux Soleno et Weholite effectué selon la norme ASTM F2306 en bleu et rouge et hors-norme en vert et rose.

12.4 Test de rigidité annulaire (PS)

La rigidité annulaire, aussi appelé «Pipe Stiffness» en langue anglaise, et noté « PS », consiste à déterminer une pression en appliquant une charge sur une surface. Afin de pouvoir calculer ce paramètre, une éprouvette est comprimée jusqu'à 5% de son diamètre interne. À l'aide de la charge totale appliquée, de la longueur de l'éprouvette et la distance de déformation, il est possible de calculer la valeur du paramètre PS. Pour les normes utilisées, les calculs sont effectués à partir des valeurs observées à 5% de déformation. Cependant, pour fin de comparaison future, ce paramètre a également été évalué à une déformation de 3%. (annexe 2.)

Il est à noter que, conformément à la norme ASTM F894, aucune valeur du paramètre PS n'a pu être calculée à 5% de déformation, puisque la déformation maximale atteinte expérimentalement était de 3%, tel que requis par la norme. Néanmoins, pour fins de comparaison future, les éprouvettes de 48 pouces de diamètre ont été amenées à une déformation de 5%.

Le tableau 9 présente les valeurs et résultats obtenus pour le calcul du paramètre PS à 5% de déformation pour les éprouvettes de type Weholite, alors que le tableau 10 présente les valeurs et résultats pour celles de type Soleno. Les calculs d'erreurs ont été effectués en utilisant le test de Student lorsque trois résultats d'essai étaient disponibles, avec un niveau de confiance de 95%. Lorsqu'un seul échantillon était soumis à l'essai, l'erreur a été évaluée par propagation des erreurs instrumentales (valeurs en rouge).

Toutes les valeurs du coefficient PS calculées en utilisant les données expérimentales recueillies selon les normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120 sont supérieures à 320 kPa, qui correspond à la valeur cible du paramètre PS de la norme BNQ 3624-120 pour les tuyaux à simple paroi. Il en est de même pour les résultats issus des éprouvettes à doubles parois (Soleno), dont toutes les valeurs du paramètre PS sont au-dessus de 400 kPa. Par conséquent, pour les deux types de tuyaux, le paramètre PS excède amplement les valeurs minimales exigées par les normes, et les deux types de tuyaux sont donc considérés conformes.

On peut noter également que les valeurs du paramètre PS obtenues des résultats d'essai à 3% de déformation respectent aussi les normes étant donné qu'elles présentent des valeurs au-dessus de 320 kPa, tel qu'on peut le constater dans les tableaux présentés à l'annexe 2.

Tableau 7: Tableau comparatif des exigences de rigidités des conduites en PEHD et polypropylène en fonction des différentes normes en vigueur.¹³⁷

Conduite selon		Norme MTQ (Tome 3)	BNQ 3624.120 (06)	CSA B182.8 (06)	AASHTO M294 (09)	ASTM F2306 (08)	ISO 9969 (07)	ASTM F894 (07)	ASTM F2736 (10)	ASTM F2764 (10)
Matériel		Polyéthylène	Polyéthylène	Polyéthylène	Polyéthylène	Polyéthylène	?	Polyéthylène	Polypropylène	Polypropylène
Diamètre		Extérieur annelé	Extérieur annelé	Extérieur annelé	Extérieur annelé	Extérieur annelé	?	Extérieur lisse	Extérieur annelé	Extérieur lisse
mm	po	Rigidité des conduites								
300	12	--	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	345 kPa	345 kPa	?	--	320 kPa	--
375	15	--	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	290 kPa	290 kPa	?	--	320 kPa	--
450	18	320 kPa	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	275 kPa	275 kPa	?	356 kPa (RSC160)	320 kPa	--
525	21	320 kPa	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	260 kPa	260 kPa	?	306 kPa (RSC160)	320 kPa	--
600	24	320 kPa	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	235 kPa	235 kPa	?	269 kPa (RSC160)	320 kPa	--
675	27	320 kPa	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	205 kPa	205 kPa	?	239 kPa (RSC160)	--	--
750	30	320 kPa	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	195 kPa	195 kPa	?	215 kPa (RSC160)	320 kPa	317 kPa
835	33	--	--	--	--	--	?	196 kPa (RSC160)	--	--
900	36	320 kPa	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	150 kPa	150 kPa	?	*284 kPa (RSC250)	--	317 kPa
1015	40	--	--	--	--	--	?	*256 kPa (RSC250)	--	--
1050	42	320 kPa	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	140 kPa	140 kPa	?	*244 kPa (RSC250)	--	317 kPa
1200	48	320 kPa	210 ou 320 kPa	210 ou 320 kPa	125 kPa	125 kPa	?	*214 kPa (RSC250)	--	317 kPa
1350	54	--	--	--	110 kPa	110 kPa	?	*190 kPa (RSC250)	--	317 kPa
1500	60	--	--	--	95 kPa	95 kPa	?	*171 kPa (RSC250)	--	317 kPa
1675	66	--	--	--	--	--	?	*155 kPa (RSC250)	--	--
1825	72	--	--	--	--	--	?	*143 kPa (RSC250)	--	--
1980	78	--	--	--	--	--	?	*132 kPa (RSC250)	--	--
2130	84	--	--	--	--	--	?	*123 kPa (RSC250)	--	--
2285	90	--	--	--	--	--	?	*183 kPa (RSC400)	--	--
2435	96	--	--	--	--	--	?	*171 kPa (RSC400)	--	--
2740	108	--	--	--	--	--	?	*152 kPa (RSC400)	--	--
3050	120	--	--	--	--	--	?	*137 kPa (RSC400)	--	--

Note : Les valeurs de kPa avec un astérisque * proviennent d'un document technique de KWH Pipe et non pas de la norme ASTM F894 qui réfère à des classes de RSC (Ring Stiffness Constant) et non pas à des kPa.

Tableau 8 : Résumé des résultats de rigidité et des normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120.

Taille de Tuyau	Intervalle de valeurs expérimentales (PS) - kPa	Rigidité ASTM F2306	Norme respectée
S24	406-424	235 kPa	O
W24	330-333	235 kPa	O
S48	137-140	125 kPa	O
W48	205-210	125 kPa	O

Taille de Tuyau	Intervalle de valeurs expérimentales (PS) - kPa	Rigidité minimale BNQ 3624-120 (Catégories R210/R320)	Norme respectée
S24	405-424	210/320 kPa	O/O
W24	327-335	210/320 kPa	O/O
S48	140-142	210/320 kPa	N/N
W48	224-238	210/320 kPa	O/N

Tableau 9 : Valeurs de PS pour les tuyaux 24 pouces de Weholite à 5% de déformation.

a) Paramètres utilisés pour calculer les valeurs de PS.

	Norme	F(N)	F (lbf)	y (mm)	y (po)	L (mm)	L (po)
W1	ASTM F2306	6139,8	1380,3	30,5	1,2	607,2	23,9
W2	ASTM F2306	6167,8	1386,6	30,5	1,2	606,2	23,9
W3	ASTM F2306	6104,7	1372,4	30,5	1,2	605,4	23,8
W4	BNQ 3624-120	6205,7	1395,1	30,5	1,2	606,2	23,9
W5	BNQ 3624-120	6076,3	1366,0	30,5	1,2	605,1	23,8
W6	BNQ 3624-120	6072,2	1365,1	30,5	1,2	607,7	23,9
W7	BNQ 3624-120	6558,9	1474,5	30,5	1,2	609,6	24,0
W8	ASTM F894	---	---	---	---	1209,4	---
W9	ASTM F894	---	---	---	---	1216,6	---
W10	ASTM F894	---	---	---	---	1216,8	---

b) Valeurs calculées de PS, écart-type et erreur à l'aide du test de Student (95%).

	PS 5%(lbf/po ²)	Écart-type	Erreur (lbf/po ²)	%Erreur	PS 5%(kN/m ²)
W1	48,1	0,4	0,4	0,9	331
W2	48,4	0,4	0,4	0,9	333
W3	47,9	0,4	0,4	0,9	330
W4	48,7	0,4	0,4	0,9	335
W5	47,7	0,4	0,4	0,9	329
W6	47,5	0,4	0,4	0,9	327
W7	51,2	---	0,4	0,8	353
W8	---	---	---	---	---
W9	---	---	---	---	---
W10	---	---	---	---	---

Tableau 10 : Valeurs de PS pour les tuyaux 24 pouces de Soleno à 5% de déformation.

a) Paramètres utilisés pour calculer les valeurs de PS.

	Norme	F(N)	F(lbf)	y (mm)	y (po)	L (mm)	L (po)
S1	ASTM F2306	9053,0	2035,2	30,5	1,2	699,3	27,5
S2	ASTM F2306	8749,4	1966,9	30,5	1,2	695,9	27,4
S3	ASTM F2306	8677,5	1950,8	30,5	1,2	699,8	27,6
S4	BNQ 3624-120	8719,5	1960,2	30,5	1,2	697,7	27,5
S5	BNQ 3624-120	8622,2	1938,3	30,5	1,2	697,4	27,5
S6	BNQ 3624-120	9011,0	2025,8	30,5	1,2	695,9	27,4
S7	BNQ 3624-120	10611,9	2385,6	35,5	1,4	698,0	27,5
S8	ASTM F894	---	---	---	---	1290,9	---
S9	ASTM F894	---	---	---	---	1300,4	---
S10	ASTM F894	---	---	---	---	1299,4	---

b) Valeurs calculées de PS, écart-type et erreur à l'aide du test de Student (95%).

	PS 5% (lbf/po ²)	Écart-type	Erreur (lbf/po ²)	%Erreur	PS 5% (kN/m ²)
S1	62	1	1	2	424
S2	60	1	1	2	412
S3	59	1	1	2	406
S4	59	1	1	2	409
S5	59	1	1	2	405
S6	62	1	1	2	424
S7	62	---	0,4	1	428
S8	---	---	---	---	---
S9	---	---	---	---	---
S10	---	---	---	---	---

Tableau 11 : Valeurs de PS pour les tuyaux 48 pouces de Weholite à 5% de déformation.

a) Paramètres utilisés pour calculer les valeurs de PS.

	Normes	F(N)	F (lbf)	y (mm)	y (po)	L (mm)	L (po)
W12	ASTM F2306	7810,6	1755,9	61,0	2,4	607,2	23,9
W13	ASTM F2306	7814,4	1756,7	61,0	2,4	610,4	24,0
W14	ASTM F2306	7615,1	1712,0	61,0	2,4	609,1	24,0
W15	BNQ 3624-120	17638,8	3965,4	61,0	2,4	1212,9	47,8
W16	BNQ 3624-120	16596,8	3731,1	61,0	2,4	1215,8	47,9
W17	BNQ 3624-120	16682,4	3750,3	61,0	2,4	1213,1	47,8
W18	BNQ 3624-120	19769,2	4444,3	61,0	2,4	1209,7	47,6
W19	ASTM F894	20425,5	4591,8	61,0	2,4	1217,1	47,9
W20	ASTM F894	19814,2	4454,4	61,0	2,4	1219,2	48,0
W21	ASTM F894	19588,0	4403,6	61,0	2,4	1214,7	47,8

b) Valeurs calculées de PS, écart-type et erreur à l'aide du test de Student (95%).

	PS 5% (lbf/po ²)	Écart-type	Erreur (lbf/po ²)	% Erreur	PS 5% (kN/m ²)
W12	30,6	0,5	1,1	3,7	210,9
W13	30,4	0,5	1,1	3,7	209,9
W14	29,7	0,5	1,1	3,8	205,0
W15	35	1	3	8	238
W16	32	1	3	9	224
W17	33	1	3	9	225
W18	38,8	0,7	1,1	2,8	267,8
W19	39,9	0,7	1,1	2,7	275,0
W20	38,6	0,7	1,1	2,8	266,3
W21	38,3	0,7	1,1	2,8	264,3

Tableau 12 : Valeurs de PS pour les tuyaux 48 pouces de Soleno à 5% de déformation.

a) Paramètres utilisés pour calculer les valeurs de PS.

	Normes	F(N)	F(lbf)	y (mm)	y (po)	L (mm)	L (po)
S12	ASTM F2306	6331,3	1423,3	61,0	2,4	742,7	29,2
S13	ASTM F2306	6235,0	1401,7	61,0	2,4	745,3	29,3
S14	ASTM F2306	5941,1	1335,6	61,0	2,4	694,3	27,3
S15	BNQ 3624-120	11481,6	2581,2	61,0	2,4	1347,0	53,0
S16	BNQ 3624-120	11601,5	2608,1	61,0	2,4	1335,6	52,6
S17	BNQ 3624-120	11458,7	2576,0	61,0	2,4	1347,3	53,0
S18	BNQ 3624-120	12692,6	2853,4	61,0	2,4	1289,6	50,8
S19	ASTM F894	13014,3	2925,7	61,0	2,4	1346,2	53,0
S20	ASTM F894	12376,8	2782,4	61,0	2,4	1297,3	51,1
S21	ASTM F894	12409,1	2789,7	61,0	2,4	1298,0	51,1

b) Valeurs calculées de PS, écart-type et erreur à l'aide du test de Student (95%).

	PS 5% (lbf/po ²)	Écart-type	Erreur (lbf/po ²)	% Erreur	PS 5% (kN/m ²)
S12	20,3	0,2	0,6	3,0	139,8
S13	19,9	0,2	0,6	3,1	137,2
S14	20,4	0,2	0,6	3,0	140,3
S15	20,3	0,2	0,6	2,9	139,8
S16	20,7	0,2	0,6	2,9	142,4
S17	20,2	0,2	0,6	2,9	139,5
S18	23,4	0,3	0,5	2,2	161,3
S19	23,0	0,3	0,5	2,3	158,4
S20	22,7	0,3	0,5	2,3	156,3
S21	22,7	0,3	0,5	2,3	156,7

12.5 Essai de rigidité circonférentielle (RSC)

La constante de rigidité circonférentielle, appelée «ring stiffness constant» en langue anglaise et notée, RSC, se détermine à partir des résultats d'essai obtenus à 3% de déformation. Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux 15 et 16 pour les éprouvettes de 24 pouces de diamètre et aux tableaux 17 et 18 pour celles de 48 pouces de diamètre. La constante RSC a également été déterminée à 5% de déformation pour des fins de comparaison lorsque c'était possible (annexe. 2).

La seule norme qui se base sur des valeurs de la constante RSC est la norme ASTM F894.³⁷ Ces valeurs de RSC sont reproduites dans le tableau 13. Ce tableau donne les valeurs de la constante RSC requises pour qu'un tuyau soit classé dans la codification comprenant six catégories soit RSC 40, 63, 100, 160, 250 et 400.

Comme on peut le constater au tableau 13, un tuyau est dit de la catégorie RSC 40 de la norme ASTM F894 s'il satisfait un essai pour lequel la valeur de la constante RSC déterminée est d'au moins 36 livre-force par pied de longueur d'éprouvette, peu importe de diamètre du tuyau.

Toutes les valeurs de RSC calculées pour les tuyaux de 24 pouces à partir des courbes expérimentales, que l'on retrouve dans les tableaux 15b et 16b, autant pour les tuyaux doubles parois qu'à joints vissés, sont supérieures à 144 lbf/pi, ce qui les classe dans la catégorie RSC 160. Dans les tableaux 15b à 18b, les éprouvettes 8 à 10 de chacun des deux types de tuyaux sont pertinents puisqu'ils sont les seuls à avoir été mesurés avec les paramètres de la norme en question. Ces valeurs sont plus élevées et s'approchent davantage de la catégorie RSC 250. Dans le cas des trois échantillons Soleno, si on fait la moyenne des éprouvettes, la valeur est supérieure à 225 lbf/pi et ils feraient partie de la catégorie RSC 250.

Les valeurs pour les tuyaux de 48 pouces Weholite, qui se retrouvent dans les tableaux 17b et 18b, se situent entre celles des catégories RSC 160 et RSC 250, selon l'éprouvette, alors que les tuyaux Soleno se classent dans

la catégorie RSC 160. Un résumé de ces résultats obtenus dans cette étude est présenté au tableau 14.

Tableau 13 : Valeur de rigidité de tuyau (PS) correspondant aux diverses valeurs de RSC de la norme F894 pour les deux tailles de tuyau mesurées

Classification nominale F894	RSC (lbf/pi)	RSC (kN/m)	PS (kPa)	
			Tuyau de 24 po (610 mm) de diamètre	Tuyau de 48 po (1220 mm) de diamètre
Mesurés selon la norme ASTM F894				
R40	36	0,53	69*	35*
R63	56	0,82	107*	54*
R100	90	1,3	173*	86*
R160	144	2,1	276*	138*
R250	225	3,3	431*	216*
R400	360	5,3	690*	345*
Mesurés selon la norme ASTM F2306				
-	123*	1,8*	235	125

*Valeurs calculées à partir de l'équation de la section 12.6 et en utilisant une valeur de K approximative de la norme ASTM F894

Tableau 14 : Résumé des résultats expérimentaux et de la norme ASTM F894.

Identification de tuyau	Intervalle de valeurs expérimentales (PS) - kPa	Intervalle de valeurs expérimentales (RSC) - lbf/pi	Norme ASTM F894 (PS)	Norme respectée
S24	406-434	221-236	269 kPa (RSC 160)	O
W24	330-333	194-199	269 kPa (RSC 160)	O
S48	137-143	147-148	214 kPa (RSC 250)	N
W48	205-210	250-263	214 kPa (RSC 250)	O

Tableau 15 : Valeurs de RSC pour les tuyaux 24 pouces de Weholite à 3% de déformation.

a) Paramètres utilisés pour calculer les valeurs de RSC.

	Norme	F(N)	F(lbf)	y (mm)	di (mm)	y/di	y%	L(mm)	L(pi)
W1	ASTM F2306	4217,8	948,2	18,3	613,0	0,03	3,0	607,2	2,0
W2	ASTM F2306	4186,9	941,3	18,3	613,8	0,03	3,0	606,2	2,0
W3	ASTM F2306	4188,3	941,6	18,3	613,8	0,03	3,0	605,4	2,0
W4	BNQ 3624-120	4235,6	952,2	18,3	613,0	0,03	3,0	606,2	2,0
W5	BNQ 3624-120	4166,0	936,6	18,3	611,2	0,03	3,0	605,1	2,0
W6	BNQ 3624-120	4189,7	941,9	18,3	611,5	0,03	3,0	607,7	2,0
W7	BNQ 3624-120	4476,7	1006,4	18,2	614,1	0,03	3,0	609,6	2,0
W8	ASTM F894	10490,7	2358,4	18,2	609,9	0,03	3,0	1209,4	4,0
W9	ASTM F894	10275,7	2310,1	18,2	611,2	0,03	3,0	1216,6	4,0
W10	ASTM F894	10295,6	2314,5	18,2	612,2	0,03	3,0	1216,8	4,0

b) Valeurs calculées de RSC, écart-type et erreur à l'aide du test de Student (95%).

	RSC 3% (lbf/pi)	Écart-type	Erreur (lbf/pi)	% Erreur	RSC 3% (kN/m)
W1	160	1	1	1	2,33
W2	159	1	1	1	2,32
W3	159	1	1	1	2,32
W4	161	1	1	1	2,34
W5	158	1	1	1	2,30
W6	158	1	1	1	2,31
W7	169	---	1	1	2,47
W8	199	3	6	3	2,91
W9	194	3	6	3	2,84
W10	195	3	6	3	2,85

Tableau 16 : Valeurs de RSC pour les tuyaux 24 pouces de Soleno à 3% de déformation.

a) Paramètres utilisés pour calculer les valeurs de RSC.

	Norme	F(N)	F(lbf)	y (mm)	di (mm)	y/di	y%	L(mm)	L(pi)
S1	ASTM F2306	6164,5	1385,8	18,2	606,7	0,03	3,0	699,3	2,3
S2	ASTM F2306	5890,6	1324,3	18,2	608,0	0,03	3,0	695,9	2,3
S3	ASTM F2306	5804,4	1304,9	18,2	608,3	0,03	3,0	699,8	2,3
S4	BNQ 3624-120	5899,7	1326,3	18,2	607,5	0,03	3,0	697,7	2,3
S5	BNQ 3624-120	5789,7	1301,6	18,2	606,2	0,03	3,0	697,4	2,3
S6	BNQ 3624-120	6016,1	1352,5	18,2	604,6	0,03	3,0	695,9	2,3
S7	BNQ 3624-120	6441,5	1448,1	18,2	607,2	0,03	3,0	698,0	2,3
S8	ASTM F894	13364,5	3004,5	18,2	604,8	0,03	3,0	1290,9	4,2
S9	ASTM F894	12723,5	2860,4	18,2	606,7	0,03	3,0	1300,4	4,3
S10	ASTM F894	12556,1	2822,7	18,2	607,2	0,03	3,0	1299,4	4,3

b) Valeurs calculées de RSC, écart-type et erreur à l'aide du test de Student (95%).

	RSC 3%(lbf/pi)	Écart-type	Erreur (lbf/pi)	%Erreur	RSC 3%(kNm)
S1	201	4	5	2	2,93
S2	193	4	5	2	2,82
S3	190	4	5	2	2,77
S4	193	4	5	2	2,82
S5	189	4	5	2	2,76
S6	196	4	5	2	2,87
S7	210	---	1	0,7	3,07
S8	236	8	20	8	3,44
S9	224	8	20	9	3,26
S10	221	8	20	9	3,23

Tableau 17 : Valeurs de RSC pour les tuyaux 48 pouces de Weholite à 3% de déformation.

a) Paramètres utilisés pour calculer les valeurs de RSC.

	Normes	F(N)	F(lbf)	y (mm)	di (mm)	y/di	y%	L(mm)	L(pi)
W12	ASTM F2306	5408,5	1215,9	36,6	1225,6	0,03	3,0	607,2	2,0
W13	ASTM F2306	5364,9	1206,1	36,6	1237,2	0,03	3,0	610,4	2,0
W14	ASTM F2306	5201,3	1169,3	36,6	1226,3	0,03	3,0	609,1	2,0
W15	BNQ 3624-120	12030,9	2704,7	36,6	1219,5	0,03	3,0	1212,9	4,0
W16	BNQ 3624-120	11394,1	2561,5	36,6	1223,4	0,03	3,0	1215,8	4,0
W17	BNQ 3624-120	11369,2	2555,9	36,6	1229,5	0,03	3,0	1213,1	4,0
W18	BNQ 3624-120	13464,5	3026,9	36,6	1226,3	0,03	3,0	1209,7	4,0
W19	ASTM F894	13997,0	3146,6	36,6	1221,6	0,03	3,0	1217,1	4,0
W20	ASTM F894	13397,0	3011,8	36,6	1214,2	0,03	3,0	1219,2	4,0
W21	ASTM F894	13395,8	3011,5	36,6	1231,4	0,03	3,0	1214,7	4,0

b) Valeurs calculées de RSC, écart-type et erreur à l'aide du test de Student (95%).

	RSC 3% (lbf/pi)	Écart-type	Erreur (lbf/pi)	% Erreur	RSC 3% (kN/m)
W12	204	5	11	6	3
W13	203	5	11	6	3
W14	196	5	11	6	3
W15	226	7	16	7	3
W16	215	7	16	8	3
W17	216	7	16	8	3
W18	256	6	9	3	4
W19	263	6	9	3	4
W20	250	6	9	4	4
W21	255	6	9	3	4

Tableau 18 : Valeurs de RSC pour les tuyaux 48 pouces de Soleno à 3% de déformation.

a) Paramètres utilisés pour calculer les valeurs de RSC.

	Normes	F(N)	F(lbf)	y (mm)	di (mm)	y/di	y%	L (mm)	L(pi)
S12	ASTM F2306	4354,3	978,9	36,6	1227,9	0,03	3,0	742,7	2,4
S13	ASTM F2306	4255,0	956,6	36,6	1219,5	0,03	3,0	745,3	2,4
S14	ASTM F2306	4075,9	916,3	36,6	1221,1	0,03	3,0	694,3	2,3
S15	BNQ 3624-120	7775,9	1748,1	36,6	1217,6	0,03	3,0	1347,0	4,4
S16	BNQ 3624-120	7930,1	1782,8	36,6	1222,6	0,03	3,0	1335,6	4,4
S17	BNQ 3624-120	7691,8	1729,2	36,6	1217,9	0,03	3,0	1347,3	4,4
S18	BNQ 3624-120	8438,8	1897,1	36,6	1214,7	0,03	3,0	1289,6	4,2
S19	ASTM F894	8710,1	1958,1	36,6	1219,7	0,03	3,0	1346,2	4,4
S20	ASTM F894	8351,6	1877,5	36,6	1218,4	0,03	3,0	1297,3	4,3
S21	ASTM F894	8416,2	1892,0	36,6	1220,5	0,03	3,0	1298,0	4,3

b) Valeurs calculées de RSC, écart-type et erreur à l'aide du test de Student (95%).

	RSC 3%(lbf/pi)	Écart-type	Erreur (lbf/pi)	%Erreur	RSC 3%(kN/m)
S12	135	2	6	4	2
S13	130	2	6	5	2
S14	134	2	6	4	2
S15	132	3	7	6	2
S16	136	3	7	5	2
S17	130	3	7	6	2
S18	149,0	0,8	1,3	0,9	2,2
S19	147,9	0,8	1,3	0,9	2,2
S20	147,0	0,8	1,3	0,9	2,1
S21	148,3	0,8	1,3	0,9	2,2

12.6 Passage de RSC à PS et vice-versa selon l'équation proposée dans la norme ASTM F894.³⁷

Est-il possible de convertir une valeur de RSC en PS ou l'inverse tout en conservant des valeurs se rapprochant de la réalité? La norme ASTM F894 inclut une méthode de calcul pour faire ce transfert. Celle-ci utilise les équations suivantes, en unités impériales :

$$PS = \frac{C \times 8,337 \times RSC}{D_m}$$
$$RSC = \frac{PS \times D_m (po)}{6,67}$$

où D_m est le diamètre en pouces du tuyau et C une constante liée au polyéthylène, dont la valeur est d'environ 0,8. Selon la norme ASTM F894, version 2003, une variance de 10% par rapport à la valeur attendue est acceptable et permettrait l'utilisation de cette méthode d'estimation. Par contre, dans la version 2007 de cette norme, aucune variance acceptable n'est indiquée.

Ayant accès dans la plupart des cas aux valeurs expérimentales, tel que mesuré selon la norme, pour des RSC et PS d'un même tuyau, il a été possible de faire l'évaluation de la justesse de cette méthode. Aux tableaux 19 et 20 sont rapportés les paramètres ayant servi à calculer PS et RSC par l'utilisation de ces équations, ainsi que le pourcentage d'écart par rapport à la valeur expérimentale pour les tuyaux d'un diamètre de 24 pouces. Les mêmes valeurs pour les tuyaux de 48 pouces sont rapportées aux tableaux 21 et 22. Pour faciliter la compréhension des tableaux, un code de couleur a été employé: les valeurs de RSC transformées en PS sont en bleu alors que les valeurs de PS transformées en RSC sont en rouge. Les unités du système impérial ont été utilisées, puisque l'équation est prévue à cet effet. Les valeurs de RSC choisies sont celles mesurées à 3% de déformation, et celles de PS sont à 5% de déformation.

Si on observe les valeurs obtenues, on comprend rapidement qu'elles sont imprécises. Dans le cas des échantillons testés avec les tuyaux Soleno, toutes les éprouvettes avaient une variation d'environ 20% à part l'échantillon S7 dont l'écart était de 17%. Dans le cas des échantillons Weholite, l'écart est plus faible, trois échantillons sur sept étant un peu en-dessous des 10% de variation, avec 9,7%, 9,9% et 9,9%.

Les tuyaux de plus grand diamètre ont une variation plus acceptable, soit de 8 à 11% mais se rapprochent tout de même beaucoup de la limite supérieure de 10% et la dépasse légèrement dans certains cas. Étant donné que la norme en question tolère une variation de maximum 10% par rapport à la valeur réelle, il semble que la méthode soit en général trop inexacte pour permettre d'estimer de façon précise des valeurs sans utiliser des données expérimentales. Cette méthode peut cependant être utilisée pour une évaluation semi-quantitative.

On peut exprimer cette équivalence en utilisant une seule constante de transformation K selon :

$$PS = \frac{K \times RSC}{D_m} \quad \text{et} \quad RSC = \frac{PS \times D_m}{K}$$

Cette constante K a une valeur, selon les données de la norme ASTM F894, de 6,67 en système impérial, ce qui correspond à une valeur de 79,400 en système métrique. On retrouve, dans le tableau 23, les valeurs de PS et RSC moyennes mesurées selon les normes ASTM F2306, BNQ 3624-120 pour PS et ASTM F894 pour RSC, pour les divers tuyaux étudiés dans la présente étude, de même qu'un calcul de la constante K expérimentale de l'écart entre cette valeur calculée et la valeur de K proposée par la norme F894. Pour les tuyaux de faible diamètre, les normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120 donnant des valeurs comparables, la moyenne des valeurs de K a été calculée. Par contre, pour les tuyaux de 48 pouces de diamètre, ces valeurs divergent, et des valeurs individuelles ont alors été

calculées pour le facteur K. La divergence entre la valeur de K obtenue à partir des données expérimentales et la valeur approximative de K proposé dans la norme F894 varie de 1 à 13%, et ne sont donc pas négligeable. Il est donc recommandé de ne pas se fier à cette transformation pour obtenir une valeur précise de PS ou de RSC, mais ces valeurs peuvent être utilisée à titre semi-quantitatif, pour des fins de comparaison, et tenant compte d'une erreur possible d'environ 15%.

Les divergences entre les normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120 méritent quelques explications. Ces deux normes utilisent la même vitesse de chargement. Elles diffèrent principalement par la longueur des éprouvettes soumis aux essais : la norme BNQ 3624-120 définit la longueur de l'éprouvette en fonction de son diamètre alors que cette longueur est constante dans le cas de la norme ASTM F2306. L'utilisation d'une longueur égale d'éprouvette pour tous les diamètres de tuyaux se base sur l'hypothèse que l'effet de bord (ou des extrémités) de l'éprouvette est négligeable. Or, plus le diamètre de l'éprouvette est grand, plus la proportion de matériel présent dans les bouts est grande, et donc plus l'effet est appréciable. L'utilisation d'une taille d'éprouvette variant avec le ratio longueur/diamètre (L/d) permet de s'assurer que l'effet de bord reste négligeable, ce qui est donc un net avantage de la norme BNQ 3624-120. On remarque d'ailleurs dans le tableau 23 que les valeurs moyennes de PS obtenues pour les tuyaux de 24 pouces de diamètre et basées sur les normes ASTM F2306 et BNQ 3624-1220 sont identiques (à l'intérieur de l'écart-type). Pour un diamètre de tuyaux de 48 pouces, les tuyaux à doubles parois (S48) présentent des valeurs de PS comparables, mais ce n'est pas le cas pour les tuyaux à joints vissés mesurés dans le présent projet (W48), pour lesquels la différence entre les deux valeurs moyennes de PS (20 kPa) est plus de trois fois l'écart-type (6 kPa). Dans ce cas, la norme BNQ 3624-120 conduit à des valeurs de PS plus élevées, en accord avec l'effet négatif des extrémités de tuyaux sur les valeurs de PS obtenues par la norme ASTM F2306. La méthode de mesure proposée par la norme BNQ 3624-120 serait donc plus exacte pour les plus grands tuyaux.

Tableau 19 : Comparaison du transfert d'une valeur de PS (psi) à RSC (lbf/pi) et vice-versa pour un tuyau de Soleno d'après ASTM F894. (24 pouces)

	Normes	Diamètre moyen (po)	RSC 3%(lbf/pi)	PS 5%(lbf/po ²)(Psi)
S1	ASTM F2306	27,53	201	62
S2	ASTM F2306	27,40	193	60
S3	ASTM F2306	27,55	190	59
S4	BNQ 3624-120	27,47	193	59
S5	BNQ 3624-120	27,46	189	59
S6	BNQ 3624-120	27,40	196	62
S7	BNQ 3624-120	27,48	210	62
S8	ASTM F894	50,82	236	---
S9	ASTM F894	51,20	224	---
S10	ASTM F894	51,16	221	---

	RSC à partir de PS	PS à partir de RSC	% d'écart vs valeur réelle	% d'écart vs valeur réelle
S1	254	49	21	21
S2	245	47	21	21
S3	243	46	22	22
S4	245	47	21	21
S5	242	46	22	22
S6	253	48	22	22
S7	256	51	18	18
S8	---	31	---	---
S9	---	29	---	---
S10	---	29	---	---

Tableau 20 : Comparaison du transfert d'une valeur de PS (psi) à RSC (lbf/pi) et vice-versa pour un tuyau de Weholite d'après ASTM F894. (24 pouces)

	Normes	Diamètre moyen (po)	RSC 3%(lbf/pi)	PS 5%(lbf/po ²)(Psi)
W1	ASTM F2306	23,91	201	48
W2	ASTM F2306	23,86	193	48
W3	ASTM F2306	23,83	190	48
W4	BNQ 3624-120	23,86	193	49
W5	BNQ 3624-120	23,82	189	48
W6	BNQ 3624-120	23,93	196	47
W7	BNQ 3624-120	24,00	210	51
W8	ASTM F894	47,61	236	---
W9	ASTM F894	47,90	224	---
W10	ASTM F894	47,91	221	---

	RSC à partir de PS	PS à partir de RSC	% d'écart vs valeur réelle	% d'écart vs valeur réelle
W1	172	56	14	14
W2	173	54	11	11
W3	171	53	10	10
W4	174	54	10	10
W5	170	53	10	10
W6	170	55	13	13
W7	184	58	13	13
W8	---	33	---	---
W9	---	31	---	---
W10	---	31	---	---

Tableau 21 : Comparaison du transfert d'une valeur de PS (psi) à RSC (lbf/pi) et vice-versa pour un tuyau de Soleno d'après ASTM F894. (48 pouces)

	Normes	Diamètre moyen (po)	RSC 3%(lbf/pi)	PS 5%(lbf/po ²)(Psi)
S12	ASTM F2306	48,34	135	20,3
S13	ASTM F2306	48,01	130	19,9
S14	ASTM F2306	48,07	134	20,4
S15	BNQ 3624-120	47,94	132	20,3
S16	BNQ 3624-120	48,14	136	20,7
S17	BNQ 3624-120	47,95	130	20,2
S18	BNQ 3624-120	47,82	149	23,4
S19	ASTM F894	48,02	148	23,0
S20	ASTM F894	47,97	147	22,7
S21	ASTM F894	48,05	148	22,7

	RSC à partir de PS	PS à partir de RSC	% d'écart vs valeur réelle	% d'écart vs valeur réelle
S12	147	19	8	8
S13	143	18	9	9
S14	147	19	9	9
S15	146	18	10	10
S16	149	19	9	9
S17	145	18	11	11
S18	168	21	11	11
S19	165	21	11	11
S20	163	20	10	10
S21	164	21	9	9

Tableau 22 : Comparaison du transfert d'une valeur de PS (psi) à RSC (lbf/pi) et vice-versa pour un tuyau de Weholite d'après ASTM F894. (48 pouces)

	Normes	Diamètre moyen (po)	RSC 3% (lbf/pi)	PS 5% (lbf/po ²)(Psi)
W12	ASTM F2306	48,25	204	30,6
W13	ASTM F2306	48,71	203	30,4
W14	ASTM F2306	48,28	196	29,7
W15	BNQ 3624-120	48,01	226	35
W16	BNQ 3624-120	48,17	215	32
W17	BNQ 3624-120	48,41	216	33
W18	BNQ 3624-120	48,28	256	38,8
W19	ASTM F894	48,09	263	39,9
W20	ASTM F894	47,80	250	38,6
W21	ASTM F894	48,48	255	38,3

	RSC à partir de PS	PS à partir de RSC	% d'écart vs valeur réelle	% d'écart vs valeur réelle
W12	221	28	8	8
W13	222	28	8	8
W14	215	27	9	9
W15	249	31	9	9
W16	234	30	8	8
W17	237	30	9	9
W18	281	35	9	9
W19	288	37	8	8
W20	277	35	10	10
W21	279	35	9	9

Tableau 23 : Calcul des valeurs de constantes servant à transformer les valeurs de PS en RSC à partir des données expérimentales mesurées dans le présent travail

	Méthode de mesure de PS	PS		RSC (ASTM F894)		D _m		K calculé	
		kPa	psi	kN/m	lbf/pi	mm	po	métrique	impérial
S24	ASTM F2306	414	60,0	3,31	227	607	23,9	75,9 X 10 ³	6,51
S24	BNQ 3624-120	413	59,9	3,31	227	607	23,9	75,7 X 10 ³	6,50
							Moyenne	75,8 X 10 ³	6,51
							Écart	5%	
S48	ASTM F2306	139	20,2	2,16	148	1221	48,1	78,6 X 10 ³	6,55
							Écart	2%	
S48	BNQ 3624-120	141	20,5	2,16	148	1221	48,1	79,7 X 10 ³	6,64
							Écart	0,5%	
W24	ASTM F2306	331	48,0	2,87	197	612	24,1	70,6 X 10 ³	5,88
W24	BNQ 3624-120	330	47,9	2,87	197	612	24,1	70,3 X 10 ³	5,87
							Moyenne	70,5 X 10 ³	5,88
							Écart	12%	
W48	ASTM F2306	209	30,3	3,7	254	1227	48,3	69,3 X 10 ³	5,77
							Écart	13%	
W48	BNQ 3624-120	229	33,2	3,7	254	1227	48,3	75,9 X 10 ³	6,33
							Écart	5%	

12.7 Test mécanique sur tuyau vieilli par gel/dégel.

Deux sections de tuyau ont été vieillées par cycle de gel/dégel par l'équipe du ministère des Transports du Québec. Ces tuyaux de la compagnie Soleno avaient un diamètre de 610 mm. Nous avons donc choisi de les tester selon la méthode standard du BNQ 3624-120 mais à ce diamètre, la norme ASTM F2306 est équivalente. Une section de tuyau Soleno ayant les mêmes dimensions que ces éprouvettes a été découpée afin de servir d'échantillon de contrôle lors des tests. Les résultats de ces tests mécaniques en PS sont présentés à la figure 32.

Une première section d'environ 400 mm a été soumise à des cycles gel-dégel du 8 octobre 2010 au 10 janvier 2011 (température variant de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Par la suite, cette section de tuyau a été mise dans une chambre d'écaillage du 11 janvier 2011 au 16 décembre 2011 (température variant de $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$). On peut considérer que cette section de tuyau a subi environ 750 cycles de gel et dégel sur une période d'environ 14 mois.

La seconde section d'environ 610 mm a été placée dans la chambre d'écaillage du 8 octobre 2010 au 16 décembre 2011. À raison d'un cycle par jour, un total de 424 cycles de gel-dégel avec des cycles de températures variant de $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ont été effectués.

Les traits en rose et en bleu sont les échantillons de contrôles ou blanc pour chacun des tests, ils proviennent d'un autre lot de fabrication que les tuyaux vieillis. En vert, on a indiqué le test de la section de 400 mm et en turquoise celui de la section de 610 mm. En rouge ont été ajoutées les valeurs pour une section de tuyau testé selon la même norme durant cette étude. On remarque que les valeurs sont très similaires à celles des échantillons ayant subi les cycles gel/dégel. Les valeurs mesurées sont égales, à l'intérieur de l'erreur calculée, et ont une petite variation par rapport à ceux effectués lors des tests pour cette norme. On peut donc conclure que le phénomène de gel/dégel, tel que simulé, n'a aucun effet mesurable sur ce test mécanique d'un échantillon neuf. Cependant, on ne peut rien conclure sur l'effet du cycle

gel/dégel sur un échantillon qui aurait préalablement subi un vieillissement en présence d'une contrainte de force ou d'un agent chimique.

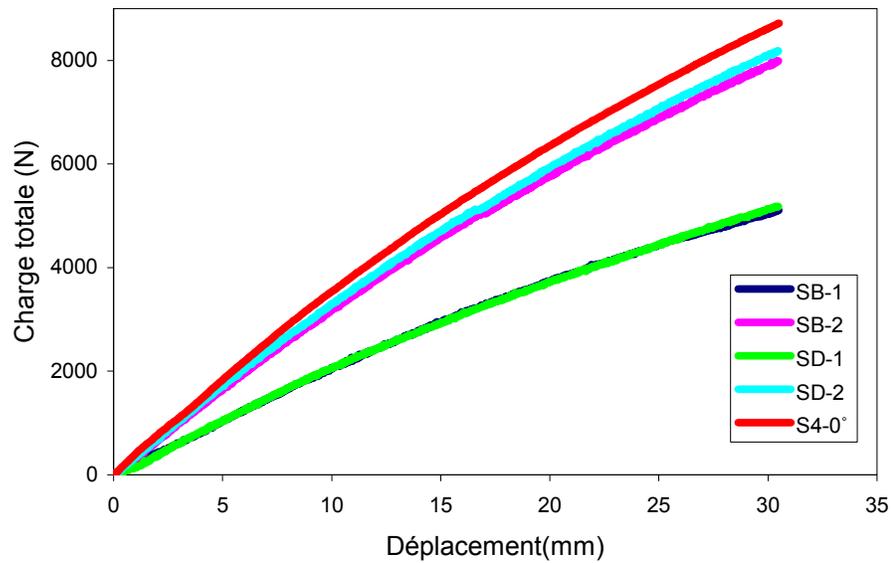


Figure 32 : Les résultats obtenus au test BNQ 3624-120 pour des sections de tuyaux ayant subi des cycles de gel/dégel.

12.8 Recommandation sur le choix de la norme à utiliser pour les mesures de tuyaux

L'un des buts de ce travail était de comparer trois différentes normes (ASTM F2306, BNQ 3624-120 et ASTM F894), et d'identifier si l'une d'entre elles permettrait de mieux comparer les tuyaux de même diamètre mais de conception différente. Ces normes se basent en effet sur des mesures expérimentales très similaires. Les différences se situent dans les conditions expérimentales utilisées, principalement la longueur des éprouvettes, la vitesse de chargement et la déformation maximale appliquée aux éprouvettes, les autres différences (tel le positionnement des éprouvettes) étant mineurs et affectant peu les résultats obtenus.

Il faut noter que deux informations importantes se retrouvent dans les normes : les conditions de mesures et des paramètres minimums pour que le tuyau satisfasse la norme. Ces deux aspects seront ici discutés séparément.

12.8.1 Conditions de mesures utilisées dans les normes

La norme ASTM F894, par laquelle des valeurs de RSC sont calculées, utilise une vitesse de chargement plus élevée que les normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120. Cette vitesse laisse moins de temps au matériau pour s'adapter aux sollicitations subies, entraîne une dispersion plus grande des résultats, et reflète moins bien les propriétés des matériaux soumis à une contrainte. Pour ces raisons, cette méthode de mesure n'est pas recommandée.

Les normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120 sont similaires. Elles diffèrent principalement par la longueur des éprouvettes soumises aux essais : la norme BNQ 3624-120 définit la longueur de l'éprouvette en fonction de son diamètre, alors que cette longueur est constante dans le cas de la norme ASTM F2306. Tel qu'indiqué dans la section 12.6, la norme BNQ 3624-120 conduit donc à des mesures plus exactes pour les plus grands tuyaux.

La norme BNQ 3624-120 exige aussi un essai supplémentaire à un taux de déformation nettement plus grand (20%), ce qui donne une information additionnelle par rapport aux autres normes. En effet, il est probable qu'en présence de défauts importants, il serait alors possible de constater un effet sur le comportement des tuyaux à ce taux de déformation. Cela n'a pas été le cas pour les tuyaux soumis aux essais dans le présent travail, ce qui ne veut cependant pas dire que les tuyaux d'autres compagnies passeraient aussi facilement ce test. Du strict point de vue information, la **méthode de mesure proposée dans la norme BNQ 3624-120 est donc plus complète que celles des normes ASTM F2306, et est donc celle que nous recommandons.**

L'utilisation de la norme BNQ 3624-120 présente cependant certains désavantages. D'une part, elle n'est reconnue qu'au Québec, alors que les normes ASTM disposent d'une reconnaissance internationale favorisant une ouverture sur le marché mondial. Ceci se reflète par une diminution du coût des analyses requises lors du contrôle de qualité par le manufacturier, et devrait se refléter sur les soumissions proposées au Ministère.

Il est donc important de remarquer que, pour les tuyaux de faibles diamètres, le protocole expérimental exigé dans les normes ASTM F2306 et dans la norme BNQ 3624-120 est essentiellement le même, sauf pour l'essai supplémentaire à haut taux de déformation. De plus, pour les tuyaux de plus grand diamètre, l'utilisation d'éprouvettes plus courtes pour les tests ASTM F2306 par rapport à BNQ 3624-120 résulte en une sous-estimation de la valeur de PS pour les tuyaux de diamètres élevés. Il est donc **recommandé que soit acceptées les mesures effectuées par la méthode ASTM F2306 et que seul un essai supplémentaire soit demandé, soit celui à taux de déformation de 20%.**

12.8.2 Facteurs à considérer pour le choix de la rigidité minimale d'un tuyau de plastique

Les normes incluent toutes un seuil minimal qui doit être rencontré pour les valeurs de rigidité des tuyaux, exprimées en PS ou RSC, mais ne sont pas

unanimes quant à la valeur exacte de cette rigidité minimale. Il est donc important de considérer les facteurs qui devraient entrer en jeu dans la sélection de ces valeurs minimales.

Le Plastic Pipes Institute identifie les facteurs suivants à considérer lors du choix de la rigidité du tuyau utilisé pour une application donnée ¹³⁸:

- 1) La rigidité minimale pour assurer le transport, la manipulation et l'entreposage du tuyau sans l'endommager,
- 2) La charge subie par le tuyau durant l'installation et en particulier la compaction mécanique du sol,
- 3) La résistance à la déflexion une fois le tuyau installé, résistance qui passe par l'interaction sol-tuyau,
- 4) La résistance aux déformations de type flambage (buckling).

On peut supposer que, pour le premier facteur, toutes les normes permettent d'arriver au but souhaité, soit la conservation de l'intégrité des propriétés des tuyaux. Par contre, les autres facteurs sont plus variables d'un type d'application à l'autre, et même d'un chantier à l'autre. Il est donc préférable d'effectuer une évaluation des facteurs 2 à 4 pour sélectionner la rigidité du tuyau la plus appropriée pour tout chantier majeur. Une description détaillée de ces calculs apparaît, entre autre, dans le *Handbook of PE Plastic Pipe* publié par le Plastic Pipe Institute¹³⁹, et fournit un outil de calcul interactif intéressant.¹⁴⁰ Des descriptions plus sommaires apparaissent dans diverses références, tel, par exemple, le *Piping Handbook*¹⁴¹ ou le *Buried Plastic Pipe Technology*.¹⁴²

Sixsmith et Hanselka¹⁴³ détaillent la charge subie par les tuyaux comme étant constituée du poids du sol et de tout autre matériau situé au-dessus du tuyau (charge statique), de la charge due aux véhicules se déplaçant au-dessus des tuyaux (charge dynamique), ainsi que des contraintes dues à l'expansion thermique (gel-dégel, par exemple).

La déflexion maximale du tuyau installé, qui doit être limitée afin d'éviter le bris des tuyaux, est généralement estimée en utilisant l'équation de

l'Iowa, d'abord proposée pour estimer la déflexion horizontale de tuyaux flexibles de métal par Spangler en 1941, puis corrigée par Watkins en 1958. Cette équation fait appel à la fois à la rigidité des tuyaux et à celle du sol ou du matériau où sont enterrés les tuyaux, et permet de calculer la déflexion d'un tuyau une fois installé en fonction à la fois des caractéristiques du tuyau et de celles du sol. Cependant, comme c'est la déflexion verticale qui est mesurée sur le terrain, alors que l'équation estime la déflexion horizontale, on doit supposer que la transformation est symétrique pour pouvoir passer de l'un à l'autre des axes de déformation, approximation qui n'est pas nécessairement valide, tel qu'observé sur le terrain.^{144, 145}

Les calculs utilisant cette équation démontrent que la rigidité du tuyau influence peu la déflexion de celui-ci une fois installé (à condition que cette installation soit appropriée en termes de rigidité du sol et de compaction), le sol supportant la majeure partie de la charge. En effet, en raison de la forme du sol au-dessus du tuyau, un arc se forme, arc qui permet de supporter une grande partie de la charge et donc de protéger le tuyau. De plus, latéralement, le tuyau est supporté par le sol, ce qui minimise ses déformations, même dans le cas de tuyaux très flexibles. Par contre, ce support dépend de la rigidité du sol. Il est donc important, lors de l'installation, d'enterrer le tuyau à une profondeur suffisante, d'utiliser un matériau de remplissage assez rigide et de bien compacter le sol afin d'assurer un contact intime entre le sol et le tuyau. Jeyapalan *et al.* notent qu'il y a contradiction, dans le discours des fabricants de tuyau de plastique, puisque ceux-ci insistent sur la facilité de manipulation et d'installation des tuyaux, pour par contre invoquer une mauvaise installation lorsque les tuyaux rencontrent des problèmes.¹⁴⁴

Une seconde approche de calcul est l'utilisation de méthodes d'éléments finis pour simuler le système tuyau-sol. Le logiciel CANDE permet d'effectuer de tels calculs.^{146,147} Celui-ci permet en outre d'établir, en fonction de la rigidité du tuyau, des caractéristiques du sol et des charges attendues (ex : poids des camions circulant sur une route), la profondeur à laquelle le tuyau doit être installé. Un tel calcul a récemment été rapporté dans la littérature pour des tuyaux de 36 pouces et de 48 pouces de diamètre.¹⁴⁸

McGrath et Mruk indiquent qu'à faible valeur de PS, l'équation de l'Iowa conduit à des aberrations, reliées à un changement de mécanisme de déformation puisque, lorsque les parois sont trop peu rigides, il y a un phénomène de déformation de type flambage (buckling) qui entre en jeu (facteur 4), et l'équation n'est alors plus valide.¹⁴¹ Il faut alors utiliser les équations appropriées pour tenir compte de ce dernier facteur, les plus utilisées étant des variations de l'équation de Luscher.

Par ailleurs, une fois la valeur adéquate de charge déterminée et donc la rigidité du tuyau sélectionnée, l'utilisation de tuyaux ayant des rigidités supérieures ne donnent aucun avantage à long terme, selon Sixsmith et Hanselka¹⁴³, pour deux raisons principales. Tout d'abord, le PS et le RSC sont des propriétés à court terme, qui ne permettent pas aisément de prédire le comportement du tuyau à long terme. Une plus grande rigidité n'est donc pas garante d'une plus grande longévité. De plus, une fois une valeur minimale de RSC ou de RS rencontrée, la déformation d'un tuyau installé dépend plus de la rigidité du sol que de celle du tuyau lui-même, ce qui signifie que les principaux facteurs contrôlant la déformation du tuyau sont reliés à l'installation (manutention, taille de la tranchée, matériau de remplissage utilisé, compaction, nature du sol, etc).

12.8.3 Comparaison des valeurs obtenues dans les normes et définition des valeurs minimales

Tel que mentionné dans la section précédente, bien que différentes applications puissent nécessiter l'utilisation de rigidités de tuyau différentes, une rigidité minimale est essentielle, afin d'éviter les déformations excessives lors de la manutention et l'installation, ainsi que pour maintenir la résistance et la stabilité structurelle des tuyaux durant toute la durée de leur utilisation prévue.

On retrouve dans le tableau 24 une comparaison des principales valeurs proposées dans la littérature pour ces minimums. Afin de convertir les valeurs de RSC en PS ou l'inverse, le facteur de conversion utilisé pour ce

tableau est celui proposé dans la norme ASTM F894, tel que décrit à la section 12.6 du présent rapport. Il faut cependant noter que celui-ci conduit à des erreurs de calcul variant entre 1 et 13 % selon les caractéristiques et la taille des tuyaux étudiés, tel qu'établi dans la présente étude.

Tableau 24 : Comparaison des valeurs mesurées par les méthodes ASTM F2306 et BNQ 3624-120 dans la présente étude

Identification des échantillons	ASTM F2306		BNQ 3624-120		PS minimal défini dans la norme		
	PS	Écart-type	PS	Écart-type	ASTM F2306	BNQ 3624-120 R210	BNQ 3624-120 R320
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
S24	414	9	413	10	235	210	320
W24	331	3	330	3	235	210	320
S48	139	2	141	2	125	210	320
W48	209	3	229	6	125	210	320

Les normes BNQ 3624-120 et ASTM F2306 sont exprimées en termes de valeurs de rigidité de tuyau (PS), alors que les valeurs obtenues par les normes ASTM F894 sont des constantes de rigidité circonférentielle (RSC). L'utilisation du RSC serait une adaptation du facteur de flexibilité utilisé par l'ASSHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) pour évaluer les tuyaux flexibles de métal ondulé (corrugated) et de plastique.¹⁴³ Ces deux valeurs sont mathématiquement reliées: la rigidité du tuyau (PS) correspond à la charge nécessaire pour produire une déflexion absolue du tuyau, alors que la constante de rigidité circonférentielle (RSC)

correspond à la charge nécessaire pour produire une déflexion relative. À valeur égale de PS, les tuyaux de diamètres différents auront la même déflexion absolue (par exemple 1 cm), alors qu'à RSC égal, ils auront la même déflexion relative (par exemple 1%). Le Plastic Pipes Institute suggère la valeur de RSC comme facteur de comparaison des tuyaux, puisque, sur le terrain, c'est habituellement le pourcentage de déflexion maximal du tuyau qu'on voudra limiter.¹³⁸ La valeur de PS est cependant exprimée dans une unité plus habituelle pour les ingénieurs. Il est possible d'utiliser quand même des valeurs de PS et de tenir compte de ce facteur en définissant, comme le font les normes ASTM F2306 et AASHTO M294-11, des valeurs minimales de PS différentes en fonction du diamètre des tuyaux. L'utilisation d'une valeur de RSC unique pour toutes les tailles de tuyaux, dans la norme ASTM F894, correspond bien à une diminution des exigences en termes de valeur de PS lorsque le diamètre du tuyau augmente, comme on peut le voir dans le tableau 25.

Les normes ASTM F2306 et AASHTO M-294-11 s'entendent pour exiger des valeurs de PS correspondant à une valeur de RSC d'environ 2 kN/m, et ce pour les deux diamètres de tuyaux utilisés. Ceci correspond, dans la norme ASTM F894, à une valeur près de celle de la catégorie 160. Rappelons que tous les tuyaux mesurés rencontraient la norme ASTM F2306, tel qu'indiqué dans le tableau 8. Les valeurs minimales de rigidité des normes BNQ 3624-120, exprimées en valeurs PS, diffèrent cependant. Pour les tuyaux de 24 pouces, les normes ASTM F2306 et BNQ 3624-120 proposent des valeurs minimales de PS similaires (235 et 210 kPa), alors que la norme BNQ 3624-120 exige une valeur de 320 kPa (valeur actuellement exigée par le Ministère des transports du Québec, voir le tableau 8). Rappelons que tous les tuyaux de 24 po de diamètre mesurés dans la présente étude avaient des valeurs de PS supérieures aux exigences de cette norme.

Par contre, lorsque le diamètre augmente, la rigidité des tuyaux diminue considérablement. La norme ASTM F2306 tient compte de cet effet en diminuant les exigences à une valeur de PS de 125 kPa, alors que la norme BNQ 3624-120 maintient la valeur exigée à 210 kPa pour la catégorie 210 et

320 kPa pour la catégorie 320. Dans la présente étude, aucun des tuyaux de 48 pouces de diamètre ne satisfait les exigences de la catégorie 320 de la norme BNQ 3624-120, et seuls les tuyaux W24 satisfont les exigences de la catégorie 210.

Au-dessus d'une valeur minimum permettant à la fois le transport et l'installation, de même que la résistance à une charge normale sur le terrain, le choix de la rigidité d'un tuyau devrait se faire selon les contraintes de l'emplacement où il est installé, afin de maximiser les interactions sol-tuyau. Dans cet ordre d'esprit, l'utilisation d'une valeur de PS constante en fonction du diamètre n'apparaît pas justifiée, et conduit à une exigence plus sévère pour les tuyaux de grande taille que pour ceux de petite taille. La norme BNQ 3624-120 catégorie 210 se trouve ainsi à être moins exigeante que les normes ASTM F2306 et AASHTO M-294-11 dans le cas des tuyaux de 24 pouces, et beaucoup plus exigeante pour les tuyaux de 48 pouces. **Il est donc recommandé d'adopter des valeurs de PS minimales variant avec le diamètre de telle façon à ce que ces valeurs correspondent approximativement à une valeur de RSC constante.**

La valeur exacte de RSC à privilégier est impossible à établir à partir des données expérimentales du présent projet, et il faut donc se fier aux valeurs de la littérature pour proposer une recommandation. Il faut noter que, pour des projets d'envergure, des calculs préliminaires sont effectués afin de choisir la rigidité minimale selon l'usage envisagé et le site d'installation spécifique (voir, par exemple, l'étude de Jeyapalan pour le projet CSO Conveyance)¹⁴⁹. Dans le cas de cette dernière étude, des valeurs de RSC idéales assez faibles avaient été calculées à partir des données sur la nature du sol, mais une valeur minimale de RSC de 1.5 kN/m a été retenue afin de tenir compte des problèmes associés à des tuyaux trop flexibles durant le transport et l'installation. Il faut noter ici que les diamètres étudiés variaient entre 12 et 96 pouces de diamètre, et que l'utilisation projetée était différente de celles envisagées par le Ministère des transports.

Selon les données communiquées par C. Nazair et rapportées dans le tableau 7, la norme minimale pour ces tuyaux est actuellement de 320 kPa au

Ministère des transports. Par contre, quelques études sur le terrain démontrent que des tuyaux de rigidité plus faible ne présentent pas de problème particulier sur le terrain, à condition que leur installation soit appropriée.^{150, 151, 152} Il est donc recommandé, sur la base de la revue de la littérature, d'adopter des valeurs de PS minimales variant avec le diamètre. Comme la norme BNQ 3624-120 ne présente pas une telle caractéristique, **nous recommandons plutôt de suivre les valeurs de PS proposées soit par la norme ASTM F2306, soit par la norme AASHTO M294-11, légèrement plus exigeante que celles de la norme ASTM F2306 pour les tuyaux de 48 pouces de diamètre.** Ceci correspond, pour les tuyaux de plus grands diamètres, à une diminution des exigences actuelles, mais à une augmentation des exigences pour des tuyaux de 12 po de diamètre et moins. De plus, cette norme a été établie pour des utilisations similaires à celles envisagées dans le présent projet. Il est cependant conseillé de déterminer des conditions d'enfouissement spécifiques pour les diverses utilisations projetées en termes de remplissage et de profondeur d'enfouissement, et pour tout projet d'envergure, d'effectuer une étude afin de vérifier si cette rigidité est bien adéquate pour le site spécifique du projet.

Tableau 25 : Tableau récapitulatif des valeurs limites de PS ou RSC fixées par divers organismes et équivalent tel que calculé en utilisant la constante proposée dans les normes (K = 6,67)

Tuyaux de 24 po de diamètre						
Référence	PS	PS	RSC	RSC	D	D
	psi	kPa	lbf/pi	kN/m	po	mm
ASTM F2306	34	235	122	1.8	24	609.6
BNQ 3624-120 R210	30	210	110	1.6	24	609.6
BNQ 3624-120 R320	46	320	167	2.4	24	609.6
AASHTO M-294-11	34	235	122	1.8	24	609.6
Jeyapalan (2010)	28	191	100	1.5	24	609.6
ASTM F894 -R40	10	69	36	0.5	24	609.6
ASTM F894 -R63	16	107	56	0.8	24	609.6
ASTM F894 -R100	25	173	90	1.3	24	609.6
ASTM F894 -R160	40	276	144	2.1	24	609.6
ASTM F894 -R250	62	431	225	3.3	24	609.6
ASTM F894 -R400	100	690	360	5.3	24	609.6
Tuyaux de 48 po de diamètre						
Référence	PS	PS	RSC	RSC	D	D
	psi	kPa	lbf/pi	kN/m	po	mm
ASTM F2306	18	125	131	1,9	48	1219
BNQ 3624-120 R210	30	210	219	3,2	48	1219
BNQ 3624-120 R320	46	320	334	4,9	48	1219
AASHTO M-294-11	20	135	144	2,1	48	1219
Jeyapalan (2010)	1,5	96	100	1,5	48	1219
ASTM F894 -R40	5	35	36	0,5	48	1219
ASTM F894 -R63	8	54	56	0,8	48	1219
ASTM F894 -R100	12	86	90	1,3	48	1219
ASTM F894 -R160	20	138	144	2,1	48	1219
ASTM F894 -R250	31	216	225	3,3	48	1219,2
ASTM F894 -R400	50	345	360	5,3	48	1219,2

13. CONCLUSIONS PARTIELLES SUR LES TESTS MÉCANIQUES

Dans le cadre de cette étude, nous devons tester deux propriétés mécaniques semblables en rigidité, le PS et le RSC. Les normes employées étaient la norme ASTM F2306 et BNQ 3624-120 pour les tests du PS et la norme ASTM F984 pour le RSC. Ces méthodes se sont avérées très reproductibles d'un échantillon à l'autre. Plusieurs facteurs étaient en cause dans chacune de ces normes. Le positionnement de l'échantillon, et la faible variation de la longueur n'ont pas beaucoup d'influence sur le résultat final. Par contre, la vitesse de charge et la longueur totale de l'éprouvette sont des facteurs déterminants du résultat final. La vitesse de déformation est particulièrement importante, car le comportement des tuyaux est lié à une déformation viscoélastique. Les plastiques de ce type n'ont une déformation linéaire que pour un court intervalle de déformations. Lorsque les tests sont effectués dans cette zone, comme c'était le cas pour cette étude, les valeurs obtenues sont proportionnelles à la longueur de l'éprouvette pour une même vitesse de déformation.

Toutes les normes ne sont pas aussi précises, par exemple ASTM F894 mène à une erreur expérimentale plus élevée car les tests sont effectués sur une plus courte distance à une vitesse plus élevée. Les deux types de tuyaux que nous avons testés n'ont pas performé de la même façon durant ces essais. Pour les plus petits diamètres, les tuyaux à doubles parois de la marque Soleno avaient de meilleurs résultats, alors que c'était le contraire pour les plus grands diamètres, où les tuyaux de la marque Weholite avaient de meilleures propriétés.

La norme ASTM F2306 a été respectée dans tous les cas, ce qui n'est pas le cas pour la norme BNQ 3624-120. Pour les plus petits diamètres de tuyau, elle était respectée autant par les tuyaux de type Soleno que Weholite. Cependant, pour les tuyaux de plus grand diamètre, seuls les tuyaux de Weholite respectaient la norme pour les valeurs les plus basses demandées. Finalement, pour la norme F894, tous les tuyaux avaient au moins un RSC de 160 dans tous les cas. Toutes les valeurs obtenues ont permis de comparer

ces deux tests de rigidité entre eux. On a ainsi démontré que l'équation qui permet de transférer les valeurs de l'un à l'autre était dans la plupart des cas imprécise, et conduisait à des erreurs de 10 à 20%. Finalement, des tests ont été effectués sur des tuyaux vieillis par gel/dégel. Ces essais ont démontré que l'action du gel/dégel n'influçait pas la propriété de rigidité mesurée en PS selon BNQ 3624-120 par rapport à des tuyaux neufs qui n'ont pas été mis en service.

14. RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LE VIEILLISSEMENT

14.1 Vieillissement étudié par spectroscopie infrarouge

La principale méthode employée afin de connaître l'évolution du vieillissement était la spectrométrie infrarouge par réflexion totale atténuée. Les autres méthodes (voir section 10.2.2) se sont avérées peu sensibles au vieillissement. Les spectres infrarouges donnent de l'information sur les groupements chimiques constituant l'échantillon. De plus, la technique spécifiquement utilisées dans le cas présent (méthode ATR avec un cristal de diamant) est sensible environ aux premiers 2 microns de la surface. La méthode de transmission, plus couramment utilisée, posait problème dans le cas des échantillons utilisés en raison de la présence du noir de carbone, qui ne permettait pas à une quantité suffisante de lumière de traverser les échantillons.

Une première série de vieillissements a été effectuée de façon à connaître le meilleur appareillage pour cibler ces changements. Ces premiers vieillissements ont été effectués en chauffant les polymères de façon à accélérer le processus. Selon la nature de l'agent de vieillissement à une température de 80°C, quelques heures à près d'un mois étaient nécessaires afin de voir un changement mesurable par infrarouge. En même temps, une série d'échantillons de plus grande taille ont été vieillis avec une gamme d'agents chimiques et de concentrations, tel que décrit dans la section 10.2.1. Un échantillon de chaque type de tuyau, Soleno et Weholite, ont été mesurés après deux et cinq mois de vieillissement. Encore trois échantillons de chaque type poursuivent leur vieillissement. (mars 2012).

Des échantillons provenant de deux endroits au Québec ont également été analysés par cette méthode. Un Soleno de 1200 mm de diamètre (Ste-Marie de Blanford) et un Weholite de 2000 mm de diamètre (Baie Ste-Catherine, Charlevoix) ont été installés il y a environ dix ans (en 2003 pour le Soleno et en 2000 pour le Weholite) et ont subi le vieillissement

naturel du climat québécois. L'annexe 5 fournit l'information sur le lieu exact où se situe ces tuyaux et l'endroit sur le tuyau où les échantillons ont été prélevés, et fournit aussi des photographies prises sur le terrain. (Annexe 6) Il faut noter que l'échantillon Soleno a été prélevé plus tard dans la saison, et l'eau était alors gelée au fond de celui-ci, ce qui a limité les sections que l'on pouvait échantillonner.

Le tableau 6 en section 10.2.2.1 présente une revue de la littérature sur les différentes vibrations que les auteurs ont trouvées dans leurs études du vieillissement du PEHD (Note : ν indique une vibration d'élongation du lien, alors que δ correspond à un mode de déformation du groupement chimique). En annexe 4, les différents spectres infrarouge qui ont été effectués et qui présentaient un vieillissement ont été rapportés.

Plusieurs bandes apparaissent en spectroscopie infrarouge lors de vieillissement. Les plus intenses sont généralement :

- 1) La large bande centrée vers $1070-1030\text{ cm}^{-1}$, attribuée à des vibrations C-O de divers groupements chimiques liés au vieillissement
- 2) L'une des bandes de la région des carbonyles, le plus souvent celle à 1740 cm^{-1}
- 3) L'une des bandes des groupements vinyles, habituellement celle vers 1640 cm^{-1}
- 4) Dans une moindre mesure, mais dans une région où cette bande est isolée, la large bande d'élongation des fonctions hydroxyles vers 3370 cm^{-1}

Or, ces bandes n'apparaissent pas toutes avec la même absorbance selon le mode et le temps de vieillissement. Afin de faire une corrélation avec un vieillissement, la plupart des auteurs proposent un index basé sur le rapport entre une bande caractéristique de la dégradation et une bande qui n'est pas affectée par celui-ci, et qui sert de standard interne, comme par exemple le

rapport des absorptions des bandes à 1714 et 1470 cm^{-1} ou index carbonyle.¹²⁹ Dans le présent travail, les index suivants ont été mesurés :

$$I_{hydroxyl} = \frac{A_{3370}}{A_{2915}} \quad I_{carbonyl} = \frac{A_{1740-1696}}{A_{1472}} \quad I_{vinyl} = \frac{A_{1590, 1542 \text{ ou } 1650}}{A_{1472}} \quad I_{ether} = \frac{A_{1078-1035}}{A_{1472}}$$

où la bande utilisée au dénominateur, ou bande de référence, est une vibration propre au PEHD, et donc peu affectée par le vieillissement. De plus, la bande est choisie dans la même région spectrale, à la fois pour faciliter les calculs et la comparaison avec les données de la littérature. Il faut aussi noter que, même pour deux bandes qui seraient reliées au même vieillissement, et pour un même nombre de groupements présents à la surface, l'absorbance variera en fonction de la longueur d'onde de la vibration. On ne peut donc pas additionner les absorbances de différentes vibrations, ni leurs index. Le suivi se fera donc une vibration à la fois, en utilisant l'index de la vibration comme paramètre de comparaison des échantillons (de cette étude ou de travaux de la littérature). Plusieurs vibrations d'un même type (ex : vibrations de groupements carbonyles) sont parfois adjacentes. Dans le cadre de ce travail, la plus intense a alors été utilisée pour le calcul de l'index, et l'absorbance a été prise comme étant la hauteur de la bande sans procéder à une séparation des différentes bandes.

Les tableaux 26 et 27 sont le résultat de ces différents taux pour les vieillissements accélérés ainsi que pour les échantillons pris sur le terrain. En premier lieu, on peut noter que les divers agents de vieillissement ne produisent pas les mêmes groupements chimiques à la surface du PEHD, ou du moins pas dans les mêmes proportions. Pour le vieillissement en présence de NaCl, les principales fonctionnalités qui apparaissent sont des vinyles, de carboxylates et des éthers, bien qu'on retrouve en plus faible quantité des hydroxyles et des carbonyles. Le vieillissement en présence de NaNO_3 conduit également à de faibles quantités de groupements carbonyles, vinyles et éthers. Les pH basiques, contrairement à ce qui était rapporté dans la littérature, n'ont pas eu d'effet majeur sur le vieillissement jusqu'à maintenant,

si bien qu'on dénote seulement une faible présence de vinyles et d'éthers. Pour les agents chimiques plus agressifs tel que la solution piranha, une présence marquée de la vibration du groupe carbonyle est notée, ainsi qu'un faible vieillissement au niveau des autres fonctionnalités.

Pour des échantillons prélevés sur le terrain, les tuyaux Weholite exposés à la lumière du soleil (échantillons E-1 et E-4), présentaient toutes les vibrations mentionnées. Les vibrations hydroxyles, vinyles et carboxylates étaient par contre plus faibles. L'échantillon pris dans le ruisseau (E-3) avait une intensité importante pour presque toutes ces vibrations, montrant un vieillissement significatif en surface.

Les intensités des échantillons de tuyaux Soleno montraient aussi d'assez forts index, les échantillons ayant été pris sur le bord extérieur des tuyaux (S-1 et S-2). Aucun échantillon n'a pu être prélevé dans l'eau comme dans le cas du tuyau Weholite, l'eau étant gelée lors de l'échantillonnage sur le terrain. L'échantillon pris le plus près de l'eau (S-2) donne un signe de vieillissement significatif seulement au niveau de la vibration éther avec une très faible intensité pour les vibrations des groupes hydroxyl et carbonyle. On peut supposer que le vieillissement était beaucoup plus important dans la section du bas, en contact beaucoup plus fréquent avec de l'eau.

Tableau 26 : Comparaison des index (ou rapports d'absorbance) des bandes infrarouge observées après différents vieillissements accélérés.

Bande	Position	Réf.	Conditions de vieillissement						
	(cm ⁻¹)	(cm ⁻¹)	Air	Eau 5 mois	NaCl 5 mois	NaCl 28 j. haute T	Piranha	NaNO ₃ 5 mois	pH 12
Hydroxyle	3370	2915	0,00	0,03	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00
Carbonyle	1741	1412	0,00	0,06	0,01	0,04	0,13	0,02	0,00
Carbonyle	1711	1412	0,00	0,03	0,01	0,04	0,17	0,02	0,00
Carbonyle	1696	1412	0,00	0,01	0,01	0,06	0,13	0,01	0,00
Vinyle	1650	1412	0,00	0,05	0,02	0,15	0,04	0,02	0,00
Carboxylate	1610?	1412	0,00	0,00	0,02	0,11	0,03	0,01	0,00
Vinyle	1590-1577	1412	0,00	0,00	0,03	0,09	0,03	0,01	0,02
Vinyle	1542	1412	0,00	0,01	0,01	0,05	0,02	0,00	0,02
Éther	1078-1035	1412	0,00	0,12	0,04	1,87	0,03	0,04	0,04

Réf. : Bande de référence utilisée pour calculer les index.

Tableau 27 : Comparaison des index des principales bandes infrarouge pour les échantillons prélevés sur le terrain.

Bande	Longueur d'onde (cm ⁻¹)	Index des échantillons				
		Weholite E-1 et E-4*	Weholite E-3	Weholite E-2 et E-5*	Soleno S-1	Soleno S-2
Hydroxyl	3370	0,01	0,08	0,01	0,04	0,03
Carbonyl	1741	0,00	0,06	0,02	0,04	0,03
	1711	0,08	0,03	0,01	0,06	0,03
Vinyl	1696	0,06	0,02	0,01	0,05	0,01
	1650	0,05	0,15	0,03	0,15	0,03
	1610-1577	0,04	0,14	0,01	0,12	0,00
	1577	0,04	0,13	0,02	0,11	0,00
	1542	0,02	0,06	0,02	0,07	0,01
C-O	1078-1035	0,11	0,48	0,08	0,38	0,21

*Moyenne des deux échantillons

Comme observé dans les figures précédentes, certaines bandes sont propres au polyéthylène (vibrations à 2915-2843, 1472-1463, 1368-1351 et 907 cm^{-1} , principalement, dues aux groupements CH_2 et aux vibrations C-C). À celles-ci se superposent des vibrations liées au vieillissement, pouvant être dues à des produits de dégradation oxydative, à des groupements vinyène (C=C) ou à des bouts de chaînes supplémentaires (COOH , CH_2 ou autres) dus à des scission de chaîne. Alors que certaines bandes de vibration apparaissent ou augmentent en intensité, d'autres peuvent diminuer en intensité, tel que rapporté par Carraco *et al.*¹³¹ On a aussi remarqué que, selon l'agent de vieillissement utilisé, la position et l'intensité relative des vibrations liées à la dégradation changeaient. Ceci est attribué à la présence de différents mécanismes de vieillissement, tel que proposé dans la littérature^{128, 130, 135, 153,}

Ces divers mécanismes peuvent causer une diminution ou une augmentation de la masse molaire.¹⁵⁴ C'est pour cette raison que la méthode permettant de quantifier celle-ci, soit la chromatographie par exclusion stérique (SEC), prévue à l'origine dans le projet, a été écartée.

On peut donc conclure que la spectroscopie infrarouge permet de déterminer la dégradation subie par l'échantillon. La quantification est cependant semi-quantitative en raison de divers facteurs, dont :

- 1) La présence de plusieurs mécanismes distincts et parfois concurrents
- 2) Le fait que la technique utilisée est sensible aux deux premiers microns de la surface uniquement, qui oblige à vérifier la corrélation entre le vieillissement observé à la surface et le vieillissement en profondeur
- 3) La difficulté à corréler le vieillissement accéléré en laboratoire au vieillissement réel sur le terrain

Ces divers aspects seront abordés successivement, et une revue de la littérature spécifique à ces aspects a été ajoutée dans la présente section.

14.1.1 Présence de plusieurs mécanismes distincts et parfois concurrents.

Les échantillons prélevés sur le terrain présentent diverses vibrations de forte intensité. De plus, selon la position de l'échantillon sur le terrain (exposée au soleil, à l'eau), les vibrations de vieillissement présentes et leurs index (donc leurs intensités relatives) sont différents. Les index les plus élevés, et donc les vibrations les plus intéressantes, seraient ceux des vibrations éther et vinyl pour les échantillons prélevés dans ou près de l'eau, et les index carbonyle et éther pour les échantillons pris sur les sections des extrémités externes des tuyaux, et donc exposés au soleil. Ceux-ci se rapprochent donc à la fois du vieillissement par solution piranha, avec des vibrations carbonyles assez intenses, et du vieillissement par NaCl, avec ses vibrations éthers intenses. Ceci nous permet de proposer que ces agents chimiques seraient les plus intéressants pour simuler le vieillissement des tuyaux soumis au climat québécois, bien que la comparaison ne s'avère pas parfaite.

14.1.2 Corrélation entre le vieillissement observé à la surface et le vieillissement en profondeur

La méthode de mesure utilisée étant sensible aux deux premiers microns de la surface uniquement, il est important de vérifier si cette mesure est effectivement réaliste en ce qui a trait au vieillissement de tuyaux faisant plusieurs millimètres d'épaisseur.

Plusieurs travaux ont été publiés sur la progression de la dégradation en profondeur. Les plus intéressants sont, dans le cadre du problème qui nous intéresse, ceux de Gulmine *et al*, de Bruin et de Terselius, Gedde et Jansson.^{34,129,135}

Gulmine *et al*¹²⁹ ont montré que le vieillissement, tel que mesuré par l'intensité de la bande carbonyle à 1740 cm^{-1} , s'étendait au moins sur les premiers un à cinq microns de l'échantillon après un vieillissement accéléré à

la lumière UV, la diminution de l'index carbonyle étant quasi linéaire en fonction de la profondeur.

Plusieurs auteurs ont démontré que, pour des tuyaux ou d'autres pièces de PEHD, le vieillissement est limité à une couche de surface, qui est d'épaisseur relativement faible par rapport à l'épaisseur totale des morceaux de polyéthylène (de Bruijn mentionne une épaisseur de 50 microns pour des tuyaux de 4 mm d'épaisseur, et Terselius, Gedde et Jansson de 20 à 170 microns pour des tuyaux de 5 à 25 mm d'épaisseur, et de diamètre variant de 0,2 à 1 m. Ces géométries se rapprochent de celles des tuyaux utilisés dans le présent travail.

Yanai *et al.*¹⁵⁵ ont étudié des profils de dégradation en fonction de la profondeur dans des échantillons de polyéthylène basse densité soumis à un vieillissement par rayonnement UV. Ils notent aussi un pourcentage de dégradation presque linéaire en fonction de la position par rapport à la surface, et une corrélation entre la concentration à la surface et la profondeur de dégradation. La quantité exacte de groupements vinyle, carbonyle ou autre était différente, mais un même profil et une même épaisseur de dégradation étaient observés.

Dans la présente étude, aucune mesure de vieillissement n'a été faite en fonction de la profondeur. Les données de la littérature indiquent cependant clairement que la dégradation se produit principalement sur une mince couche de surface, et que la profondeur de la dégradation est proportionnelle à la quantité de dégradation trouvée en surface. Ceci justifie l'utilisation des valeurs d'index décrits dans la section précédente se rapportant à des mesures de surface, pour l'étude de la dégradation des tuyaux.

14.1.3 La difficulté à corréler le vieillissement accéléré en laboratoire au vieillissement réel sur le terrain.

Le vieillissement accéléré en laboratoire implique d'exposer les tuyaux en permanence à un agent de vieillissement. De plus, afin d'accélérer le

vieillissement, on peut aussi augmenter la concentration de l'agent causant le vieillissement, augmenter la durée de contact ou augmenter la température. Cependant, corrélérer vieillissement en laboratoire et sur le terrain n'est pas simple.

Plusieurs études se basent sur une augmentation de la température pour accélérer le vieillissement, en calculant facteur d'accélération par la Loi d'Arrhenius, selon :

$$v = ke^{-E_{act}/RT}$$

où v est la vitesse de réaction, k une constante, E_{act} l'énergie d'activation de la réaction, R la constante des gaz parfaits et T la température. Jelle et Nilsen¹³² ont proposé la réorganisation suivante de l'équation d'Arrhénius pour calculer un facteur d'accélération v_1/v_2 selon :

$$\log \frac{v_1}{v_2} = \frac{E_{act}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Le facteur calculé avec cette équation, en supposant une énergie d'activation de 70 kJ/mol, est proche de la valeur obtenue pour la différence d'absorbance des groupements carbonyles à 1732 cm^{-1} des échantillons étudiés par Jelle et Nilsen¹³² et vieillis par rayonnement UV. L'index carbonyle pourrait donc être indicatif du facteur d'accélération de ce type de vieillissement. Il faut cependant noter que la valeur d'énergie d'activation va dépendre fortement du mode de vieillissement, et on retrouve, par exemple, une valeur de 56 kJ/mole pour la photo-oxydation du PEHD (Vincent, Jansen et Nijsten, tel que rapporté par de Bruijn).¹³⁵

Il est donc intéressant de comparer les vieillissements effectués en accéléré au laboratoire (tableau 26) à ceux constatés sur des échantillons prélevés sur le terrain à l'aide du ministère des Transports du Québec (tableau 27). On remarque, sur les échantillons 'extérieurs' (exposés au soleil, et donc ayant subi un vieillissement par lumière UV), que l'index carbonyle varie entre 0,04 et 0,08, valeurs nettement plus faibles que celle de 0,41 calculée à partir des spectres IR rapportés par Jelle et Nilsen¹³² et correspondant à des échantillons qui auraient 9 ans sur le terrain. Rappelons que les échantillons

prélevés dans le cadre du présent travail avaient environ **une dizaine d'années**, donc un âge similaire à celui des échantillons de Jelle et Nilsen.¹³² Ceci indique à quel point le vieillissement peut varier d'un endroit à l'autre, selon les conditions d'ensoleillement ou la température externe. Le vieillissement des surfaces externes serait donc beaucoup moins élevé au Québec que celui observé dans des régions plus chaudes. Cependant, en ce qui a trait aux sections intérieures du tuyau, il peut en être autrement, les régions chaudes n'employant pas de déglaçant (NaCl), qui accélère considérablement la dégradation.

En comparant les divers vieillissements chimiques effectués sur les tuyaux en laboratoire, tel que décrits dans le tableau 26, il est intéressant de vérifier si l'un d'entre eux pourrait remplacer la lumière UV pour le vieillissement en laboratoire d'échantillons. Or, le vieillissement sur le terrain des échantillons «extérieurs» qui devraient principalement être affectée par la lumière UV, est caractérisée parfois par un index éther élevé, parfois par les index éther et vinyles élevés, ce qui laisse croire que des mécanismes différents pourraient être en cause, la présence de sel et d'eau de ruissellement sur la surface du tuyau pouvant peut-être expliquer la forte vibration éther observée.

Comme discuté précédemment, la lumière UV n'est pas le seul facteur accélérant le vieillissement, la présence de sel étant de loin le facteur qui a le plus changé les spectres. L'index éther est le plus approprié pour discuter de ce type de vieillissement. On remarque, dans les échantillons Weholite prélevée en bordure de Baie Ste-Catherine, une valeur très importante de cet index, allant jusqu'à 0,48 pour les échantillons dans l'eau (E-3), à 0,21 pour les échantillons près de l'eau (S-2) et 0,38 pour les échantillons extérieurs (S-1) Soleno prélevés à Ste-Marie de Blandford (le gel ayant empêché le prélèvement d'un échantillon dans l'eau dans ce cas précis). La valeur de 0,04 obtenue après trempage durant 5 mois dans une solution de NaCl correspond, si on prend les deux premiers mois comme temps approximatif d'induction, à un vieillissement actif de 3 mois en continu. Or, il faut tenir compte du fait que les sels ne sont pas présents continuellement dans l'eau de drainage des

routes en quantité importante, et que celle-ci est également conditionnelle au niveau de service d'entretien des routes. L'index de 0,48 obtenu pour les tuyaux Weholite après 11 ans sur le terrain correspond à une valeur douze fois plus élevée que celle obtenue pour un trempage continu dans NaCl pour 3 mois après le temps d'induction. **On peut calculer, à partir de ces chiffres, une équivalence d'un mois en trempage continu pour environ 3 à 4 mois dans les conditions sur le terrain pour le tuyau Weholite (soit une accélération par un facteur trois).** Pour les tuyaux Soleno, il n'est pas possible de le calculer, puisqu'aucun échantillon submergé n'a pu être échantillonné en raison des conditions climatiques. Si on prend cependant la valeur de l'échantillon extérieur (S-1), qui est de 0,38, on obtient approximativement la même valeur. Malheureusement, cette estimation se base sur un seul échantillon submergé (Weholite). Il aurait été essentiel, afin de s'assurer de la validité de cette estimation, d'avoir un échantillon ayant vieilli pour une durée de temps différente, afin de s'assurer, par exemple, que ce vieillissement suivait approximativement une loi linéaire. Il est par contre intéressant de constater que ce facteur trois correspond, approximativement, au temps durant lequel on est le plus susceptible d'avoir du sel sur les routes, soit entre novembre et mars, soit environ quatre à cinq mois sur 12, ou un ratio de un pour trois ou quatre.

Il faut aussi noter qu'une valeur complètement différente aurait été obtenue si on avait utilisé la bande carbonyle à 1741 cm^{-1} pour ce calcul, celle-ci étant presque constante dans le temps. En effet, après 5 mois dans NaCl, cet index est de 0,06, et est de 0,04 pour NaCl 48 jours à haute température, alors que dans les conditions réelles, cet index est de 0,06 pour l'échantillon Weholite prélevé dans l'eau (E-3). Ceci cependant n'est pas représentatif de l'ensemble des bandes liées au vieillissement.

Il est intéressant, à cet égard, de comparer l'accélération de vieillissement rapporté dans la littérature. Pour le polyéthylène basse densité, une diminution du temps de vie du polymère de 16% a été rapportée dans l'eau par rapport à l'air. Le vieillissement continu dans des solutions de NaNO_3 et NaCl a conduit à une diminution de temps de vie de 43 et 60 %,

respectivement, selon Henry *et al.*¹⁵⁶ Même s'il ne s'agit pas du même polymère, le polyéthylène basse densité étant généralement moins résistance au vieillissement que le PEHD en raison de sa faible cristallinité, ceci est en accord avec les mesures effectuées sur le vieillissement des morceaux de tuyau, tel que décrit dans la section 14.1. On a effectivement observé, en moyenne, un vieillissement négligeable après cinq mois dans l'eau distillée ou à pH variant de 4 à 10, et très faible pour de l'eau de pH 12, mais deux mois ont suffi pour voir du vieillissement dans les solutions de NaCl et cinq mois dans les solutions de NaNO₃. De plus, les index sont systématiquement plus élevés pour le vieillissement dans des solutions de NaCl que dans des solutions de NaNO₃, bien que la variation de ces index change d'une bande à l'autre.

Si on se fie à la comparaison entre le vieillissement dans NaCl au laboratoire et le vieillissement des tuyaux Weholite immergés sur le terrain (E-3), un temps d'induction d'environ un mois au laboratoire, tel qu'observé, pourrait correspondre à environ de trois à quatre mois à un an sur le terrain pour la partie immergée externe des tuyaux, qui est la plus susceptible de vieillir prématurément.

14.2 Observation, par microscopie électronique à balayage, de la surface de tuyaux

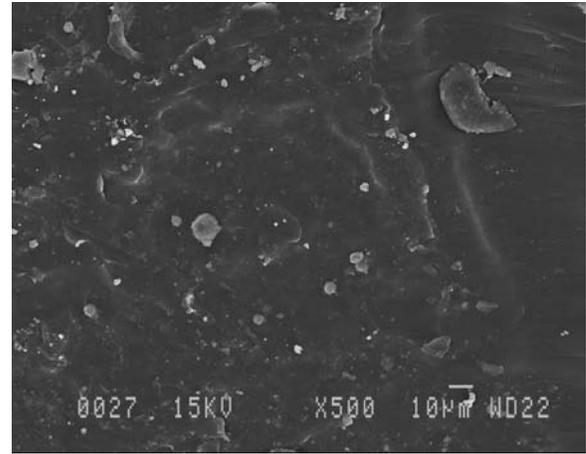
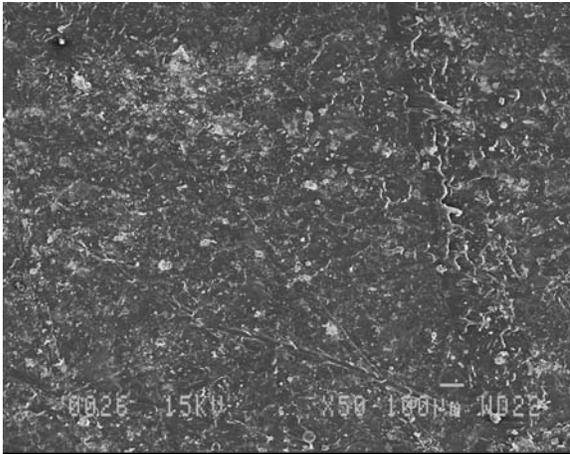
La Figure 33 rapporte des photographies prises, par microscopie électronique à balayage, de la surface de quelques échantillons représentatifs. Dans chaque cas, l'image à gauche a été effectuée à faible grossissement, et celle à droite, à plus fort grossissement. Quelques échantillons seulement ont été mesurés, et les photographies montrent des surfaces représentatives de ces échantillons. On ne peut voir sur aucun échantillon de microcraquelures en surface. Les échantillons les plus abimés sont ceux ayant séjournés dans une solution piranha, fortement oxydante, durant 18 jours. On peut y voir, partout sur la surface, la présence de petits trous, rappelant les piqures produites alors de la corrosion aqueuse des métaux. Ceci semble indiquer que le plastique se

dégrade préférentiellement à certains endroits où il y avait probablement des défauts de surface.

Les échantillons neufs, ainsi que ceux prélevés sur les sites, ne présentent pas de telles piqûres, mais on voit des défauts de surface surélevés ou parfois sous formes de plissements.

Il reste donc à établir s'il est essentiel de soumettre les échantillons à une forte tension ou à des cycles de tension avant que n'apparaissent les craquelures sur les surfaces, et à quel vieillissement ces microcraquelures peuvent apparaître.

a) Tuyau Soleno neuf



b) Échantillon de tuyau Soleno vieilli 18 jours dans une solution Piranha

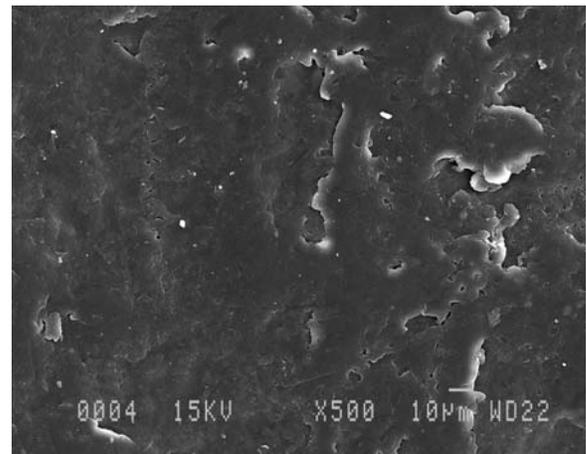
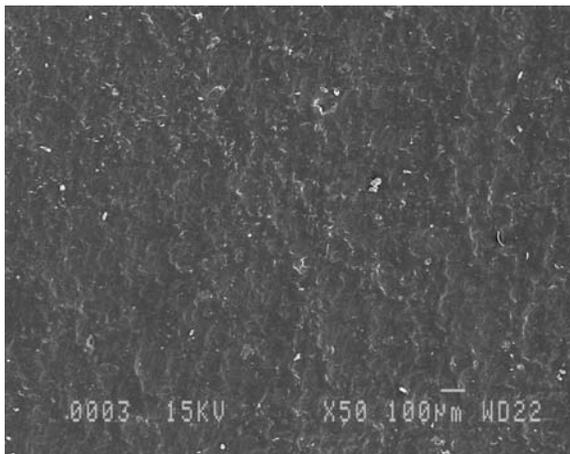


Figure 33 : Photographies prises par microscopie électronique à balayage de quelques échantillons représentatifs de tuyaux Soleno (page 1 de 2)

c) Tuyau Soleno prélevé sur le site de Ste-Marie de Blandford (S2)

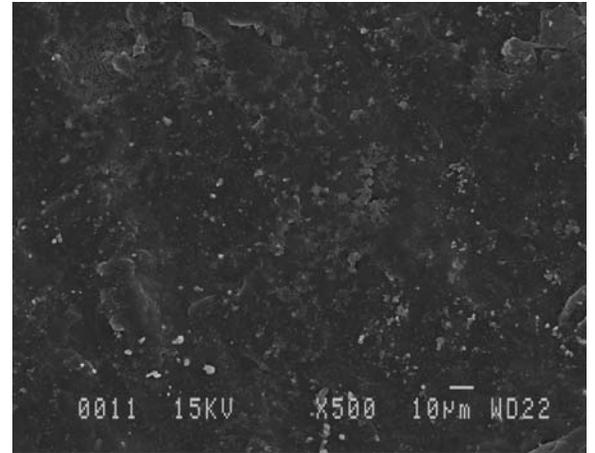
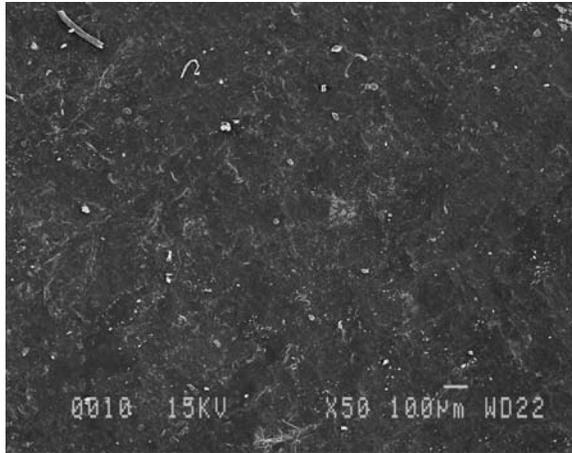


Figure 33 : Photographies prises par microscopie électronique à balayage de quelques échantillons représentatifs de tuyaux Soleno (page 2 de 2)

d) Échantillons de tuyau Weholite vieilli 18 jours dans une solution Piranha

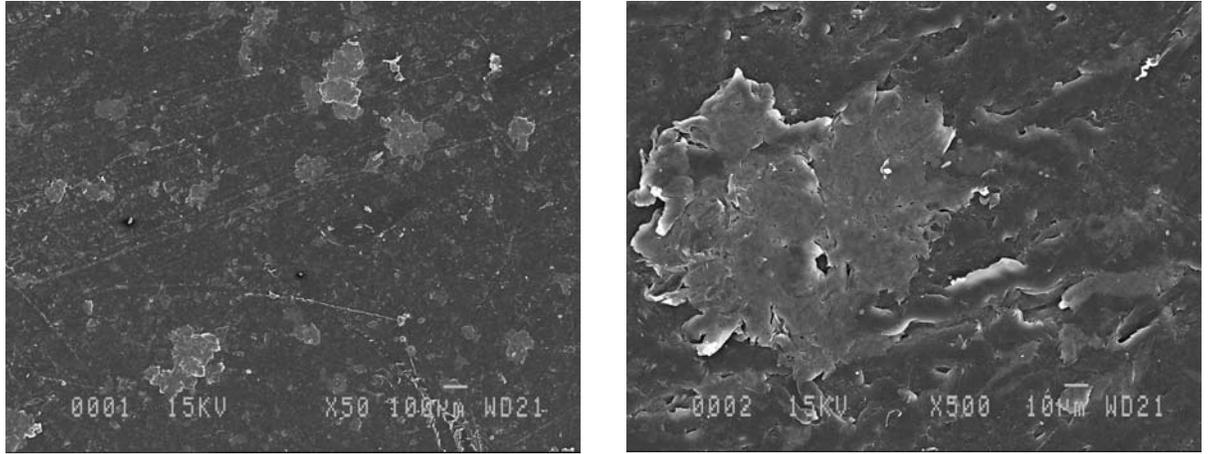


Figure 34 : Photographies prises par microscopie électronique à balayage d'un échantillon de tuyau Weholite

14.3 Effet de la dégradation sur les propriétés mécaniques des tuyaux.

Les données de spectroscopie infrarouge ont clairement établi la présence d'une mince couche de dégradation à la surface des tuyaux, apparaissant rapidement, et dont l'apparition est accélérée par divers facteurs, les plus importants étant la présence de lumière UV et de NaCl.

On pourrait croire qu'en raison de la faible épaisseur, cette couche n'affecte pas les propriétés mécaniques des tuyaux. Les modèles de prédiction de la durée de vie des tuyaux utilisés par les manufacturiers, basés sur les propriétés mécaniques, ne tiennent nullement compte de la présence de cette couche dégradée à la surface des tuyaux. Rappelons que cette prédiction de durée de vie doit surtout être considérée comme un indicateur de qualité des tuyaux plus qu'une prédiction de durée de vie réelle, puisqu'elle ne tient nullement compte des agents de vieillissement présents sur le terrain. Le présent projet prévoyait, à l'origine, une mesure mécanique de tuyaux dégradés, mais l'agent de dégradation (solution de NaCl) n'agit pas assez rapidement pour que la dégradation ait été significative dans le temps alloué pour ce projet. Les échantillons de tuyaux continuent leur vieillissement pour l'instant. Il faut donc se tourner vers la littérature scientifique pour vérifier l'effet de cette mince couche de matériau dégradé sur les propriétés mécaniques de tuyaux.

Deux types d'études sont répertoriés sur l'effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques: des études de l'effet de la dégradation sur les propriétés du matériau dégradé sur toute son épaisseur, et l'effet d'une mince couche de produit dégradé sur les propriétés du tuyau lui-même.

14.3.1 Effet de la dégradation sur les propriétés du matériau dégradé

La diminution des propriétés mécaniques de PEHD vieilli sur toute la profondeur de l'échantillon a été constatée par plusieurs chercheurs. Yanai *et al.*¹⁵⁵ ont mesuré les propriétés mécaniques de plusieurs lamelles prises à différentes distances de la surface, et ont montré que l'élongation à la rupture diminuait ainsi que, dans une proportion moindre, la force à la rupture. Par contre, le module d'élasticité ne subissait aucune perte. Tel qu'attendu, plus l'échantillon mesuré était prélevé loin de la surface, moins les propriétés étaient affectées, puisque moins l'échantillon est dégradé.

Une diminution de la force à la rupture de 25% et une diminution de l'élongation à la rupture de plus de 200% ont aussi été notés par Caraco *et al.*¹³¹ sur des échantillons de PEHD ayant subi un vieillissement par irradiation UV durant 120 jours. Dans cette étude, cependant, une augmentation de 42% du module de Young avait été observée. D'autres auteurs ont aussi noté une diminution rapide de l'élongation à la rupture^{128,130,134,136} comme étant le facteur le plus sensible à la dégradation, bien que la force à la rupture ait aussi fait l'objet de mesures en fonction du temps, surtout lors de vieillissement par photo-irradiation.¹²⁸

Si on veut corrélérer ces observations aux propriétés faisant l'objet de normes pour les tuyaux de PEHD, ceci entraîne la question suivante : Quelle propriété est la mieux corrélée aux propriétés normées des tuyaux, soit le RSC et le PS? On peut déduire que le PS sera principalement lié au module d'élasticité si on accepte le fait que la déformation des tuyaux est principalement liée aux contraintes de flexion annulaire ou «ring bending». Ceci est moins vrai pour les tuyaux de type «Profile wall», ou à joints vissés comme ceux de la compagnie Weholite, pour lesquels on ne peut négliger l'effet des poussées, l'inertie et la contrainte de cisaillement, et pour lesquels la relation entre le module d'élasticité et le module de cisaillement (G) doivent être utilisés si on veut une bonne simulation des propriétés mécaniques.¹⁵⁷

(Ceci pourrait aussi expliquer que la transformation mathématique entre PS et RSC proposée dans certaines normes reste approximative).

Or, tel que discuté dans les paragraphes précédents, le module d'élasticité ou module de Young est peu affecté par le vieillissement. Ceci implique, si on ne tient compte que de ce paramètre, que le vieillissement ne devrait avoir aucun effet sur la durée de vie des tuyaux, tel qu'estimé par le PS. Dans le cas du RSC, comme aucune étude ne rapporte l'effet du vieillissement sur le module de cisaillement, on ne peut se prononcer aussi facilement. Sur cette base, il serait tentant de conclure, tel que le font diverses compagnies, que le vieillissement affecte peu les propriétés mécaniques, certains proposant une durée de vie des tuyaux de plastique allant jusqu'à 100 ans.

Mais avant de conclure au faible effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques des tuyaux, il est important de regarder l'effet d'une mince couche de produit dégradé sur celles-ci.

14.3.2 Effet d'une mince couche de produit dégradé sur les propriétés du tuyau.

Plusieurs études portent sur l'effet de la couche de dégradation sur les propriétés de pièces de PEHD, et en particulier de tuyaux. Malgré sa faible épaisseur, il a été démontré que la couche de dégradation en surface affecte la durée de vie des tuyaux, accélérant les ruptures fragiles de ceux-ci.

Le vieillissement est bien connu pour causer du «*stress corrosion cracking*» (SCC) : une colonie de craquelures apparaît sur une couche de surface du tuyau exposé à une combinaison de contrainte mécanique et de vieillissement chimique.³³

Terselius, Gedde et Jansson³⁴ ont étudié des tuyaux de PEHD avec noir de carbone ayant été utilisé comme conduites d'eau et ayant subi du vieillissement thermique dans des conditions réelles. Ils indiquent qu'à une certaine épaisseur de pénétration et degré d'oxydation, des changements

structuraux et morphologiques sont observés sur la couche de surface, et que ces changements diminuent la résistance à l'initiation de fracture et donc la durée de vie des tuyaux. L'étape initiale, selon cette étude, est la consommation des agents antioxydants, sans dommage au polymère, ce qui se traduit par un temps d'induction à la dégradation, temps qui est proportionnel à la quantité d'agents antioxydants ajoutés dans la formulation. Ils évaluent l'épaisseur de la surface oxydée à entre 0 et 180 microns, et des craquelures de 15 à 180 μm de profondeur ont été observées sur les tuyaux, craquelures qui pénètrent souvent plus profondément que la couche de dégradation. Ceux-ci mentionnent que la netteté de la craquelure détermine son habileté à réduire la force ou le temps de vie d'un corps soumis à une tension. Or, la réduction drastique du temps de vie des tuyaux étudiés est corrélée à la présence de craquelures à la surface interne des tuyaux, ces craquelures se propageant au-travers de l'épaisseur du tuyau à bas stress par mécanisme de fracture fragile évoqué dans la section 4.2. Si une contrainte plus élevée est appliquée, les craquelures peuvent être arrêtées par un mécanisme de rupture ductile. Ceci peut expliquer l'observation effectuée sur le terrain que des trous d'impact n'ont pas conduit au bris des tuyaux.

Ce n'est que récemment que des modèles mathématiques ont commencé à apparaître dans la littérature pour quantifier le temps de vie selon le mécanisme de «*stress corrosion cracking*»^{32,33} Quatre stages de vieillissement ont été observés :

- 1) Dégradation du matériau localisé, causant l'initiation de craquelures multiples
- 2) Croissance des craquelures sous l'effet de contraintes
- 3) Interaction entre les craquelures et formation de clusters de craquelures
- 4) Instabilité des craquelures et propagation dynamique causant le bris.

Choi a établi que les deux dernières étapes sont courtes, et donc que ce sont les deux premières qui sont critiques pour établir la durée de vie des tuyaux.³³

À ces quatre stages pourrait être ajouté un stage préliminaire, ou temps de latence, durant lequel la dégradation de PEHD n'apparaît pas, en raison de la présence de stabilisants. Une fois ceux-ci consommés, ou dissous dans l'eau, la dégradation devrait se produire tel qu'attendu. La durée de ce temps de latence dépendant des additifs ajoutés au PEHD, celui-ci risque de varier d'un fabricant à un autre, mais demeurera mineur par rapport au temps de vie global des tuyaux. Elle dépend aussi des conditions dans lesquelles est placé le tuyau (ex : exposé ou non au soleil, trempant ou non dans l'eau, présence des sels tel NaCl ou NaNO₃). Dans le laboratoire, on se rappellera que ce temps de latence, pour des échantillons trempant continuellement dans de l'eau salée à température de la pièce, était d'environ deux mois, alors qu'il était de cinq mois environ pour des échantillons trempant dans de l'eau distillée.

L'effet de la dégradation chimique est connu pour causer des changements de structure moléculaire, incluant une diminution de la masse molaires, causant une augmentation de la cristallinité et donc de la densité, une légère augmentation de la force à la rupture, et une diminution importante de la résistance

Choi propose que le temps de vie jusqu'au bris t_f soit donné par :

$$t_f \approx t_i + t_p$$

où t_i est le temps d'initiation des craquelures et t_p celui de leur croissance. Il observe que t_i dépend faiblement de la contrainte et constitue l'étape la plus longue, alors que t_p , plus court, est fortement affecté par la contrainte.

L'absence de craquelures sur les échantillons prélevés sur le terrain indique que le vieillissement de ceux-ci est toujours dans le premier stade, qui s'étend donc sur plus de 10 ans. Il est cependant difficile, étant donné les données existantes, d'évaluer la durée de cette étape. Le seul article trouvé dans la littérature présentant des données de spectroscopie infrarouge de la surface de PEHD, permettant de calculer les index de vieillissements, et dont les mesures soient effectuées sur des tuyaux assez vieillis pour présenter des craquelures est celui de Jelle et Nilson.¹³² On peut calculer, à partir de leurs données, un index éther de 2,5. Si on suppose un vieillissement constant dans

le temps, et un même mécanisme de vieillissement, et si on néglige le temps d'induction, comme l'échantillon Weholite mesuré sur le terrain avait, pour un temps de vieillissement sur le terrain d'environ 11 ans, un index éther de 0,48, ceci indiquerait que les microfractures devraient apparaître après environ 50 ans. Cependant, il faut noter que cette comparaison est très approximative, et ne donne qu'un ordre de grandeur. En effet, elle est basée sur un seul échantillon prélevé sur le terrain, et suppose un vieillissement linéaire dans le temps. Or, si on avait pu prélever des échantillons du tuyau Soleno dans l'eau, il est fort probable que le vieillissement, pour un temps équivalent, aurait été beaucoup plus élevé. En effet, la plupart des index de vieillissement de l'échantillon prélevé à l'extérieur de ce tuyau étaient de deux à trois fois plus élevés que ceux du Weholite, pour un temps de vieillissement similaires (13 ans dans le cas du Soleno). De plus, rien n'assure, en utilisant un seul temps de vieillissement sur le terrain, qu'une relation linéaire serait effectivement observée avec le temps.

Il faut cependant aussi mentionner que le vieillissement effectué par Jelle et Nilson¹³² était un vieillissement induit par lumière UV. Cette comparaison serait plus exacte avec la partie externe du tuyau, mais ne donnerait alors pas une idée réaliste du temps de vie du tuyau non plus, puisque c'est la section immergée qui vieillit le plus vite, comme l'a démontré la présente étude.

Les mesures effectuées après des cycles gel-dégel sur des tuyaux non vieillis ont montré que ces cycles n'affectaient pas la rigidité annulaire des tuyaux neufs. Cependant, selon le modèle du «stress corrosion cracking», c'est au niveau de la couche dégradée que les cycles gel-dégel pourraient le plus affecter les tuyaux en accélérant l'apparition de craquelures et leur croissance par l'imposition de contrainte au niveau de la couche vieillie. Or, aucune étude n'a été effectuée, à notre connaissance, sur ce phénomène. L'effet des cycles gel-dégel reste donc inconnu sur le temps d'apparition des craquelures. On peut cependant fortement soupçonner que ces cycles imposeront une contrainte sur des craquelures existantes. Compte tenu des conclusions de Choi, qui indique que la deuxième étape de vieillissement

constituerait environ le tiers de la durée de vie du tuyau, une diminution de la durée de vie d'environ la moitié de cette valeur de t_p , ce qui constituerait un effet majeur, ne causerait qu'une diminution de la durée de vie d'environ un sixième. Sur des tuyaux installés pour 50 ans, cet effet serait donc de l'ordre de 8 ans.

Finalement, aucune étude n'a été effectuée pour vérifier si les deux principaux types de tuyaux vieillissaient de la même manière sur le terrain. Les mesures préliminaires montrent un vieillissement présent sur les deux tuyaux échantillonnés sur le terrain, dans des proportions différentes, ce qui peut être attribuable à des sites d'échantillonnages différents et donc des conditions climatiques ou des expositions à des sels différents. Cependant, la géométrie même des tuyaux Weholite, constitués d'une épaisseur plus grande de PEHD, pourrait permettre de diminuer l'effet de cette couche de vieillissement sur le temps de vie, le temps de propagation de la craquelure étant plus grand si le tuyau est plus épais. Ceci reste cependant à vérifier.

15. CONCLUSIONS PARTIELLES SUR LE VIEILLISSEMENT

En résumé, les échantillons suivants ont été mesurés par spectroscopie infrarouge avec une technique sensible aux premiers 2 microns de la surface:

- Des échantillons vieillis en laboratoire à l'aide de différentes solutions (NaCl, NaNO₃, piranha, et solutions aqueuses à pH de 2 à 10)
- Des échantillons sur le terrain, prélevés sur place avec l'assistance du ministère des Transports du Québec

Ces données, combinées aux essais de propriétés mécaniques, ont permis d'établir que :

- 1) Le temps d'induction avant que le vieillissement n'apparaisse est relativement court lorsque le matériau est en contact continu avec de l'eau salée, soit environ 2 mois dans plusieurs cas. Ceci pourrait correspondre à entre six et huit mois de vieillissement sur le terrain dans la partie la plus basse du tuyau, qui se retrouve fréquemment immergée. Par contre, cela pourrait être de l'ordre de plusieurs années en l'absence de lumière, et lorsque le plastique n'est pas ou peu en contact avec de l'eau.
- 2) Pour des échantillons de 10 ans de service, peu de dégradation n'apparaît pour les sections à l'abri de la lumière et de l'eau, mais une dégradation importante est déjà présente dans les sections exposées au soleil, et encore plus grande pour la section immergée dans l'eau. Malgré ceci, aucun signe de bris lié au vieillissement n'était apparent pour ces tuyaux, et aucune craquelure n'a été observée ni pour le tuyau Weholite, ni pour le tuyau Soleno.
- 3) Les cycles gel-dégel n'ont pas affecté les propriétés PS et RSC des tuyaux neufs. Cependant, il est probable que ceux-ci auraient un effet sur des tuyaux portant une couche dégradée, surtout si celle-ci présente déjà des craquelures liées au vieillissement. Une accélération de la propagation des fissures est prévisible. Étant donné le manque d'informations à cet égard, des études plus poussées sont nécessaires pour vérifier l'effet du gel sur l'apparition ou la croissance de ces craquelures.

16. RECOMMANDATIONS

En ce qui a trait à la **norme à utiliser pour tester les tuyaux**, tel que discuté dans la section 12.8, il est recommandé d'utiliser la norme BNQ 3624-120 comme base de mesure expérimentale, mais d'accepter comme équivalentes les mesures effectuées avec la norme ASTM F2306.

Il est de plus recommandé d'adopter, comme **valeurs minimales de rigidité de tuyau**, les valeurs de PS proposées par l'AASHTO dans leur norme M-294-11, valeurs qui sont similaires mais, dans certains cas, légèrement supérieures aux valeurs minimales de la norme ASTM F2306.

En raison de l'effet d'accélération des solutions salines et de nitrate, toutes deux présentes dans l'environnement des tuyaux de plastique, aussi bien en ville qu'en campagne, ainsi qu'en raison de l'effet potentiel des cycles gel-dégel sur les propagations de fissure, il est recommandé **de limiter le temps de vie attendu des tuyaux de plastique**. Les recommandations des manufacturiers ne semblent pas tenir compte de ces facteurs. Une comparaison très approximative entre les données sur le terrain et les données de la littérature (le vieillissement effectué en laboratoire n'ayant pas été assez long pour servir de base de comparaison), a permis d'estimer à environ 50 ans, le temps requis pour que des craquelures apparaissent suite au vieillissement. Ces craquelures entraîneront alors à relativement courte échéance, soit probablement en moins de 10 ans, l'apparition de fractures fragiles, surtout en présence de cycles gel-dégel qui viendront accélérer la croissance des fractures en appliquant des tensions sur celles-ci. Étant donné que cette estimation a été effectuée sur la base d'un seul échantillon sur le terrain, elle n'est pas suffisamment représentative pour permettre ni d'abaisser, ni d'élever la durée de vie prévue. Il est recommandé, d'ici à ce que des mesures plus complètes soient disponibles, à ce que soit limité au maximum à 50 ans le temps de vie estimé pour les tuyaux de PEHD.

De plus, il est permis d'estimer qu'en cas de bris ou d'impact sévère subi lors de son installation, la diminution de la durée de vie des conduites en PEHD pourrait être significative.

Cette étude a permis de clarifier certains points, mais a aussi soulevé certaines interrogations. Il serait intéressant d'effectuer des études complémentaires portant sur les points suivants :

- La corrélation entre les indices de vieillissement mesurés par infrarouge et l'apparition de la couche de craquelure, point crucial pour évaluer la durée de vie réelle des tuyaux, et sur lequel il n'existe actuellement que très peu de données.
- L'effet sur la couche de dégradation sur les propriétés mécaniques (PS ou RSC) des tuyaux, en effectuant des mesures à différentes vitesses de sollicitation sur des tuyaux vieillis en accéléré avec un agent chimique (solution piranha par exemple).
- L'évaluation de l'impact de l'endommagement lors de l'installation sur la durée de vie des tuyaux.
- La mise en œuvre d'une campagne d'échantillonnage plus représentative et significative sur le réseau routier du MTQ (emplacement, niveau de service, capacité d'écoulement, etc.).

17. CONCLUSION

Ce travail a consisté en trois parties, soit une revue de la littérature sur les tuyaux en PEHD, une étude comparative de leurs propriétés mécaniques utilisant diverses normes, et finalement une étude de vieillissement. Chacun de ces aspects a été traité dans le présent travail, et des conclusions partielles de chacun de ces aspects se retrouvent :

- à la section **9** pour la vielle technologique
- à la section **13** pour l'étude des propriétés mécaniques des tuyaux
- à la section **15** pour le vieillissement.

Il est important de souligner les avantages de ces tuyaux : légèreté, absence de dégradation chimique visible (pas de rouille, pas d'effritement du tuyau), et résistance à la plupart des produits chimiques. Leur utilisation comporte donc plusieurs avantages Par contre, on ne peut non plus faire complètement abstraction du vieillissement de ces tuyaux, qui est bien établi, même si son effet sur la durée de vie reste encore difficile à établir avec précision.

La revue de la littérature a permis de dégager les principaux types de mécanismes de rupture de tuyaux, et de vérifier l'intérêt porté sur les études de vieillissement, en particulier depuis les vingt dernières années. L'importance que pourrait prendre la présence d'additifs dans les tuyaux est aussi soulignée, celle-ci faisant l'objet d'une inquiétude croissante des consommateurs en ce qui a trait aux tuyaux et bouteilles d'eau potable.

La comparaison des propriétés mécaniques mesurées par diverses normes a permis de démontrer que, bien qu'il existe une équation permettant de passer d'un type de propriété à l'autre (PS ou «*Pipe Stiffness*» vers RSC ou «*Ring Stiffness Constant*», ou l'inverse), cette transformation induit entre 10 et 20% d'erreur lorsqu'on utilise des paramètres approximatifs proposés dans les normes. Cette étude a mené à une importante et très intéressante banque de données à cet effet.

L'étude de vieillissement a permis de vérifier que les principaux agents de vieillissement qui pourraient se retrouver sur les routes du Québec et qui affectent le vieillissement des tuyaux en PEHD sont le sel (NaCl) et le nitrate de sodium (NaNO₃, présents dans les engrais), en plus de la lumière (rayons ultraviolet). On a pu estimer le temps de latence avant que le vieillissement ne survienne à température de la pièce dans des solutions de NaCl, et mesurer par spectroscopie infrarouge ATR, les principales vibrations apparaissant, pour chaque agent de vieillissement, à la surface des tuyaux. Une corrélation entre temps de vieillissement au laboratoire et sur le terrain a ainsi pu être établie. Cette estimation reste approximative, vu le nombre de facteurs présents sur le terrain et le nombre limité d'échantillons sur lequel elle est basée.

Finalement, une comparaison entre l'un des échantillons prélevés sur le terrain et les données d'un article de la littérature ont permis d'estimer à environ 50 ans le temps avant que la dégradation en surface n'entraîne l'apparition de craquelures et, conséquemment, le bris des tuyaux. En raison du manque d'échantillons prélevés sur le terrain pour confirmer cette estimation, et d'ici à ce que des mesures complémentaires soient disponibles, il est suggéré de maintenir ce temps de vie attendu pour les conduites en PEHD utilisées sur le réseau routier du ministère des Transports au Québec.

Annexe 1 –Exemples de calcul

Calcul de la rigidité des tuyaux (*Pipe Stiffness*)

La valeur de la rigidité des tuyaux, PS, a été obtenue en utilisant la formule suivante :

$$PS = \frac{F}{\Delta y \times L}$$

où :

- PS est la rigidité des tuyaux ou «*Pipe Stiffness*» et est exprimée en kilopascals (kPa ou kN/m²) ou en livre-force par pouce carré (lbf/po² ou psi). Il s'agit donc d'une mesure de pression.
- F est la force requise pour provoquer une déformation de 5%. Cette valeur est exprimée en Newton (N), kilo Newton (kN) ou livre-force (lbf).
- Δy est la déformation à 5%, en millimètres ou en pouces.
- L est la longueur de l'éprouvette, en millimètres ou en pouces.

Exemple de calcul

En unités impériales :

$$F = 1380,23 \text{ lbf}$$

$$\Delta y = 1,20 \text{ pouces (in)}$$

$$L = 23,91 \text{ pouces (in)}$$

$$PS = \frac{1380,23 \text{ lbf}}{1,20 \text{ po} \times 23,91 \text{ po}}$$

$$PS = 48,11 \text{ lbf / po}^2 \text{ ou } \text{lbf / in}^2$$

En unités métriques :

$$F = 6139,57 \text{ N; } 6,14 \text{ kN}$$

$$\Delta y = 30,48 \text{ mm ; } 0,03048 \text{ m}$$

$$L = 607,317 \text{ mm ; } 0,607317 \text{ m}$$

$$PS = \frac{6,14 \text{ kN}}{0,03048 \text{ m} \times 0,607317 \text{ m}}$$

$$PS = 331,62 \text{ kN / m}^2$$

Calcul de la constante de rigidité circonférentielle (Ring Stiffness Constant)

La valeur de la constante de la rigidité circonférentielle des tuyaux, RSC, a été obtenue en utilisant la formule suivante :

$$RSC = \frac{F}{y\% \times L}$$

où :

- RSC est la constante de rigidité annulaire, ou Ring Stiffness Constant, exprimée en kilo newton par mètre (kN/m) ou en livre-force par pied (lbf/pi).
- F est la force à 3% de déformation en kiloNewton (kN) ou livre-force (lbf).
- L est, comme précédemment, la longueur de l'éprouvette, mais cette fois-ci l'unité est le mètre ou le pied.
- y% = est le pourcentage de déformation de l'éprouvette, soit 3% selon les normes utilisées, et est calculé plus précisément par :

$$y\% = \frac{\Delta y}{d_i} \times 100$$

où

- Δy est la déformation à 3%, en millimètres ou en pouces.
- d_i est le diamètre interne de l'éprouvette, en millimètres ou en pouces.

Exemple de calcul

En unités impériales :

F = 948,21 lbf
L = 1,99 pi ou ft
 Δy = 0,72 po ou in
di = 24,14 po ou in

$$y\% = \frac{0,72 \text{ po}}{24,14 \text{ po}} \times 100 = 2,98$$

$$RSC = \frac{948,21 \text{ lbf}}{2,98 \times 1,99 \text{ pi}} = 158,9 \text{ lbf/pi ou lbf/ft}$$

En unités métriques :

F = 4217,85 N ; 4,22 kN
L = 0,61 m
 Δy = 18,28 mm
di = 613,04 mm

$$y\% = \frac{18,28 \text{ mm}}{613,04 \text{ mm}} \times 100 = 2,98$$

$$RSC = \frac{4,22 \text{ kN}}{2,98 \times 0,61 \text{ m}} = 2,32 \text{ kN/m}$$

Conversion

1 mm = 0,03937 po

1 po (in) = 25,4 mm

1 pi (ft) = 0,3048 m

1 m = 3,28084 pi

1 N = 0,224809 lbf

1 lbf = 4,448222 N

1 kN/m² (kPa) = 0,145038 lbf/in²

1 lbf/in² (psi) = 6,894757 kN/m²

1 kN/m = 68,521763633 lbf/ft

1 lbf/ft = 0,014593176 kN/m

Annexe 2

***Tableaux des valeurs de propriétés mécaniques calculées à partir
des expériences de déformation et détails des paramètres utilisés***

Tableau A1 : Rigidités de tuyau (PS) des les tuyaux de Weholite à 3% de déformation. (24’’)

	Norme	F(N)	F (lbf)	y (mm)	y (po)	L (mm)	L (po)
W1	ASTM F2306	4217,8	948,2	18,3	0,7	607,2	23,9
W2	ASTM F2306	4186,9	941,3	18,3	0,7	606,2	23,9
W3	ASTM F2306	4188,3	941,6	18,3	0,7	605,4	23,8
W4	BNQ 3624-120	4235,6	952,2	18,3	0,7	606,2	23,9
W5	BNQ 3624-120	4166,0	936,6	18,3	0,7	605,1	23,8
W6	BNQ 3624-120	4189,7	941,9	18,3	0,7	607,7	23,9
W7	BNQ 3624-120	4476,7	1006,4	18,2	0,7	609,6	24,0
W8	ASTM F894	10490,7	2358,4	18,2	0,7	1209,4	47,6
W9	ASTM F894	10275,7	2310,1	18,2	0,7	1216,6	47,9
W10	ASTM F894	10295,6	2314,5	18,2	0,7	1216,8	47,9

	PS 3%(lbf/po ²)	Écart-type	Erreur (lbf/po ²)	%Erreur	PS 3%(kN/m ²)
W1	55,1	0,3	0,3	1	380
W2	54,8	0,3	0,3	1	378
W3	54,9	0,3	0,3	1	379
W4	55,4	0,3	0,3	1	382
W5	54,6	0,3	0,3	1	377
W6	54,7	0,3	0,3	1	377
W7	58,4	---	0,5	1	403
W8	69	1	3	4	477
W9	67	1	3	4	464
W10	67	1	3	4	465

Tableau A2 : Rigidités de tuyau (PS) des les tuyaux de Soleno à 3% de déformation. (24'')

	Norme	F(N)	F(lbf)	y (mm)	y (po)	L (mm)	L (po)
S1	ASTM F2306	6164,5	1385,8	18,2	0,7	699,3	27,5
S2	ASTM F2306	5890,6	1324,3	18,2	0,7	695,9	27,4
S3	ASTM F2306	5804,4	1304,9	18,2	0,7	699,8	27,6
S4	BNQ 3624-120	5899,7	1326,3	18,2	0,7	697,7	27,5
S5	BNQ 3624-120	5789,7	1301,6	18,2	0,7	697,4	27,5
S6	BNQ 3624-120	6016,1	1352,5	18,2	0,7	695,9	27,4
S7	BNQ 3624-120	6441,5	1448,1	18,2	0,7	698,0	27,5
S8	ASTM F894	13364,5	3004,5	18,2	0,7	1290,9	50,8
S9	ASTM F894	12723,5	2860,4	18,2	0,7	1300,4	51,2
S10	ASTM F894	12556,1	2822,7	18,2	0,7	1299,4	51,2

	PS 3%(lbf/po ²)	Écart-type	Erreur (lbf/po ²)	%Erreur	PS 3%(kN/m ²)
S1	70	2	2	2	484
S2	67	2	2	3	464
S3	66	2	2	3	455
S4	67	2	2	3	464
S5	66	2	2	3	455
S6	69	2	2	2	474
S7	73	---	1	1	506
S8	83	3	3	4	569
S9	78	3	3	4	538
S10	77	3	3	4	531

Tableau A3 : Rigidités de tuyau (RSC) des les tuyaux de Weholite à 5% de déformation. (24'')

	Norme	F(N)	F(lbf)	y (mm)	di (mm)	y/di	y%	L(mm)	L(pi)
W1	ASTM F2306	6139,8	1380,3	30,5	613,0	0,05	5,0	607,2	2,0
W2	ASTM F2306	6167,8	1386,6	30,5	613,8	0,05	5,0	606,2	2,0
W3	ASTM F2306	6104,7	1372,4	30,5	613,8	0,05	5,0	605,4	2,0
W4	BNQ 3624-120	6205,7	1395,1	30,5	613,0	0,05	5,0	606,2	2,0
W5	BNQ 3624-120	6076,3	1366,0	30,5	611,2	0,05	5,0	605,1	2,0
W6	BNQ 3624-120	6072,2	1365,1	30,5	611,5	0,05	5,0	607,7	2,0
W7	BNQ 3624-120	6558,9	1474,5	30,5	614,1	0,05	5,0	609,6	2,0
W8	ASTM F894	---	---	---	609,9	---	---	1209,4	4,0
W9	ASTM F894	---	---	---	611,2	---	---	1216,6	4,0
W10	ASTM F894	---	---	---	612,2	---	---	1216,8	4,0

	RSC 5%(lbf/pi)	Écart-type	Erreur (lbf/pi)	%Erreur	RSC 5%(kN/m)
W1	139	1	1	1	2,03
W2	140	1	1	1	2,05
W3	139	1	1	1	2,03
W4	141	1	1	1	2,06
W5	138	1	1	1	2,01
W6	137	1	1	1	2,00
W7	148	---	1	1	2,17
W8	---	---	---	---	---
W9	---	---	---	---	---
W10	---	---	---	---	---

Tableau A4 : Rigidités de tuyau (RSC) des les tuyaux de Soleno à 5% de déformation (24’’)

	Norme	F(N)	F(lbf)	y (mm)	di (mm)	y/di	y%	L(mm)	L(pi)
S1	ASTM F2306	9053,0	2035,2	30,5	606,7	0,05	5,0	699,3	2,3
S2	ASTM F2306	8749,4	1966,9	30,5	608,0	0,05	5,0	695,9	2,3
S3	ASTM F2306	8677,5	1950,8	30,5	608,3	0,05	5,0	699,8	2,3
S4	BNQ 3624-120	8719,5	1960,2	30,5	607,5	0,05	5,0	697,7	2,3
S5	BNQ 3624-120	8622,2	1938,3	30,5	606,2	0,05	5,0	697,4	2,3
S6	BNQ 3624-120	9011,0	2025,8	30,5	604,6	0,05	5,0	695,9	2,3
S7	BNQ 3624-120	9569,6	2151,3	30,5	607,2	0,05	5,0	698,0	2,3
S8	ASTM F894	---	---	---	604,8	---	---	1290,9	4,2
S9	ASTM F894	---	---	---	606,7	---	---	1300,4	4,3
S10	ASTM F894	---	---	---	607,2	---	---	1299,37	4,26

	RSC 5%(lbf/pi)	Écart-type	Erreur (lbf/pi)	%Erreur	RSC 5%(kN/m)
S1	176	3	4	2	2,57
S2	172	3	4	2	2,50
S3	169	3	4	2	2,47
S4	170	3	4	2	2,49
S5	168	3	4	2	2,46
S6	176	3	4	2	2,57
S7	187	---	1	0,7	2,73
S8	---	---	---	---	---
S9	---	---	---	---	---
S10	---	---	---	---	---

Tableau A5 : Rigidités de tuyau (PS) des les tuyaux de Weholite à 3% de déformation. (48'')

	Normes	F(N)	F(lbf)	y (mm)	y (po)	L (mm)	L (po)
W12	ASTM F2306	5408,5	1215,9	36,6	1,4	607,2	23,9
W13	ASTM F2306	5364,9	1206,1	36,6	1,4	610,4	24,0
W14	ASTM F2306	5201,3	1169,3	36,6	1,4	609,1	24,0
W15	BNQ 3624-120	12030,9	2704,7	36,6	1,4	1212,9	47,8
W16	BNQ 3624-120	11394,1	2561,5	36,6	1,4	1215,8	47,9
W17	BNQ 3624-120	11369,2	2555,9	36,6	1,4	1213,1	47,8
W18	BNQ 3624-120	13464,5	3026,9	36,6	1,4	1209,7	47,6
W19	ASTM F894	13997,0	3146,6	36,6	1,4	1217,1	47,9
W20	ASTM F894	13397,0	3011,8	36,6	1,4	1219,2	48,0
W21	ASTM F894	13395,8	3011,5	36,6	1,4	1214,7	47,8

	PS 3% (lbf/po ²)	Écart-type	Erreur (lbf/po ²)	% Erreur	PS 3% (kN/m ²)
W12	35,3	0,7	1,8	5,2	243,3
W13	34,8	0,7	1,8	5,3	240,0
W14	33,8	0,7	1,8	5,5	233,2
W15	39	1	3	8	271
W16	37	1	3	8	256
W17	37	1	3	8	256
W18	44,2	0,9	1,5	3,3	304,5
W19	45,6	0,9	1,5	3,2	314,5
W20	43,6	0,9	1,5	3,4	300,5
W21	43,7	0,9	1,5	3,4	301,6

Tableau A6 : Rigidités de tuyau (PS) des les tuyaux de Soleno à 3% de déformation. (48'')

	Normes	F(N)	F (lbf)	y (mm)	y (po)	L (mm)	L (po)
S12	ASTM F2306	4354,3	978,9	36,6	1,4	742,7	29,2
S13	ASTM F2306	4255,0	956,6	36,6	1,4	745,3	29,3
S14	ASTM F2306	4075,9	916,3	36,6	1,4	694,3	27,3
S15	BNQ 3624-120	7775,9	1748,1	36,6	1,4	1347,0	53,0
S16	BNQ 3624-120	7930,1	1782,8	36,6	1,4	1335,6	52,6
S17	BNQ 3624-120	7691,8	1729,2	36,6	1,4	1347,3	53,0
S18	BNQ 3624-120	7428,3	1670,0	36,6	1,4	1289,6	50,8
S19	ASTM F894	8710,1	1958,1	36,6	1,4	1346,2	53,0
S20	ASTM F894	8351,6	1877,5	36,6	1,4	1297,3	51,1
S21	ASTM F894	8416,2	1892,0	36,6	1,4	1298,0	51,1

	PS 3% (lbf/ipo ²)	Écart-type	Erreur (lbf/ipo ²)	% Erreur	PS 3% (kN/m ²)
S12	23,2	0,4	0,9	3,9	160,1
S13	22,6	0,4	0,9	4,0	155,9
S14	23,3	0,4	0,9	3,9	160,3
S15	22,9	0,5	1,2	5,1	157,7
S16	23,5	0,5	1,2	4,9	162,2
S17	22,6	0,5	1,2	5,1	155,9
S18	23	1	2	10	158
S19	26	1	2	9	177
S20	26	1	2	9	176
S21	26	1	2	9	177

Tableau A7 : Rigidités de tuyau (RSC) des les tuyaux de Weholite à 5% de déformation. (48'')

	Normes	F(N)	F(lbf)	y (mm)	di (mm)	y/di	y%	L(mm)	L(pi)
W12	ASTMF2306	7810,6	1755,9	61,0	1225,6	0,05	5,0	607,2	2,0
W13	ASTMF2306	7814,4	1756,7	61,0	1237,2	0,05	4,9	610,4	2,0
W14	ASTMF2306	7615,1	1712,0	61,0	1226,3	0,05	5,0	609,1	2,0
W15	BNQ 3624-120	17638,8	3965,4	61,0	1219,5	0,05	5,0	1212,9	4,0
W16	BNQ 3624-120	16596,8	3731,1	61,0	1223,4	0,05	5,0	1215,8	4,0
W17	BNQ 3624-120	16682,4	3750,3	61,0	1229,5	0,05	5,0	1213,1	4,0
W18	BNQ 3624-120	19769,2	4444,3	61,0	1226,3	0,05	5,0	1209,7	4,0
W19	ASTMF894	20425,5	4591,8	61,0	1221,6	0,05	5,0	1217,1	4,0
W20	ASTMF894	19814,2	4454,4	61,0	1214,2	0,05	5,0	1219,2	4,0
W21	ASTMF894	19588,0	4403,6	61,0	1231,4	0,05	5,0	1214,7	4,0

	RSC 5%(lbf/pi)	Écart-type	Erreur (lbf/pi)	% Erreur	RSC 5%(kN/m)
W12	177	3	8	4	3
W13	178	3	8	4	3
W14	172	3	8	4	3
W15	199	6	15	8	3
W16	188	6	15	8	3
W17	190	6	15	8	3
W18	225	4	6	3	3
W19	230	4	6	3	3
W20	222	4	6	3	3
W21	223	4	6	3	3

Tableau A8 : Rigidités de tuyau (RSC) des les tuyaux de Soleno à 5% de déformation. (48'')

	Normes	F(N)	F(lbf)	y (mm)	di (mm)	y/di	y%	L (mm)	L(pi)
S12	ASTM F2306	6331,3	1423,3	61,0	1227,9	0,05	5,0	742,7	2,4
S13	ASTM F2306	6235,0	1401,7	61,0	1219,5	0,05	5,0	745,3	2,4
S14	ASTM F2306	5941,1	1335,6	61,0	1221,1	0,05	5,0	694,3	2,3
S15	BNQ 3624-120	11481,6	2581,2	61,0	1217,6	0,05	5,0	1347,0	4,4
S16	BNQ 3624-120	11601,5	2608,1	61,0	1222,6	0,05	5,0	1335,6	4,4
S17	BNQ 3624-120	11458,7	2576,0	61,0	1217,9	0,05	5,0	1347,3	4,4
S18	BNQ 3624-120	12692,6	2853,4	61,0	1214,7	0,05	5,0	1289,6	4,2
S19	ASTM F894	13014,3	2925,7	61,0	1219,7	0,05	5,0	1346,2	4,4
S20	ASTM F894	12376,8	2782,4	61,0	1218,4	0,05	5,0	1297,3	4,3
S21	ASTM F894	12409,1	2789,7	61,0	1220,5	0,05	5,0	1298,0	4,3

	RSC 5%(lbf/pi)	Écart-type	Erreur (lbf/pi)	% Erreur	RSC 5%(kN/m)
S12	118	2	4	4	2
S13	115	2	4	4	2
S14	117	2	4	4	2
S15	117	2	4	3	2
S16	119	2	4	3	2
S17	116	2	4	3	2
S18	134	2	3	2	2
S19	132	2	3	2	2
S20	131	2	3	2	2
S21	131	2	3	2	2

Annexe 3- Mesure des tuyaux

Mesure des tuyaux de 610 mm (2 pi)

Soleno 24''

ASTM F2306 - Déplacement : 35 mm Vitesse : 12,5 mm/min

	Longueur (po)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)	Conversion (mm)
S-1	24	27,47	27,56	27,50	27,53	0,05	699,0
S-2	24	27,56	27,38	27,25	27,4	0,2	696,0
S-3	24	27,56	27,47	27,63	27,55	0,08	700,0

	Diamètre (po)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Ecart-type (po)	Conversion (mm)
S-1	24	23,88	23,94	23,84	23,89	0,05	613,0
S-2	24	24,00	23,88	23,94	23,94	0,06	613,8
S-3	24	23,97	23,91	23,97	23,95	0,04	613,8

	Épaisseur réelle (mm)							
S-1	5,89	6,22	6,34	6,61	6,75	6,45	5,91	5,83
S-2	6,47	6,03	6,17	6,04	6,38	6,41	6,20	6,29
S-3	6,00	6,07	6,02	5,56	5,35	5,64	6,46	6,29

Remarque :

S-1 : Photos 110-44-48 ; test effectué à 21,8°C ; position 0°.

S-2 : Photos 110-50-54 ; test effectué à 21,8°C ; position 45°.

S-3 : Photos 111-1-2 ; test effectué à 21,6°C ; position 90°.

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

BNQ-3624-120 - Déplacement : 35 mm (3x); 130 mm (1x)* Vitesse : 12,5 mm/min (<5min)

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
S-4	2	27,44	27,44	27,53	27,47	0,05
S-5	2	27,50	27,53	27,34	27,46	0,1
S-6	2	27,44	27,31	27,4	27,40	0,07
S-7	2	27,31	27,47	27,47	27,48	0,2

	Diamètre (po)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
S-4	24	23,94	23,94	23,88	23,92	0,04
S-5	24	23,94	23,84	23,81	23,86	0,07
S-6	24	23,81	23,81	23,78	23,80	0,02
S-7	24	23,94	23,91	23,88	23,91	0,03

	Épaisseur réelle (mm)							
S-4	5,61	5,42	5,92	5,80	6,05	6,32	6,47	6,06
S-5	5,60	6,15	6,71	6,50	6,09	6,22	5,80	5,46
S-6	6,14	5,02	5,36	4,46	5,15	4,70	6,85	6,85
S-7	5,72	5,80	6,40	6,44	6,16	6,02	5,86	5,52

Remarque :

S-4 : Photos 111-3 ; test effectué à 21,4°C ; position 0°.

S-5 : Photos 110-49 ; test effectué à 21,6°C ; position 35°.

S-6 : Photos 111-4-5 ; test effectué à 21,6°C ; position 70°.

S-7 : Photos 111-6-7 ; test effectué à 21,6°C ; position 0° Vitesse 30 mm/min ; autres photos 111-8-17 2 pouces de déformations semi-permanente après 1h30.

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

ASTM F894 - Déplacement : 22 mm Vitesse 0,8 mm/min

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)	Conversion (mm)
S-8	4	50,88	50,81	50,78	50,82	0,05	1290,9
S-9	4	51,19	51,19	51,22	51,20	0,02	1300,4
S-10	4	51,22	51,16	51,09	51,15	0,06	1299,4

	Diamètre (po)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)	Conversion (mm)
S-8	24	23,88	23,78	23,78	23,81	0,05	604,8
S-9	24	23,94	23,84	23,88	23,89	0,05	606,7
S-10	24	23,94	23,91	23,88	23,91	0,03	608,2

	Épaisseur réelle (po)							
S-8	6,58	5,71	5,49	5,86,2	58	6,33	6,16	6,32
S-9	6,27	5,93	6,06	6,23	5,72	5,29	5,33	6,31
S-10	5,69	5,96	5,87	6,06	6,06	6,234	6,45	5,77

Remarque :

S-8 : Photos 111-29 ; test effectué à 21,8°C ; position 0°.

S-9 : test effectué à 21,4°C ; position 35°.

S-10 : Photos 111-27-28 ; test effectué à 21,4°C ; position 70°.

Les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

Hors-Norme

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Conversion (mm)
S-11	2	27,38	27,41	27,47	27,42	696,4

	Diamètre (po)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Conversion (mm)
S-11	24	23,88	23,61	23,88	23,85	605,9

	Épaisseur réelle (po)							
W-11	6,48	6,16	5,94	6,00	6,23	6,10	5,92	6,11

Weholite 24''

ASTM F2306 - Déplacement : 35 mm Vitesse : 12,5 mm/min

	Longueur (po)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)	Conversion (mm)
W-1	24	23,97	23,94	23,81	23,91	0,08	607,2 ^v
W-2	24	23,81	23,97	23,81	23,86	0,09	606,2
W-3	24	23,84	23,72	23,94	23,83	0,1	605,4

	Diamètre (po)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Ecart-type (po)	Conversion (mm)
W-1	24	24,09	24,19	24,13	24,14	0,05	613,04
W-2	24	24,13	24,13	24,25	24,17	0,07	613,83
W-3	24	24,19	24,16	24,16	24,17	0,02	613,83

	Épaisseur réelle (mm)							
W-1	5,62	5,15	5,36	5,58	5,63	5,41	5,38	5,28
W-2	5,37	5,48	5,58	5,38	5,45	5,60	5,71	5,69
W-3	5,16	5,43	5,32	5,35	5,74	5,36	5,21	4,92

Remarque :

W-1 : Photos 110-1-4 ; test effectué à 21,6°C ; position 0°.

W-2 : Photos 110-11-12 ; test effectué à 21,6°C ; position 45°.

W-3 : Photos 110-13-16 ; test effectué à 21,8°C ; position 90°.

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

BNQ-3624-120 - Déplacement : 35 mm(3x) 130mm(1x) Vitesse : 12,5 mm/min(<5min)

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)	Conversion (mm)
W-4	2	23,94	23,91	23,75	23,9	0,1	606,2
W-5	2	23,75	23,88	23,84	23,82	0,07	605,1
W-6	2	23,94	23,97	23,88	23,93	0,07	607,7
W-7.2	2	24,13	23,88	24,00	24,0	0,1	609,6

	Diamètre (po)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)	Conversion (mm)
W-4	24	24,25	24,19	23,97	24,1	0,1	608,8
W-5	24	24,19	24,13	23,88	24,06	0,2	606,4
W-6	24	24,16	24,06	24,00	24,07	0,08	609,6
W-7.2	24	24,13	24,16	24,25	24,18	0,07	616,0

	Épaisseur réelle (mm)							
W-4	6,04	5,31	5,22	5,23	5,46	5,40	5,24	5,24
W-5	5,29	5,46	5,41	5,48	5,35	5,88	5,22	5,23
W-6	5,56	5,93	5,56	6,05	5,31	5,09	5,01	5,47
W-7.2	5,28	5,20	5,06	5,11	5,15	5,94	5,46	5,53

Remarque :

W-4 : Photos 110-17-20 ; test effectué à 22,2°C ; position 0°.

W-5 : Photos 110-21-23 ; test effectué à 22,2°C ; position 35°.

W-6 : Photos 110-24-27 ; test effectué à 22,4°C ; position 70°.

W-7 : Photos 111-20-21 ; test effectué à 22,6°C ; position 0° ; Vitesse 30 mm/min ; déformation autres photos 111-22-26 rayon 23" 1/8.

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

ASTM F894 - Déplacement : 22 mm Vitesse 0,8 mm/min

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)	Conversion (mm)
W-8	4	47,75	47,94	47,16	47,61	0,034	1 209,4
W-9	4	47,88	47,88	47,94	47,90	0,034	1 216,6
W-10	4	47,91	47,88	47,94	47,91	0,03	1 216,8

	Diamètre (po)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)	Conversion (mm)
W-8	24	24,16	24,00	23,88	24,01	0,1	609,9
W-9	24	24,13	23,94	24,13	24,06	0,1	611,2
W-10	24	24,13	24,19	24,00	24,10	0,1	612,2

	Épaisseur réelle (mm)							
W-8	5,20	5,83	4,83	4,86	5,40	5,25	5,62	5,40
W-9	5,27	5,35	5,69	5,66	5,68	5,30	5,12	5,09
W-10	5,55	5,26	5,18	5,36	5,39	5,54	5,62	5,29

Remarque :

W-8 : Photos 111-30-32 ; test effectué à 21,4°C ; position 0°.

W-9 : Photos 110-36-39 ; test effectué à 21,4°C ; position 35°.

W-10 : Photos 110-40-43 ; test effectué à 21,4°C ; position 70°.

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

Hors-Norme

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Conversion (mm)
W-11	2	28,16	28,00	28,16	28,10	713,8

	Diamètre (po)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Conversion (mm)
W-11	24	24,13	24,00	24,09	24,07	611,5

	Épaisseur réelle (mm)							
W-11	5,34	5,21	5,58	7,01	5,03	5,25	5,30	5,40

Soleno 48''

ASTM F2306 - Déplacement : 65 mm Vitesse : 12,5 mm/min

	Longueur (pi) :	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
S-12	2	29,31	29,28	29,13	29,2	0,1
S-13	2	29,59	29,22	29,22	29,3	0,2
S-14	2	27,28	27,28	27,44	27,33	0,09

	Diamètre (pi)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
S-12	4	48,13	49,13	47,78	48,3	0,7
S-13	4	48,13	48,31	47,59	48,0	0,4
S-14	4	48,13	48,03	48,06	48,07	0,05

	Épaisseur réelle (mm)							
S-12	7,02	7,87	8,30	8,28	7,42	5,99	6,13	5,70
S-13	5,72	6,72	7,40	7,73	8,29	7,53	6,90	5,53
S-14	7,66	7,95	8,39	7,60	6,97	5,66	6,58	6,21

Remarques

S-12 : Photo 107-0092-95

S-13 : Photo 107-0088-89

S-14 : Photo 107-0090-91

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

BNQ-3624-120 - Déplacement : 65 mm (3x); 250 mm (1x)* Vitesse : 12,5 mm/min; 50,8 mm/min

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
S-15	4	52,91	53,19	53,00	53,0	0,1
S-16	4	51,97	52,88	52,91	52,6	0,5
S-17	4	53,38	52,91	52,84	53,0	0,3
S-18*	4	50,75	50,78	50,78	50,77	0,02

	Diamètre (pi)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
S-15	4	48,13	47,94	47,75	47,9	0,2
S-16	4	48,19	48,16	48,06	48,14	0,07
S-17	4	48,16	47,94	47,75	47,9	0,2
S-18*	4	48,03	48,00	47,44	47,8	0,3

	Épaisseur réelle (mm)							
S-15	7,32	7,96	7,61	7,65	7,18	7,68	5,54	7,05
S-16	7,65	8,05	8,25	7,89	6,51	5,68	5,81	6,69
S-17	7,90	6,33	6,40	5,89	6,78	7,93	7,54	7,77
S-18*	7,29	6,00	7,44	7,46	7,54	8,38	8,84	7,08

Remarques

S-15 : Photo 107-0063-65

S-16 : Photo 107-0066-67

S-17 : Photo 107-0068-69

S-18* : Photo 107-0070-73

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

ASTM F2306 - Déplacement : 65 mm Vitesse : 50,8 mm/min

	Longueur (pi):	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
S-19	4	53,16	52,94	52,91	53,0	0,1
S-20	4	50,97	51,09	51,16	51,1	0,1
S-21	4	51,25	51,00	51,06	51,1	0,1

	Diamètre : (pi)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
S-19	4	47,97	48,03	48,06	48,02	0,05
S-20	4	47,91	47,91	48,09	48,0	0,1
S-21	4	47,97	48,06	48,13	48,05	0,08

	Épaisseur réelle (mm)							
S-19	6,58	5,60	6,51	6,04	7,83	7,69	8,19	8,01
S-20	6,42	7,34	8,26	7,59	7,33	5,79	5,04	5,20
S-21	6,98	7,87	8,07	8,13	6,46	5,36	5,92	6,29

Remarques

S-19 : Photo 107-0076-80

S-20 : Photo 107-0081-84

S-21 : Photo 107-0085-87

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

Weholite 48''

ASTM F2306 - Déplacement : 65 mm Vitesse : 50,8 mm/min

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
W-19	4	47,88	47,94	47,94	47,92	0,04
W-20	4	47,94	48,09	47,97	48,00	0,08
W-21	4	47,94	47,88	47,66	47,8	0,2

	Diamètre (pi)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
W-19	4	48,00	48,25	48,03	48,1	0,1
W-20	4	47,66	47,88	47,88	47,8	0,1
W-21	4	48,38	48,28	48,78	48,5	0,3

	Épaisseur réelle (mm)							
W-19	67,61	68,09	68,33	67,64	67,72	64,48	66,50	53,84
W-20	59,18	67,42	67,13	67,78	67,98	66,18	62,42	54,41
W-21	68,44	68,71	69,80	67,54	65,64	51,66	63,48	67,18

Remarques

W-12 : Photo 107_1511-0057-62

W-13 : Photo 107-0049-56

W-14 : Photo 107-0047-48

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

BNQ-3624-120 - Déplacement : 65 mm(3x);250 mm(1x)* Vitesse : 12,5 mm/min; 50,8 mm/min

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
W-15	4	47,75	47,81	47,69	47,75	0,06
W-16	4	47,94	47,91	47,75	47,9	0,1
W-17	4	47,66	48,00	47,63	47,8	0,2
W-18*	4	47,38	47,63	47,88	47,6	0,3

	Diamètre (pi)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
W-15	4	47,88	47,84	48,31	48,0	0,3
W-16	4	48,19	48,09	48,22	48,17	0,07
W-17	4	48,38	48,38	48,47	48,41	0,05
W-18*	4	48,25	48,69	47,91	48,3	0,4

	Épaisseur réelle (mm)							
W-15	67,23	68,56	65,80	66,40	67,60	66,99	69,44	69,74
W-16	69,60	67,21	52,90	54,28	59,16	65,33	66,96	66,23
W-17	66,17	66,52	66,90	66,95	67,98	69,67	57,12	64,39
W-18*	66,09	56,25	59,80	66,44	67,33	55,98	66,64	66,84

Remarques

W-15 : Photo 107-0032-46

W-16 : Photo 107-0027-32

W-17 : Photo 107-0020-26

W-18* : Photo 107-0011-19

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

ASTM F2306 - Déplacement : 65 mm Vitesse : 12,5 mm/min

	Longueur (pi)	Longueur réelle (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
W-12	2	23,94	23,91	23,88	23,91	0,03
W-13	2	23,97	24,06	24,06	24,03	0,05
W-14	2	23,88	24,06	24,00	23,98	0,10

	Diamètre (pi)	Diamètre réel (po)			Moyenne (po)	Écart-type (po)
W-12	4	48,50	47,97	48,28	48,25	0,27
W-13	4	49,06	48,66	48,41	48,71	0,33
W-14	4	48,63	48,13	48,09	48,28	0,30

	Épaisseur réelle (mm)							
W-12	50,51	66,13	66,16	67,08	66,54	65,67	64,12	58,80
W-13	57,73	60,44	66,27	67,84	62,24	67,03	67,12	66,68
W-14	67,09	67,75	59,54	62,48	65,14	69,24	68,79	66,78

Remarques

W-19 : Photo 107-0001

W-20 : Photo 107-002-3

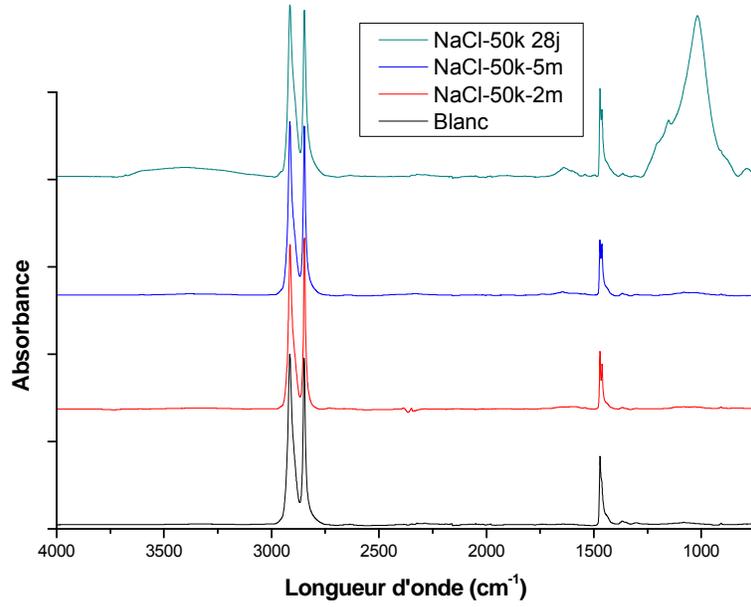
W-21 : Photo 107-0004-10

Note : les numéros de photos se réfèrent à des fichiers transmis précédemment

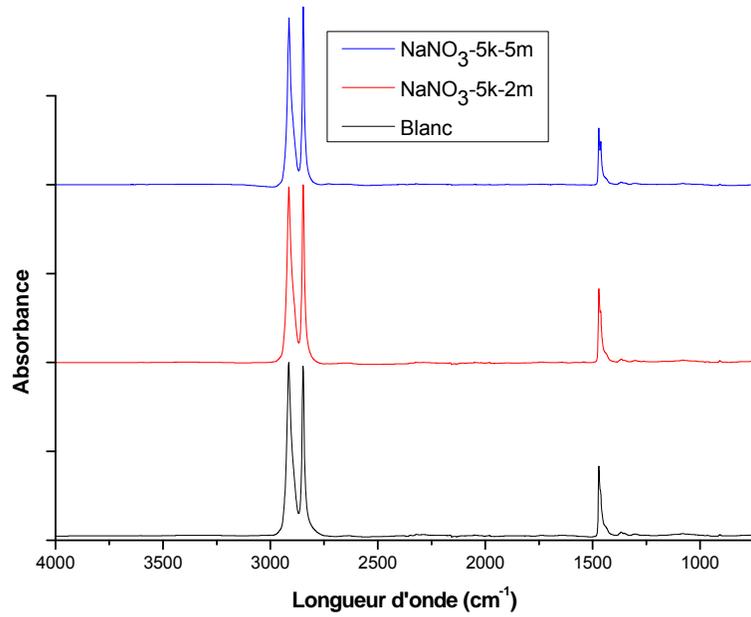
Annexe 4

Spectres infrarouge des échantillons vieillis en laboratoire et prélevés sur le terrain

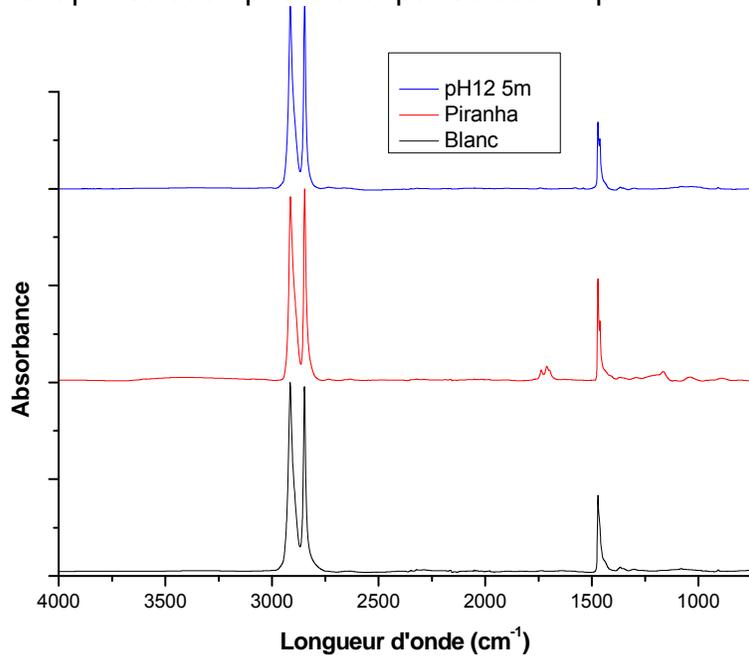
Vieillissement par NaCl



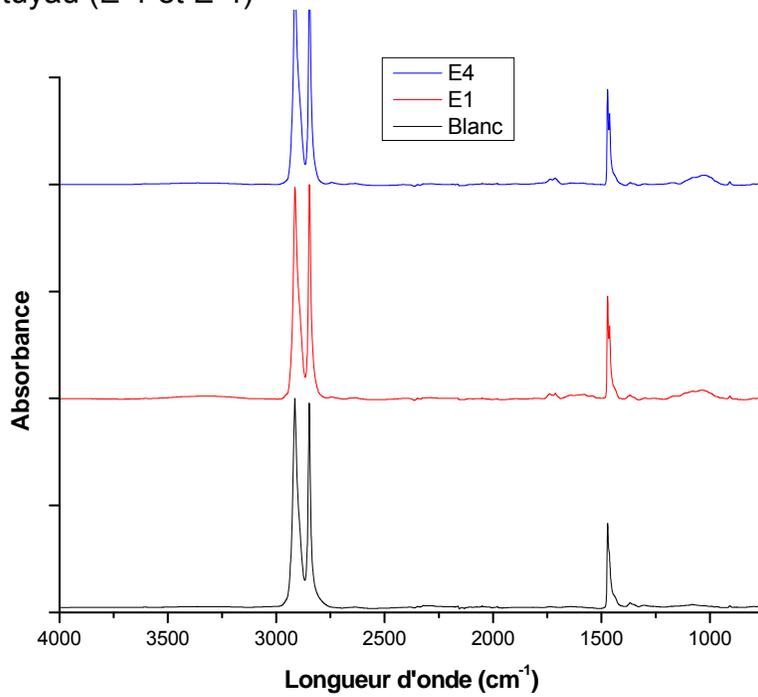
Vieillissement par NaNO_3



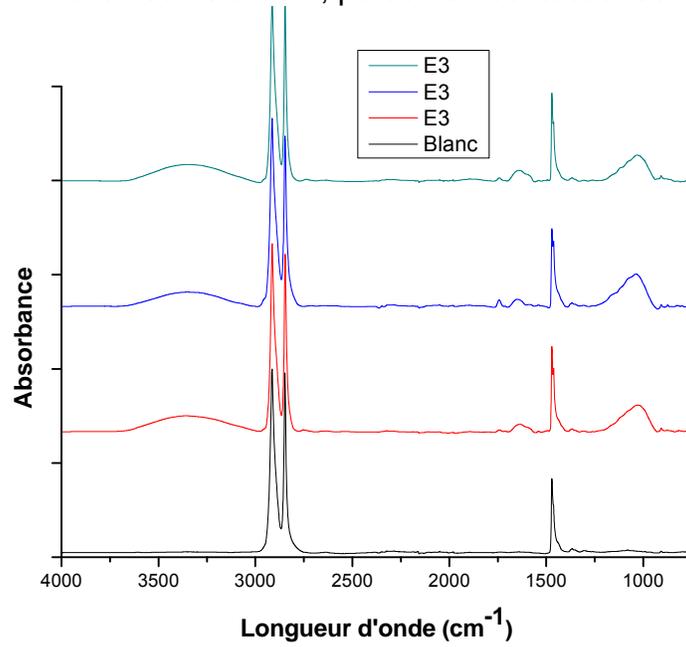
Vieillessement par solution piranha et par solution à pH 12



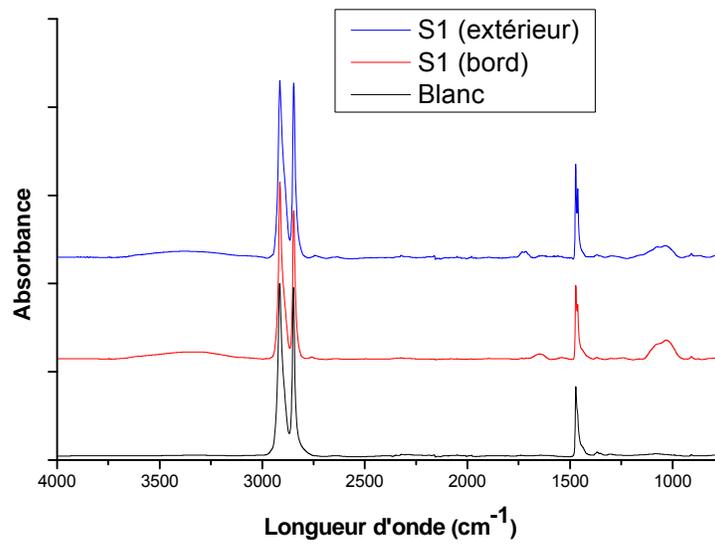
Weholite (Échantillons prélevés sur le terrain, sections externes du tuyau (E-1 et E-4))



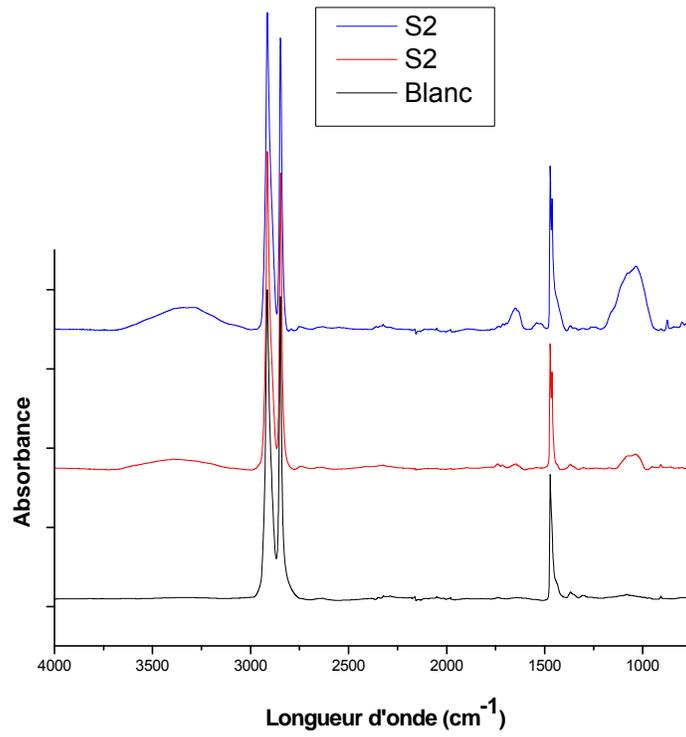
Weholite (échantillon sur le terrain, portion en contact avec l'eau E-3)



Soleno- échantillon prélevé sur le terrain S-1



Soleno- Échantillon prélevé sur le terrain S2

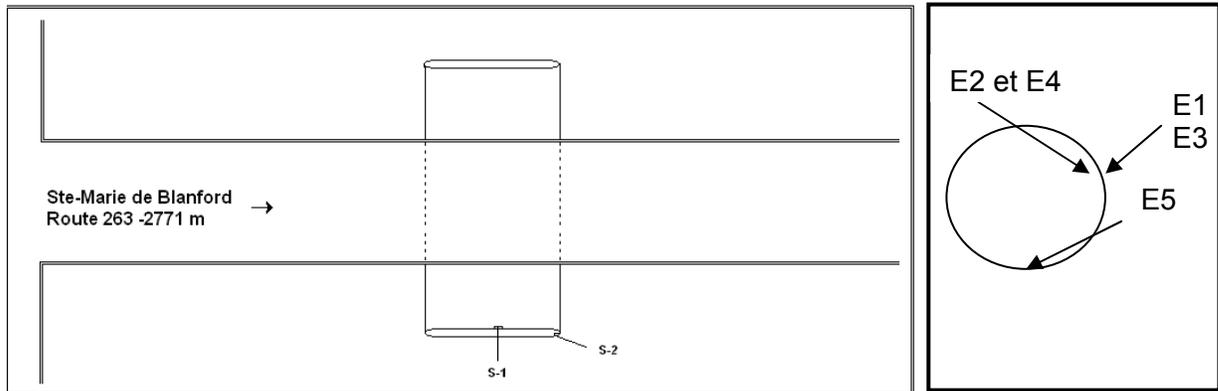


Annexe 5
Lieu et position de cueillette des échantillons sur le terrain

Soleno – 3 février 2012

Échantillonnage tuyau Soleno, route 263 Ste-Marie de Blanford (2771 m intersection).

Dessin du site : vue transversale à droite et vue longitudinale à gauche

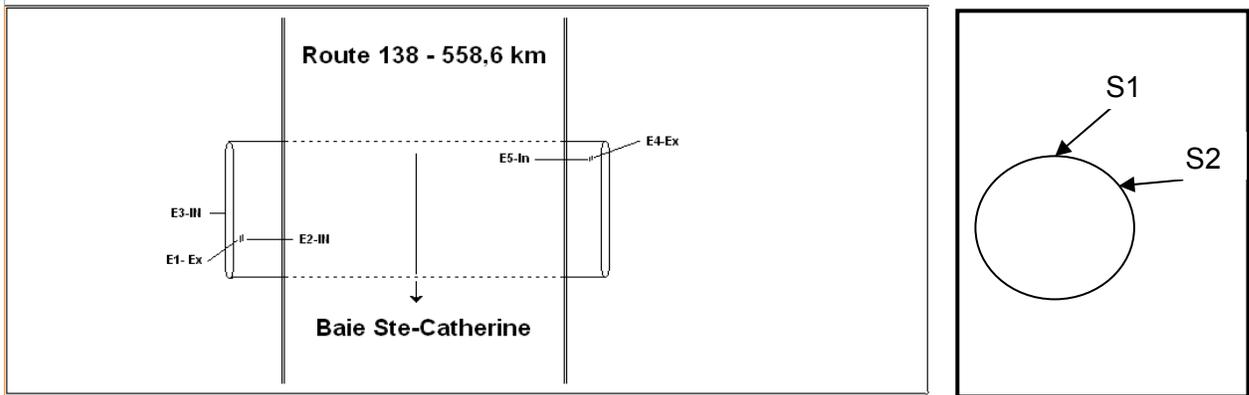


Échantillon No	Remarques
S1	Échantillon prélevé au bord , en haut
S2	Échantillon prélevé à mi-hauteur du tuyau, à droite

Weholite - 12 décembre 2011

Échantillonnage tuyau Weholite Baie Ste-Catherine, ponceau km 558,6 sur la 138 (RTSS 138-08-222-000C chainage 5+997)

Dessin du site : vue transversale à droite et vue longitudinale à gauche



Échantillon No	Remarques
E1	Échantillon prélevé à 1 po du bord du tuyau, photo 107-0001
E2	Échantillon prélevé à 400mm du bord, intérieur du tuyau, photo 2-0002-0006
E3	Échantillon intérieur, prélevé du côté du ruisseau, photo 0007-0008
E4	Échantillon extérieur, photo 0009
E5	Échantillon intérieur

Annexe 6 - Photos d'échantillons prises sur le terrain

Weholite (Baie Ste-Catherine)

1) E-1 (paroi extérieure du tuyau)



2) E-2 (paroi intérieure du tuyau, même position de prélèvement que E-1)



2) E-3: bord intérieur en contact avec l'eau



4) E-5 (paroi intérieure du tuyau)



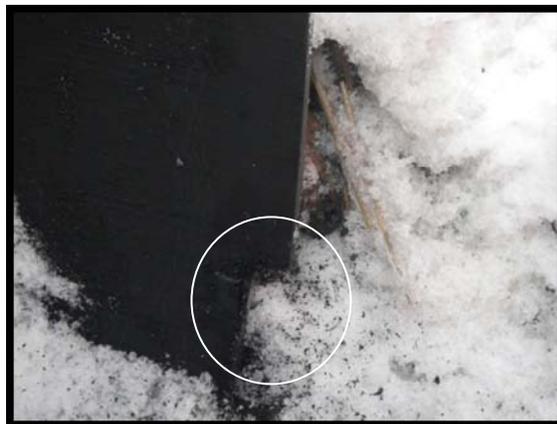
Note : Le cercle indique l'endroit où l'échantillon a été prélevé

Soleno – Ste-Marie de Blandford

1) S-1 : bord extérieur du tuyau, partie supérieure de celui-ci



2) S-2 : bord extérieur du tuyau, à mi-hauteur de celui-ci



Note : Le cercle indique l'endroit où l'échantillon a été prélevé

Bibliographie

1. EHRENSTEIN G. W. et MONTAGNE, F *Matériaux polymères, structure, Propriétés et applications*, Hermes, Paris, 2000 p. 27.
2. *Design Guide Residential PEX Water Supply Plumbing Systems*, Plastic Pipe Institute, novembre 2006, p.128, http://plasticpipe.org/publications/pex_handbook.html, consulté le 12 août 2011.
3. Plastic Pipe Institute, *Handbook of Polyethylene Pipe*, Second edition, Chapitre 1, 640 p.
4. Plastic Pipe Institute, *Handbook of Polyethylene Pipe*, Second edition, Chapitre 3, 640 p.
5. *The Wiley Database of Polymer Properties*, Wiley, Hoboken, N.J. 2003, DOI 10.1002/04715, <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/0471532053> consulté le 10 juillet 2011.
6. Site web de la Ductile Iron Society, <http://www.ductile.org> consulté le 20 juillet 2011.
7. O'CONNOR C., *The Nature of Polyethylene Pipe Failure*, Modern Plastics Worldwide, Mars 2011, p. 20.
8. HSUAN Y.G., MCGRATH T.J., *HDPE Pipe: Recommended Material Specifications and Design Requirements, NCHRP Report 429*, National Cooperative Highway Research Program, National Academy Press, Washington, D.C. 1999.
9. BONDS R. W., *Ductile Iron Pipe Versus HDPE Pipe*, Ductile Iron Pipe Research Association, USA, 2000, 13 p.
10. COWIE J.M.C. *Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials*, Londres, Intertext, 1973, p. 232.
11. PAINTER P.C. et COLEMAN M. M. *Fundamentals of Polymer Science: An Introductory Text*, Technomic Pub, Lancaster, 1994, 433 p.
12. MANO J. F., SOUSA R. A., REIS R. L., CUNHA A. M. et BEVIS M. J. *Viscoelastic Behaviour and Time-Temperature Correspondence of HDPE*

- with Varying Levels of Process-Induced Orientation*, Polymer, vol. 42, 2001, p. 6187.
13. *HDPE Physical Properties*, Marley Pipesystems, 2010, 11.p.
 14. FRIED N. L., *Polymer Science and Technology*, Prentice Hall, New Delhi, 2000, 216 p.
 15. POPELAR C. F., POPELAR C. H. et KENNER V. H., *Material Characterization and Modeling for Polyethylene*, Polymer Engineering and Science, vol. 30, 1990, p. 577.
 16. PANKOW V. R., *Dredging Applications of High Density Polyethylene Pipe Hydraulics Laboratory*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS 39180-0631, 1987.
 17. YABUKI A., SUGITA K., MATSUMURA M. et HIRASHIMA M., TSUNAGA M., *The Anti-Slurry Erosion Properties of Polyethylene for Sewerage Pipe Use*, Wear, 240, 2000, p. 52.
 18. KAFIEH R., LOTFI T. et AMIRFATTAHI R., *Automatic Detection of Defects on Polyethylene Pipe Welding Using Thermal Infrared Imaging*, *Infrared Physics & Technology*, vol. 54, 2011, p. 317.
 19. CHOLEWA J.A., BRACHMAN R.W.I. et MOORE I.D., *Stress–Strain Measurements for HDPE Pipe During and After Simulated Installation by Horizontal Directional Drilling, Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, 2010, p. 773.
 20. CHENG J. J., POLAK M.A. et PENLIDIS A., *Influence of Micromolecular Structure on Environmental Stress Cracking Resistance of High Density Polyethylene*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 26, 2011, p. 582.
 21. CHEHAB A.G. et MOORE I. D., *Parametric Study Examining the Short and Long Term Response of HDPE Pipes When Installed by Horizontal Directional Drilling*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, 2010, p. 782.

22. JAR p.-Y.B, ADIANTO R. et MUHAMMAD S., *A Mechanistic Approach for Determining Plane-Stress Fracture Toughness of Polyethylene*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 77, 2010, p. 2881.
23. NITTA K.-H. et MAEDA H., *Creep Behavior of High Density Polyethylene Under a Constant True Stress*, Polymer Testing, vol. 29, 2010, p. 60.
24. XIN S., HONGWANG S., BANGHU X., WEI Y. et MINGBO Y., *Fracture Behavior of Bimodal Polyethylene: Effect of Molecular Weight Distribution Characteristics*, Polymer, vol. 52, 2011, p. 564.
25. MOGHADDAS TAFRESHI S.N. et KHALAJ O., *Analysis of Repeated-Load Laboratory Tests on Buried Plastic Pipes in Sand*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 31, 2011, p. 1.
26. BENHAMENA A., AMINALLAH L., BACHIR BOUIADJRA B., BENGUEDIAB M., AMROUCHE A. et BENSEDDIQ N., *Integral Solution for Semi-Elliptical Surface Crack in High Density Poly-Ethylene Pipe Under Bending*, Materials & Design, vol. 32, 2011, p. 2561.
27. FRANK A., PINTER G. et LANG R.W., *Prediction of the Remaining Lifetime of Polyethylene Pipes After Up to 30 Years in Use*, Polymer Testing, vol. 28, 2009, p. 737.
28. LEMAITRE J. et DESMORAT R., *Engineering Damage Mechanics Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*, Berlin, Springer, 2005, 380 p.
29. MESSLER R.W. Jr, *The Essence of Materials for Engineers*, Sudbury, Jones & Bartlett Learning, 2011, 554 p.
30. ABOLMAALI A., MOTAHARI A. et HUTCHESON J., *Evaluation of PEHD Pipelines Structural Performance*, University of Texas at Arlington, Department of Civil and Environmental Engineering, 2009, 333 p.
31. CHAOUI K., KHELIF R., ZEGHIB N. et CHATEAUNEUF A., *Failure Analysis of Polyethylene Gas Pipes, Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines*, NATO Science for Peace and Security Series, 2008, p.131.

- 32 CHOI B.-H., ZHOU Z., CHUDNOVSHY A., STIVALA S.S., SEHANOBISH K. et BOSNYAK C.P., *Fracture Initiation Associated with Chemical Degradation : Observation and Modelling*. International Journal of Solids and Structures, vol. 42, 2005, p. 681.
- 33 CHOI B.-H., CHUDNOVSKY A. et SEHANOBISH K., *Stress Corrosion Cracking in Plastic Pipes : Observation and Modeling.*, Intelligence Journal Fracture, vol. 145, 2007, p. 81.
- 34 TERSELIUS B., GEDDE U.W. et JANSSON J.-F., *Structure and Morphology of Thermally Oxidized High Density Polyethylene Pipes*, Polymer Engineering and Science, vol. 22, 1982, p. 422.
- 35 ASTM D2412, ASTM International, *Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading*, 2002 R2008, 6.p.
- 36 ASTM F2306, ASTM International, *Standard Specification for 12 to 60 in.[300 to 1500 mm] Annular Corrugated Profile-Wall Polyethylene (PE) Pipe and Fittings for Gravity-Flow Storm Sewer and Subsurface Drainage Applications*, 2008, 6.p.
- 37 ASTM F894, ASTM International, *Standard Specification for Polyethylene (PE) Large Diameter Profile Wall Sewer and Drain Pipe*, 2007, 9.p.
- 38 Norme International ISO 9969, 2^e édition, *Tube en matière thermoplastiques – Détermination de la rigidité annulaire*, 2007, 14.p.
- 39 Norme BNQ 3624-120 Tuyaux et raccords en polyéthylène (PE) – Tuyaux à profil ouvert à paroi intérieur lisse pour l'égout pluvial et le drainage des sols – Caractéristiques et méthodes d'essais, 2006, 43.p.
- 40 Association Canadien de Normalisation, Norme CSA B182.8, *Tuyaux d'évacuation et d'égout à paroi profilée et raccords en polyéthylène (PE)*, 2006, 21 p.
41. *Design Service Life Of Corrugated HDPE Pipe TR-43/2003*, Plastics Pipe Institute, www.plasticpipe.org, Washington, 2003, 13 p.

42. KURDZIEL J.M. et PALERMO E.F., *Stress Crack Resistance of Structural Members in Corrugated High Density Polyethylene Pipe*, Transport Research Board (TRB) Annual Meeting, 2007, consulté sur le site web du Plastic Pipe Institute, <http://www.plasticspipe.com/docs/32.pdf>, le 5 juin 2011.
43. LU X. et BROWN N., *The Ductile-Brittle Transition in a Polyethylene Copolymer*, Journal of Materials Science, vol. 25, 1990, p. 29-34.
44. CHUDNOVSKY A., MANUEL UY O. et WIENHOLD P.D., *Service Life of HDPE Drain Pipe : the Recently Proposed Specification and an Alternative Approach*, Pipelines, 2005, p. 1117.
45. BURK R.C., OLMSTED III J. et WILLIAMS G., *Chemistry*, Canadian Edition, Wiley, Canada, 2010, p. 1216.
46. Florida State Testing Methods, disponible sur le site web du Florida Department of Transportation, <http://www.dot.state.fl.us/statematerialsoffice/administration/resources/library/publications/fstm/fstmpage6.shtm>, consulté le 29 juillet 2011.
47. SCHOUWENAARS R, JACOBO V.H., RAMOS E. et ORTIZ A., *Slow Crack Growth and Failure Induced by Manufacturing Defects in HDPE Tubes*, Engineering Failure Analysis, vol. 14, 2007, p. 1124.
48. CHOI B.M., CHUDNOVSKY R., PARADKAR R., MICHIE W., ZHOU Z. et CHAM P.M., *Experimental and Theoretical Investigation of Stress Corrosion Crack (SCC) Growth of Polyethylene Pipes*, Polymer Degradation Stability, vol. 94, 2009, p.859.
49. WARD I., LU X., HUANG Y. et BROWN N., *The Mechanism of Slow Crack Growth in Polyethylene by an Environmental Stress Cracking Agent*, Polymer, vol. 32, 1991, p. 2172.
50. TR-19/2007 *Chemical Resistance of Thermoplastics Piping Materials*, Plastic Pipe Institute, www.plasticspipe.org, p. 47.
51. *Thermal Expansion and Contraction in Plastics Piping Systems*, PPI TR-21/2001, Plastic Pipe Institute, 2001, p. 28.

52. NEZBEDOVA E., ZAHRADNICKOVA A. et SALAJKA Z., *Brittle Failure Versus Structure of HDPE Pipe Resins*, Journal of Macromolecular Science, Part B, vol. 40, 2001, p. 507.
53. NEZBEDOVA E., KUCERA J. et ZAHRADNICKOVA A., *Relation of Slow Crack Growth Failure Time to Structure of HDPE*, Mechanics of Time-Dependent Materials, vol. 5, 2001, p. 67.
54. LUCKEY S.G. Jr, HENSHAW J.M., DEWAN C., ELTANANY G.M. et TEETERS D., *Analysis of a Blow-Molded HDPE Bottle that Failed by Brittle Failure*, Engineering Failure Analysis, vol. 8, 2001, p. 361.
55. KITAO K., *A Study of Brittle-Ductile Transition in Polyethylene*, Polymer Engineering and Science, vol.37, 1997, p.777.
56. KRIPTON I., *Some Aspect of the Degradation and Stabilization of Philips Type Polyethylene*, Ph D. Thesis, Laboratory of Plastic and Rubber Technology, University of Budapest, 2010, 111 p.
57. HSUAN Y.G. et KOERNER R.M., Honorary Member, ASCE, *Antioxidant Depletion Lifetime in High Density Polyethylene Geomembranes*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 124, 1998, p. 532.
58. *Thermoplastic Polymer Additives*, LUTZ J.T. Jr. ed., Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1989, 523 p.
59. SHELTON J. R., *Stabilization Against Thermal Oxidation in Polymer Stabilization*, W. L. Hawkins, Ed., Wiley, New York, 1972, p. 104.
60. HOLMSTROM A., ANDERSSON A. et SORVIK E.M., *On the Effect of Mechanical Energy on the Degradation of Polyethylene in the Solid State and in the Melt*, Polymer Engineering and Science, vol. 17, 1977, p. 728.
61. EL'DAROV E.G., MAMEDOV F.V., GOLDBERG V.M. et ZAIKOV G.E, *A Kinetic Model of Polymer Degradation During Extrusion*, Polymer Degradation and Stability, vol. 51, 1996, p. 271.
62. GUGUMUS F., *Physico-Chemical Aspects of Polyethylene Processing in an Open Mixer 2. Functional Group Formation on PE-LD Processing*, Polymer Degradation and Stability, vol. 67, 1999, p. 35.

63. IRING M. and TUDOS F., *Thermal Oxidation of Polyethylene and Polypropylene: Effects of Chemical Structure and Reaction Conditions on the Oxidation Process*, Progress in Polymer Science vol. 15, 1990, p. 217
64. HINSKEN H., MOSS S., PAUQUET J.R. and ZWEIFEL H., *Degradation of Polyolefins During Melt Processing*, Polymer Degradation and Stability, vol. 34, 1991, p. 279.
65. GUGUMUS F., *Physico-Chemical Aspects of Polyethylene Processing in Open Mixer 1: Review of Published Work*, Polymer Degradation and Stability, vol. 66, 1999, p. 161.
66. GUGUMUS F., *Physico-Chemical Aspects of Polyethylene Processing in an Open Mixer. Part 3. Experimental Kinetics of Functional Group Formation*, Polymer Degradation and Stability, vol. 68, 2000, p. 21.
67. GUGUMUS F., *Physico-Chemical Aspects of Polyethylene Processing in an Open Mixer. 4. Comparison of PE-LLD and PE-HD with PE-LD*, Polymer Degradation and Stability, vol. 68, 2000, p. 219.
68. RIDEAL G.R. et PADGET J.C., *The Thermal-Mechanical Degradation of High Density Polyethylene*, Journal of Polymer Science Symposium, vol. 57, 1977, p. 1.
69. MARIA R., RODE K., BRÜLI R., DORBATH F., BAUDRIT B., BASTIAN M. et BRENDLÉ E., *Monitoring the Influence of Different Weathering Conditions on Polyethylene Pipes by IR-Microscopy*, Polymer Degradation and Stability, vol. 96, 2011, p. 1901.
70. *Chemical Resistance of Thermoplastics Piping Materials*, TR-19 2007, Plastics Pipe Institute, Irving Tx, 2007, 47 p.
71. HENRY J. L. et GARTON A. *Thermal Oxidation of Polyethylene in Aqueous Environments*, Polymer Preprints, vol.30,no 1, 1989 p.183.
72. HENRY J.L. et GARTON A. *Oxidation of Polyethylene in Water and Aqueous Salts*, Journal Polymer Science Part A, Polymer Chemistry, vol. 28, 1990, p. 945.

73. MASSEY S., ADNOT A., RJEBA, A., ROY D., *Action of Water in the Degradation of Low-Density Polyethylene Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy*, eXPRESS Polymer Letters, vol. 1, 2007, p. 506.
74. HENRY J. L., RUAYA A. L. et GARTON A., *The Kinetics of Polyolefin Oxidation in Aqueous Media*, Journal of Polymer Science Part A : Polymer Chemistry, vol. 30, 1992, p. 1693.
75. Site web d'Environnement Canada, <http://www.ec.gc.ca/air/default.asp?lang=Fr&n=7E5E9F00-1>, consulté le 20 juillet 2011.
76. LUND O.P., VAUGHAN J. G., et THIRUMURTHI, D. *Impact of Acid Drainage Pollution from Mineralized Slate at Halifax Airport*, Water Pollution Research Journal of Canada, vol. 22, 1987, p. 308.
77. Site web du dictionnaire Webster, <http://www.websters-online-dictionary.org/definitions/ACID+MINE+DRAINAGE?cx=partner-pub-0939450753529744%3Av0qd01-tdlq&cof=FORID%3A9&ie=UTF-8&q=ACID+MINE+DRAINAGE&sa=Search#922>, consulté le 20 juillet 2011.
78. HAWKINS W.L., WORTHINGTON M.A. et MATREYEK W., *Loss of Antioxidants from Polyethylene by Evaporation and Aqueous Extraction*, Journal of Applied Polymer Science, vol. 3, 1960, p. 277.
79. Site web de Santé Canada, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/guidance-federal-conseils/framework-app-cadre-4-fra.php>, consulté le 20 juillet 2011.
80. DEAR J.P. et MASON N.S., *Effect of Chlorine on Polyethylene Pipes in Water Distribution Networks*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L, vol. 220, 2006, p. 97.
81. HEIN T. et DIETRICH A. M., *Sensory Aspect and Water Quality Impacts of Chlorinated and Chloraminated Drinking Water in Contact with PEHD and PVC Pipes*, Water Research, vol. 41, 2007, p. 757.
82. HENRY, J.L. et GARTON A., *Oxidation of Polyethylene in Water and Aqueous Salts*, Journal of Polymer Science Part A, Polymer Chemistry, vol. 28, 1990, p. 945.

83. CASTAGNETTI D., SCIRÈ MAMMANO G., DRAGONI E., *Effect of Chlorinated Water on the Oxidative Resistance and the Mechanical Strength of Polyethylene Pipes*, Polymer Testing, vol. 30, 2011, p. 277.
84. DEVILLIERS C., FAYOLLE B., LAIARINANDRASANA L., OBERTI S. et GAUDICHET-MAURIN E., *Kinetics of Chlorine-Induced Polyethylene Degradation in Water Pipes*, Polymer Degradation and Stability, vol. 96, 2011, p. 1361.
85. YU W., AZHDAR B., ANDERSSON D., REITBERGER T., HASSINEN J., HJERTBERG T., GEDDE U.W., *Deterioration of Polyethylene Pipes Exposed to Water Containing Chlorine Dioxide*, Polymer Degradation and Stability, vol. 96, 2011, p. 790.
86. ALLARA D.L. et WHITE C.W. *Microscopic Mechanisms of Oxidative Degradation and its Inhibition at a Copper-Polyethylene Interface*. Advances in Chemistry Series, vol. 169, 1978, p.273.
87. OSAWA Z. et SAITO T., *The Effect of Transition Metal Compounds on the Thermal Oxidative Degradation of Polypropylene in Solution*, Advances in Chemistry Series, vol. 169, 1978, p.159.
88. LAVER H. S., *The Influence of Metal Chelates on the Oxidation of Polymers in Developments in Polymer Stabilization - I*, G. Scott, Ed., Applied Science, London, 1979, p.167-197.
89. VERDU J., *Effect of Aging on the Mechanical Properties of Polymeric Materials*, Journal of Macromolecular Science: Pure and Applied Chemistry, vol. A3, 1994, p. 1383.
90. HABAS-ULLOA A., MORAES D'ALMEIDA J.-R., HABAS J.-P., *Creep Behavior of High Density Polyethylene after Aging in Contact with Different Oil Derivates*, Polymer Engineering and Science, vol. 50, 2010, p. 2122.

91. ZHANG Z., LOU G., SHAO M., LV X., *Prestressed Corrugated PEHD Pipe and its Preparation Method*, Tianjin Yaoxin Technology Development Co. Patent no CN 102050983, 2011
92. Wu, X.; Wu, W., *Low-Cost Composite Polyethylene Pipe for Sewage Drainage*, Jiangsu Changsheng Pipe Industrial Co., Ltd. Patent no CN 101968142, 2010.
93. BU X., *Underground Water Diffusion Pipe*, Peop. Rep. China, Patent no CN 101767071, 2010
94. ZHANG X., DING, Y., SU Z. et CHEN, K., *Method for Manufacturing Large-Caliber Double-Wall Corrugated Pipe from Waste High Density Polyethylene (PEHD) Plastic*, Jiangsu Shengtong Environment Engineering Co., Ltd. Patent no CN 101549535, 2009.
95. TAO G., YU W. et LAI M., *Production of City Drainage Pipeline Materials from Polyethylene and Waste Tire Powder*, Jiangsu Polytechnic University, China, Patent no CN 101367968, 2009
96. LI Y., WU X., *Multi-Layer Composite Pipe having High Strength and Low Cost and Formed by Winding Polyethylene and Waste Plastics*, Beijing Round Sharp Plastic Produce Co., Ltd. China, Patent no. CN 102003578, 2011.
97. SHAPOVALOV V. M, ZLOTNIKOV I. I., TIMOSHENKO V. V. et KUDYAN S. G, *Polymer Composition Based on Recycled Polyethylene for Production of Plastic Pipes for Carrying Water or Cables*, Patent no. RU 237539, 2009.

98. PALERMO G., VIBIEN p., OLIPHANT K., KOSARI T., *New Test Method to Determine Effect of Recycled Materials on Corrugated HDPE Pipe Performance as Projected by Rate Process Method*, *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 36, 2007, p. 213.
99. THOMAS R.W., *The Development of HDPE Corrugated Drainage Pipe Containing Recycled HDPE for Highway Applications*, GPEC 2009, Global Plastics Environmental Conference, Orlando, FL, United States, 25-27 février 2009
100. LUZURIAGA S., KOVAROVA J. et FORTELNY I., *Degradation of Pre-Aged Polymers Exposed to Simulated Recycling: Properties and Thermal Stability*, *Polymer Degradation and Stability* vol. 91, 2006, p. 1226.
101. STEIN R., *Polymer Recycling. Thermodynamics and Economics*, *Macromolecular Symposia*, vol. 135, 1998, p. 295.
102. POSPÍŠIL J., HORÁK Z., KRULIŠ Z. et NEŠPŮREK S., *The Origin and Role of Structural Inhomogeneities and Impurities in Material Recycling of Plastics*, *Macromolecular Symposia*, vol.135, 1998, p. 247.
103. ZANASI T., FABBRI E. et PILATI F., *Qualification of Pipe-Grade HDPEs: Part I, Development of a Suitable Accelerated Ageing Method*, *Polymer Testing*, vol. 28, 2009, p. 96.
104. THÖRNBLÖM K., PALMLÖF M. et HJERTBERG T., *The Extractability of Phenolic Antioxidants into Water and Organic Solvents from Polyethylene Pipe Materials – Part I*, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 96 , 2011, p.1711.
105. Site web de Santé Canada, <http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/legislation/acts-lois/phthalates-fra.php>, consulté le 17 mai 2011.
106. HALLMARK N., WALKER M., MCKINNELL C., MAHOOD I.K., SCOTT H., BAYNE R., COUTTS S., ANDERSON R.A., GREIG I., MORRIS K., SHARPE R.M., *Effects of Monobutyl and Di(n-butyl) Phthalate In Vitro on Steroidogenesis and Leydig Cell Aggregation in Fetal Testis Explants from the Rat: Comparison with Effects In Vivo in the Fetal Rat and Neonatal*

- Marmoset and In Vitro in the Human*, Environmental Health Perspective, vol. 115, 2007, p. 390.
107. SWAN S.H., MAIN K.M., LIU F., STEWART S.L., KRUSE R.L., CALAFAT A.M., MAO C.S., REDMON J.B., TERNAND C.L. et SULLIVAN S., Teague JL *Decrease in Anogenital Distance Among Male Infants with Prenatal Phthalate Exposure*, Environmental Health Perspective, vol. 113, 2005, p. 1056.
108. BARRETT, J.R., *Phthalates and Baby Boys: Potential Disruption of Human Genital Development*. Environmental Health Perspective, vol. 113, 2005, p. A542.
109. WHELTON A.J. et DIETRICH A.M., *Critical Considerations for the Accelerated Aging of High Density Polyethylene Potable Water Materials*. Polymer Degradation and Stability, vol. 94, 2009, p.1163.
110. WHELTON A.J. et DIETRICH AM, Gallagher DL. *Contaminant Diffusion, Solubility, and Material Property Differences between New PEHD and PEX Potable Water Pipes*, Journal of Environmental Engineering, vol. 136, 2010, p. 227.
111. EZQUERRO O., PONS B. et TENA M.T. *Direct Quantitation of Volatile Organic Compounds in Packaging Materials by Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry*, Journal of Chromatography A, vol. 985, 2003, p. 247.
112. PINELLI, F., BOCCHINI P., POZZI R. et GALLETTI G., *Chemical Analysis Applied to the Development of a Model for the Determination of Quality of PE Pipes*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 89, 2010, p. 44.
113. Site web de l'Éditeur officiel du Québec, http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/Q_2/Q2.htm, consulté le 20 juillet 2011.
114. FONT R., ARACIL I., FULLANA A., MARTIN-GULLON I. et CONESA J.A., *Semivolatile Compounds in Pyrolysis of Polyethylene*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 68-69, 2003, p. 599.

115. LATTIMER R.P., *Mass Spectral Analysis of Low-Temperature Pyrolysis Products from Poly(tetrahydrofuran)*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 57, 2001, p. 57.
116. LATTIMER R.P., POLCE M.J. et WESDEMIOTIS C., *MALDI-MS Analysis of Pyrolysis Products from a Segmented Polyurethane*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 48, 1998, p. 1.
117. CARRASCO F., P. P., PASCUAL S. et COOLOM X., *Artificial Aging of High-Density Polyethylene by Ultraviolet Irradiation*, European Polymer Journal, vol. 37, 2001, p. 1457.
118. DOLEZAL Z., PACAKOVA V. et KOVAROVA J., *The Effects of Controlled Aging and Blending of Low- and High-Density Polyethylenes, Polypropylene and Polystyrene on their Thermal Degradation Studied by Pyrolysis Gas Chromatography*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 57, 2001, p. 177.
119. BROUGH I., HAWARD R.N., HEALEY G. et WOOD A., *Scanning Electron Micrographs of High Density Polyethylene Fracture Surfaces*, Polymer, vol. 45, 2004, p. 3115.
120. GULMINE J.V., JANISSEK P.R., HEISE H.M. et AKCELRUD L., *Degradation Profile of Polyethylene after Artificial Accelerated Weathering*, Polymer Degradation and Stability, vol. 79, 2003, p. 385.
121. HAN O.H., CHAE S.A., HAN S.O. et WOO S.K., *High Density Polyethylene as a Thermal Storage Material Studied by MAS 13C NMR Spectroscopy*, Polymer, vol. 40, 1999, p. 6329.
122. MARIANI p., CARIANNI G. and LA MANTIA F.P., *The Antioxidant Effect in Controlling Thermal Degradation of a Low Density Polyethylene Blown Film*, Polymer Degradation and Stability, vol. 85, 2004, p. 1003.
123. FOUAD H., *Effect of Long-Term Natural Aging on the Thermal, Mechanical, and Viscoelastic Behavior of Biomedical Grade of Ultra High Molecular Weight Polyethylene*, Journal of Applied Polymer Science, vol. 118, 2010, p.17.

124. CHOI B.-H., BALIKA W., CHUDNOVSKY A., PINTER G. et REINHOLD R.W., *The Use of Crack Layer Theory to Predict the Lifetime of the Fatigue Crack Growth of High Density Polyethylene*, Polymer Engineering & Science, vol. 49, 2009, p. 1421.
125. CHENG C., WIDERA G.E.O., *Development of Maximum Secondary Creep Strain Method for Lifetime of PEHD Pipes*, Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 131, 2009, p. 021208/1.
126. LAIARINANDRASANA L., DEVILLIERS C., OBERTI S., GAUDICHET E., FAYOLLE B., LUCATELLI J.M., *Ring Tests on High Density Polyethylene: Full Investigation Assisted by Finite Element Modeling*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 88, janvier 2011, p. 1.
127. *FT-IR Spectroscopy Attenuated Total Reflectance (ATR)*, Technical Note FT-IR Spectroscopy, Perkin Elmer, 2005, 5 p.
128. TORIKAI, A., TAKEUCHI A., NAGAYA, S. et FUEKI, K., *Photodegradation of Polyethylene: Effect of Crosslinking on the Oxygenated Products and Mechanical Properties*, Polymer Photochemistry, vol. 7, 1986, p. 199.
129. GULMINE, J.V., JANISSEK, P.R., HEISE, H.M. et AKCELRUD, L., *Degradation Profile of Polyethylene After Artificial Accelerated Weathering*, Polymer Degradation and Stability, vol. 79, 2003, p.385.
130. GEETHA, R., TORIKAI, A., NAGAYA, S. et FUEKI, K., *Photo-oxidative Degradation of Polyethylene: Effect of Polymer Characteristics on Chemical Changes and Mechanical Properties. Part 1 – Quenched Polyethylene*, Polymer Degradation and Stability, vol. 19, 1987, p.279.
131. CARRASCO, F., P., P., PASCUAL, S., COLOM, X., *Artificial Aging of High Density Polyethylene by Ultraviolet Irradiation*, European Polymer Journal, vol. 37, 2001, p. 1457.
132. JELLE, B. P. et NILSEN, T-N., *Comparison of Accelerated Climate Ageing Methods of Polymer Building Materials by Attenuated Total*

- Reflectance Fourier Transform Infrared Radiation Spectroscopy*, Construction and Building Materials, vol. 25, 2011, p.2122.
133. BOWER, D.I., MADDAMS, W.F., *The Vibrational Spectroscopy of Polymers*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992, p.326.
134. SURESH, B., MARUTHAMUTHU, S., KHARE, A., PALANISAMY, N., MURALIDHARAN, V.S., RAGUNATHAN, R., KANNAN, M. et NAVANEETHA PANDIYARAJ, K., *Influence of Thermal Oxidation on Surface and Thermo-Mechanical Properties of Polyethylene*, Journal of Polymer Research, vol. 18, 2011, p.2175.
135. DE BRUIJIN, J.C.M., *Degradation Profiles of Thick High-Density Polyethylene Samples after Outdoor and Artificial Weathering*, In *Polymer Durability*, Clough, R., Billingham, N. C. et Gillen, K. T. editeurs, Advances in Chemistry; American Chemical Society, Washington, 1996, p.599.
136. GIJSMAN, P., HENNEKENS, J. et JANSSEN, K., *Comparison of UV Degradation of Polyethylene in Accelerated Test and Sunlight*, In *Polymer Durability*, Clough, R., Billingham, N. C. et Gillen, K. T. editeurs, Advances in Chemistry; American Chemical Society, Washington, 1996, p.621.
137. NAZAIR, C., *Tableau comparatif des exigences de rigidités des conduites en PEHD et Polypropylène en fonction des différentes normes en vigueur*, transport Québec, Service des matériaux d'infrastructures, Direction du laboratoire des chaussées, Québec, Canada
138. *Pipe Stiffness (PS), Ring Stiffness Constant (RSC) and Flexibility Factor (FF) for Buried Gravity Flow Pipes*, TN-19/20102, Plastic Pipe Institute, 2010, http://plasticpipe.org/pdf/tn-19_pipe_stiffnes_buried_gravity_flow.pdf, consulté le 12 décembre 2012.
139. *Handbook of PE Pipe*, 2e édition, Plastic Pipe Institute, 2007, http://plasticpipe.org/publications/pe_handbook.html, consulté le 20 décembre 2012.
140. Site web du Plastic Pipe Institute, <http://www.hdpipecalc.com/>, consulté le 8 janvier 2012.

141. McGRATH T. J. et MRUK, S.A., *Thermoplastics Piping*, Chapitre D1 de *Piping Handbook*, 6e édition, édité par Nayyar M. L., McGraw-Hill, New York, 2000, D3-D78.
- 142 . BUCZALA, G. S. et CASSIDY, M. J. éditeurs, *Buried Plastic Pipe Technology*, ASTM International, Baltimore, 1990, 407p.
143. SIXSMITH, T. et HANSELKA, R. *Handbook of Thermoplastic Piping Design*, Marcel Dekker, New York, 1997, p. 198.
144. JEYAPALAN, J. K., ETHIYAJEEVAKARUNA, S.W. et BOLDON, B. A., J. *Behavior and Design of Buried Very Flexible Plastic Pipes*, Journal of Transportation Engineering, vol. 113, 1987, p. 642-657.
145. SMITH, G. et WATKINS, R., *The Iowa Formula It's Use and Misuse when Designing Flexible Pipe*, Pipeline Engineering and Construction, ASCE Pipeline Division Specialty Congress, San Diego, 2004, p. 1-7.
146. KATONA, M. G., SMITH, J. B., ODELLO, R. S. et ALLGOOD, J. R. *CANDE—A Modern Approach for the Structural Design and Analysis of Buried Culverts. Rapport. No. FHWA RD-77-5*, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1976.
147. MUSSER, S.C. *CANDE-89 User Manual*, Rapport No. FHWA-RD-89-169, Office of Engineering and Highway Operations R & D, Federal Highway Administration, Washington, D. C., 1989.
148. NG, K. W., LOHNES, R. A., WIPF, T.J. et KLAIBER, F.W., *Numerical Analysis of Polyethylene Pipes Using Culvert Analysis and Design (CANDE)*, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, vol. 17, 2012, p. 2872-2890.
149. JEYAPALAN J. K., *Pipeline 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability –Renew, Rehab and Reinvest* , édité par G. Ruchti et T. Roode, P.E., ASCE Conference Proceeding, Keystone, E.-U., 2010, p. 23-30.
150. HASHASH, N. et SELIG, E. T. *Analysis of the Performance of a Buried High Density Polyethylene Pipe*, Proceedings of the 1st National Conference on Flexible Pipes, A.A. Balkema, Rotterdam, 1990, p.95–103.

151. SARGAND, S. M., et MASADA, T. *Performance of Large Diameter Honey-Comb Design HDPE Pipe Under a Highway Embankment*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 37, 2000, p. 1099–1108.
152. SARGAND, S., MASADA, T., TARAWNEH, B., et GRUVER, D. *Field Performance and Analysis of Large-Diameter High-Density Polyethylene Pipe under Deep Soil Fill*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, vol. 131, 2005, p. 39–51.
153. LEMAIRE, J., GARDETTE, J-L., LACOSTE, J., DELPRAT, P. et VAILLANT, D., *Mechanisms of Photooxidation of Polyolefins : Prediction of Lifetime in Weathering Conditions*, In *Polymer Durability*, Clough, R., Billingham, N. C. et Gillen, K. T. éditeurs, Advances in Chemistry; American Chemical Society, Washington, 1996, p. 578.
154. ZANASI, T., FABBRI, E. et PILATI, F., *Qualification of Pipe-Grade PEHDs : Part I, Development of a Suitable Accelerated Ageing Method*, *Polymer Testing*, vol. 28, 2009, p.96.
155. YANAI, G., RAM, A. et MILTZ, J., *Accelerated Weathering-Induced Degradation of Unprotected Multilayer Polyethylene Slabs. I*, *Journal of Applied Polymer Science*, vol.57, 1995, p.303.
156. HENRY, J.L., RUAYA, A.L. et GARTON, A., *The Kinetics of Polyolefin Oxidation in Aqueous Media*, *Journal of Polymer Science: Part A : Polymer Chemistry*, vol. 30,1992, p.1693.
157. BURGON, R.P., FOLKMAN, S.L. et MOSER, A.P., *Comparison of Measured and Computed Stiffness of High-Density Polyethylene Pipe*, *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1976, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006, p. 162.