

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

M. Ing

PAR
IAN CUCURULL

RÉDUCTION DE LA DISTANCE DE GARDE EN TÊTE DES
EXCAVATIONS ÉTANÇONNÉES À L'AIDE D'UN TUYAU
DE TÔLE EN ACIER ONDULÉ ET GALVANISÉ

MONTRÉAL, LE 11 MAI 2007

© droits réservés de Ian Cucurull

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Omar Chaallal, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Amar Khaled, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Denis Leboeuf, membre du jury
Département de génie civil à l'Université Laval

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 11 MAI 2007
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

RÉDUCTION DE LA DISTANCE DE GARDE EN TÊTE DES EXCAVATIONS ÉTANÇONNÉES À L'AIDE D'UN TUYAU DE TÔLE EN ACIER ONDULÉ ET GALVANISÉ

Ian Cucurull

SOMMAIRE

L'utilisation de divers systèmes d'étançonnement, lors de travaux d'excavation pour l'entretien ou la réparation des réseaux souterrains d'aqueduc et d'égout, en milieu urbain, semble en pleine croissance dans les municipalités du Québec et d'ailleurs. Mais les exigences du Code de sécurité pour les travaux de construction, notamment en ce qui a trait à la distance de garde en tête des excavations étançonnées, constituent des limites contraignantes, voire pénalisantes, surtout dans les chantiers situés en milieu urbain. C'est ce qui a motivé, à la demande de la Ville de Saguenay, la présente recherche, dont le but est d'étudier, à travers des investigations expérimentales étendues, si les tuyaux de tôle en acier ondulé et galvanisé (TTAOG), utilisés comme étançonnement par la Ville de Saguenay lors des travaux d'excavation de courte durée, permettent de : (a) déposer, en toute sécurité, des matériaux à moins de 1,2 mètre du sommet des parois; (b) circuler ou stationner, en toute sécurité, des véhicules ou des machines à moins de 3 mètres du sommet des parois. Les investigations expérimentales renferment des essais en laboratoire, et en chantier. Ces investigations, réalisées sur des tuyaux de type TTAOG-1500, totalisent 72 tests et prévoient un vaste dispositif de mesure. En laboratoire, les tuyaux sont soumis à l'essai de chargement par plaques parallèles. En chantier, et pour le type de sol le plus critique, les tuyaux servant d'étançonnement, sont soumis à différentes conditions de chargement, selon: (a) la distance en tête d'étançonnement ; (b) le type de camion ; (c) la vitesse de circulation du camion; et (d) la présence d'un dos d'âne simulant ainsi un défaut de chaussée. Ces investigations expérimentales ont permis d'obtenir une quantité considérable de mesures expérimentales et d'observations indispensables par ailleurs à une interprétation plus fiable des résultats et une formulation sûre de règles régissant la distance de garde en tête des excavations étançonnées par un TTAOG-1500. En particulier, ces investigations ont permis de constater que la diminution de la distance en tête d'étançonnement, que la présence d'un dos d'âne et que l'augmentation de la vitesse de circulation engendrent une augmentation des contraintes nettes et des déplacements nets dans le tuyau. Cependant, les résultats d'essais permettent de conclure que le TTAOG-1500 est un système d'étançonnement sécuritaire, qui permet de déposer des matériaux ne dépassant pas 45 kPa à une distance supérieure de 600 mm du sommet des parois. Également, ce système permet la circulation routière ou la machinerie lourde à une distance de 1 000 mm du sommet des parois, à conditions toutefois que les travaux soient de courte durée et que le TTAOG-1500 soit confiné dans le sol.

REDUCTION OF THE SAFETY DISTANCE OF A SHORING MADE OF A CORRUGATED GALVANISED STEEL PIPE

Ian Cucurull

ABSTRACT

The use of shoring systems during the excavation for the repair of aqueducts and sewers in urban area is gaining popularity within the province of Quebec as well as in Canada and elsewhere in North America. However, the code safety requirements for construction works are very stringent as far the safety distance at the head of a shoring system, particularly in urban areas. This has motivated the city of Saguenay to request the present research. The objective of this research is to study through experimental investigations, if the use of a pipe made of corrugated galvanised steel (TTAOG) as a shoring system by the city during short duration works can allow: (a) to safely deposit some materials at a distance below 1.2 meters from the pipe head; (b) safely drive or park heavy vehicles and machinery at a distance above 3 meters from the pipe head. The experimental investigations were carried out in laboratory as well as in the field using TTAOG-1500 pipes. A total of 72 field tests were performed with various measurement devices. In laboratory, parallel plate load tests were carried out on different TTAOG-1500 specimens. In the field, the following parameters with the worst condition of soil were considered: (a) the distance from the pipe's head; (b) the truck type; (c) the speed of the truck; and (d) the presence of a bump across the road. From these experimental investigations, a considerable quantity of experimental data and observations were gathered and used for interpretation of the results and formulation of the limits of the safety distance from the head of the shoring. In particular, this investigation shows that the decrease of the distance from the head of the shoring, the presence of a bump across the road and the increase of the vehicle speed give rise to an increase in the net stresses as well as in the net displacements in the pipe. However, the results clearly showed that the TAAOG-1500 can be safely used for the following conditions: (a) with a deposit of materials not exceeding 45 kPa at a distance of 600 millimetres from the head of the shoring; (b) Traffic of heavy vehicle and construction machinery can be permitted at a distance of 1 000 millimetres from the head of the shoring. However, this works have to be of short duration and the TTAOG-1500 has to be fully confined.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire constitue le fruit de deux rapports émis dans le cadre du mandat confié au Pr. Omar Chaallal de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) et au Pr. Denis Leboeuf de l'Université Laval, par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) pour la réalisation des activités de recherche « Réduction de la distance de garde en tête des excavations étançonnées par un tuyau de tôle en acier ondulé et galvanisé» et « Recensement des systèmes d'étançonnement et de blindage au Québec ».

Concernant la première activité, de façon spécifique, le mandat consistait à étudier la possibilité de réduire, par calcul et par expérimentation en laboratoire et en chantier, la distance de garde en tête des excavations étançonnées par un tuyau de tôle en acier ondulé et galvanisé (TTAOG-1500) ne dépassant pas 15 pieds. Le présent mémoire présente et analyse les résultats obtenus à l'issue de ces expérimentations.

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la collaboration d'un grand nombre d'organisations et d'individus. Pour l'IRSST, M. André Lan, ing., et Renaud Daigle ont contribué activement à cette étude. M. Lan a été l'initiateur de ce projet et il en a, de plus, coordonné la direction pour l'IRSST. Pour la Ville de Saguenay, M. Jean Paquet, ing., et son équipe d'ouvriers des travaux publics ont contribué notamment à l'organisation et à la réalisation des travaux en chantier.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de recherche, M. Omar Chaallal, ing., Ph.D., pour sa grande disponibilité et sa bonne écoute tout au long des travaux et de la rédaction de ce mémoire. Je tiens également à remercier un de mes collègues faisant partie de mon groupe de recherche (DRSR), M. Abdelhak Bousselham, Ph.D., pour ses judicieux conseils lors de la rédaction de mon mémoire. Je remercie également M. John Lescelleur pour sa précieuse aide lors des essais en laboratoire et en chantier.

Pour son aide financière, je tiens à remercier l’Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) de m’avoir aidé à mener à terme ce projet de recherche.

Je tiens à souligner également que mes études ont été d’autant plus agréables en ayant de très bons collègues dans mon local de recherche, soit Steve, Karine et Hassan. Finalement, je tiens à remercier ma famille qui a su m’épauler durant ces études universitaires.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
AVANT-PROPOS	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xi
LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE	xii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ASPECTS THÉORIQUES DU COMPORTEMENT DES TUYAUX	4
1.1 Généralité sur les tuyaux	4
1.2 Comportement des tuyaux flexibles	5
1.2.1 Flexible versus rigide	5
1.2.2 Comportement mécanique des tuyaux	7
1.2.2.1 Direction longitudinale	7
1.2.2.2 Direction radiale	8
1.2.3 Comportement structural d'un tuyau flexible enfoui	14
CHAPITRE 2 REVUE DES SYSTÈMES D'ÉTANÇONNEMENT UTILISÉS AU QUÉBEC	22
2.1 Les différentes catégories d'étançonnement	22
2.1.1 Les caissons	22
2.1.2 Les tuyaux	22
2.1.3 Les vérins hydrauliques	23
2.2 Statistiques sur l'utilisation des systèmes	23
2.2.1 Description du sondage	23
2.2.2 Résultats du sondage	24
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU PROGRAMME D'ESSAIS	34
3.1 Le TTAOG-1500 utilisé par la ville de Saguenay	34
3.2 Essais en laboratoire	35
3.2.1 Généralités et objectifs des essais	35
3.2.2 Spécimens d'essai	35
3.2.3 Instrumentation	36
3.2.4 Déroulement des essais	36
3.2.5 Programme des essais	37

3.3	Essais en chantier	38
3.3.1	Généralités et objectifs des essais	38
3.3.2	Type d'excavation	38
3.3.3	Spécimen d'essai	39
3.3.4	Programme des essais	39
3.3.5	Instrumentation	40
3.3.6	Acquisition de données	41
3.3.7	Déroulement des essais	42
3.3.7.1	Les essais statiques avec des blocs	42
3.3.7.2	Les essais dynamiques avec des camions	43
3.3.7.3	Les essais dynamiques avec le rouleau compacteur	45
CHAPITRE 4 PRÉSENTATION ET ANALYSES DES RÉSULTATS		65
4.1	Essais en laboratoire	65
4.1.1	Force versus déplacement	65
4.1.2	Valeurs caractéristiques mesurées	65
4.1.3	Valeurs des rigidités	67
4.2	Essais en chantier	68
4.2.1	Résultats généraux	68
4.2.1.1	Réponses typiques	68
4.2.1.2	Valeurs maximales atteintes	69
4.2.2	Blocs	76
4.2.2.1	Observations	78
4.2.3	Camions	78
4.2.3.1	Effets typiques de la distance en tête d'éstançonnement	78
4.2.3.2	Effet typique d'un dos d'âne	79
4.2.3.3	Effets typiques de la vitesse de circulation des camions	79
4.2.3.4	Effets combinés	80
4.2.4	Rouleau compacteur	81
4.2.5	Conclusions	81
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		104
BIBLIOGRAPHIE		106

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 2.1	Résultats du sondage	26
Tableau 2.2	Sondage récapitulatif.....	28
Tableau 3.1	Propriétés du TTAOG-1500.....	35
Tableau 3.2	Propriétés mesurées des spécimens mis à l'essai en laboratoire.....	36
Tableau 3.3	Programme des essais	38
Tableau 3.4	Propriétés du spécimen mis à l'essai.....	39
Tableau 3.5	Date des essais en chantier par ordre chronologique	40
Tableau 3.6	Dimensions et poids des blocs en béton.....	43
Tableau 3.7	Déroulement des essais C10 par ordre chronologique	44
Tableau 3.8	Déroulement des essais R12 par ordre chronologique	45
Tableau 3.9	Déroulement des essais RC par ordre chronologique	46
Tableau 4.1	Valeurs caractéristiques mesurées.....	66
Tableau 4.2	Rigidité et facteur de rigidité.....	67
Tableau 4.3	Valeurs des contraintes résiduelles, maximales et nettes – C10	70
Tableau 4.4	Valeurs nettes des différents essais – C10	71
Tableau 4.5	Valeurs des contraintes résiduelles, maximales et nettes – R12	72
Tableau 4.6	Valeurs nettes des différents essais – R12	73
Tableau 4.7	Valeurs des contraintes résiduelles, maximales et nettes – RC	74
Tableau 4.8	Valeurs nettes des différents essais - RC	75
Tableau 4.9	Caractéristiques des blocs	76
Tableau 4.10	Essai statique en chantier – LVDTs	77
Tableau 4.11	Essai statique en chantier – CPHs	77

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Classification des conduits flexibles.....	16
Figure 1.2	Effet d'arche se développant dans le sol autour d'une conduite flexible ...	16
Figure 1.3	Analyse des contraintes pour un anneau circulaire dans le sol.....	17
Figure 1.4	Diagramme des corps libres pour une section infinitésimale d'anneau	17
Figure 1.5	Déflexion ellipsoïdale d'un élément de tuyau sous l'effet de la compression axiale du sol de remblai	18
Figure 1.6	Illustration des caractéristiques géométriques d'une ellipse en relation avec l'analyse de la déflexion d'une section de tuyau remblai	18
Figure 1.7	Relation pression extérieure / déflexion – Cas d'un anneau flexible non supporté latéralement	19
Figure 1.8	Module de réaction du sol en fonction de la profondeur et du degré de compactage Proctor du remblai.....	19
Figure 1.9	Comportement d'un tuyau enfoui en fonction de la densité du sol et du niveau de compaction.....	20
Figure 1.10	Couverture minimale requise (rapport H/D)	21
Figure 2.1	Exemples de caissons	29
Figure 2.2	Le tuyau en polyéthylène haute densité (PEHD).....	30
Figure 2.3	Le vérin hydraulique « vertical shore de speed shore »	31
Figure 2.4	Nombre annuelle des excavations par ville	32
Figure 2.5	Taux d'utilisation annuelle des étançonnements lors des excavations par ville.....	32
Figure 2.6	La fréquence d'utilisation annuelle de chacun des systèmes d'étançonnement	33
Figure 3.1	Vue du TTAOG-1500.....	47
Figure 3.2	Vue intérieure du TTAOG-1500	47
Figure 3.3	Ouverture du TTAOG-1500	48
Figure 3.4	Manutention à l'aide d'une pelle rétro-excavatrice	48
Figure 3.5	Manutention à l'aide d'une pelle rétro-excavatrice	49
Figure 3.6	Le récureur de la Ville de Saguenay	49
Figure 3.7	Essai en laboratoire du TTAOG-1500.....	50

Figure 3.8	Croquis illustrant la rigidité de la conduite	50
Figure 3.9	Localisation du site des essais en chantier.....	51
Figure 3.10	Excavation de la tranchée	51
Figure 3.11	Schéma de l'excavation.....	52
Figure 3.12	Installation du TTAOG-1500 dans l'excavation	53
Figure 3.13	Remblayage de l'excavation avec du sable	53
Figure 3.14	Spécimen d'essai en chantier.....	54
Figure 3.15	Présentation des différents essais	54
Figure 3.16	Disposition des LVDT dans le TTAOG	55
Figure 3.17	Hauteur des LVDT (mm)	55
Figure 3.18	Hauteur des capteurs de pression horizontale (CPH) (mm)	56
Figure 3.19	Disposition des capteurs à pression sous le passage routier.....	56
Figure 3.20	Espacement des capteurs de pression verticale	57
Figure 3.21	Radar de vitesse	57
Figure 3.22	Système d'acquisition de données utilisé en chantier	58
Figure 3.23	Empilement de blocs en béton pour essais statiques	58
Figure 3.24	Emplacement et poids total des blocs (mm).....	59
Figure 3.25	Les blocs A et B de différentes dimensions	59
Figure 3.26	Le camion MACK de 3 essieux et 10 roues	60
Figure 3.27	Le récureur VAC-CON modifié de quatre essieux et 12 roues	61
Figure 3.28	Essais dynamiques avec des camions	62
Figure 3.29	Plan et coupe du dos d'âne	62
Figure 3.30	Le dos d'âne.....	63
Figure 3.31	Le véhicule de type « rouleau compacteur » Ingersoll-rand.....	64
Figure 4.1	Courbes charge-déplacement (lecture des LVDTs).....	83
Figure 4.2	Réponses typiques – C10.....	84
Figure 4.3	Réponses typiques – R12.....	85
Figure 4.4	Réponses typiques - RC.....	86
Figure 4.5	Effet de la distance – C10 – sans dos d'âne	87
Figure 4.6	Effet de la distance – R12 – sans dos d'âne	88

Figure 4.7	Effet de la distance – C10 – avec dos d'âne	89
Figure 4.8	Effet de la distance – R12 – avec dos d'âne	90
Figure 4.9	Effet du dos d'âne – Essai C10-A0/1-V10-D0,2	91
Figure 4.10	Effet du dos d'âne – Essai C10-A0/1-V10-D0,2	92
Figure 4.11	Effet du dos d'âne – Essai R12-A0/1-V10-D0,2	93
Figure 4.12	Effet du dos d'âne – Essai R12-A0/1-V10-D0,2	94
Figure 4.13	Effet de la vitesse – Essai C10-A0-V10/25-D0,2	95
Figure 4.14	Effet de la vitesse – Essai R12-A0-V10/25-D0,2	96
Figure 4.15	Effets combinés – Essai C10-A0/1-V10/25 - CPH	97
Figure 4.16	Effets combinés – Essai C10-A0/1-V10/25 - LVDTs	99
Figure 4.17	Effets combinés – Essai R12-A0/1-V10/25 - CPH	101
Figure 4.18	Effets combinés – Essai R12-A0/1-V10/25 - LVDTs	102
Figure 4.19	Effet de la distance - Essai RC-V5-D0,2/1/2/3/4	103

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ÉTS	École de Technologie Supérieure
APSAM	Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
TTAOG	Tuyau de tôle en acier ondulé et galvanisé
PVC	Tuyaux plastiques en chlorure de polyvinyle
PEHD	Tuyau en polyéthylène à haute densité
AASHTO	American association of state highway and transportation officials
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer (capteur de déplacement)
C10	Camion de 3 essieux et de 10 roues
R12	Récureur de 4 essieux et de 12 roues
RC	Rouleau compacteur
PS	Pipe Stiffness (rigidité du tuyau)
SF	Stiffness Factor (facteur de rigidité)
CPH	Capteur de pression horizontale

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	aire de la section
c	distance de l'axe neutre à la fibre la plus éloignée
d	déflexion diamétrale
D	diamètre de la conduite
$d\theta$	angle de déformation
E	module d'élasticité du matériau
EI	rigidité de la paroi
F	force
I	moment d'inertie
kg	kilogramme
km/h	kilomètre par heure
kN	kilonewton
kN/m	kilonewton par mètre
kPa	kilopascal
M	moment appliqué
m	mètre
mm	millimètre
N	newton
P	pression
P_o	contrainte résiduelle
r	rayon moyen de la conduite
t	épaisseur de la paroi
$\Delta\sigma$	contrainte nette
Δ_x	déflexion horizontale de la conduite
Δ_y	déflexion verticale de la conduite
ε	déformation circonférentielle à la surface de la paroi du tuyau
σ	contrainte

σ_{\max} contrainte maximale

ν coefficient de Poisson

INTRODUCTION

Contexte et problématique

Il existe une multitude de systèmes d'éstançonnement éprouvés sur le marché. Malheureusement, ces systèmes d'éstançonnement sont souvent lourds et complexes à mettre en place, surtout pour les tranchées de moindre envergure comme c'est souvent le cas en milieu urbain (Tremblay, 1994). Aussi, pour subvenir à ses besoins, en matière d'interventions en milieu urbain, la Ville de Saguenay a conçu un système d'éstançonnement plus efficace communément appelé TTAOG. Les travaux d'excavation sont régis par le Code de sécurité pour les travaux de construction. En particulier, l'article 3.15.3 du S-2.1, r.6 stipule à l'alinéa 5) qu'il est interdit de :

- a. *déposer des matériaux à moins de 1,2 mètre du sommet des parois;*
- b. *circuler ou stationner des véhicules ou des machines à moins de 3 mètres du sommet des parois, à moins qu'un étançonnement renforcé n'ait été prévu en conséquence.*

Les exigences du code énoncées plus haut imposent des contraintes qui peuvent être contraignantes, voire pénalisantes, surtout pour des chantiers en milieu urbain. Ceci a conduit la Ville de Saguenay à vouloir explorer les possibilités de réduire la distance de garde en tête des tranchées. Puis dans un second temps, de savoir jusqu'à quelle distance il serait possible d'approcher la machinerie et les véhicules lourds du bord de la tranchée étançonnée par un TTAOG-1500 (c'est-à-dire 1500 millimètres de diamètre). En effet, un des avantages attendus d'un étançonnement est justement la diminution des distances de garde en tête des tranchées. L'article 3.15.3.5 du S-2.1, r.6 est clair à ce sujet. Il est possible de circuler ou de stationner des véhicules ou des machines à moins de 3 mètres du sommet des parois si un étançonnement renforcé a été prévu en conséquence.

De plus, l'article 2.3.1. qui est équivalent au S-2.1, r.6 stipule que :

Dans l'application du présent code, la nature, les dimensions et la disposition des matériaux peuvent différer des règles fixées pour autant que la résistance des matériaux et leur emploi offrent une sécurité équivalente à celle prescrite.

Buts et objectifs du mémoire

Le but poursuivi par ce mémoire est de déterminer par calcul et par expérimentation en laboratoire et sur le terrain si un TTAOG-1500, utilisé comme étançonnement lors des travaux d'excavation de courte durée, permet de :

- a. déposer des matériaux à une distance inférieure à 1,2 mètre du sommet des parois;
- b. autoriser la circulation routière ou de machinerie lourde à une distance inférieure à 3,0 mètres du sommet des parois.

Plus spécifiquement, ce mémoire vise à déterminer, par expérimentation en chantier ainsi qu'en laboratoire, la capacité critique des TTAOG-1500 comme système d'étançonnement vertical des excavations temporaires. L'approche de validation, à travers la confrontation des résultats des tests (le laboratoire et le chantier) et les observations reliées lors de ces tests, autorise une interprétation plus fiable des résultats et une formulation sûre des conclusions et des recommandations.

En laboratoire, les profilés ont été soumis à l'essai de chargement par plaques parallèles afin de permettre la détermination de la rigidité diamétrale et la déformation maximale avant flambage local. Les essais en chantier ont été effectués pour différentes conditions de chargement et pour le type de sol le plus critique. La convergence (ou le déplacement) des parois du tuyau lors du chargement a été mesurée à l'aide de jauge de déformations. Les mesures ont été complétées par des observations visuelles.

Organisation du rapport

Le présent rapport est organisé en 4 chapitres. Le premier porte sur les aspects théoriques du comportement des tuyaux. Le chapitre 2 décrit la revue des systèmes d'étaconnement utilisés au Québec. La présentation du tuyau du Saguenay mis à l'essai est présentée et discutée au chapitre 3, tandis que la présentation et l'analyse des résultats des essais, conduits en laboratoire et en chantier, sont regroupées au chapitre 4. La comparaison des résultats en laboratoire et en chantier est présentée à la conclusion, suivie de quelques recommandations.

CHAPITRE 1

ASPECTS THÉORIQUES DU COMPORTEMENT DES TUYAUX

Ce chapitre donne un aperçu sur le comportement mécanique et structural des tuyaux utilisés comme système d'étançonnement.

1.1 Généralité sur les tuyaux

Généralement, les tuyaux utilisés pour les ponceaux et égouts sont classés en deux catégories, selon leur comportement structural : (a) tuyaux rigides; et (b) tuyaux flexibles. Les tuyaux en béton, en amiante de ciment, en fonte et en acier à paroi épaisse font partie de la première catégorie alors que les TTAOG, les tuyaux en aluminium et les tuyaux plastiques en chlorure de polyvinyle (PVC) ou en polyéthylène à haute densité (PEHD) font partie de la seconde. La différence de comportement entre ces deux catégories sera expliquée ci-après. Les tuyaux, qu'ils soient rigides ou flexibles, sont en général utilisés comme conduites de drainage d'eau usée ou d'eau pluviale, ou comme conduites de distribution d'eau potable. Ils sont donc, en règle générale, enfouis "couchés" à différentes profondeurs. Leur dimensionnement est alors fonction des caractéristiques hydrauliques recherchées, de la pression à laquelle ils sont soumis, ainsi que de la profondeur d'enfouissement. Celui-ci se fait de façon aisée grâce à des normes (exemple : les normes de l'American Association of State Highway and Transportation, AASHTO), des formules empiriques (par exemple, celles utilisées par l'État de l'Iowa) ou en utilisant les abaques fournis par les manufacturiers.

1.2 Comportement des tuyaux flexibles

1.2.1 Flexible versus rigide

Les tuyaux sont généralement enfouis en profondeur dans le sol et forment ainsi avec le sol environnant (emprunt granulaire compacté) un système structural composé non seulement du tuyau mais également du sol avoisinant. Le comportement d'un tel système relève donc de l'interaction sol-structure. C'est le degré de cette interaction qui qualifie le tuyau comme flexible ou rigide, dépendamment de sa rigidité diamétrale par rapport à celle du sol qui l'enveloppe. Il faut noter que cette qualification représente un aspect majeur dans le dimensionnement du tuyau. Dans le cas de tuyau flexible, la charge est principalement reprise par le sol, moyennant un effet d'arche. En revanche, dans le cas de tuyau rigide, la quasi-totalité de la charge est reprise par le tuyau. Ceci explique toute l'importance du choix des propriétés du sol de remblai dans le cas de tuyau flexible. Par ailleurs, le mode de rupture et les déformations limites avant rupture sont essentiellement différents pour les deux catégories de tuyau (figure 1.1).

Tel qu'expliqué plus haut, dans le cas de tuyaux rigides tels que ceux en béton, le support latéral est très faible, souvent non existant et l'anneau doit résister seul aux moments de flexion induits par les charges verticales. Par opposition, l'anneau flexible s'écrase quelque peu et soulage ainsi le tuyau d'une part importante des charges verticales permettant une réaction quasi-égale de la part de l'emprunt granulaire (remblai) sur les côtés. En fait, l'enveloppe, constituée de matériel granulaire ayant un angle de friction interne élevé, forme un effet d'arche semblable aux arches de maçonnerie et supporte ainsi une partie importante des charges verticales en présence. Ce comportement est illustré à la figure 1.2.

La rigidité diamétrale du tuyau ("*Pipe Stiffness*" ou PS) déterminée par l'essai de plaques parallèles ("*Parallel plate test*", ASTM D2412) pourrait être utilisée pour catégoriser les tuyaux. Ainsi,

$$PS = \frac{F}{\Delta_y} = \frac{EI}{0.149 \times r^3} \quad (2.1)$$

où

PS	=	rigidité diamétrale du tuyau kN/m/m déterminée à une déflection de 5% du diamètre intérieur du tuyau (" <i>Pipe stiffness</i> ")
F	=	charge appliquée, en kN/m
Δ_y	=	déflexion verticale de la conduite, en mm
E	=	module d'élasticité du matériau du tuyau, en kPa
I	=	moment d'inertie par unité de longueur de la section transversale de la paroi de la conduite, en mm^4/mm
r	=	rayon moyen de la conduite, en mm

Par ailleurs, il a été suggéré que si une conduite subit, sans rupture, une déflection diamétrale de plus de 2%, alors elle peut être considérée comme flexible (Moser, 1990). D'autres chercheurs (Burns et Richard 1964; McGrath 1999) suggèrent que la classification soit basée sur la rigidité relative de la conduite et du sol qui l'enveloppe, notée S_B , soit :

$$S_B = \frac{M_s r^3}{EI} \quad (2.2)$$

où M_s représente le module contraint du sol et r est le rayon moyen de la conduite

La rigidité relative est utilisée pour calculer le facteur qui tient compte de l'effet d'arche, VAF (*Vertical Arch Factor*) par différentes théories dont la méthode des éléments finis, les solutions de Burns et Richard (1964). Si $VAF < 1.0$, la conduite est alors dite flexible.

1.2.2 Comportement mécanique des tuyaux

Généralement, le dimensionnement des tuyaux est basé sur les contraintes et les déformations qui doivent en tout temps demeurer inférieures aux valeurs admissibles. Les valeurs admissibles sont définies par les limites de performance. Toutefois, dans le cas de conduites flexibles enfouies, c'est la déformation excessive et non la contrainte qui définit cette limite de performance. À noter que l'analyse des contraintes se fait dans les deux directions: longitudinale et transversale (radiale).

1.2.2.1 Direction longitudinale

L'analyse dans la direction longitudinale concerne les contraintes axiales et les contraintes de flexion. Les contraintes axiales sont générées par des effets de température et les effets de Poisson dus aux pressions radiales. Les contraintes de flexion, elles, sont générées par les effets de poutre en flexion et sont déterminées en utilisant la théorie classique des poutres, en fonction des charges (le poids propre, le remblai et les surcharges) et les points de réaction. La plupart des conduites sont conçues pour reprendre les contraintes longitudinales. Dans les tuyaux ondulés par exemple, les contraintes longitudinales sont atténuées, voire annulées, puisque ces tuyaux s'accommodent très bien à la forme du radier sur lequel ils sont installés. Aussi, compte tenu de leurs ondulations et leur flexibilité dans le sens longitudinal, les tuyaux peuvent subir des allongements et des rétrécissements sans pour autant générer des contraintes excessives.

1.2.2.2 Direction radiale

L'analyse dans la direction radiale considère les contraintes, les déformations, les déflections et la stabilité de la section normale (anneau), c'est à dire perpendiculaire à l'axe longitudinal de la conduite.

- *Contraintes*

Il convient de noter que l'analyse des contraintes convient mieux aux tuyaux rigides alors que celle des déformations et les déflections est plus adaptée aux tuyaux flexibles. Les contraintes de surface comprennent : (i) la contrainte de compression circonférentielle (ring compression), et (ii) la contrainte due au moment de flexion.

Pour une section d'un anneau de tuyau (figure 1.3), la contrainte s'écrit:

$$\sigma = \frac{Pr}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (2.3)$$

où

P	=	pression radiale
r	=	rayon moyen du tuyau
A	=	aire de la section de la paroi par unité de longueur
M	=	moment appliqué
I / c	=	module de résistance de la paroi par unité de longueur

La force de compression $T = Pr$ et le moment M dépendent de la forme du chargement de sol.

Dans le cas de tuyaux flexibles, l'équation (2.3) est plus utile si la contrainte de flexion (Mc/I) est écrite en terme de changement de rayon de l'anneau. La théorie de l'élasticité permet d'écrire (figure 1.4) :

$$\frac{M}{EI} = d\theta = \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \quad (2.4)$$

où

- M = moment appliqué
- EI = rigidité de la paroi
- $d\theta$ = l'angle de déformation
- $1/r$ = le rayon de courbure avant la déformation
- $1/r'$ = le rayon de courbure après la déformation

L'équation (2.3) devient alors:

$$\sigma = \frac{Pr}{A} + Ecd\theta \quad (2.5)$$

où

- $d\theta$ = $1/r - 1/r'$
- E = module d'élasticité de la conduite
- c = distance de l'axe neutre à la fibre la plus éloignée

Pour un tuyau lisse et uniforme (sans ondulations), l'équation (2.5) devient :

$$\sigma = Pm + \frac{E}{m} \times \frac{r' - r}{2r'} \quad (2.6)$$

où

- m = r/t et représente la flexibilité de la paroi
- r = rayon moyen
- t = épaisseur de la paroi

■ *Déformation*

Dans le domaine élastique, la déformation s'exprime comme suit :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.7)$$

En considérant l'équation (2.3), on trouve :

$$\varepsilon = \frac{Pr}{AE} + cd\theta \quad (2.8)$$

où

- ε = déformation circonférentielle à la surface de la paroi du tuyau
- $d\theta$ = $1/r - 1/r'$

Dans le cas d'un tuyau lisse (sans ondulations) d'épaisseur t , l'équation (2.8) devient :

$$\varepsilon = \frac{Pm}{E} = \frac{r' - r}{2mr'} \quad (2.9)$$

■ *Déflexion*

Pour les tuyaux flexibles, la déflexion contrôle souvent la conception. Typiquement, un tuyau flexible rond se déforme en ellipse comme le montre la figure 1.5. La déformée en ellipse d'un tuyau flexible entraîne une diminution du rayon de courbure (figure 1.5 b)).

$$d\theta = \frac{1}{r_x} - \frac{1}{r} \quad (2.10)$$

Mais la figure 1.6 permet d'écrire que :

$$r_x = \frac{r \times (1 - d)^2}{(1 + d)} \quad (2.11)$$

En substituant $d\theta$ dans l'équation (2.5), et en négligeant les termes d'ordre supérieur de d , il suit :

$$\sigma = \frac{Pr}{A} + \frac{Ec}{r} \times 3d \times (1 - 2d) \quad (2.12)$$

où

$$d = \Delta/D = \text{déflexion diamétrale} = \Delta_y/D = \Delta_x/D$$

Dans le cas d'un tuyau lisse et uniforme d'épaisseur t , l'équation (2.12), devient:

$$\sigma = Pm + \frac{3Ed}{2m \times (1 - 2d)} \quad (2.13)$$

Il est intéressant de noter à partir de l'équation (2.12) que le terme représentant la déflection est insignifiant pour des petites valeurs de d (quand un déplacement vertical maximum est spécifié). Si la paroi du tuyau peut se plastifier sans fracture (ex. métal ou plastique), le flambement de la paroi ou son écrasement n'auront lieu qu'après que la contrainte de compression ait atteint sa limite élastique. L'instabilité causée par la pression extérieure quand le tuyau est dans un état de déformée s'éloignant d'une forme ronde constitue l'exception à la règle.

- *Stabilité*

L'instabilité implique souvent la rupture due à une pression extérieure, P (voir figure 1.7). Des solutions classiques sont disponibles. Par exemple, un tuyau flexible circulaire non supporté latéralement subit une rupture brusque si :

$$\frac{Pr^3(1 - \nu^2)}{EI} = 3 \quad \text{ou} \quad \frac{PD^3(1 - \nu^2)}{EI} = 24 \quad (2.14)$$

En négligeant l'effet de poisson, ce qui est plus conservateur, on obtient :

$$\frac{Pr^3}{EI} = 3 \quad \text{ou} \quad \frac{PD^3}{EI} = 24 \quad (2.15)$$

où

Pr^3/EI =	terme relié à la stabilité de l'anneau
P =	pression critique extérieure uniforme
r =	rayon moyen = $D/2$
EI =	rigidité de la paroi par unité de longueur
S =	résistance

$$\frac{F}{\Delta} = 53.77 \frac{EI}{D^3} = 6.72 \frac{EI}{r^3} \quad (2.16)$$

où

D =	diamètre
EI/r^3 =	rigidité de l'anneau (<i>ring stiffness</i>)
F/Δ =	rigidité du tuyau (<i>pipe stiffness</i>)

où F/Δ est la pente de la courbe force – déplacement diamétral à partir de l'essai de plaques parallèles (*parallel plate test*), voir la figure 1.7. La rigidité de l'anneau (*ring stiffness*), EI / r^3 , représente la propriété d'un anneau circulaire de résister à la rupture causée par une pression extérieure. Elle peut être soit calculée, soit mesurée à partir de F/Δ en utilisant l'équation suivante :

$$\frac{EI}{r^3} = 0.149 \frac{F}{\Delta} \quad (2.17)$$

1.2.3 Comportement structural d'un tuyau flexible enfoui

À mesure que se développe la pression verticale du sol (charges permanentes et surcharges) sur la conduite, le sol autour du tuyau est comprimé et l'anneau flexible tend alors à se déformer selon une configuration elliptique résultant en un accroissement Δ_x de son diamètre horizontal et une réduction Δ_y de son diamètre vertical.

Un accroissement horizontal Δ_x est désirable parce qu'il permet de développer une butée latérale de la part du sol qui l'entoure. Une déflexion verticale est aussi désirable parce qu'elle permet au sol (ou emprunt granulaire) de développer un effet d'arche au-dessus de la conduite et soulager ainsi la conduite des pressions verticales excessives (Watkins et al., 1973).

L'amplitude des déformations dépend principalement de l'affaissement du sol, lequel dépend surtout des charges appliquées et de la densité et du niveau de compaction du milieu (figure 1.9), ainsi que de la profondeur d'enfouissement (figure 1.8). Les déformations (Δ_x, Δ_y) de la conduite sont certes désirables mais ne doivent pas dépasser une certaine limite, au-delà de laquelle le système ne peut plus remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu.

On voit bien que le sol contribue substantiellement à la résistance, si bien qu'on évoque souvent, et à très juste titre, l'interaction sol-tuyau ou le système sol-tuyau, lorsqu'on parle de tuyau flexible. Ainsi, deux facteurs sont donc importants dans la conception des tuyaux flexibles: (a) limiter le déplacement vertical diamétral, la valeur limite acceptée étant de 5% du diamètre intérieur; (b) optimiser l'emprunt granulaire quant à son type et sa densité (exprimée par le degré de compacité du sol ou le pourcentage de l'essai Proctor standard ou modifié).

Du point de vue structural, plusieurs diagrammes et abaques ont été développés pour aider l'ingénieur à choisir les dimensions du tuyau pour une application donnée. Partant d'une limite de déflection, ces abaques donnent en fonction du type de l'emprunt granulaire et sa compaction, la profondeur maximale d'enfouissement. Pour des profondeurs d'enfouissement faibles, où l'effet des charges vives (véhicules lourds) ne peut être négligé, des couvertures minimales empiriques requises (basées sur des essais) sont également recommandées (figure 1.10).

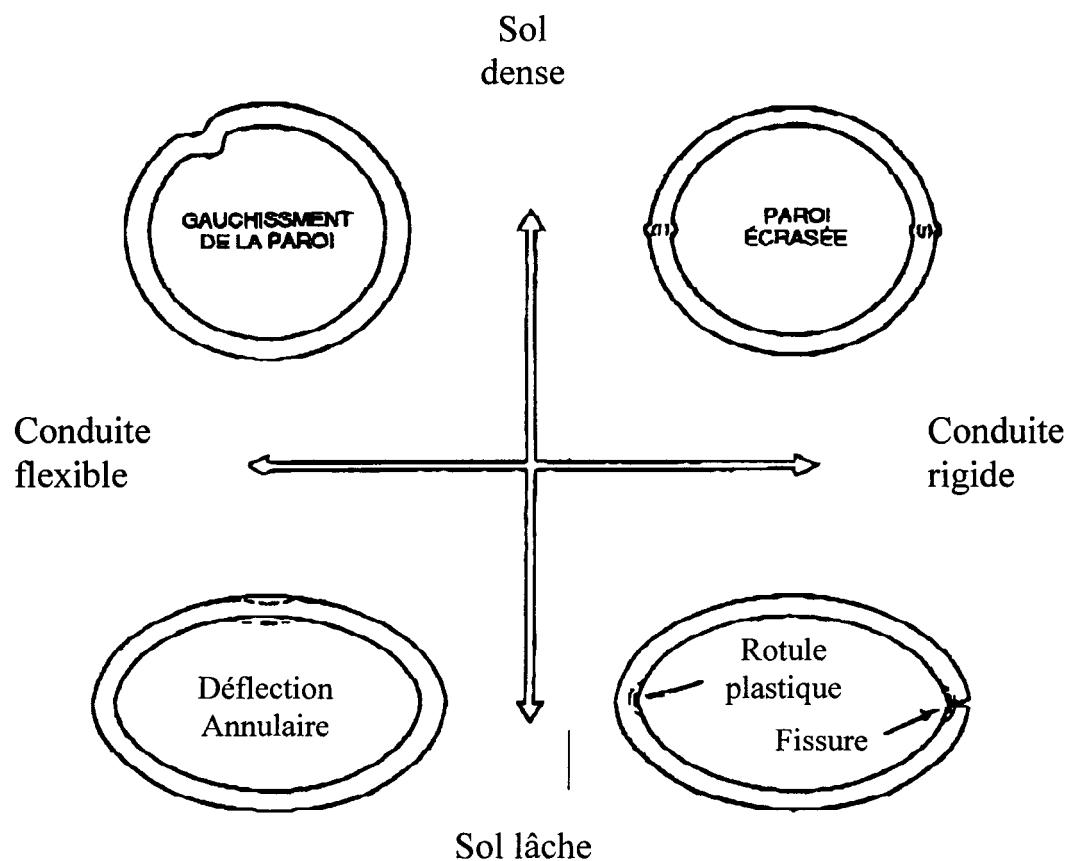


Figure 1.1 Classification des tuyaux flexibles

(Modifiée d'après Watkins et Anderson, 2000)

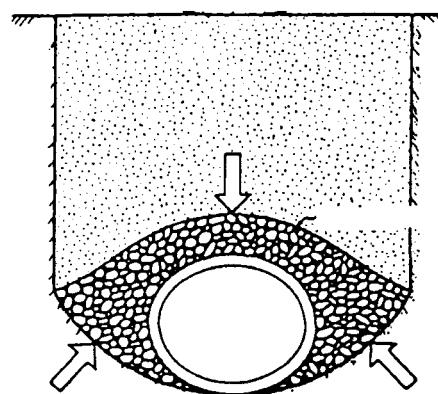


Figure 1.2 Effet d'arche se développant dans le sol autour d'un tuyau flexible

(Modifiée d'après : Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980)

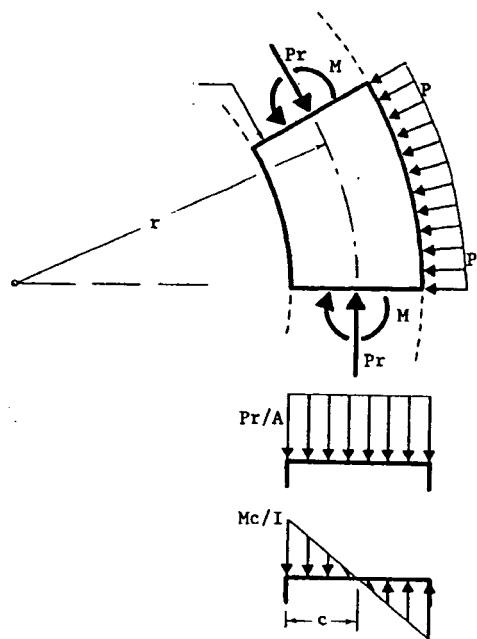


Figure 1.3 Analyse des contraintes pour un anneau circulaire dans le sol
 (Modifiée d'après Watkins et Anderson, 2000)

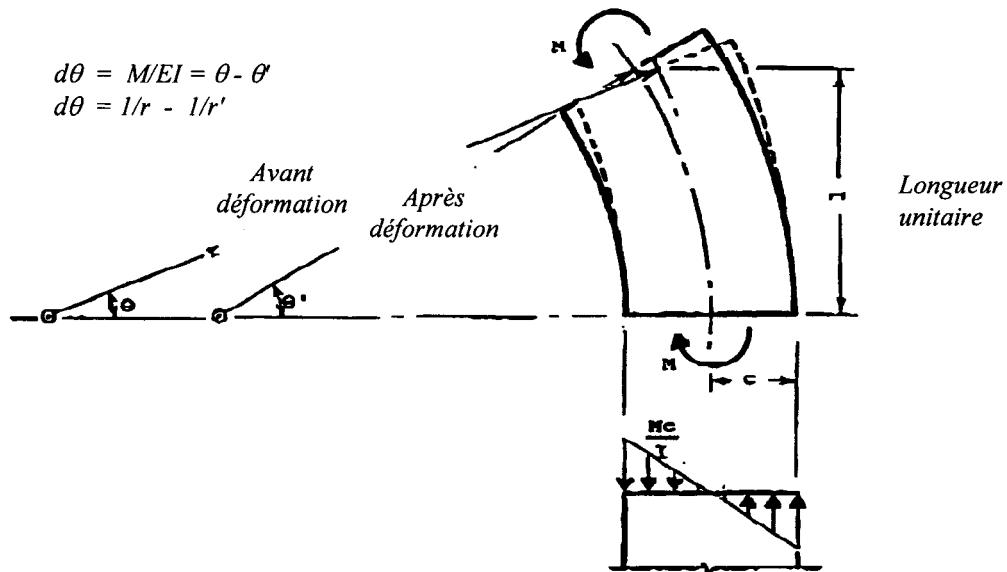


Figure 1.4 Diagramme des corps libres pour une section infinitésimale d'anneau
 (Modifiée d'après Watkins et Anderson, 2000)

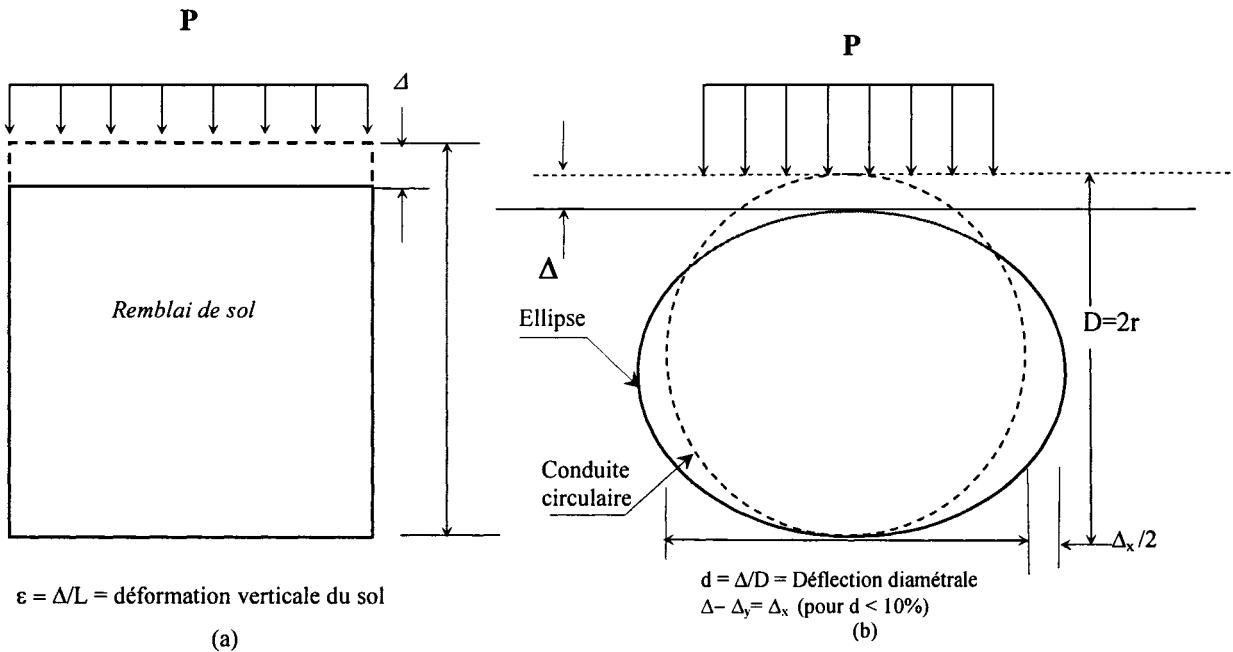


Figure 1.5 Déflexion ellipsoïdale d'un élément de tuyau sous l'effet de la compression axiale du sol de remblai

(Modifiée d'après Watkins et Anderson, 2000)

$$d = \Delta/D$$

$$a = r(1-d)$$

$$b = r(1+d)$$

$$r_x = a^2/b = r(1-d)^2/(1+d)$$

$$r_y = b^2/a = r(1+d)^2/(1-d)$$

$$r_r = r_y/r_x = [(1+d)/(1-d)]^3$$

$$A_e = \pi a b$$

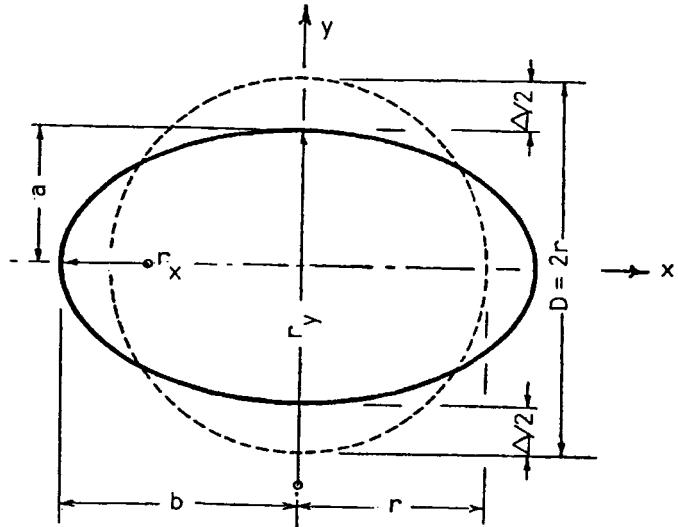


Figure 1.6 Illustration des caractéristiques géométriques d'une ellipse en relation avec l'analyse de la déflexion d'une section de tuyau remblai

(Modifiée d'après Watkins et Anderson, 2000)

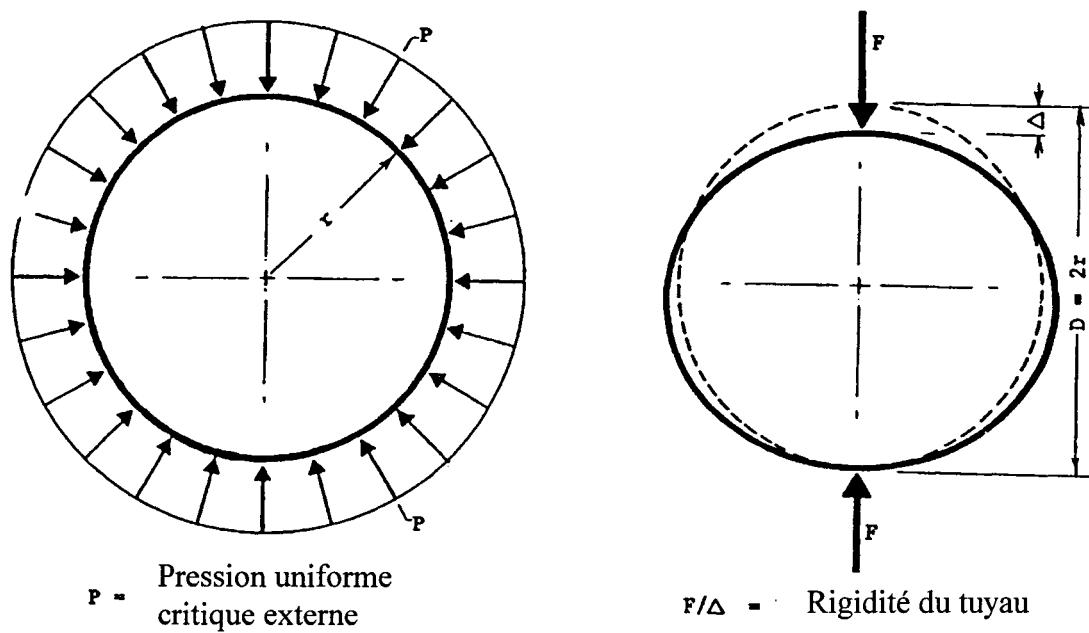


Figure 1.7 Relation pression extérieure / déflection – Cas d'un anneau flexible non supporté latéralement

(Modifiée d'après Watkins et Anderson, 2000)

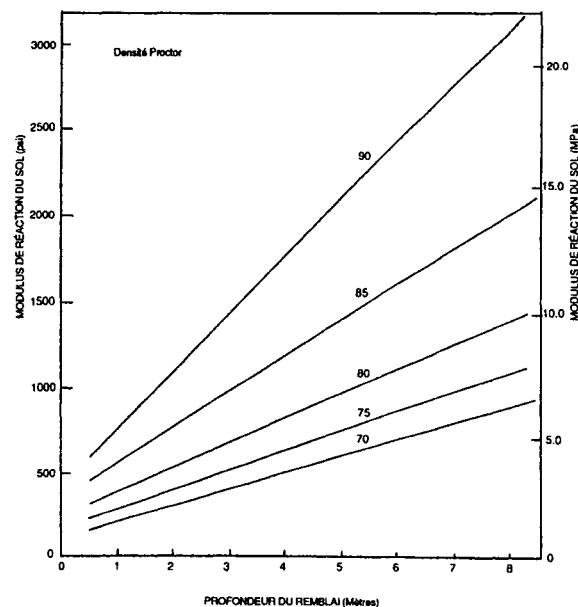
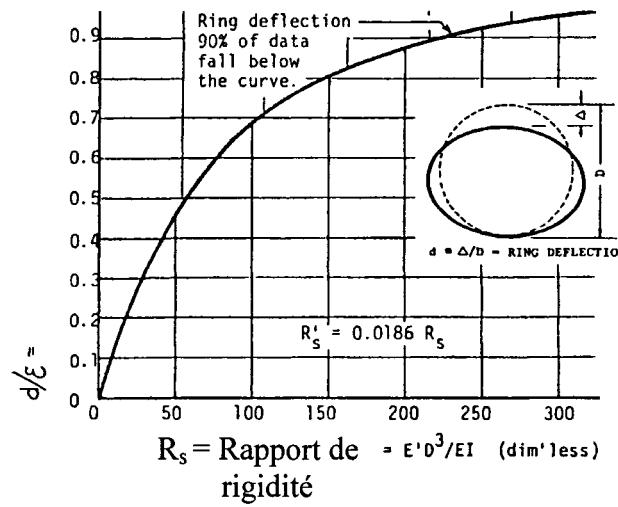
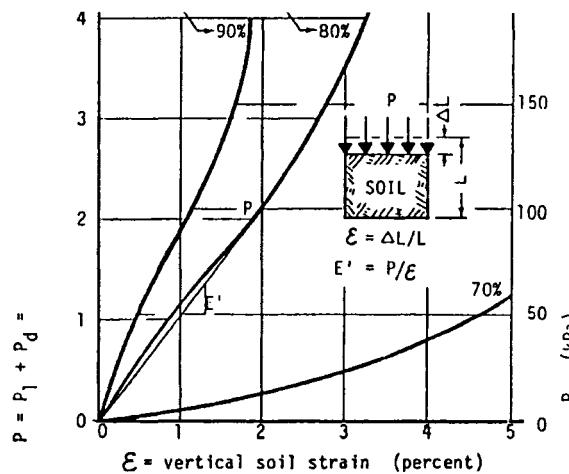


Figure 1.8 Module de réaction du sol en fonction de la profondeur et du degré de compactage Proctor du remblai

(Modifiée d'après : Plastiques Big '0' et Watkins et Reeves, 1980)



(a) Déflexion diamétrale versus rigidité



(b) Contrainte-deformation typique pour un sol non cohésif

Figure 1.9 Comportement d'un tuyau enfoui en fonction de la densité du sol et du niveau de compaction

(Modifiée d'après Watkins et Anderson, 2000)

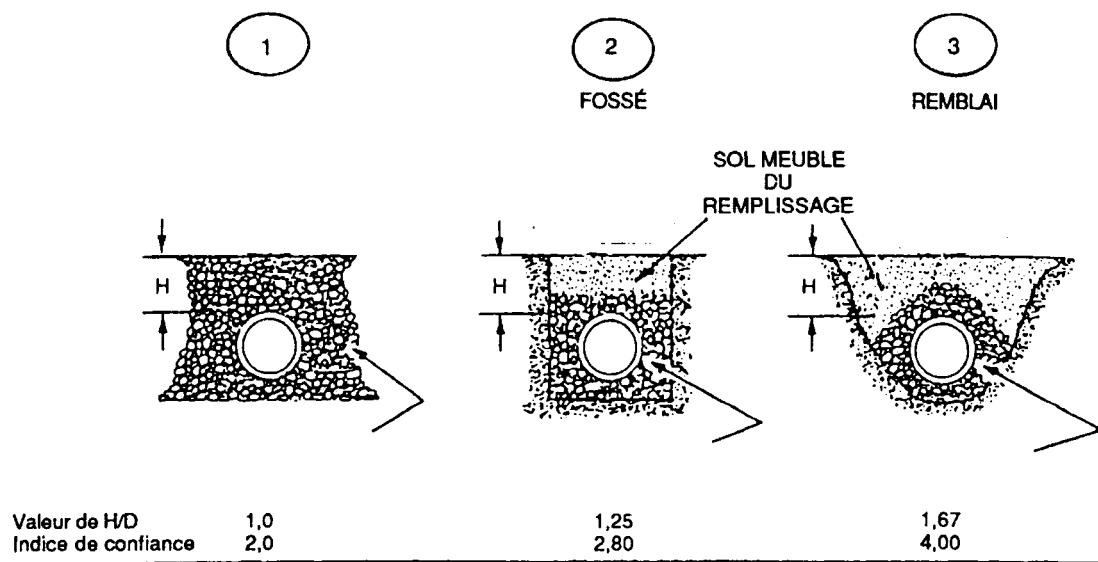


Figure 1.10 Couverture minimale requise (rapport H/D)
(Modifiée d'après : Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980)

CHAPITRE 2

REVUE DES SYSTÈMES D'ÉTANÇONNEMENT UTILISÉS AU QUÉBEC

Ce chapitre donne une description générale des différents systèmes d'éstançonnement utilisés au Québec. Les résultats obtenus à l'issue d'un sondage, mené auprès des différentes Villes du Québec, concernant l'utilisation de ces systèmes, y est également résumé.

2.1 Les différentes catégories d'éstançonnement

Les systèmes d'éstançonnement utilisés au Québec peuvent être classés en trois catégories : (a) les caissons, (b) les tuyaux, et (c) les vérins hydrauliques.

2.1.1 Les caissons

Par caisson, il est entendu une enceinte légère permettant de retenir les poussées de terre lors de travaux d'excavation (figure 2.1). Les caissons sont carrés ou rectangulaires.

2.1.2 Les tuyaux

Par tuyau, il est entendu une enceinte légère, de forme cylindrique, permettant de retenir les poussées de terre lors des travaux d'excavation (voir figure 2.2). Les tuyaux servant d'éstançonnement peuvent être en acier galvanisé ou en polyéthylène haute densité, et sont dotés de nervures afin d'augmenter leur rigidité. Plus faciles à fabriquer (produire), ils ont l'avantage d'être plus économiques. Du point de vue comportement structural, la forme cylindrique est particulièrement efficace contre les poussées de terre.

2.1.3 Les vérins hydrauliques

Par vérin hydraulique, il est entendu un système d'éstançonnement utilisant des vérins hydrauliques sous forme d'étrésillons ajustables (voir figure 2.3). Ceci permet de réaliser des éstançonnements à la mesure des dimensions des excavations. Ce type d'éstançonnement présente l'avantage d'être léger, ce qui réduit le recours aux équipements lourds lors de son installation. Mais, dans la mesure où les parois de l'éstançonnement doivent être droites, il ne peut donc être utilisé que dans un sol cohésif.

2.2 Statistiques sur l'utilisation des systèmes

À travers des données statistiques, cette section donne un aperçu sur l'utilisation des systèmes d'éstançonnement dans les différentes villes du Québec lors de travaux d'excavation.

2.2.1 Description du sondage

Dans le cadre du mandat confié à l'ÉTS et à l'Université Laval pour la réalisation de l'activité de recherche « Recensement des systèmes d'éstançonnement et de blindage au Québec », un sondage a été réalisé, entre le 15 février et le 15 avril 2006, auprès de plusieurs villes (et/ou arrondissements) au Québec sur leur utilisation des systèmes d'éstançonnement lors de travaux d'excavation. Sur un total de 17 Villes contactées, 12 d'entre elles ont répondu au questionnaire que nous leur avons soumis, soit un taux de réponse de 71%. Les villes qui ont répondu sont: Chicoutimi, Drummondville, Gatineau, Lévis, Longueuil, Montréal, Québec, Saint-Hyacinthe, Sept-Îles, Sherbrooke, Trois-Rivières et Victoriaville. Dans les Villes importantes où l'information n'est pas centralisée, comme Montréal et Québec, nous nous sommes rapprochés également des différents arrondissements, et ce dans le but de dresser un portrait qui se veut fiable de l'utilisation des éstançonnements dans ces villes. À Québec, trois arrondissements sur huit ont été contactés : Sainte-Foy Sillery, Charlesbourg, et celui des Rivières. À

Montréal, ce sont cinq arrondissements sur neuf, faisant partie de la Ville avant les fusions, qui ont été contactés : Ahuntsic/Cartierville, Villeray/St-Michel/ Parc extension, Mercier/Hochelaga / Maisonneuve, Plateau Mont-Royal/Centre-sud et Rivières-des-Prairies. Selon Martin Tremblay¹, ing. à la section géotechnique de la Ville de Montréal, il y aurait eu 2000 excavations par année dans la Ville de Montréal (avant fusion).

2.2.2 Résultats du sondage

Les résultats du sondage sont compilés dans le tableau 2.1. Ils sont assortis des coordonnées des personnes ressources dans les différentes villes. Les données statistiques sont présentées par ville et concernent le nombre d'excavations (total, et selon la profondeur) et le nombre d'excavations par type d'étalement utilisé. Ces données sont résumées dans le tableau 2.2. Et, pour une meilleure visualisation des résultats du sondage, ces derniers sont également présentés sous forme graphique (figure 2.4 à 2.6). Les résultats du sondage sont analysés en termes de :

- ❖ Nombre d'excavations annuelles par ville : La figure 2.4 permet d'observer que :
 - le nombre d'excavations est très important : plus de 7460 (voir tableau 2.2). Ce nombre est, bien entendu, proportionnel à l'importance de la ville. Pour la seule Ville de Montréal (avant fusion), on compte autour de 2000 excavations;
 - les excavations dont la profondeur est inférieure à 4 pi ne représente qu'une fraction modeste du nombre total d'excavations : 1100 (voir tableau 2.2). Ceci représente à peine 15% du nombre total d'interventions;
 - et comme conséquence directe des deux premières observations, l'importance d'un choix éclairé du système d'étalement pour les travaux d'excavations, et ce, en vue d'une utilisation sûre et économique.

¹ Communication personnelle à Cucurull, I., en date du 4 mai 2006

- ❖ Taux d'utilisation par ville des étançonnements lors des excavations excédant 4 pi. La figure 2.5 permet d'observer que ce taux est généralement assez élevé dans les villes moyennes à importantes. C'est le cas entre autres des Villes de Montréal ou Gatineau.
- ❖ Fréquence d'utilisation de chacun des systèmes d'étançonnement. La figure 2.6 permet de constater que les étançonnements de type caisson sont les plus utilisés par les villes. En effet, ils représentent 74 % des étançonnements utilisés (voir tableau 2.2). En revanche, les étançonnements de type tuyaux, bien qu'ils représentent une solution technique, économique et performante, restent très peu utilisés (à peine 3%). Par ailleurs, l'on constate que les systèmes d'étançonnement, conçus et réalisés par les Villes elles-mêmes (ex. VM-1) représentent 18 % des étançonnements utilisés (voir tableau 2.2).

Tableau 2.1

Résultats du sondage (Tiré de Chaallal et Leboeuf, 2006)

		Chicoutimi	Drummondville	Gatineau	Lévis	Longueuil	Montréal 5 arr. *
					Danny Lessard Contremaître de travaux publics (418) 833-4960 #4606 dlessard@ville.levis.qc.ca	Mario Lachapelle Chef de division; aqueduc et égouts (430) 463-7100 #3529 mario.lachapelle@ville.longueuil.qc.ca	Martin Tremblay, ing. M.Sc.A. Section géotechnique (514) 872-3226 mtremblay@ville.montreal.qc.ca
				Daniel Paquin Formateur (819) 243-2345 #499 paquin.daniel@ville.gatineau.qc.ca			
		950	300	1000	50	523	2 000
hauteur		200	150	100	20	50	40
hauteur		750	150	900	30	473	1960
	Grillagés					279	350
	Gigant alu de Ischebeck	75	25	150			550
	Longueuil						
	ATS de Pro-tec						
	Mod de Pro-tec				750	7	191
	Shoring shield de Speed shore						
	VM						
	VM-1						120
	VM-2						
	XLAP de Efficiency production Inc.					3	
	Polyéthylène haute densité						
	Tôle en acier ondulé et galvanisé	100					
	Vérins hydrauliques	Vertical shore de Speed shore		100			940

* Arr. : Arrondissement

Tableau 2.1 (suite)

Résultats du sondage (Tiré de Chaallal et Leboeuf, 2006)

* Arr. : Arrondissement

Tableau 2.2

Sondage récapitulatif
(Tiré de Chaallal et Leboeuf, 2006)

Nombre d'interventions (avec ou sans étançonnement)		7 462	100 %	
Nombre d'excavations < 4 pi.		1 105	15 %	
Nombre d'excavations > 4 pi		6 357	85 %	
Nombre d'excavations étançonnées par type d'étançonnement	Caissons	Grillagés	350	10 %
		Gigant alu de Ischebeck	1 309	36 %
		Longueuil	279	8 %
		ATS de Pro-tec	550	16 %
		Mod de Pro-tec	968	27 %
		Shoring shield de Speed shore	0	0 %
		VM	0	0 %
		VM-1	120	3 %
		VM-2	0	0 %
		XLAP de Efficiency production Inc.	3	0 %
Total		3 579	100 %	
Tuyaux		Polyéthylène haute densité	15	13 %
		Tôle en acier ondulé et galvanisé	100	87 %
		Total	115	100 %
Vérins hydrauliques	Vertical shore de Speed shore	1 155	100 %	



(a) Caisson « Gigant alu de Ischebeck »
(Ischebeck, 2006)



(b) Caisson « Mod de Pro-tec »
(Équipement NCN Ltée, 2006)

Figure 2.1 Exemples de caissons

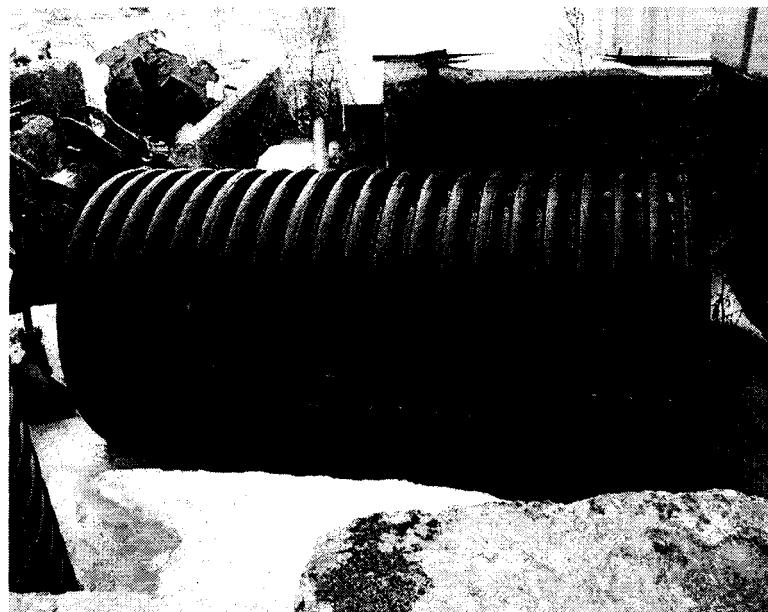


Figure 2.2 *Le tuyau en polyéthylène haute densité (PEHD)*
(Chaallal et Leboeuf, 2001)



(a) Vue de l'intérieur de l'étançonnement avec les vérins hydrauliques



(b) Vue en élévation de l'étançonnement avec les vérins hydrauliques

Figure 2.3 Le vérin hydraulique « vertical shore de speed shore »

(Source : Équipement NCN Ltée, 2006)

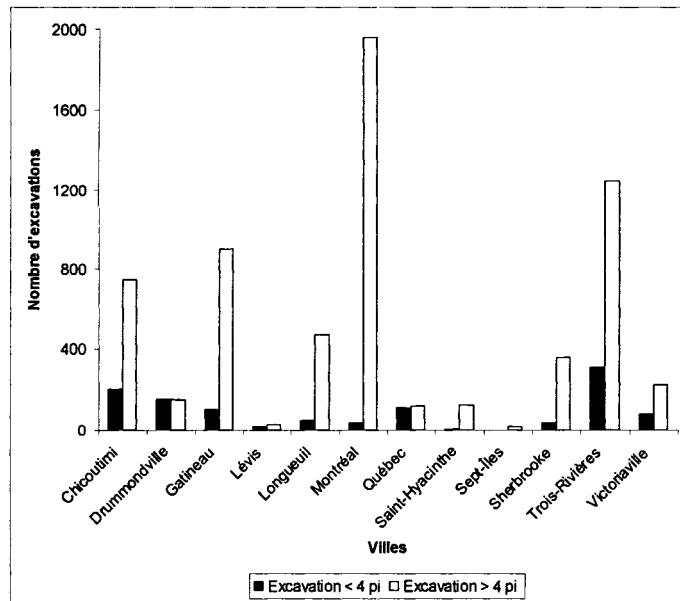


Figure 2.4 Nombre annuelle des excavations par ville
 (Tiré de Chaallal et Leboeuf, 2006)

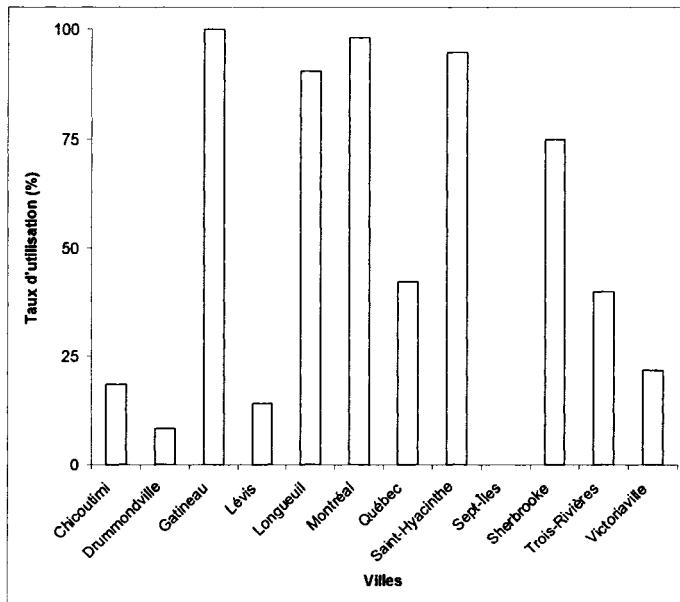


Figure 2.5 Taux d'utilisation annuelle des étançonnements lors des excavations par ville
 (Tiré de Chaallal et Leboeuf, 2006)

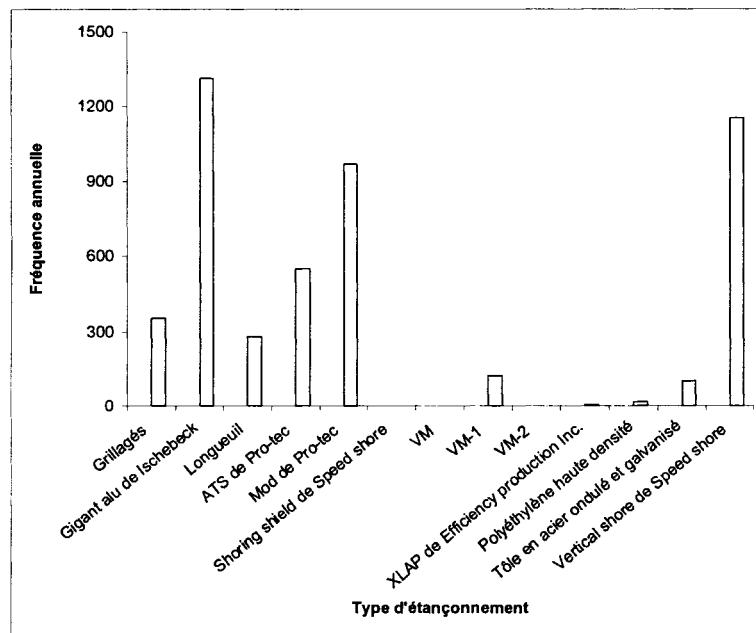


Figure 2.6 La fréquence d'utilisation annuelle de chacun des systèmes d'étançonnement

(Tiré de Chaallal et Leboeuf, 2006)

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DU PROGRAMME D'ESSAIS

3.1 Le TTAOG-1500 utilisé par la ville de Saguenay

Pour ses travaux d'excavations, la Ville de Saguenay utilise le tuyau de tôle en acier ondulé et galvanisé, désigné par TTAOG-1500 (voir la figure 3.1, 3.2 et 3.3). Le numéro *1500* indique le diamètre du tuyau en *mm*. Initialement, le TTAOG a été produit par la compagnie *Dofasco*, et mis sur le marché sous le nom de *CSP1-501*. Les ondulations ont été exécutées par la compagnie *Atlantic Industries Limited*. La Ville a acheté le produit par l'entremise du fournisseur *Produits B.C.M. Ltée*. Mais pour faciliter davantage son utilisation et sa manutention, les ouvriers de la Ville ont rajouté au produit d'origine quelques éléments d'acier. Le coût de cet étançonnement, incluant la main d'œuvre et les matériaux de fabrication, s'élève à 3 000 \$.

Le tuyau en question est à paroi épaisse, et présente des ondulations hélicoïdales qui lui confèrent une rigidité et une résistance à la compression (écrasement diamétral) accrue tout en minimisant la déflection au cours du compactage du remblai. Le joint agrafé en continu est réalisé en repliant sur eux-mêmes les rebords de tôles adjacentes et en les compressant de façon à les emboîter, et ainsi former un joint solide.

Le transport et la manutention du tuyau sont, en général, effectués à l'aide d'un équipement léger (voir la figure 3.4 et 3.5). L'excavation peut être réalisée à l'aide d'une pelle rétro-excavatrice, ce qui nécessite une emprise importante et un remblai après l'installation du TTAOG-1500. Également, elle peut être rapidement exécutée en utilisant un récureur (figure 3.6), ce qui minimise les réparations des infrastructures environnantes.

Les principales propriétés du TTAOG-1500 utilisé par la Ville de Saguenay, telles que mesurées, sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1

Propriétés du TTAOG-1500

Caractéristiques	Grandeur
Diamètre nominal	1500 mm
Ondulations (portée x profondeur)	68 mm x 12 mm
Épaisseur nominale de la paroi	3.5 mm
Longueur standard	3353 mm (11 pieds)

3.2 Essais en laboratoire

3.2.1 Généralités et objectifs des essais

Les essais en laboratoire visent à caractériser le TTAOG-1500 en terme de rigidité diamétrale d'un anneau représentatif de tuyau. Dans cet objectif, et pour s'assurer de la convergence des résultats, une série de trois spécimens de TTAOG-1500, identiques, ont été mis à l'essai.

3.2.2 Spécimens d'essai

Les spécimens d'essai ont été fournis au laboratoire par la Ville de Saguenay, coupés sous forme d'anneau à la longueur demandée. La longueur en question a été choisie sur la base de l'espacement disponible entre les colonnes de la presse MTS 810 utilisée dans ces essais. Cette longueur est de 29 pouces. Les dimensions effectives des spécimens ont été mesurées. Celles-ci incluent les diamètres intérieur et extérieur du spécimen, sa longueur, ainsi que son épaisseur. Pour chacune de ces dimensions, plusieurs mesures ont été effectuées. Le tableau 3.2 donne les valeurs moyennes de ces mesures.

Tableau 3.2

Propriétés mesurées des spécimens mis à l'essai en laboratoire

Caractéristiques	Dimensions
Ondulations	Hélicoïdales (cycle de 68 mm et amplitude de 6 mm)
Longueur	736 mm (29 po.)
Diamètre intérieur	1509 mm (59 po.)
Diamètre extérieur	1533 mm (60 po.)

3.2.3 Instrumentation

Les spécimens ont été instrumentés à l'aide de capteurs de déplacement (LVDT : *Linear Variable Displacement Transducer*) dans le sens vertical et celui horizontal, ce qui permettra de mesurer le rétrécissement et l'allongement, respectivement. La presse MTS 810 a été utilisée avec une cellule permettant de suivre l'évolution des charges. Un système d'acquisition automatique de données a permis la saisie et l'enregistrement de toutes les données durant le déroulement des essais. La figure 3.7 présente un spécimen avant un essai. Les spécimens ont été soumis à l'essai en déplacement contrôlé à un taux de 12.7 mm/min, tel que spécifié par la norme ASTM D2412.

3.2.4 Déroulement des essais

Le rigidité diamétrale de l'anneau représentatif du tuyau, noté (EI/r^3) , et qui représente l'objet des essais en laboratoire, peut être mesurée à l'aide de la méthode standardisée, décrite dans la norme ASTM D2412, et de l'essai de compression entre des plaques rigides parallèles (*parallel plate test*).

L'essai consiste à placer un anneau de tuyau d'une longueur finie entre deux plaques rigides, appliquer une charge verticale de compression, et tracer la courbe de la charge

appliquée en fonction du déplacement vertical et horizontal, comme le montre la figure 3.8.

Le produit EI, intervenant dans l'expression de la rigidité diamétrale, est appelé facteur de rigidité de la conduite. Il peut être évalué en déterminant expérimentalement le module d'élasticité du matériel constituant la conduite et en calculant le moment d'inertie de la section transversale de la paroi de la conduite. Cependant, il est plus facile, dans la plupart des cas, de soumettre des échantillons représentatifs de la conduite à un essai de compression diamétrale appelé aussi "épreuve de rigidité". La valeur exacte du produit EI est alors déduite de l'une ou l'autre des formules suivantes (3.1 et 3.2):

$$EI = 0.149 \times r^3 \times \frac{F}{\Delta_y} \quad (3.1)$$

$$EI = 0.136 \times r^3 \times \frac{F}{\Delta_x} \quad (3.2)$$

où

- Δ_y = la déflection verticale de la conduite en mm
- Δ_x = la déflection horizontale de la conduite en mm
- F = la charge appliquée en N/m
- r = rayon moyen de la conduite
- E = module d'élasticité du matériau de la conduite

3.2.5 Programme des essais

Le programme d'essai totalise 3 tests désignés par TTAOG #1, TTAOG #2 et TTAOG #3 (voir le tableau 3.3).

Tableau 3.3

Programme des essais

Désignation de l'essai	Norme	Date de l'essai
TTAOG #1	ASTM D2412	27 juillet 2005
TTAOG #2	ASTM D2412	28 juillet 2005
TTAOG #3	ASTM D2412	28 juillet 2005

3.3 Essais en chantier

3.3.1 Généralités et objectifs des essais

Les essais en chantier visent à recueillir des données et observations sur le comportement et la performance des TTAOG-1500 dans des conditions proches de celles de leur utilisation. Plus spécifiquement, ils visent à étudier l'influence séparée ou combinée des facteurs suivants sur le comportement et la performance des TTAOG-1500 : (a) distance en tête d'éstançonnement ; (b) type de camion ; (c) vitesse de circulation des camions ; (d) défaut de chaussée comme un dos d'âne.

Ces essais ont été effectués sur un site proposé par la Ville de Saguenay (voir la figure 3.9), qui a mis à disposition du projet la main d'œuvre, le matériel d'excavation, les blocs de béton, ainsi que les véhicules ayant servi de chargement. Pour sa part, l'ÉTS a mis en place l'instrumentation visant à mesurer les contraintes et les déplacements des spécimens d'essais.

3.3.2 Type d'excavation

L'excavation, où sera logé le tuyau, est réalisée en creusant une tranchée de forme carrée dont les quatre côtés sont inclinés à 45 degrés (la figure 3.10 et la figure 3.11), ce qui rend possible un chargement par compression diamétrale. Le tuyau, repose verticalement

sur un fond plat (figure 3.12). Le chargement se fait en déversant le sable de façon uniforme sur les quatre parois (figure 3.13). Le tuyau prend appui sur le côté vertical opposé au déversement. Ce type d'excavation cherche à reproduire un mode de chargement où le tuyau est chargé par l'effondrement des quatre parois de la tranchée.

3.3.3 Spécimen d'essai

Le spécimen de tuyau utilisé pour les essais provient du lot utilisé par la Ville lors des travaux d'excavation (figure 3.14). Celui-ci a été mesuré avant sa mise à l'essai pour déterminer ses propriétés effectives, à savoir le diamètre extérieur, la longueur ainsi que son épaisseur. Chacune de ces propriétés a fait l'objet de plusieurs mesures. Le tableau 3.4 donne les valeurs moyennes de ces mesures. À noter que le spécimen TTAOG-1500 nous a été livré par la Ville de Saguenay, coupé à la longueur requise pour les tests.

Tableau 3.4

Propriétés du spécimen mis à l'essai

Désignation	Dimensions
Ondulations	Hélicoïdales (cycle de 68 mm et amplitude de 6 mm)
Longueur	3804 mm (150 po.)
Diamètre intérieur	1500 mm (59 po.)
Diamètre extérieur	1524 mm (60 po.)

3.3.4 Programme des essais

Le programme d'essais totalise 69 tests, répartis en 9 séries d'essais, de trois types différents (figure 3.15): (a) une série d'essais statique réalisé à travers l'empilement de blocs de béton; (b) six séries d'essais dynamiques utilisant des camions conventionnels; et (c) une série d'essais dynamiques utilisant un camion de type rouleau compacteur.

Ces essais ont été effectués les 25 et 26 octobre 2005, sur un site choisi par la Ville de Saguenay. Le tableau 3.5 rappelle, par ordre chronologique, le planning de ces essais. Ce qui suit donne, successivement, la description de chaque type d'essai et des paramètres d'étude qui y sont pris en compte.

Tableau 3.5

Date des essais en chantier par ordre chronologique

Type d'essais		Date
Statique (Camions)	L'empilement de blocs en béton à côté de l'étançonnement	25 octobre 2005
	Le passage d'un camion ayant 3 essieux (sans dos d'âne sur la route) et l'empilement de blocs en béton du côté opposé de l'étançonnement	25 octobre 2005
	L'arrêt d'un camion ayant 3 essieux et l'empilement de blocs en béton du côté opposé de l'étançonnement	25 octobre 2005
	Le passage d'un camion ayant 3 essieux (avec un dos d'âne sur la route) et l'empilement de blocs en béton du côté opposé de l'étançonnement	25 octobre 2005
	Le passage d'un camion ayant 4 essieux (avec dos d'âne sur la route) et l'empilement de blocs en béton du côté opposé de l'étançonnement	25 octobre 2005
	L'arrêt d'un camion ayant 4 essieux et l'empilement de blocs en béton du côté opposé de l'étançonnement	25 octobre 2005
Dynamique (rouleau compacteur)	Le passage d'un camion ayant 4 essieux (sans dos d'âne sur la route) et l'empilement de blocs en béton du côté opposé de l'étançonnement	25 octobre 2005
	Le passage d'un véhicule de type « rouleau compacteur » (sans dos d'âne sur la route) et l'empilement de blocs en béton du côté opposé de l'étançonnement	26 octobre 2005

3.3.5 Instrumentation

Les spécimens ont été instrumentés à l'aide de LVDTs (voir la figure 3.16), placés à différentes hauteurs du tuyau, et suivant deux plans orthogonaux : (i) dans la même direction que celle du passage routier afin de mesurer l'allongement du tuyau; et (ii) dans la direction perpendiculaire à celle du passage routier afin de mesurer son rétrécissement. Au total, cinq LVDTs ont été installés. La figure 3.17 indique, pour chacun des LVDTs, son emplacement sur le tuyau, sa désignation utilisée lors de

l'acquisition des données sur chantier, et la désignation adoptée pour fins d'analyse. Le modèle des LDVTs utilisé est *PT1A* de la marque *Celesco*. Sa course est de 250 mm, avec un niveau de précision de $\pm 0,375$ mm. Or, dans les résultats du chapitre 4, la très grande majorité des valeurs de déplacement rapportées de déplacement sont inférieures à 0,375 mm. Ceci, nous porte à croire que ces déplacements ne sont pas dus aux surcharges mais plutôt à la vibration naturelle des cordes reliant les LVDTs.

Pour évaluer les poussées des terres, il a été prévu quatre capteurs de pression horizontale (CPH), installés à l'extérieur de l'étançonnement (figure 3.18). Le modèle des capteurs de pression horizontaux utilisé est *KDC-200KPA* de la marque *TML*. Son niveau de précision est de $\pm 1,6$ kPa.

Aussi, et dans le but d'évaluer la pression des charges statiques lorsqu'un camion s'immobilise, il a été prévu trois capteurs de pression verticale (CPV), installés sous le passage routier (figure 3.19), à différentes distances de l'étançonnement comme l'illustre de façon schématique la figure 3.20. Les CPV, désignés dans cette figure, par *EPC-1* et *EPC-2* sont un modèle *EPC* de la marque *Roctest*. Sa gamme d'étalonnage est de 50 lbs/po², avec un facteur d'étalonnage de 0,0548 et 0,0506 pour les capteurs *EPC-1* et *EPC-2* respectivement. Le capteur *TPC-1* est un modèle de la marque *Roctest*. Sa gamme d'étalonnage est de 150 lbs/po², avec un facteur d'étalonnage de 2,11838.

Enfin, en ce qui concerne la vitesse des camions, celle-ci a été mesurée à l'aide d'un radar de vitesse dont la marque est *MuniQuip* et le modèle est *K-GP*, couramment utilisé par les corps de police (figure 3.21).

3.3.6 Acquisition de données

Un système d'acquisition automatique de données a permis la saisie et l'enregistrement de toutes les données durant les essais (figure 3.22). Il s'agit de *System 6000* de la

marque *Vishay*. Ce système d'acquisition de données dynamiques à prise de données simultanées (chacun des canaux possède son convertisseur analogue-digital) est conçu pour mesurer une multitude de données provenant de différents instruments comme des LVDTs, des CPH ou encore des CPV utilisés lors de ces essais. La fréquence de balayage a été de 500 échantillons secondes par canal pour tous les essais.

3.3.7 Déroulement des essais

3.3.7.1 Les essais statiques avec des blocs

La série d'essais statiques compte un seul test. Celui-ci consiste en un chargement avec des blocs de béton. Ces blocs ont été placés à côté de l'étançonnement afin de simuler le dépôt de matériaux, comme le stipule le Code de sécurité pour les travaux de construction (figure 3.23). La distance séparant l'empilement des blocs du bord de l'étançonnement est de 305 mm, comme l'illustre, de façon schématique, la figure 3.24. À noter que deux types de blocs (tableau 3.6), A et B, ayant des dimensions différentes, ont été utilisés (figure 3.25). Par ailleurs, la résultante des poids dus aux blocs en béton sur le sol est de 101 kN et la distance qui la sépare du bord de l'étançonnement est de 1132 millimètres (figure 3.24).

Dans cet essai, le poids et la distance ont été les paramètres d'étude. Il est désigné BLOCS-D1,1-P101, où BLOCS réfère aux blocs de béton, D1.1 indique la distance nominale de 1,1 mètres séparant l'étançonnement de la roue la plus proche, et P101 correspond au poids total des blocs, soit 101 kN

Tableau 3.6
Dimensions et poids des blocs en béton

Désignation	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Volume (m ³)	Poids (kN)
Bloc A	610	915	610	0,341	8,4
Bloc B	620	620	620	0,239	5,9

3.3.7.2 Les essais dynamiques avec des camions

Deux types de camions ont été utilisés dans cette série d'essais : (a) un *MACK* ayant trois essieux et 10 roues (figure 3.26). Son poids total, incluant le poids propre et le chargement, est de 264 kN; (b) un récureur modifié de marque *VAC-CON* ayant quatre essieux et 12 roues (figure 3.27). Le poids total du camion incluant le poids propre et le chargement était de 248 kN.

Lors de ces essais, les blocs de béton ont été placés dans le côté opposé au passage des camions (figure 3.28). Ainsi, le TTAOG-1500 se trouvait davantage sollicité par les poussées de terre. Aussi, et pour simuler l'impact d'un camion qui percuterait une bosse sur la route, il a été également prévu quelques essais avec un dos d'âne proche de l'éstançonnement (la figure 3.29 et la figure 3.30). Finalement, les paramètres testés dans cette série sont successivement :

- le type de camion, désigné par C10 pour le camion à 3 essieux et 10 roues, et R12 pour le camion récureur à 4 essieux et 12 roues;
- la présence de dos d'âne, désigné par A1. A0 correspond au cas sans dos d'âne;
- la vitesse des camions, désignée par V0, V10, V25, selon la vitesse (0, 10 ou 25 km/h);
- la distance en tête d'éstançonnement, notée D. Ainsi D4, par exemple, indique qu'une distance nominale de 4 mètres sépare l'éstançonnement de la roue la plus proche.

À ces paramètres s'ajoute un cinquième, optionnel, noté E1 qui traite du numéro d'essieu le plus proche du TTAOG-1500. Celui-ci est utilisé uniquement lors des essais où la vitesse des camions est nulle. Au total, 40 essais sur camions conventionnels ont été effectués, dont 26 sur le camion de 10 roues et 14 restant sur le camion récureur de 12 roues. Le tableau 3.7 et le tableau 3.8 donnent un récapitulatif de tous les essais appartenant à cette série. Outre la désignation de l'essai, et la date de sa réalisation, ces deux tableaux donnent également sa distance en tête d'étalement et la vitesse de passage du camion, et la présence ou non de dos d'âne.

Tableau 3.7

Déroulement des essais C10 par ordre chronologique

Désignation de l'essai	Distance nominale (m)	Distance réelle (m)	Vitesse nominale (km/h)	Vitesse réelle (km/h)	Dos d'âne	Date	Heure
C10-A0-V10-D4-3	4	4	10	8	Non	25-10-2005	12h05
C10-A0-V10-D3-1	3	3.1	10	12	Non	25-10-2005	12h10
C10-A0-V25-D3-1	3	3	25	20	Non	25-10-2005	12h11
C10-A0-V10-D2-1	2	2.1	10	11	Non	25-10-2005	12h15
C10-A0-V25-D2-1	2	2.2	25	25	Non	25-10-2005	12h16
C10-A0-V10-D1-1	1	1.2	10	8	Non	25-10-2005	12h20
C10-A0-V25-D1-1	1	1.2	25	23	Non	25-10-2005	12h25
C10-A0-V10-D0.2-1	0.2	0.42	10	11	Non	25-10-2005	12h30
C10-A0-V10-D0.2-2	0.2	0.4	10	10	Non	25-10-2005	12h35
C10-A0-V25-D0.2-1	0.2	0.4	25	25	Non	25-10-2005	12h40
C10-A0-V0-D2-E1-1	2	2.23	0	0	Non	25-10-2005	13h01
C10-A0-V0-D2-E2-1	2	2.01	0	0	Non	25-10-2005	13h07
C10-A0-V0-D2-E3-1	2	2.01	0	0	Non	25-10-2005	13h12
C10-A0-V0-D2-E2-1	2	2.23	0	0	Non	25-10-2005	13h20
C10-A0-V0-D2-E3-1	2	2.23	0	0	Non	25-10-2005	13h24
C10-A1-V10-D4-1	4	3.9	10	8	Oui	25-10-2005	14h35
C10-A1-V25-D4-1	4	3.8	25	17	Oui	25-10-2005	14h40
C10-A1-V10-D3-1	3	2.8	10	9	Oui	25-10-2005	14h42
C10-A1-V25-D3-1	3	2.8	25	15	Oui	25-10-2005	14h45
C10-A1-V10-D2-1	2	2	10	7	Oui	25-10-2005	14h49
C10-A1-V25-D2-1	2	2	25	16	Oui	25-10-2005	14h51
C10-A1-V10-D1-1	1	1	10	10	Oui	25-10-2005	14h57
C10-A1-V10-D1-2	1	1	10	7	Oui	25-10-2005	14h59
C10-A1-V10-D1-3	1	1	10	4	Oui	25-10-2005	15h02
C10-A1-V10-D0.2-1	0.2	0.46	10	4	Oui	25-10-2005	15h08
C10-A1-V10-D0.2-2	0.2	0.08	10	5	Oui	25-10-2005	15h10

Tableau 3.8

Déroulement des essais R12 par ordre chronologique

Désignation de l'essai	Distance nominale (m)	Distance réelle (m)	Vitesse nominale (km/h)	Vitesse réelle (km/h)	Dos d'âne	Date	Heure
R12-A1-V10-D0.2-1	0.2	0.44	10	5	Oui	25-10-2005	15h24
R12-A1-V10-D0.2-2	0.2	0.5	10	5	Oui	25-10-2005	15h26
R12-A1-V10-D1-1	1	1	10	6	Oui	25-10-2005	15h29
R12-A1-V10-D1-2	1	1.05	10	16	Oui	25-10-2005	15h32
R12-A0-V0-D0.2-E2-1	0.2	0.2	0	0	Non	25-10-2005	15h41
R12-A0-V0-D0.2-E3-1	0.2	0.2	0	0	Non	25-10-2005	15h54
R12-A0-V0-D0.2-E4-1	0.2	0.2	0	0	Non	25-10-2005	15h55
R12-A0-V0-D1-E2-1	1	1	0	0	Non	25-10-2005	15h57
R12-A0-V0-D1-E3-1	1	1	0	0	Non	25-10-2005	15h58
R12-A0-V0-D1-E4-1	1	1	0	0	Non	25-10-2005	16h01
R12-A0-V10-D0.2-1	0.2	0.58	10	6	Non	25-10-2005	16h00
R12-A0-V25-D0.2-1	0.2	0.51	25	23	Non	25-10-2005	16h03
R12-A0-V10-D1-1	1	1.05	10	7	Non	25-10-2005	16h08
R12-A0-V25-D1-1	1	1.18	25	24	Non	25-10-2005	16h12

3.3.7.3 Les essais dynamiques avec le rouleau compacteur

Pour ces essais, il a été utilisé un véhicule de type "rouleau compacteur" à deux essieux, de marque *Ingersoll-rand*, modèle *DD-65* (figure 3.31). Le poids total du véhicule, incluant le poids propre et le chargement, est de 134 kN.

Les blocs ont été placés du côté opposé au passage du véhicule. Au total, dix essais ont été réalisés (voir le tableau 3.9), suivant différentes distances en tête d'étaconnement, et sans dos d'âne. La vitesse, parce que trop faible ($< 5 \text{ km/h}$), n'a pu être captée par le radar. Dans le tableau, RC désigne rouleau compacteur. Le reste des paramètres conservent la même nomenclature que celles des camions conventionnels.

Tableau 3.9**Déroulement des essais RC par ordre chronologique**

Désignation de l'essai	Distance nominale (m)	Distance réelle (m)	Dos d'âne	Date	Heure
RC-D4-STA-1	4	4	Non	26-10-2005	9h19
RC-D4-DYN-1	4	4	Non	26-10-2005	9h30
RC-D3-STA-1	3	3	Non	26-10-2005	9h33
RC-D3-DYN-1	3	3	Non	26-10-2005	9h36
RC-D2-STA-1	2	2	Non	26-10-2005	9h39
RC-D2-DYN-1	2	2	Non	26-10-2005	9h42
RC-D1-STA-1	1	1	Non	26-10-2005	9h45
RC-D1-DYN-1	1	1	Non	26-10-2005	9h48
RC-D020-STA-1	0,2	0,2	Non	26-10-2005	9h52
RC-D020-DYN-1	0,2	0,2	Non	26-10-2005	9h56

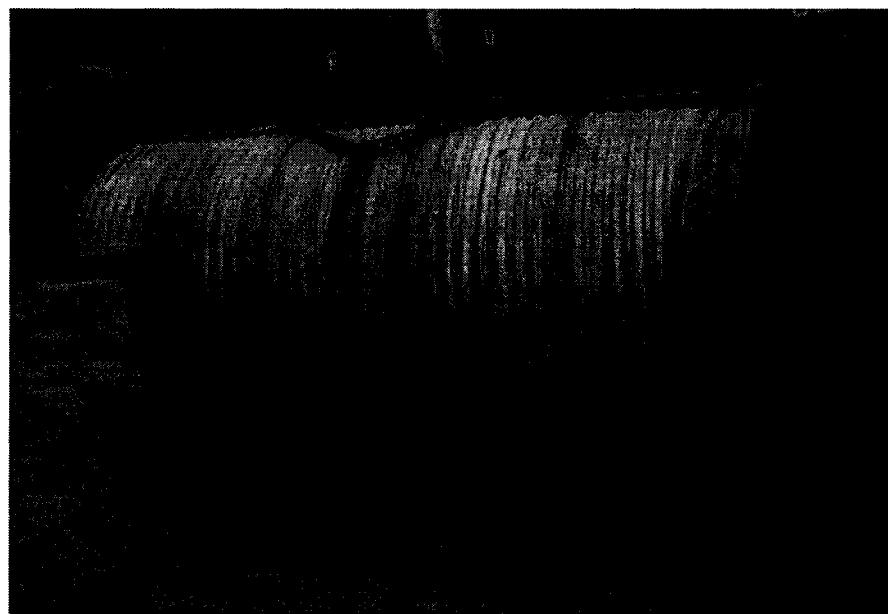


Figure 3.1 *Vue du TTAOG-1500*

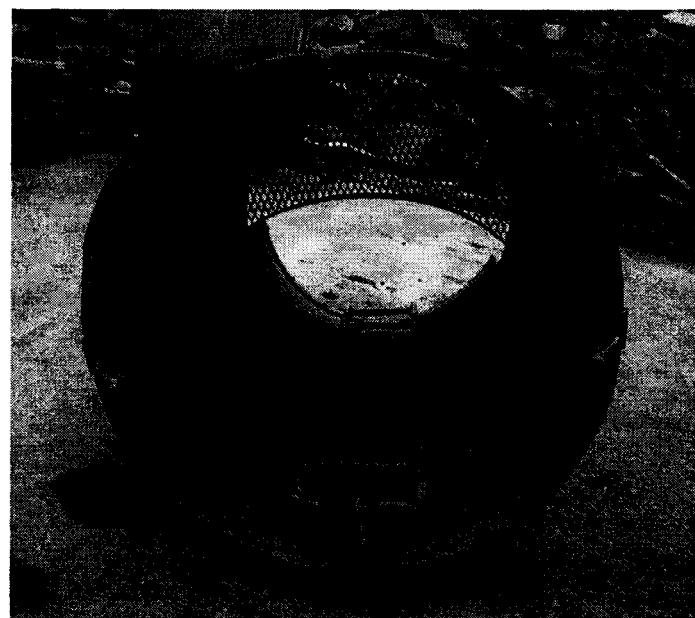


Figure 3.2 *Vue intérieure du TTAOG-1500*

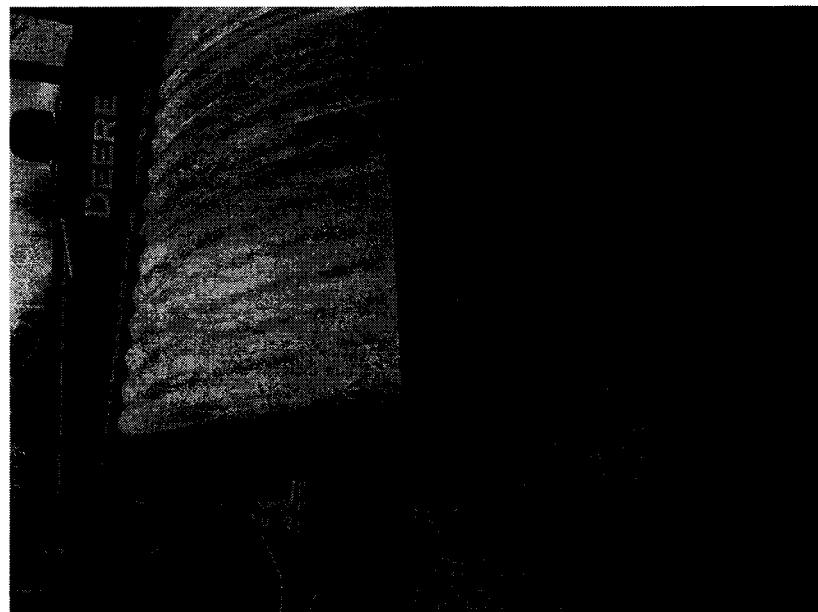


Figure 3.3 Ouverture du TTAOG-1500



Figure 3.4 Manutention à l'aide d'une pelle rétro-excavatrice



Figure 3.5 *Manutention à l'aide d'une pelle rétro-excavatrice*



Figure 3.6 *Le récureur de la Ville de Saguenay*

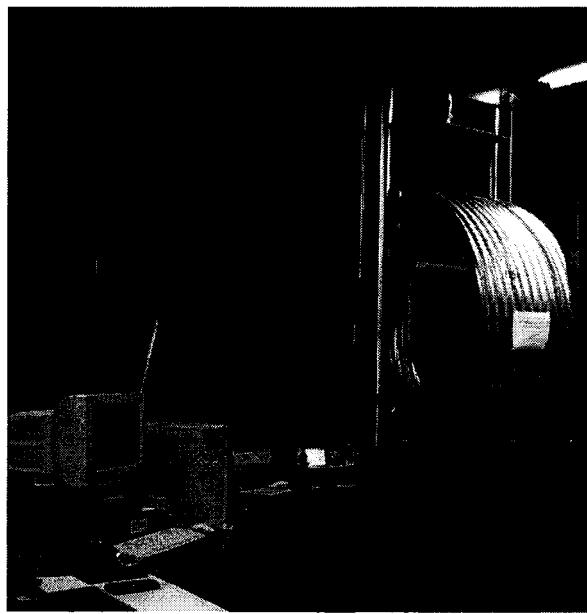


Figure 3.7 *Essai en laboratoire du TTAOG-1500*

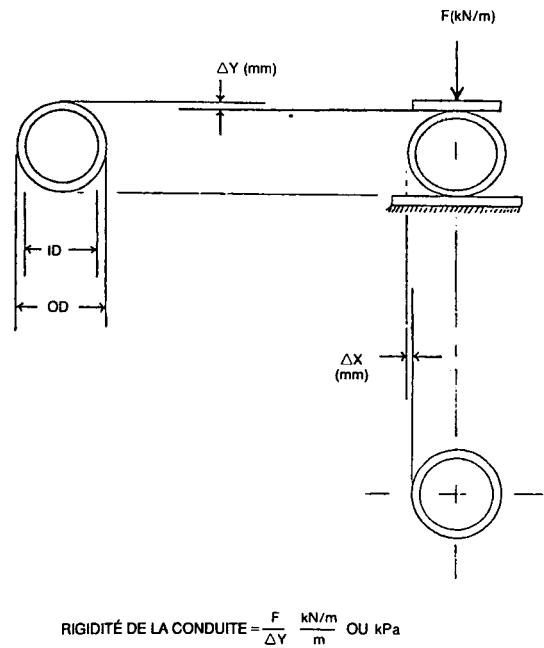


Figure 3.8 *Croquis illustrant la rigidité de la conduite*
(Modifiée d'après : Plastiques Big '0', et Watkins et Reeves, 1980)

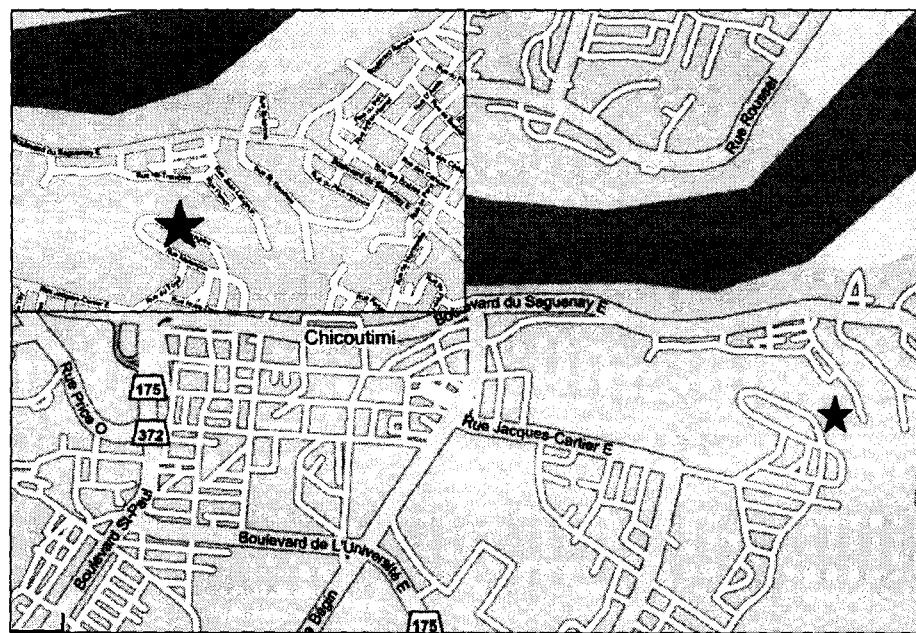


Figure 3.9 Localisation du site des essais en chantier



Figure 3.10 *Excavation de la tranchée*

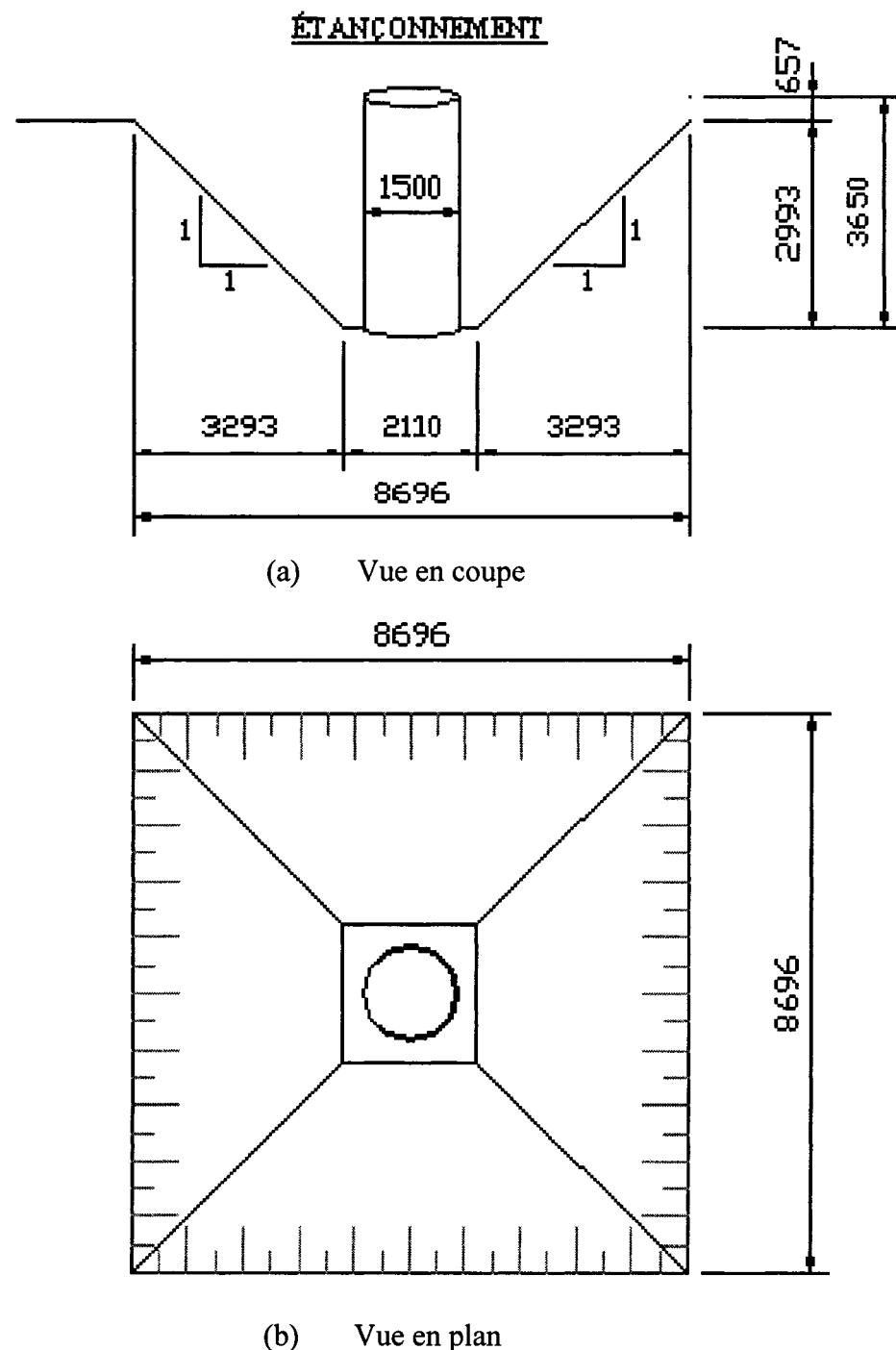


Figure 3.11 Schéma de l'excavation

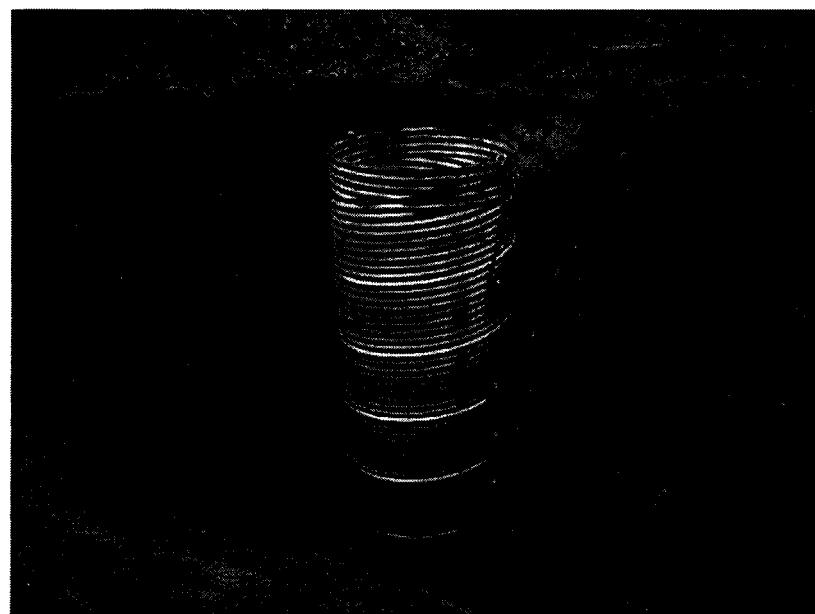


Figure 3.12 Installation du TTAOG-1500 dans l'excavation



Figure 3.13 Remblayage de l'excavation avec du sable



Figure 3.14 Spécimen d'essai en chantier

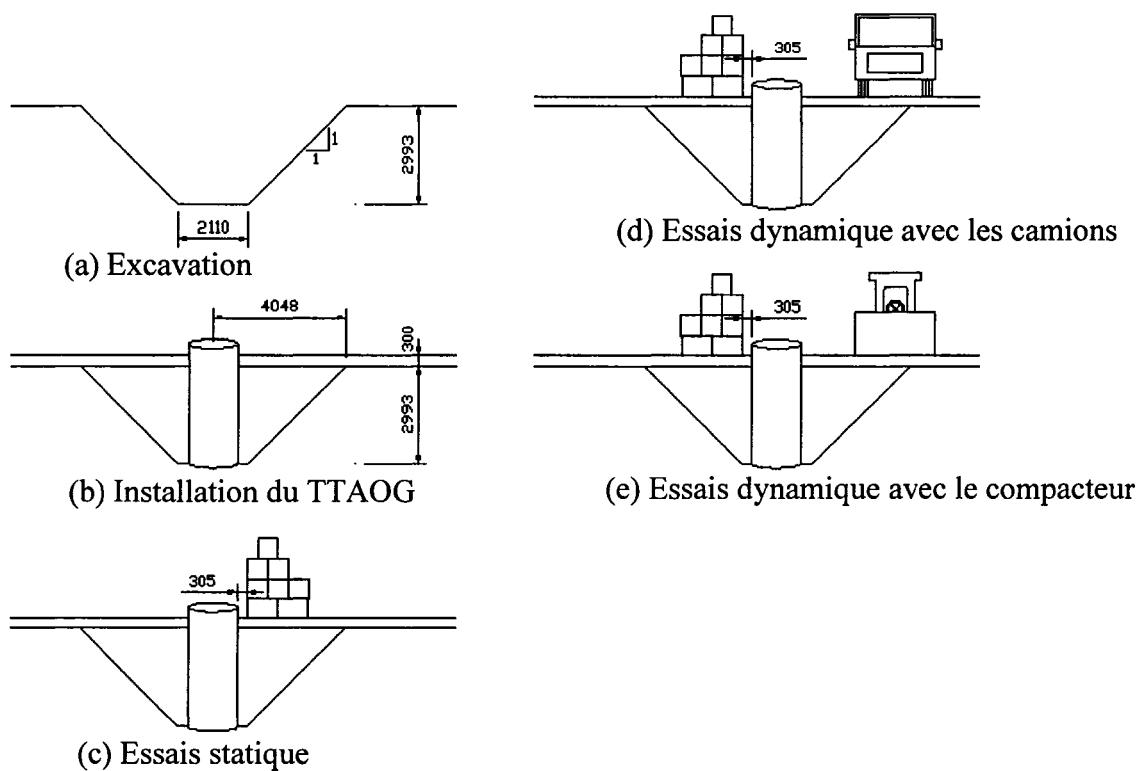


Figure 3.15 Présentation des différents essais

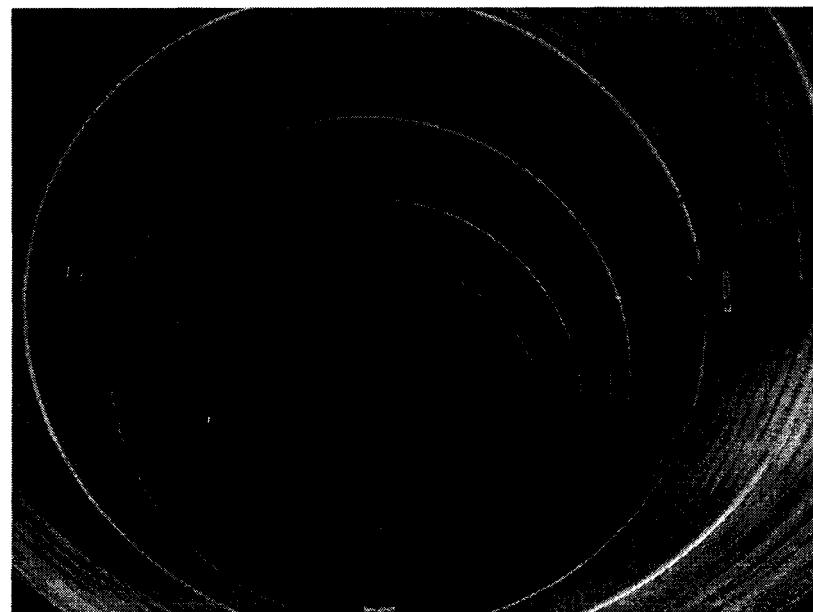


Figure 3.16 Disposition des LVDT dans le TTAOG

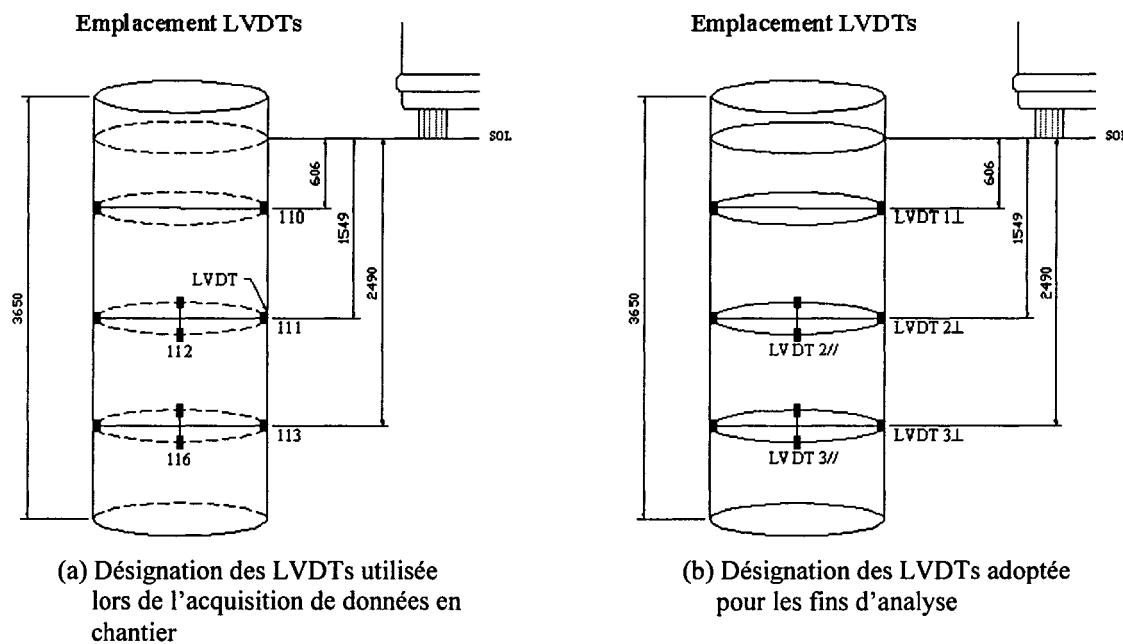


Figure 3.17 Hauteur des LVDT (mm)

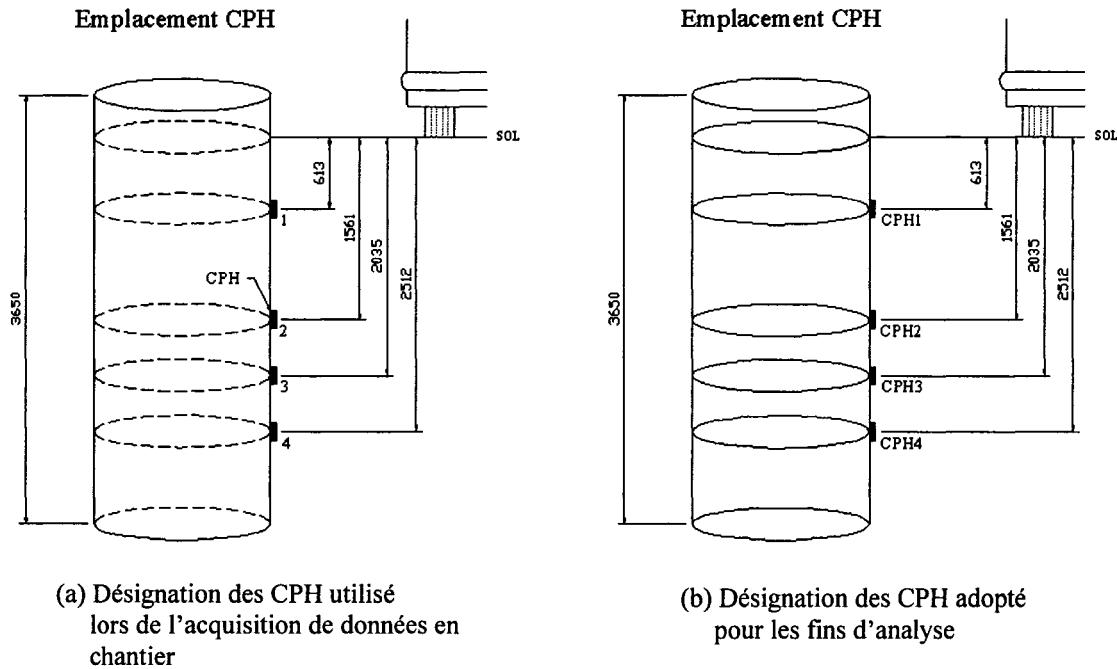


Figure 3.18 Hauteur des capteurs de pression horizontale (CPH) (mm)



Figure 3.19 Disposition des capteurs à pression sous le passage routier

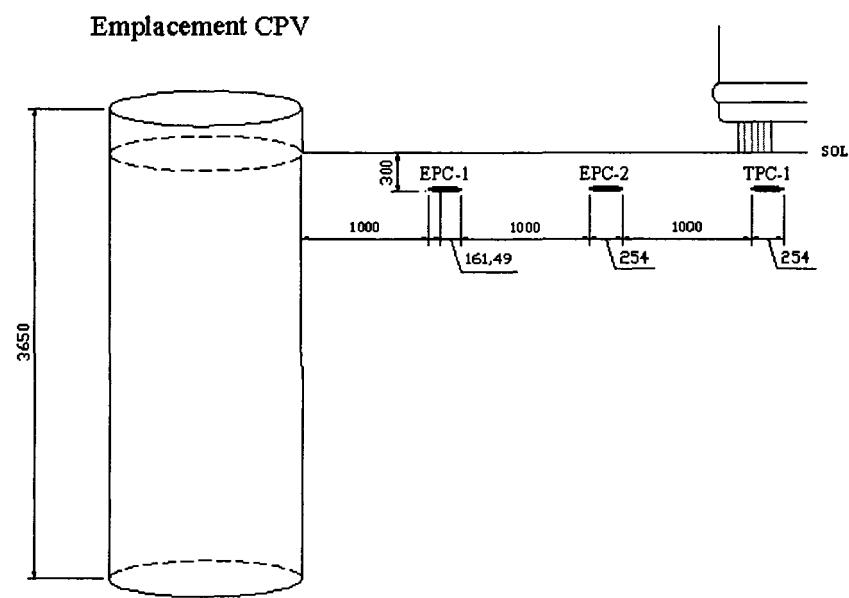


Figure 3.20 *Espacement des capteurs de pression verticale*



Figure 3.21 *Radar de vitesse*



Figure 3.22 Système d'acquisition de données utilisé en chantier

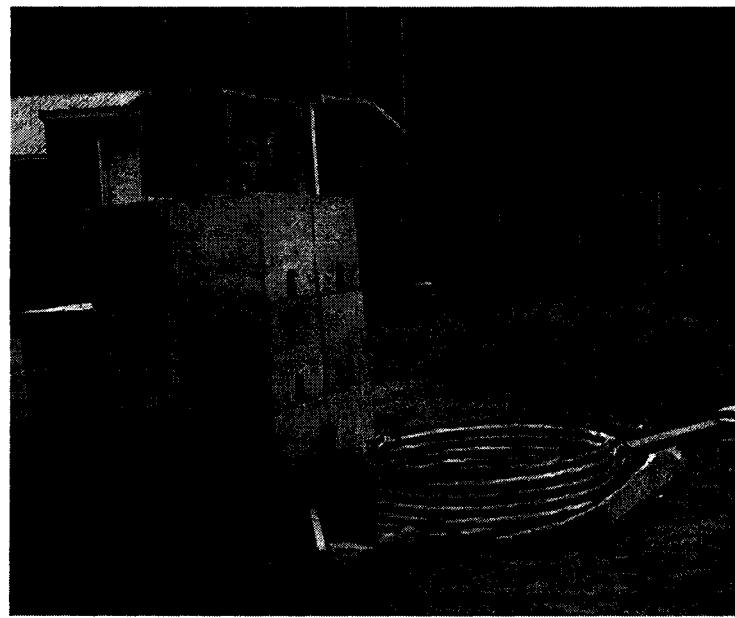


Figure 3.23 Empilement de blocs en béton pour essais statiques

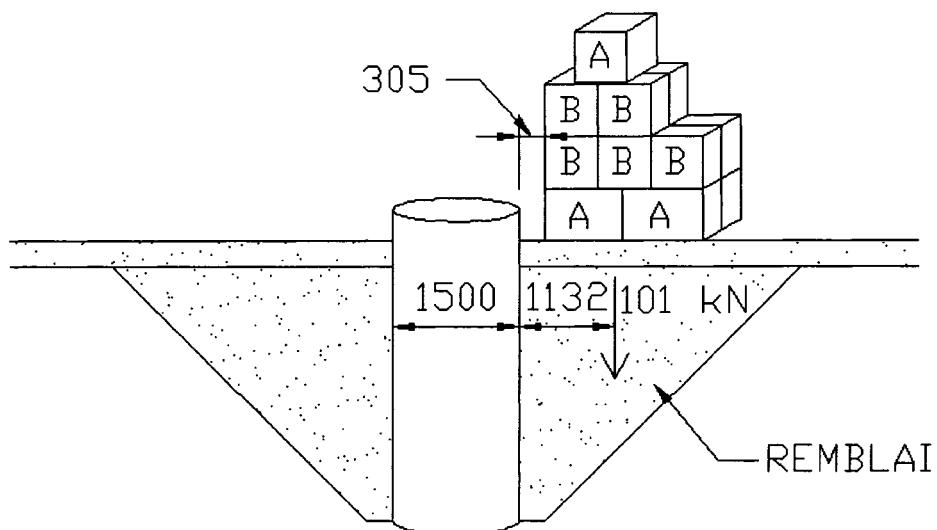


Figure 3.24 *Emplacement et poids total des blocs (mm)*

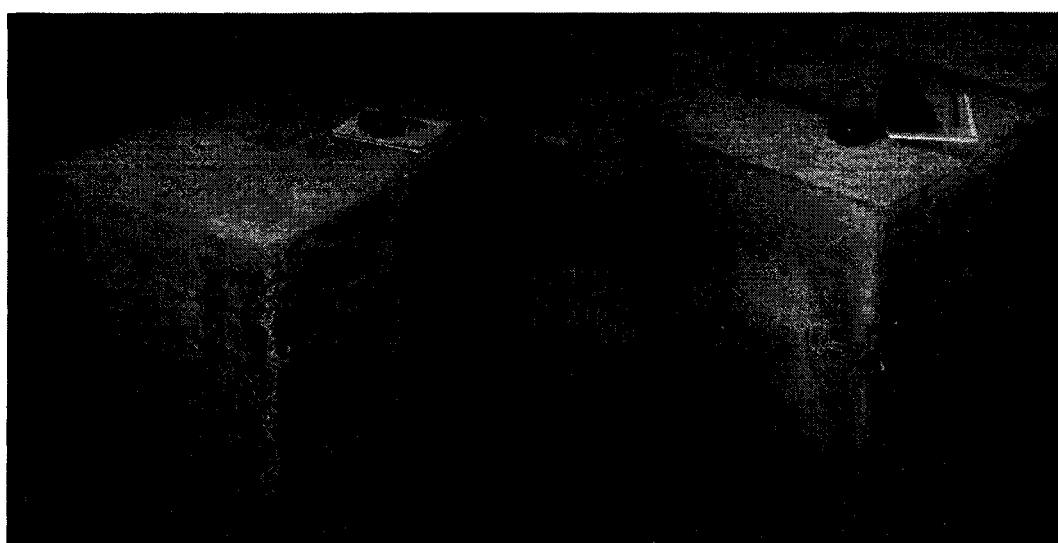
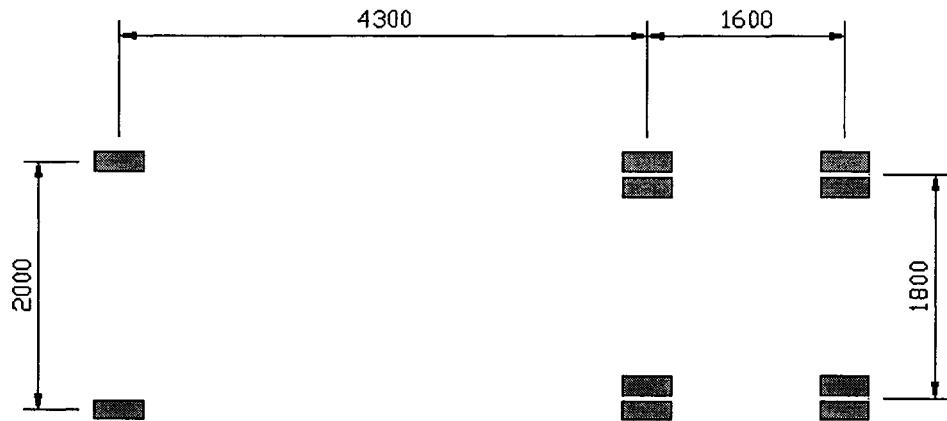


Figure 3.25 *Les blocs A et B de différentes dimensions*



(a) Photographie du camion

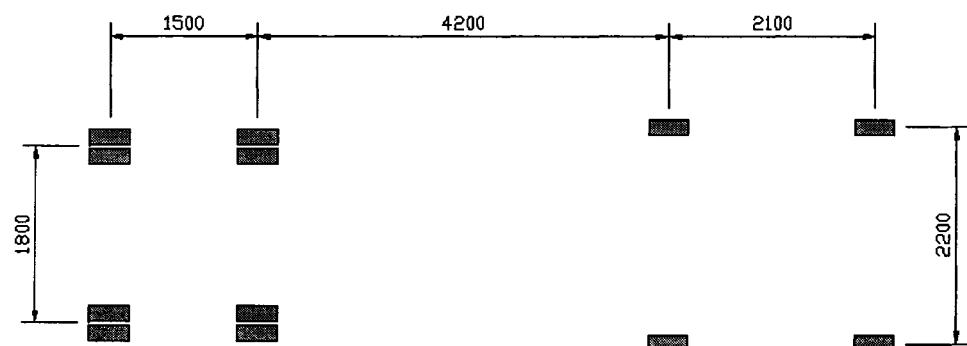


(b) Espacements des essieux (mm)

Figure 3.26 Le camion MACK de 3 essieux et 10 roues



(a) Photographie du récureur



(b) Espacements des essieux (mm)

Figure 3.27 *Le récureur VAC-CON modifié de quatre essieux et 12 roues*

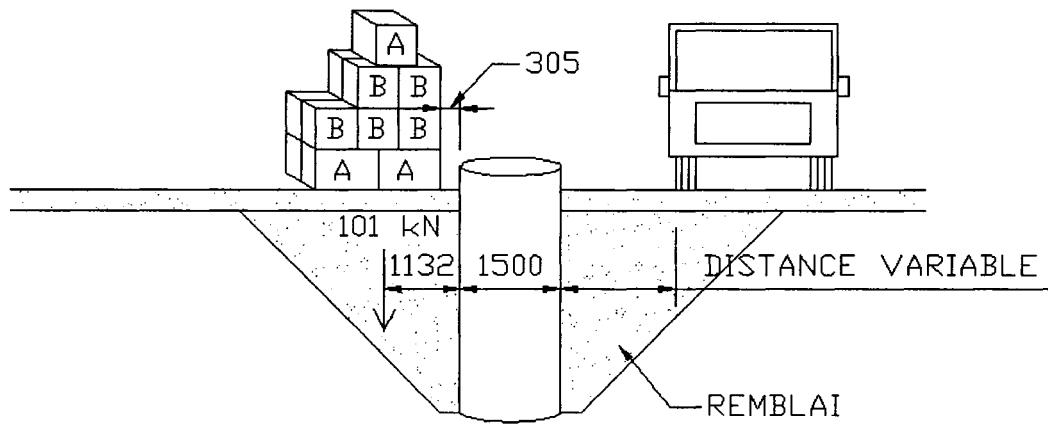


Figure 3.28 *Essais dynamiques avec des camions*

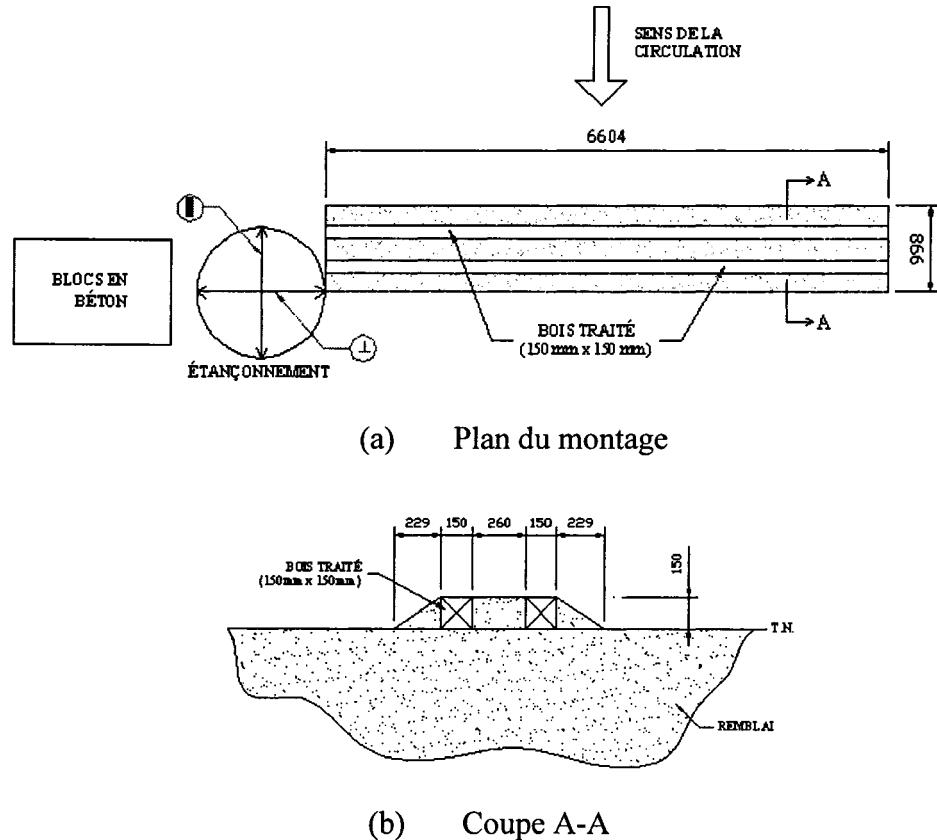


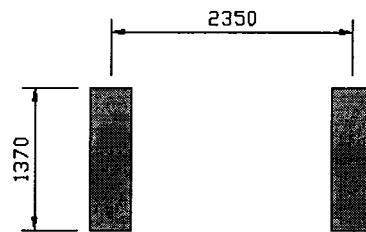
Figure 3.29 *Plan et coupe du dos d'âne*



Figure 3.30 *Le dos d'âne*



(a) Photographie du rouleau compacteur



(b) Espacements des essieux (mm)

Figure 3.31 *Le véhicule de type « rouleau compacteur » Ingersoll-rand*

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION ET ANALYSES DES RÉSULTATS

4.1 Essais en laboratoire

Les résultats des tests conduits en laboratoire sont présentés en termes de : (a) évolution des déplacements, vertical et horizontal, en fonction de la force appliquée; (b) charge et déplacements, correspondant, respectivement, à l'état ultime et à la limite élastique, et appelées dans ce qui suit valeurs caractéristiques mesurées; (c) rigidité diamétrale pour un déplacement vertical $\Delta_y = 5\% D$, où D représente le diamètre interne du tuyau.

4.1.1 Force versus déplacement

Les courbes représentant la force appliquée versus déplacement du TTAOG-1500 sont présentées à la figure 4.1. Les courbes représentées à gauche de l'axe vertical correspondent au déplacement vertical, alors que celles-ci qui sont situées à sa droite concernent le déplacement horizontal. Sur cette figure, on constate que, dans le domaine élastique, les courbes ont la même pente. Au-delà du domaine élastique, les courbes divergent quelque peu. Ceci est attribuable au fait que les longueurs des hélices et la qualité des agrafes continues peuvent différer d'un spécimen à un autre. Ce qui peut affecter le comportement (glissement) au-delà de la limite élastique. Par ailleurs, on observe que le déplacement vertical est quasiment égal au déplacement horizontal en valeur absolue.

4.1.2 Valeurs caractéristiques mesurées

Les valeurs caractéristiques pour chacun des spécimens mis à l'essai sont présentées dans le tableau 4.1. Celles-ci renferment: (a) la charge maximale, obtenue à l'ultime, et

les déplacements horizontal et vertical correspondants; (b) la charge et les déplacements horizontal et vertical correspondants, relatifs à la limite élastique apparente correspondant à $\epsilon_y = 0,002$ extraits à partir du chargement de la pente de la courbe force-déplacement; (c) la charge et les déplacements, horizontal et vertical, correspondant à un déplacement vertical de 5% du diamètre nominal, soit 75 mm; et enfin (d) la charge et les déplacements, horizontal et vertical, correspondants à un déplacement vertical de 10% du diamètre nominal, soit 150 mm. Pour fin de comparaison, on donne également les valeurs caractéristiques moyennes obtenues sur le TTAOG-1500 utilisé par la Ville de Victoriaville, (Moy. Vict.).

Tableau 4.1

Valeurs caractéristiques mesurées

	Spécimen	Force (kN)	Charge (kN/m)	Δ_y (vert.) (mm)	Δ_x (horiz.) (mm)	Δ_y / Δ_x
(a) à l'ultime	#1	13,9	18,9	293,0	242,3	1,21
	#2	15,9	21,6	296,2	246,3	1,20
	#3	14,5	19,7	304,8	244,6	1,25
	Moyenne (Moy. Vict.) ^(a)	14,8	20,1	298,0	244,4	1,22
	(Moy. Vict.) ^(a)	(18,7)	(25,3)	(301,0)	(259,5)	(1,16)
(b) à limite élastique	#1	10,0	13,6	104,0	89,3	1,16
	#2	11,6	15,8	106,0	92,9	1,14
	#3	10,6	14,4	111,0	94,6	1,17
	Moyenne (Moy. Vict.) ^(a)	10,7	14,6	107,0	92,3	1,16
	(Moy. Vict.) ^(a)	(12,0)	(16,3)	(111,2)	(86,9)	(1,28)
(c) $\Delta_y = 5\% D$	#1	8,0	10,9	75,1	65,3	1,15
	#2	7,9	10,7	75,1	65,2	1,15
	#3	8,8	12,0	75,0	66,3	1,13
	Moyenne (Moy. Vict.) ^(a)	8,2	11,2	75,1	65,6	1,14
	(Moy. Vict.) ^(a)	(8,4)	(11,4)	(75,1)	(55,8)	(1,35)
(d) $\Delta_y = 10\% D$	#1	12,5	17,0	149,9	126,2	1,19
	#2	12,1	16,4	149,5	126,5	1,18
	#3	13,9	18,9	150,0	131,1	1,14
	Moyenne (Moy. Vict.) ^(a)	12,8	17,4	149,8	127,9	1,17
	(Moy. Vict.) ^(a)	(14,7)	(20,0)	(150,1)	(121,8)	(1,24)

Note :

(a) : Pour TTAOG-60 (60 pouces) de Victoriaville

4.1.3 Valeurs des rigidités

La rigidité de la conduite (PS = *pipe stiffness*) est donnée par :

$$PS = \frac{F}{A_y} \quad \text{en kPa} \quad (4.1)$$

Le facteur de rigidité (SF = *stiffness factor*) peut être exprimé par :

$$SF = EI = 0.149 \times r^3 \times PS \quad \text{en kPa} \times m^3 \quad (4.2)$$

La rigidité (PS) et le facteur de rigidité (SF) de la conduite TTAOG-1500 sont présentés dans le tableau 4.2 pour $\Delta_y = 5\% D$ et $\Delta_y = 10\% D$. Par ailleurs, on observe que le système de Victoriaville est comparable mais un peu plus rigide que celui de la Ville de Saguenay.

Tableau 4.2

Rigidité et facteur de rigidité

Spécimen	Rigidité, PS (kPa)		Facteur de rigidité SF (kPa·m ³)	
	$\Delta_y = 5\% D$	$\Delta_y = 10\% D$	$\Delta_y = 5\% D$	$\Delta_y = 10\% D$
#1	142,5	109,7	8,96	6,90
#2	160,0	126,0	10,06	7,92
#3	145,1	113,4	9,12	7,13
Moyenne	149,1	116,2	9,37	7,30
(Moy. Vict.) ^(a)	(152,2)	(133,0)	(9,80)	(8,57)

Note :

(a) : Pour TTAOG-60 (60 pouces) de Victoriaville

4.2 Essais en chantier

Les résultats des tests conduits en chantier sont présentés en termes de : (a) contrainte nette, soit la contrainte induite par la surcharge sans la poussée de terre; (b) contrainte résiduelle, soit la contrainte avant la surcharge incluant la poussée de terre et le tassement du sol; (c) contrainte maximale, soit la contrainte la plus élevée induite par la poussée de terre et la surcharge; (d) déplacement net, soit le déplacement dû à la surcharge.

4.2.1 Résultats généraux

4.2.1.1 Réponses typiques

Les figures 4.2 à 4.4 présentent les réponses, considérées comme typiques, des capteurs de déplacements et des capteurs de pression, en fonction du temps, pour le véhicule à dix roues (C10), le véhicule à douze roues (R12), et le rouleau compacteur (RC), respectivement. Ces figures couvrent les différents paramètres d'étude ; à savoir la distance en tête, la vitesse, ou encore l'existence ou non de dos d'âne. Sur chacune de ces figures, on donne également, sous forme schématique, l'emplacement des LVDTs et des CPH sur le tuyau, ce qui facilitera grandement la lecture et l'interprétation des résultats. Ces figures permettent de constater ce qui suit :

- l'augmentation des contraintes nettes enregistrées par des CPH's à certains niveaux du tuyau amène des dépressions à d'autres CPH's. Ceci est attribuable à des déformations locales dues à la flexibilité du tuyau;
- la limite élastique semble être atteinte lorsque la contrainte nette atteint 10 kPa. En effet, on note qu'il subsiste une contrainte résiduelle à l'issue de la réponse, lorsque la contrainte nette dépasse le seuil de 10 kPa;
- les contraintes nettes les plus élevées sont obtenues avec le camion C10;
- la poussée des terres la plus élevée est enregistrée par le capteur CPH 1;

- les déplacements nets peuvent être considérés comme négligeables dans la mesure où le plus grand déplacement net obtenu lors des essais est de 0,94 mm;

4.2.1.2 Valeurs maximales atteintes

Les valeurs des contraintes maximales (σ_{\max}), résiduelles (P_0) et nettes ($\Delta\sigma$), obtenues avec les véhicules (C10, R12, RC) ou le deflectomètre, sont présentées dans les tableaux 4.3, 4.5, et 4.7, respectivement. Les tableaux 4.4, 4.6, et 4.8 donnent, respectivement, les contraintes nettes et les déplacements, pour les véhicules C10, R12 et RC. Dans l'ensemble de ces tableaux (4.4 à 4.8), on indique l'emplacement des différents LVDTs et CPH sur le tuyau. Les résultats présentés dans les tableaux 4.4 à 4.8 permettent de constater ce qui suit :

- les contraintes horizontales maximales (σ_{\max}) les plus élevées semblent être situées au niveau du capteur de pression horizontale 4 (CPH 4);
- les plus grandes contraintes nettes ($\Delta\sigma$) dues à la surcharge semblent être situées au niveau du capteur de pression horizontale 1 (CPH 1);
- la contrainte résiduelle (P_0) varie jusqu'à 35 % pour un seul type de camion. En effet, la contrainte résiduelle CPH 1 de l'essai C10-A1-V25-D3 est de 39,4 kPa lorsque celle de l'essai C10-A0-V25-D0,2 est de 29,1 kPa;
- le déplacement net (ΔL) n'est pas proportionnel à la contrainte nette ($\Delta\sigma$);
- les déplacements nets les plus élevés sont enregistrés au niveau du LVDT 2 \perp ;
- les déplacements nets sont plus élevés dans la direction perpendiculaire à la circulation des véhicules (LVDT 2 \perp et 3 \perp), comparativement à ceux correspondant à la direction parallèle;
- la contrainte nette et le déplacement net les plus élevés sont obtenus lors de l'essai C10-A1-V10-D0,2, et valent, respectivement 21,2 kPa (CPH 1), et 0,94 mm (LVDT 1 \perp).

Tableau 4.3

Valeurs des contraintes résiduelles, maximales et nettes – C10

Dos d'âne Oui / Non	Vitesse km/m	Distance m	Désignation de l'essai	CPH 1			CPH 2			CPH 3			CPH 4		
				Profondeur 613 mm			Profondeur 1561 mm			Profondeur 2035 mm			Profondeur 2512 mm		
				P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa
Oui	10	0,2	C10-A1-V10-D0,2	32,0	53,2	21,2	37,9	41,4	3,5	54,1	57,0	2,9	61,3	62,3	1,0
		1	C10-A1-V10-D1	31,1	38,1	7,0	38,5	41,1	2,6	54,3	56,1	1,8	61,5	62,2	0,7
		2	C10-A1-V10-D2	39,2	42,2	3,0	36,2	38,8	2,6	52,2	54,4	2,2	61,0	61,7	0,7
		3	C10-A1-V10-D3	39,0	41,1	2,1	36,5	37,1	0,6	52,5	53,0	0,5	61,3	61,4	0,1
		4	C10-A1-V10-D4	38,6	39,7	1,1	36,8	37,0	0,2	52,9	53,1	0,2	61,7	61,7	0,0
	25	2	C10-A1-V25-D2	38,1	42,0	3,9	36,9	39,3	2,4	53,1	54,9	1,8	61,4	61,9	0,5
		3	C10-A1-V25-D3	39,4	41,8	2,4	36,2	37,2	1,0	52,2	53,1	0,9	61,1	61,3	0,2
		4	C10-A1-V25-D4	38,8	40,3	1,5	36,6	37,1	0,5	52,6	53,1	0,5	61,5	61,5	0,0
Non	0	2 (essieu 1)	C10-A0-V0-D2-E1 ^(a)	34,2	36,2	2,0	36,6	36,6	0,0	52,3	52,4	0,1	61,4	60,8	-0,6
		2 (essieu 2)	C10-A0-V0-D2-E2 ^(a)	34,2	37,7	3,5	36,6	37,4	0,8	52,3	53,2	0,9	61,4	60,1	-1,3
		2 (essieu 3)	C10-A0-V0-D2-E3 ^(a)	34,2	38,0	3,8	36,6	37,6	1,0	52,3	53,3	1,0	61,4	60,2	-1,2
	10	0,2	C10-A0-V10-D0,2	30,3	36,3	6,0	38,4	41,6	3,2	55,7	57,8	2,1	63,2	63,4	0,2
		1	C10-A0-V10-D1	33,8	38,1	4,3	37,6	41,5	3,9	55,4	58,0	2,6	64,5	64,9	0,4
		2	C10-A0-V10-D2	33,7	36,2	2,5	37,5	39,5	2,0	55,3	56,6	1,3	64,5	64,7	0,2
		3	C10-A0-V10-D3	33,0	35,2	2,2	37,6	38,5	0,9	55,5	56,0	0,5	64,8	64,9	0,1
		4	C10-A0-V10-D4	33,0	33,9	0,9	37,6	38,0	0,4	55,6	55,9	0,3	64,8	64,9	0,1
	25	0,2	C10-A0-V25-D0,2	29,1	40,0	10,9	38,0	42,3	4,3	55,5	58,5	3,0	62,9	63,5	0,6
		1	C10-A0-V25-D1	31,3	36,6	5,3	38,5	41,7	3,2	56,5	58,5	2,0	64,5	65,0	0,5
		2	C10-A0-V25-D2	33,5	36,4	2,9	37,6	39,4	1,8	55,5	56,5	1,0	64,6	64,8	0,2
		3	C10-A0-V25-D3	33,4	35,9	2,5	37,4	38,7	1,3	55,3	56,0	0,7	64,6	64,7	0,1

Emplacement CPH

The diagram illustrates the vertical arrangement of four strain gauges (CPH1, CPH2, CPH3, CPH4) in a soil profile (SOL). The total depth is 3650 mm. The gauges are located at depths of 613 mm, 1561 mm, 2035 mm, and 2512 mm. The diagram shows the soil profile with these specific depths marked.

Note :

(a) : La contrainte résiduelle est supposée la même pour les trois essais statiques (C10-A0-V0-D2-E1, C10-A0-V0-D2-E2 et C10-A0-V0-D2-E3) et égale à la contrainte résiduelle de l'essai précédent à C10-A0-V0-D2-E1.

Tableau 4.4
Valeurs nettes des différents essais – C10

Dos d'âne / Non	Vitesse km/m	Distance m	Désignation de l'essai	Contrainte nette des capteurs de pression horizontale				Déplacement net des LVDTs				
				CPH 1	CPH 2	CPH 3	CPH 4	1⊥	2⊥	2//	3⊥	
				Prof. 613 mm	Prof. 1561 mm	Prof. 2035 mm	Prof. 2512 mm	Prof. 606 mm	Prof. 1549 mm	Prof. 2490 mm	3//	
Oui	10	0,2	C10-A1-V10-D0,2	21,2	3,5	2,9	1,0	-0,94	-0,09	0,00	0,00	0,01
		1	C10-A1-V10-D1	7,0	2,6	1,8	0,7	-0,03	-0,04	-0,01	-0,01	0,01
		2	C10-A1-V10-D2	3,0	2,6	2,2	0,7	-0,03	-0,03	0,00	0,00	0,00
		3	C10-A1-V10-D3	2,1	0,6	0,5	0,1	-0,01	-0,03	0,00	-0,01	0,00
		4	C10-A1-V10-D4	1,1	0,2	0,2	0,0	-0,01	-0,03	0,00	-0,01	0,00
	25	2	C10-A1-V25-D2	3,9	2,4	1,8	0,5	-0,03	-0,04	0,00	0,00	0,01
		3	C10-A1-V25-D3	2,4	1,0	0,9	0,2	-0,01	-0,04	0,00	-0,01	0,00
		4	C10-A1-V25-D4	1,5	0,5	0,5	0,0	0,00	-0,04	0,01	-0,01	0,00
		2 (essieu 1)	C10-A0-V0-D2-E1 ^(a)	2,0	0,0	0,1	-0,6	0,01	0,03	0,01	0,00	-0,01
Non	0	2 (essieu 2)	C10-A0-V0-D2-E2 ^(a)	3,5	0,8	0,9	-1,3	-0,01	-0,04	0,02	-0,01	-0,01
		2 (essieu 3)	C10-A0-V0-D2-E3 ^(a)	3,8	1,0	1,0	-1,2	0,04	-0,04	0,01	0,00	0,01
		0,2	C10-A0-V10-D0,2	6,0	3,2	2,1	0,2	-0,09	-0,10	0,00	0,00	0,00
	10	1	C10-A0-V10-D1	4,3	3,9	2,6	0,4	-0,03	-0,06	0,00	0,00	0,01
		2	C10-A0-V10-D2	2,5	2,0	1,3	0,2	-0,03	-0,04	0,00	-0,01	0,01
		3	C10-A0-V10-D3	2,2	0,9	0,5	0,1	-0,03	-0,04	0,00	-0,01	0,01
		4	C10-A0-V10-D4	0,9	0,4	0,3	0,1	-0,03	-0,03	0,00	0,00	0,00
	25	0,2	C10-A0-V25-D0,2	10,9	4,3	3,0	0,6	-0,59	-0,25	0,05	-0,01	0,00
		1	C10-A0-V25-D1	5,3	3,2	2,0	0,5	-0,03	-0,04	0,01	0,00	0,00
		2	C10-A0-V25-D2	2,9	1,8	1,0	0,2	-0,03	-0,04	0,00	-0,01	0,01
		3	C10-A0-V25-D3	2,5	1,3	0,7	0,1	-0,03	-0,03	0,00	-0,01	0,01

Emplacement LVDTs

Diagram showing the cylinder's height (3550 mm) and the positions of LVDT1, LVDT2, and LVDT3 relative to the 'sol' (bottom) and 'top' (top) reference lines. The distances are 613 mm, 1561 mm, and 2490 mm respectively.

Emplacement CPH

Diagram showing the cylinder's height (3550 mm) and the positions of CPH1, CPH2, CPH3, and CPH4 relative to the 'sol' (bottom) and 'top' (top) reference lines. The distances are 613 mm, 1561 mm, 2035 mm, and 2512 mm respectively.

Note :

(a) : La contrainte résiduelle est supposée la même pour les trois essais statiques (C10-A0-V0-D2-E1, C10-A0-V0-D2-E2 et C10-A0-V0-D2-E3) et égale à la contrainte résiduelle de l'essai précédent à C10-A0-V0-D2-E1.

Tableau 4.5

Valeurs des contraintes résiduelles, maximales et nettes – R12

Dos d'âne Oui / Non	Vitesse km/m	Distance m	Désignation de l'essai	CPH 1			CPH 2			CPH 3			CPH 4		
				Profondeur 613 mm			Profondeur 1561 mm			Profondeur 2035 mm			Profondeur 2512 mm		
				P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa
Oui	10	0,2	R12-A1-V10-D0,2	37,6	46,6	9,0	35,6	38,0	2,4	52,7	54,2	1,5	61,1	61,4	0,3
		1	R12-A1-V10-D1	34,3	44,2	9,9	36,3	39,5	3,2	53,3	55,6	2,3	61,2	61,4	0,2
Non	0	0,2 (essieu 2)	R12-A0-V0-D0,2-E2 ^(a)	33,6	33,1	-0,5	36,8	30,5	-6,3	53,9	50,0	-3,9	61,0	58,5	-2,5
		0,2 (essieu 3)	R12-A0-V0-D0,2-E3 ^(a)	33,6	25,6	-0,8	36,8	31,3	-5,5	53,9	50,1	-3,8	61,0	58,1	-2,9
		0,2 (essieu 4)	R12-A0-V0-D0,2-E4 ^(a)	33,6	24,1	-9,5	36,8	31,9	-4,9	53,9	50,3	-3,6	61,0	58,3	-2,7
		1 (essieu 2)	R12-A0-V0-D1-E2 ^(a)	33,6	39,2	5,6	36,8	35,9	-0,9	53,9	52,5	-1,4	61,0	59,3	-1,7
		1 (essieu 3)	R12-A0-V0-D1-E3 ^(a)	33,6	38,6	5,0	36,8	36,7	-0,1	53,9	53,1	-0,8	61,0	59,2	-1,8
		1 (essieu 4)	R12-A0-V0-D1-E4 ^(a)	33,6	38,7	5,1	36,8	36,6	-0,2	53,9	52,9	-1,0	61,0	59,3	-1,7
	10	0,2	R12-A0-V10-D0,2	34,0	42,1	8,1	36,4	38,6	2,2	53,6	54,9	1,3	61,0	61,3	0,3
		1	R12-A0-V10-D1	35,2	37,5	2,3	37,0	38,0	1,0	53,6	54,8	1,2	60,9	61,2	0,3
	25	0,2	R12-A0-V25-D0,2	35,5	41,6	6,1	36,7	39,1	2,4	53,5	55,0	1,5	60,9	61,4	0,5
		1	R12-A0-V25-D1	33,3	36,4	3,1	36,5	38,5	2,0	53,5	55,1	1,6	60,9	61,2	0,3

Emplacement CPH

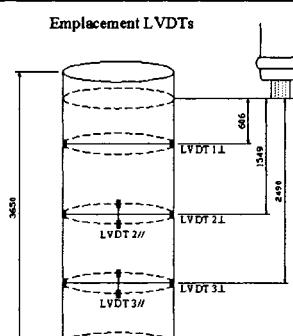
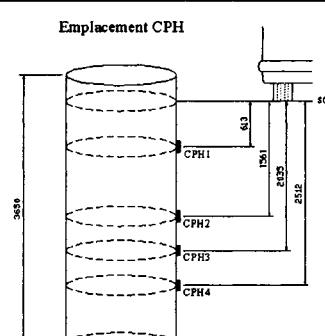
The diagram illustrates the soil profile with a total depth of 3650 mm. Four strain gauges, labeled CPH1, CPH2, CPH3, and CPH4, are positioned at depths of 613 mm, 1561 mm, 2035 mm, and 2512 mm respectively. The surface is marked as 'SOL'.

Note :

(a) : La contrainte résiduelle est supposée la même pour les six essais statiques (R12-A0-V0-D0,2-E2, R12-A0-V0-D0,2-E3, R12-A0-V0-D0,2-E4, R12-A0-V0-D1-E2, R12-A0-V0-D1-E3 et R12-A0-V0-D1-E4) et égale à la contrainte résiduelle de l'essai précédent à R12-A0-V0-D0,2-E2.

Tableau 4.6

Valeurs nettes des différents essais – R12

Dos d'âne Oui / Non	Vitesse km/m	Distance m	Désignation de l'essai	Contrainte nette des capteurs de pression horizontale				Déplacement net des LVDTs			
				CPH 1	CPH 2	CPH 3	CPH 4	1⊥	2⊥	2//	3⊥
				Prof. 613 mm	Prof. 1561 mm	Prof. 2035 mm	Prof. 2512 mm	Prof. 606 mm	Prof. 1549 mm	Prof. 2490 mm	3//
Dos d'âne Oui / Non	Vitesse km/m	Distance m	Désignation de l'essai	Δσ	Δσ	Δσ	Δσ	ΔL	ΔL	ΔL	ΔL
				kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	mm
Oui	10	0,2	R12-A1-V10-D0,2	9,0	2,4	1,5	0,3	-0,10	-0,04	0,01	0,01
		1	R12-A1-V10-D1	9,9	3,2	2,3	0,2	-0,04	-0,04	0,01	0,00
Non	0	0,2 (essieu 2)	R12-A0-V0-D0,2-E2 ^(a)	-0,5	-6,3	-3,9	-2,5	-0,03	0,00	0,00	0,00
		0,2 (essieu 3)	R12-A0-V0-D0,2-E3 ^(a)	-0,8	-5,5	-3,8	-2,9	-0,04	0,00	0,00	-0,01
		0,2 (essieu 4)	R12-A0-V0-D0,2-E4 ^(a)	-9,5	-4,9	-3,6	-2,7	-0,04	-0,02	0,00	0,00
		1 (essieu 2)	R12-A0-V0-D1-E2 ^(a)	5,6	-0,9	-1,4	-1,7	-0,02	0,00	0,00	-0,01
	10	1 (essieu 3)	R12-A0-V0-D1-E3 ^(a)	5,0	-0,1	-0,8	-1,8	-0,03	-0,02	0,00	0,00
		1 (essieu 4)	R12-A0-V0-D1-E4 ^(a)	5,1	-0,2	-1,0	-1,7	-0,03	-0,02	0,00	-0,01
25	0,2	0,2	R12-A0-V25-D0,2	8,1	2,2	1,3	0,3	-0,03	-0,04	0,01	0,01
		1	R12-A0-V25-D1	2,3	1,0	1,2	0,3	-0,03	-0,03	0,00	0,00
Emplacement LVDTs				Emplacement CPH							
											

Note :

(a) : La contrainte résiduelle est supposée la même pour les six essais statiques (R12-A0-V0-D0,2-E2, R12-A0-V0-D0,2-E3, R12-A0-V0-D0,2-E4, R12-A0-V0-D1-E2, R12-A0-V0-D1-E3 et R12-A0-V0-D1-E4) et égale à la contrainte résiduelle de l'essai précédent à R12-A0-V0-D0,2-E2.

Tableau 4.7

Valeurs des contraintes résiduelles, maximales et nettes – RC

Dos d'âne Oui / Non	Vitesse km/m	Distance m	Désignation de l'essai	CPH 1			CPH 2			CPH 3			CPH 4		
				Profondeur 613 mm			Profondeur 1561 mm			Profondeur 2035 mm			Profondeur 2512 mm		
				P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa	P_o kPa	σ_{max} kPa	$\Delta\sigma$ kPa
Non	0	0,2 (essieu 1)	RC-V0-D0,2-E1 ^(b)	31,5	34,4	2,9	37,0	37,8	0,8	54,1	54,5	0,4	64,0	63,7	-0,3
		1 (essieu 1)	RC-V0-D1-E1	29,6	32,3	2,7	35,7	36,3	0,6	53,6	54,0	0,4	63,8	63,9	0,1
		2 (essieu 1)	RC-V0-D2-E1	29,4	30,8	1,4	34,6	34,9	0,3	52,1	52,4	0,3	61,1	61,2	0,1
		3 (essieu 1)	RC-V0-D3-E1	30,2	30,4	0,2	34,3	34,6	0,3	51,7	52,0	0,3	60,1	60,4	0,3
		4 (essieu 1)	RC-V0-D4-E1	32,5	31,5	1,0	36,2	34,0	-2,2	53,5	51,4	-2,1	61,0	59,6	-1,4
	< 5 ^(a)	0,2	RC-V5-D0,2	33,1	42,8	9,7	35,3	41,2	5,9	53,0	57,7	4,7	62,8	67,2	4,4
		1	RC-V5-D1	30,6	38,4	7,8	35,2	42,5	7,3	53,0	59,2	6,2	63,0	69,0	6,0
		2	RC-V5-D2	30,3	34,4	4,1	34,3	39,6	5,3	51,9	57,5	5,6	60,8	66,2	5,4
		3	RC-V5-D3	30,1	33,4	3,3	34,3	36,6	2,3	51,7	54,0	2,3	60,2	62,3	2,1
		4	RC-V5-D4	31,3	33,5	2,2	33,9	35,3	1,4	51,3	52,8	1,5	59,5	61,4	1,9
Emplacement CPH															

Note :

- (a) : La vitesse n'a pu être captée par le radar à vitesse car elle était trop petite (< 5 km / h)
- (b) : La contrainte résiduelle des essais statiques RC-V0-D0,2-E1, RC-V0-D1-E1, RC-V0-D2-E1, RC-V0-D3-E1, RC-V0-D4-E1 est supposée égale à la contrainte résiduelle de l'essai précédent.

Tableau 4.8

Valeurs nettes des différents essais - RC

Dos d'âne Oui / Non	Vitesse km/m	Distance m	Désignation de l'essai	Contrainte nette des capteurs de pression horizontale				Déplacement net des LVDTs			
				CPH 1	CPH 2	CPH 3	CPH 4	1 \perp	2 \perp	2//	3 \perp
				Prof. 613 mm	Prof. 1561 mm	Prof. 2035 mm	Prof. 2512 mm	Prof. 606 mm	Prof. 1549 mm	Prof. 2490 mm	
Non	0	0,2 (essieu 1)	RC-V0-D0,2-E1	2,9	0,8	0,4	-0,3	-0,08	-0,01	0,00	0,00
		1 (essieu 1)	RC-V0-D1-E1	2,7	0,6	0,4	0,1	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
		2 (essieu 1)	RC-V0-D2-E1	1,4	0,3	0,3	0,1	-0,83	-0,18	-0,23	-0,28
		3 (essieu 1)	RC-V0-D3-E1	0,2	0,3	0,3	0,3	-0,01	-0,01	-0,03	-0,01
		4 (essieu 1)	RC-V0-D4-E1	1,0	-2,2	-2,1	-1,4	-0,01	-0,02	0,03	-0,01
	< 5 ^(a)	0,2	RC-V5-D0,2	9,7	5,9	4,7	4,4	-0,26	-0,44	0,01	-0,10
		1	RC-V5-D1	7,8	7,3	6,2	6,0	-0,03	-0,04	0,00	-0,01
		2	RC-V5-D2	4,1	5,3	5,6	5,4	-0,01	-0,06	0,00	0,00
		3	RC-V5-D3	3,3	2,3	2,3	2,1	-0,01	-0,01	0,01	0,00
		4	RC-V5-D4	2,2	1,4	1,5	1,9	-0,01	-0,01	0,02	-0,01

Emplacement LVDTs

Emplacement CPH

Note :

- (a) : La vitesse n'a pu être captée par le radar à vitesse car elle était trop petite (< 5 km / h)
- (b) : La contrainte résiduelle des essais statiques RC-V0-D0,2-E1, RC-V0-D1-E1, RC-V0-D2-E1, RC-V0-D3-E1, RC-V0-D4-E1 est supposée égale à la contrainte résiduelle de l'essai précédent.

4.2.2 Blocs

Tel que mentionné précédemment, cet essai s'est déroulé en deux étapes. Dans la première, le tuyau placé verticalement au fond de la tranchée a été soumis à l'action croissante de la poussée des terres en déversant du sable sec sur la paroi de la tranchée qui était inclinée à 45 degrés. La seconde étape de l'essai a consisté à surcharger le tuyau en posant une série de 15 blocs de béton posés tout près du tuyau (figure 3.23)

Les mesures effectuées sur le terrain ont pour l'essentiel, consisté à mesurer la compression ou l'extension du tuyau sous l'action de la charge en quatre sections différentes. Les déformations diamétrales et les contraintes mesurées après le déversement de sable et le gravier ainsi qu'après la mise en place de la surcharge sont présentés au tableau 4.10 et le tableau 4.11. Le tableau 4.9 donne les caractéristiques des blocs de béton utilisés à la Ville de Saguenay pour la surcharge.

Tableau 4.9

Caractéristiques des blocs

	Bloc A	Bloc B
Volume d'un bloc (V_{bloc}) (m^3)	0,341	0,239
Aire _{base} (m^2)	0,558	0,384
Poids d'un bloc (W_{bloc}) (kN)	8,4	5,9
Pression de contact (15 blocs) (kPa)	45,239	

Tableau 4.10

Essai statique en chantier – LVDTs

LVDTs	CHARGEMENT			
	Diamètre initial (mm)	Diamètre final (mm)	Diamètre final (mm)	Diamètre final (mm)
1⊥	1 500	1 499,93	1 499,93	1 499,64
2⊥	1 500	1 499,96	1 499,96	1 499,81
2//	1 500	1 500,10	1 500,10	1 500,09
3⊥	1 500	1 499,99	1 499,99	1 499,98
3//	1 500	1 500,00	1 500,01	1 499,99

Tableau 4.11

Essai statique en chantier – CPHs

CPHs	CHARGEMENT			
	Contrainte initiale (kPa)	Contrainte finale (kPa)	Contrainte finale (kPa)	Contrainte finale (kPa)
CPH 1	0,0	27,9	29,6	31,1
CPH 2	0,0	38,0	35,6	34,3
CPH 3	0,0	58,7	52,9	49,9
CPH 4	0,0	67,7	60,6	57,6

4.2.2.1 Observations

Sur la base des données des tableaux 4.10 et 4.11, les observations suivantes peuvent être énoncées :

- les déplacements nets peuvent être considérés comme négligeable dans la mesure où le plus grand déplacement net obtenu lors des essais est de 0,36 mm;
- la surcharge des blocs a amené une augmentation des contraintes du premier capteur de pression horizontale (CPH 1) et une diminution des autres capteurs plus profonds (CPH 2, CPH 3 et CPH 4).

4.2.3 Camions

Cette section analyse l'effet de chacun des paramètres d'étude, ainsi que leur effet combiné, sur le comportement du TTAOG 1500, suite au passage des véhicules C10 ou R12; soit : (a) l'effet de la distance en tête d'éstançonnement; (b) l'effet d'un défaut de chaussée ou dos d'âne; (c) l'effet de la vitesse de circulation des camions.

4.2.3.1 Effets typiques de la distance en tête d'éstançonnement

Les figures 4.5 à 4.8 comparent les réponses des CPH et celles des LVDTs lorsque la distance en tête varie. Les données présentées concernent le camion C10 et R12, en considérant le cas d'une chaussée sans dos d'âne (figure 4.5 et figure 4.6) et celui d'une chaussée avec dos d'âne (figure 4.7 et figure 4.8).

Sur ces figures, on peut constater ce qui suit :

- les contraintes nettes sont amplifiées lorsque la distance en tête d'éstançonnement diminue. Par exemple, pour l'essai C10-A1-V10, la contrainte nette CPH 1 augmente de 600 % lorsque la distance passe de 2 m (C10-A1-V10-D2) à 0,2 m (C10-A1-V10-D0,2);

- les déplacements nets sont amplifiés lorsque la distance en tête d'étalement diminue. Par exemple, pour l'essai C10-A1-V10, le déplacement net correspondant au LVDT 1₁ a augmenté de 3 000 % lorsque la distance passe de 2 m (C10-A1-V10-D2) à 0,2 m (C10-A1-V10-D0,2);
- les figures 4.5 et 4.6 indiquent par ailleurs que la vitesse a tendance à amplifier les contraintes nettes et les déplacements nets.

4.2.3.2 Effet typique d'un dos d'âne

Les figures 4.9 à 4.12 comparent les réponses des CPH (figure 4.9 et figure 4.11) et celles des LVDTs (figure 4.10 et figure 4.12), pour le camion C10 et R12, selon qu'il y a ou non défaut de chaussée (dos d'âne). Pour cela, on considère une distance en tête égale 0,2 m, et une vitesse de circulation de 10 km/h.

Ces figures montrent que :

- les contraintes nettes sont amplifiées en présence d'un dos d'âne. Par exemple, entre les essais C10-A0-V10-D0,2 (sans dos d'âne) et C10-A1-V10-D0,2 (avec dos d'âne), la contrainte nette maximale enregistrée par le CPH 1 a augmenté de 200 %;
- les déplacements nets sont également amplifiés en présence d'un dos d'âne. Par exemple, pour les essais C10-A0-V10-D0,2 et C10-A1-V10-D0,2, le déplacement net au niveau du LVDT 1₁ a augmenté de 900 %.

4.2.3.3 Effets typiques de la vitesse de circulation des camions

Les figures 4.13 et 4.14 comparent les réponses des CPH et celles des LVDTs, pour des vitesses de passage égales à 10 km/h et 25 km/h, en considérant le cas des camion C10 et R12, et une distance en tête égale à 0,2 m. Compte tenu de la configuration du site, il n'a pas été possible de pratiquer pour le R12 des essais avec un dos d'âne à une vitesse

de 25 km/h. Aussi, seuls les résultats d'essais, correspondant au cas sans dos d'ânes sont présentés.

Sur ces figures, on peut constater ce qui suit :

- les contraintes nettes sont amplifiées lorsque la vitesse de circulation des camions augmente. Par exemple, entre les essais C10-A1-V10-D2 et C10-A1-V25-D2, la contrainte nette au droit du CPH 1 a augmenté de 30 %;
- les déplacements nets sont également amplifiés lorsque la vitesse de circulation des camions augmente. Cette influence devient plus significative à une distance égale à 0,2 m. Par exemple, entre les essais C10-A0-V10-D0,2 et C10-A0-V25-D0,2, le déplacement net enregistré par le LVDT 1 \perp a augmenté de 500 %.

4.2.3.4 Effets combinés

Il importe de compléter cette analyse en considérant la combinaison des effets induits par les différents paramètres. Ceci nous a conduit à élaborer des histogrammes pour chacun des véhicules utilisés. Les figures 4.15 à 4.18 présentent les différents effets pouvant influencer la réponse des CPH d'une part et des LVDTs d'autre part. Ces histogrammes sont élaborés en termes de : (a) distance en tête d'étalement, (b) présence de dos d'âne, (c) vitesse du véhicule et (d) profondeur. Les figures 4.15 et 4.16 correspondent au C10; les figures 4.17 et 4.18 au camion R12.

Ces figures permettent d'observer ce qui suit :

- l'effet du dos d'âne sur les contraintes nettes est plus significatif lorsque la distance en tête d'étalement se situe entre 0,2 et 1 mètre
- on note que pour une distance en tête d'étalement de 0,2 mètre avec un dos d'âne, le déplacement net du LVDT 1 \perp est fortement amplifié;
- l'amplification des contraintes nettes à la suite d'une augmentation de la vitesse est d'autant plus importante que la distance en tête d'étalement est petite.

4.2.4 Rouleau compacteur

La figure 4.19 présente l'effet de la distance en tête d'étançonnement sur les réponses des CPHs et des LVDTs, lorsqu'on utilise un véhicule de type rouleau compacteur. Rappelons que dans ce cas-ci, la vitesse du RC n'a pu être captée par le radar car trop petite (< 5 km/h)

Sur ces figures, on peut constater ce qui suit :

- a) au niveau du CPH 1, la contrainte nette augmente lorsque la distance en tête d'étançonnement diminue;
- b) aux niveaux des CPH 2, CPH 3 et CPH 4, la contrainte nette est plus élevée pour une distance en tête égale à 1 mètre;
- c) les déplacements maximaux sont amplifiés lorsque la distance en tête diminue, et sont sensiblement élevés à une distance de 0,2 m.

4.2.5 Conclusions

Les essais en laboratoire ont démontré que le TTAOG-1500 se comporte de façon linéaire dans le domaine élastique lorsqu'il est soumis à une pression diamétrale.

Dans tous les essais en chantier, le TTAOG-1500 n'a été sollicité que dans le domaine élastique. Différents effets ont été observés suite à l'analyse des différents paramètres d'étude. Pour commencer, les camions et le rouleau compacteur empruntent différentes réponses dues aux positionnements des essieux, à leurs poids, aux vibrations et à leurs nombres. Puis, d'une façon générale, la diminution de la distance en tête d'étançonnement, la présence d'un dos d'âne et l'augmentation de la vitesse de circulation augmentent les contraintes nettes et les déplacements nets dans les tuyaux.

Toutefois, aucune rupture globale ou locale des éléments structuraux du TTAOG-1500, ou manifestation d'une déformation plastique structurale, n'a été observée lors des essais

en chantier, malgré le fait que les conditions d'essais étaient très sévères. Cependant, certaines difficultés ont été rencontrées lors des essais en chantier. En effet, la précision des LVDTs n'était pas suffisamment élevée pour lire les déplacements du TTAOG-1500, tant les valeurs de ces déplacement étaient faibles. De plus, il aurait été intéressant d'avoir davantage de CPH pour pouvoir mieux interpréter les contraintes induites par les charges car elles ne suivent pas une distribution triangulaire. Finalement, la pose de jauge de déformation sur le TTAOG-1500 aurait permis de mieux cerner le facteur de sécurité.

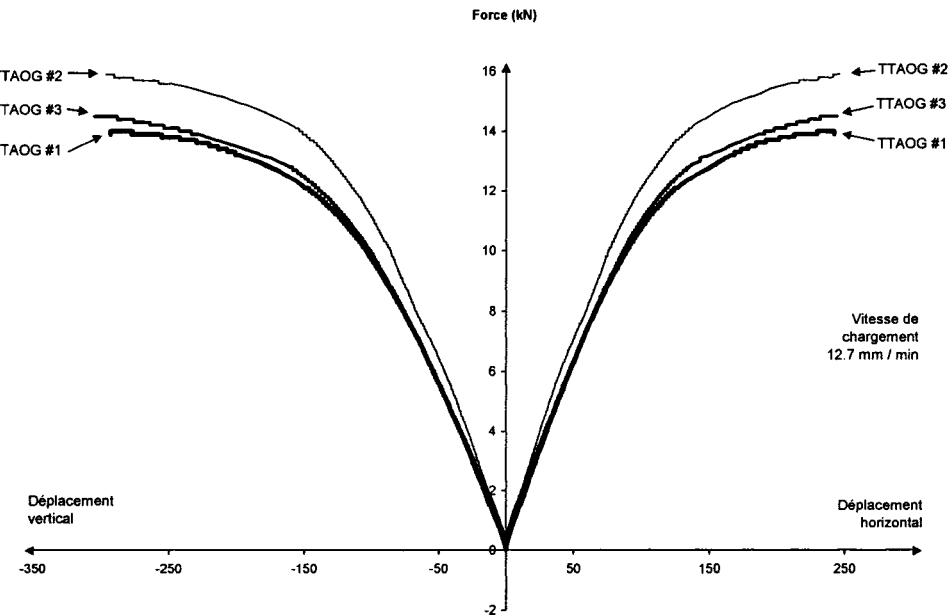


Figure 4.1 *Courbes charge-déplacement (lecture des LVDTs)*

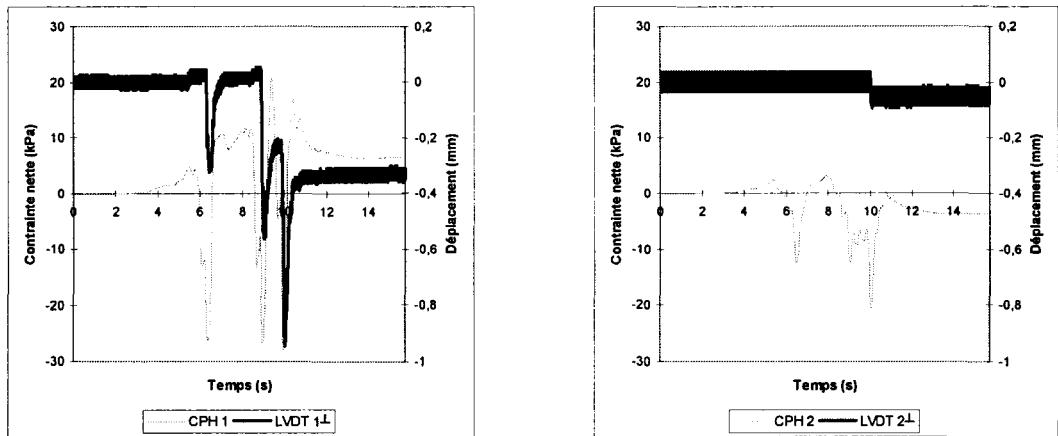
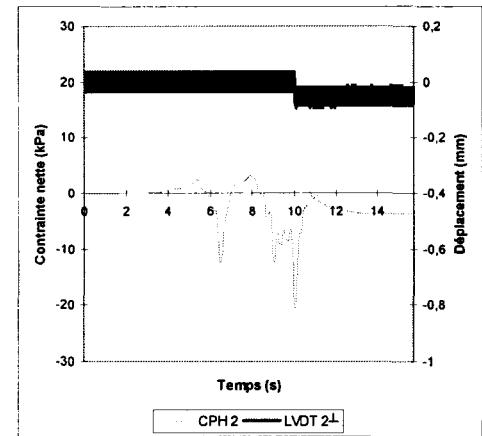
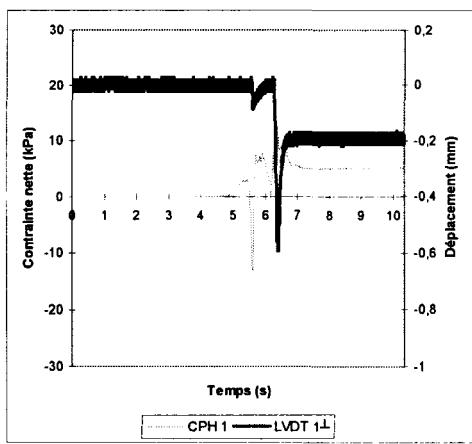
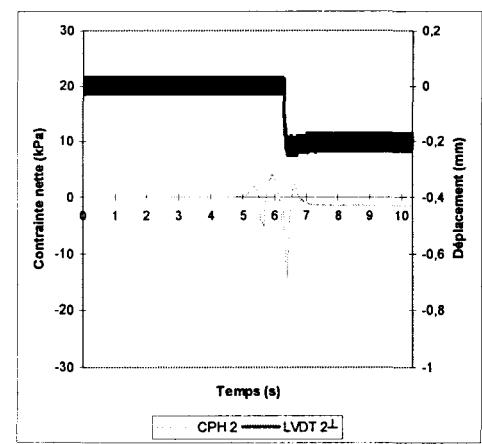
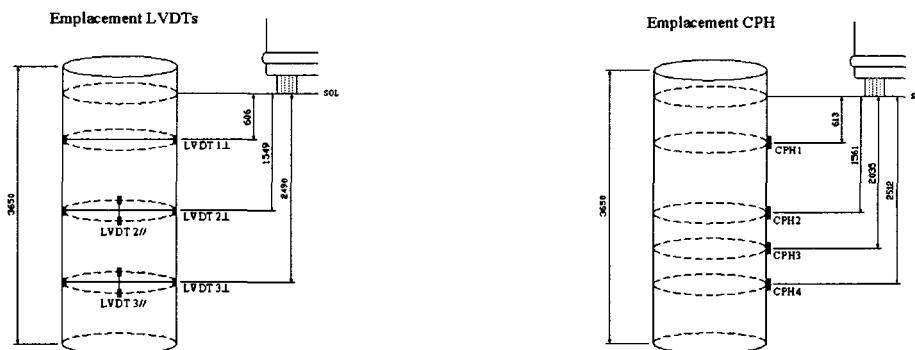
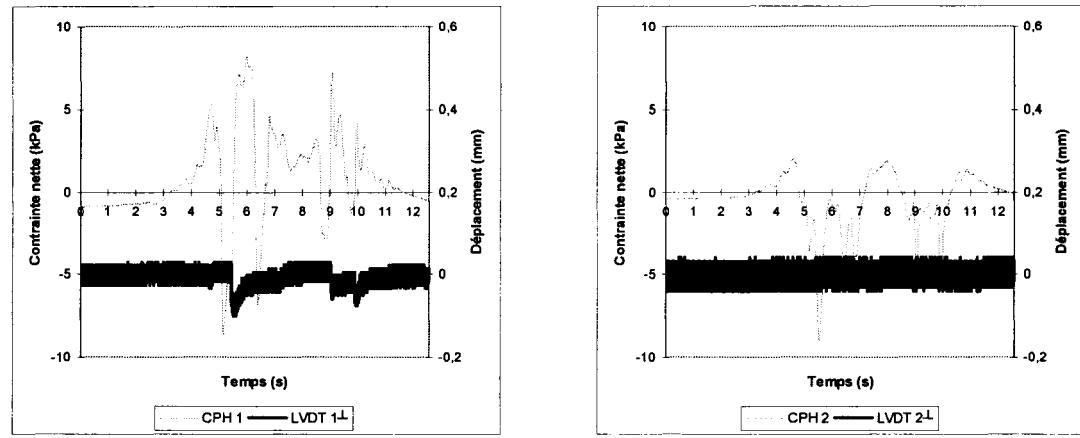
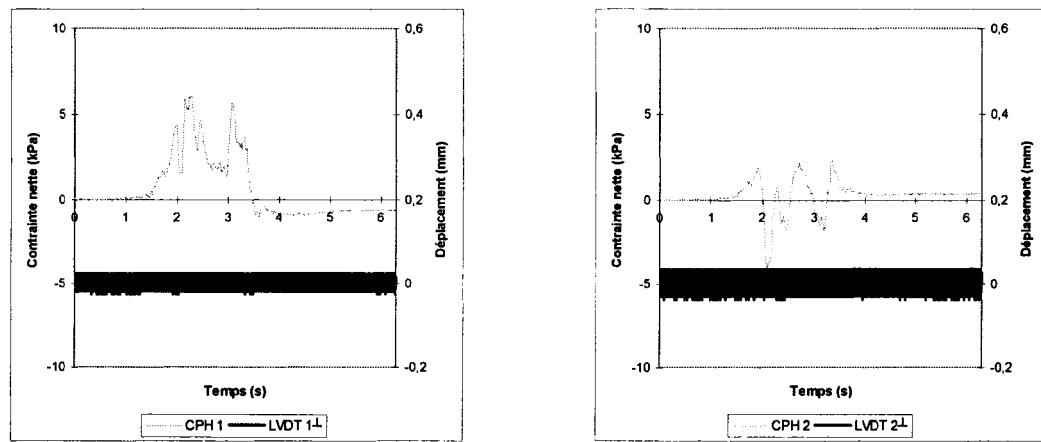
(a): Essai C10-A1-V10-D0,2 - CPH 1 / LVDT 1 \perp (b): Essai C10-A1-V10-D0,2 - CPH 2 / LVDT 2 \perp (c): Essai C10-A0-V25-D0,2 - CPH 1 / LVDT 1 \perp (d): Essai C10-A0-V25-D0,2 - CPH 2 / LVDT 2 \perp 

Figure 4.2 Réponses typiques – C10



(a): Essai R12-A1-V10-D0,2 - CPH 1 / LVDT 1L

(b): Essai R12-A1-V10-D0,2 - CPH 2 / LVDT 2L



(c): Essai R12-A0-V25-D0,2 - CPH 1 / LVDT 1L

(d): Essai R12-A0-V25-D0,2 - CPH 2 / LVDT 2L

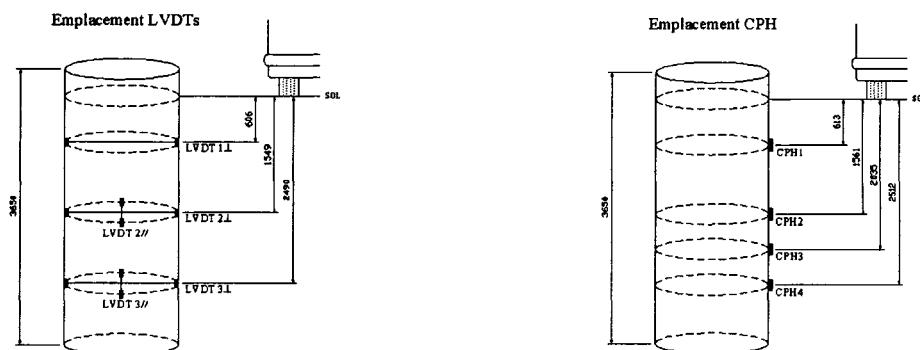


Figure 4.3 Réponses typiques – R12

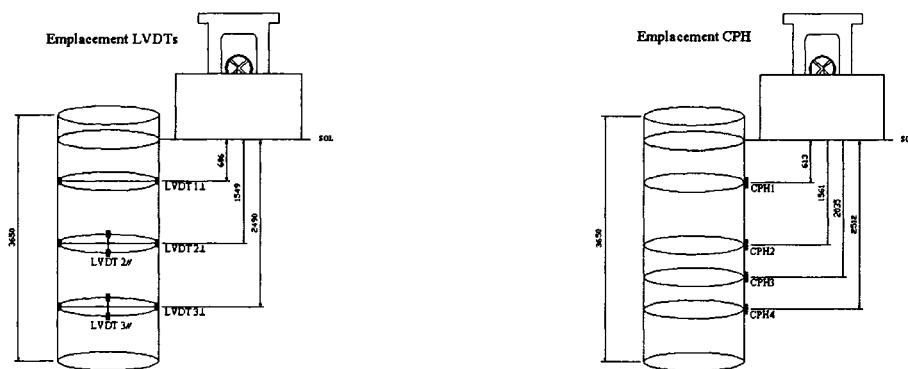
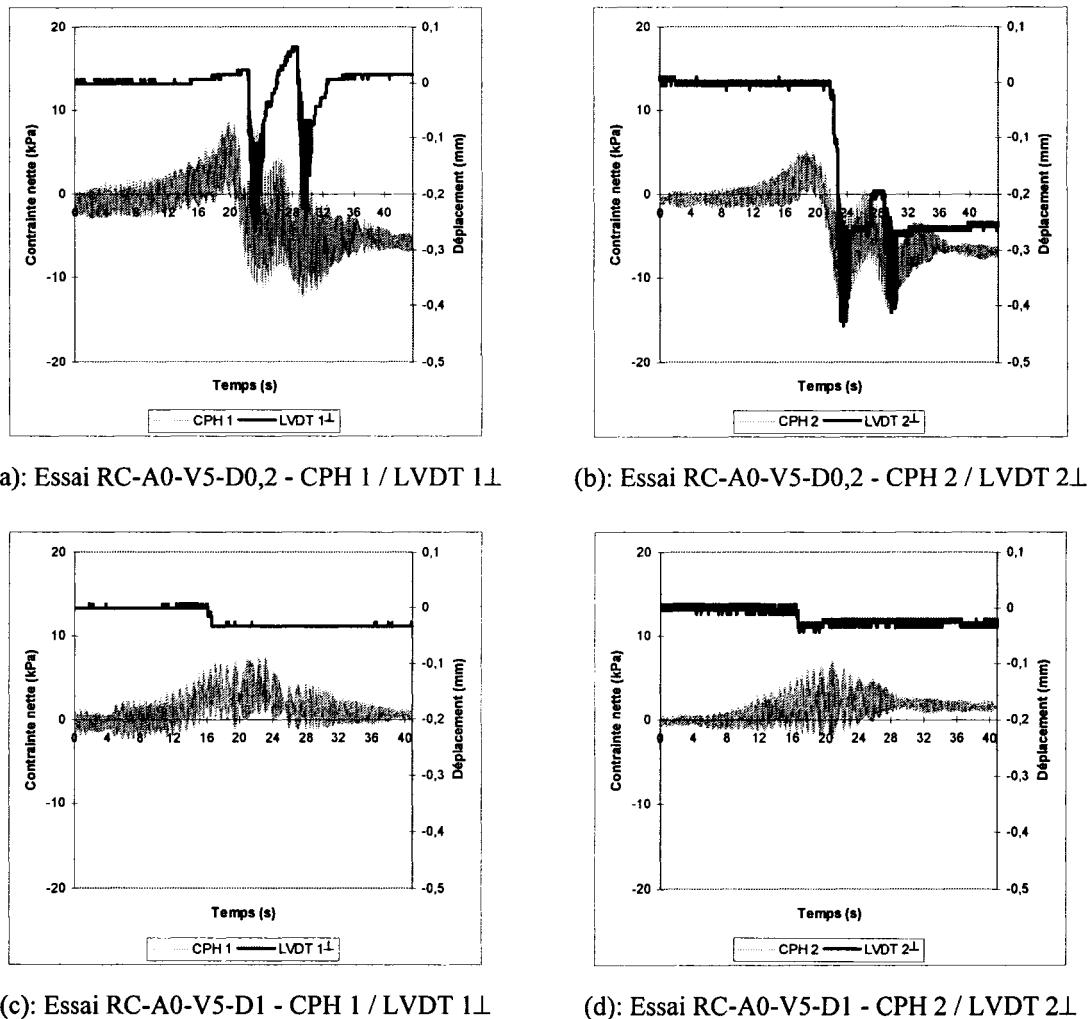


Figure 4.4 Réponses typiques - RC

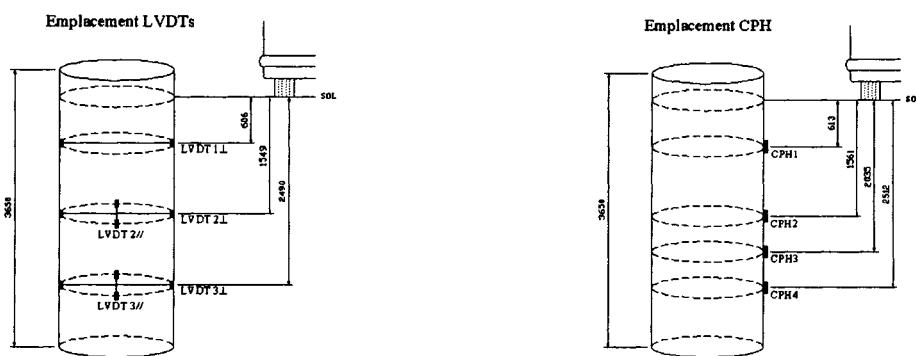
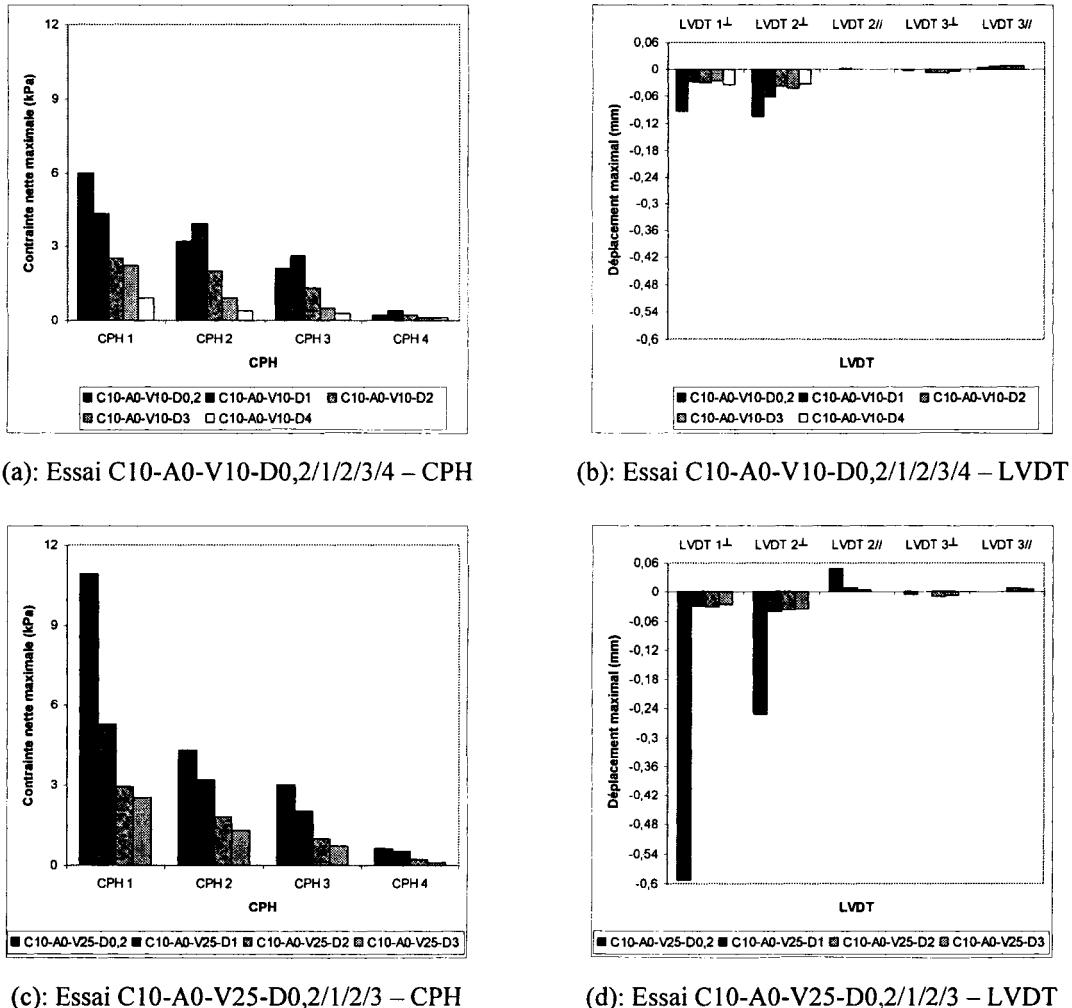


Figure 4.5 *Effet de la distance – C10 – sans dos d'âne*

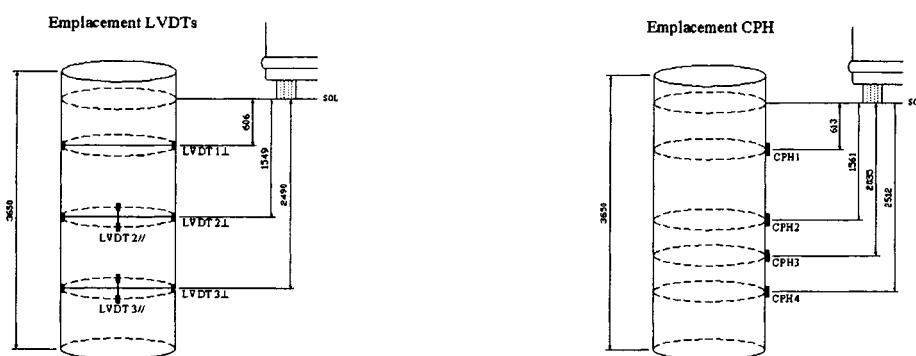
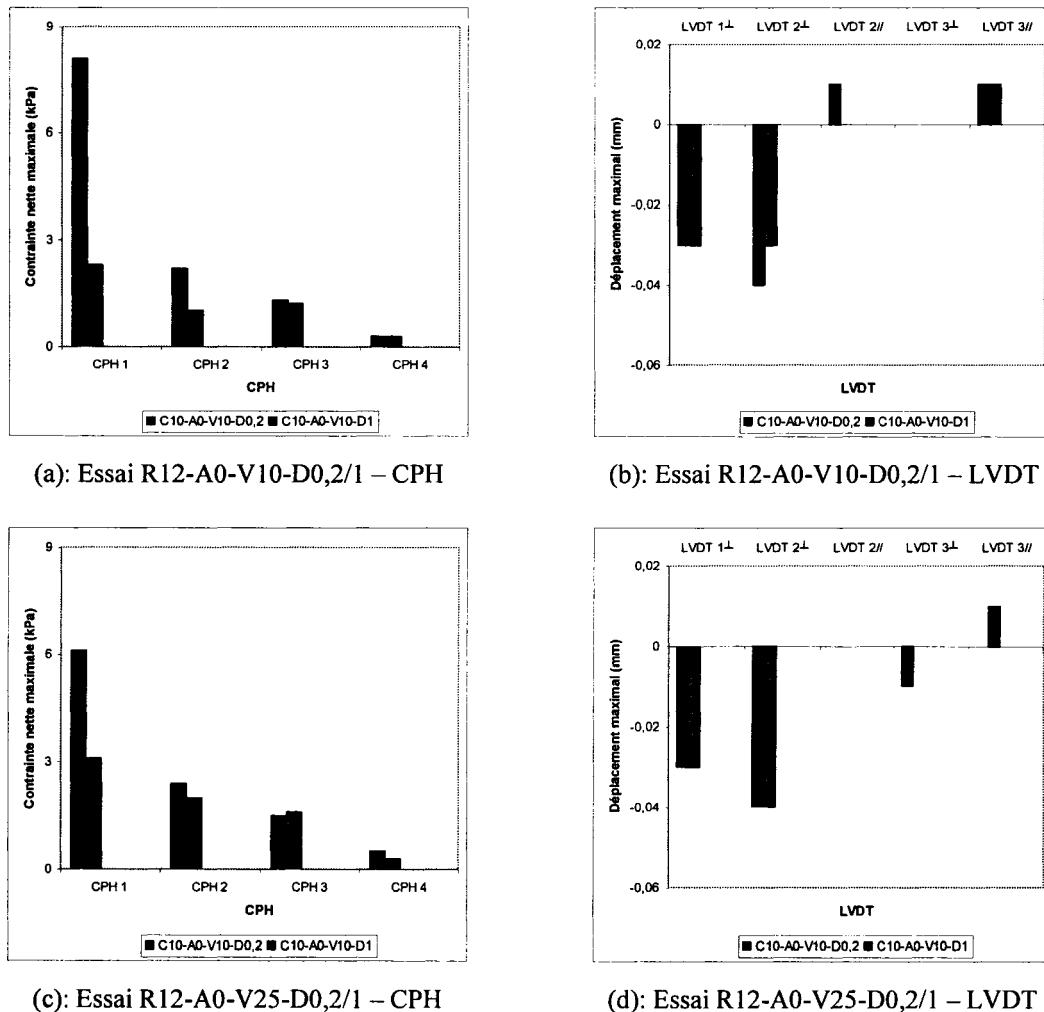


Figure 4.6 Effet de la distance – R12 – sans dos d'âne

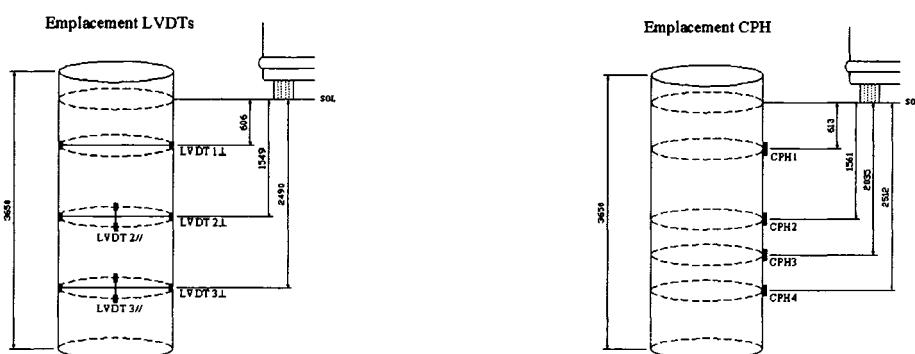
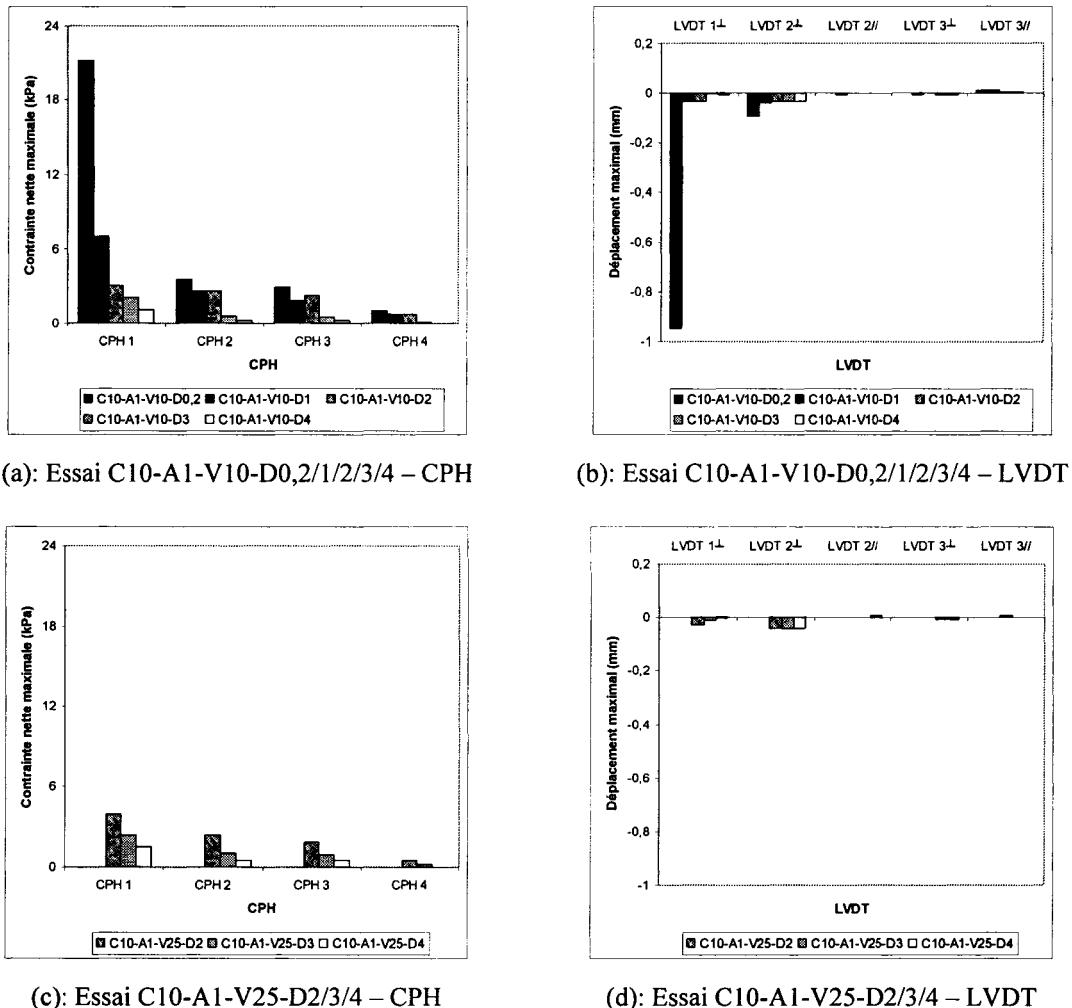
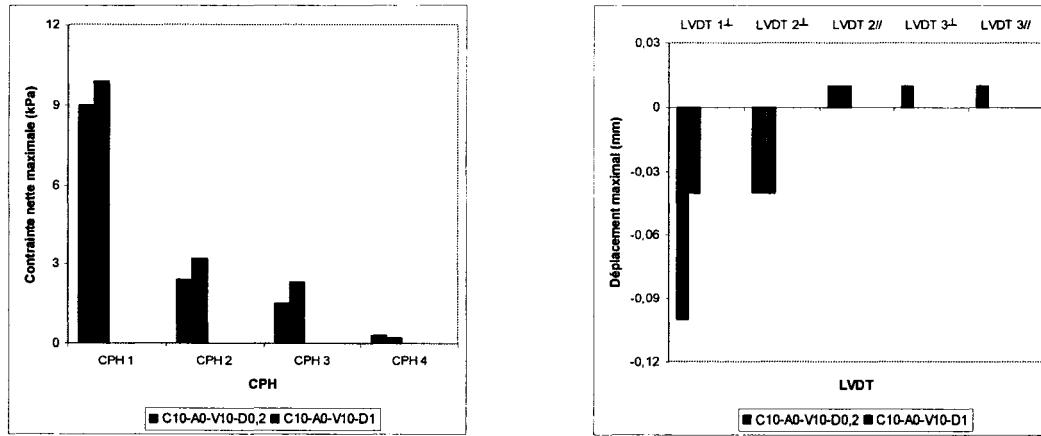
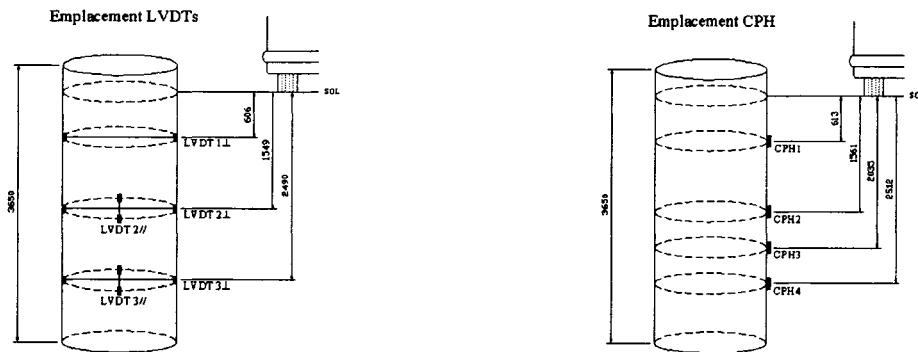


Figure 4.7 *Effet de la distance – C10 – avec dos d'âne*



(a): Essai R12-A1-V10-D0,2/1 – CPH

(b): Essai R12-A1-V10-D0,2/1 – LVDT

Figure 4.8 *Effet de la distance – R12 – avec dos d'âne*

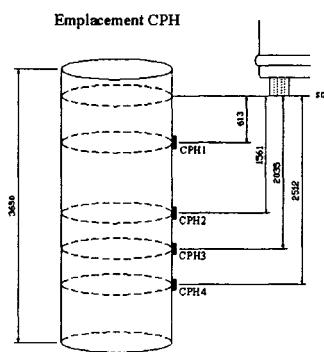
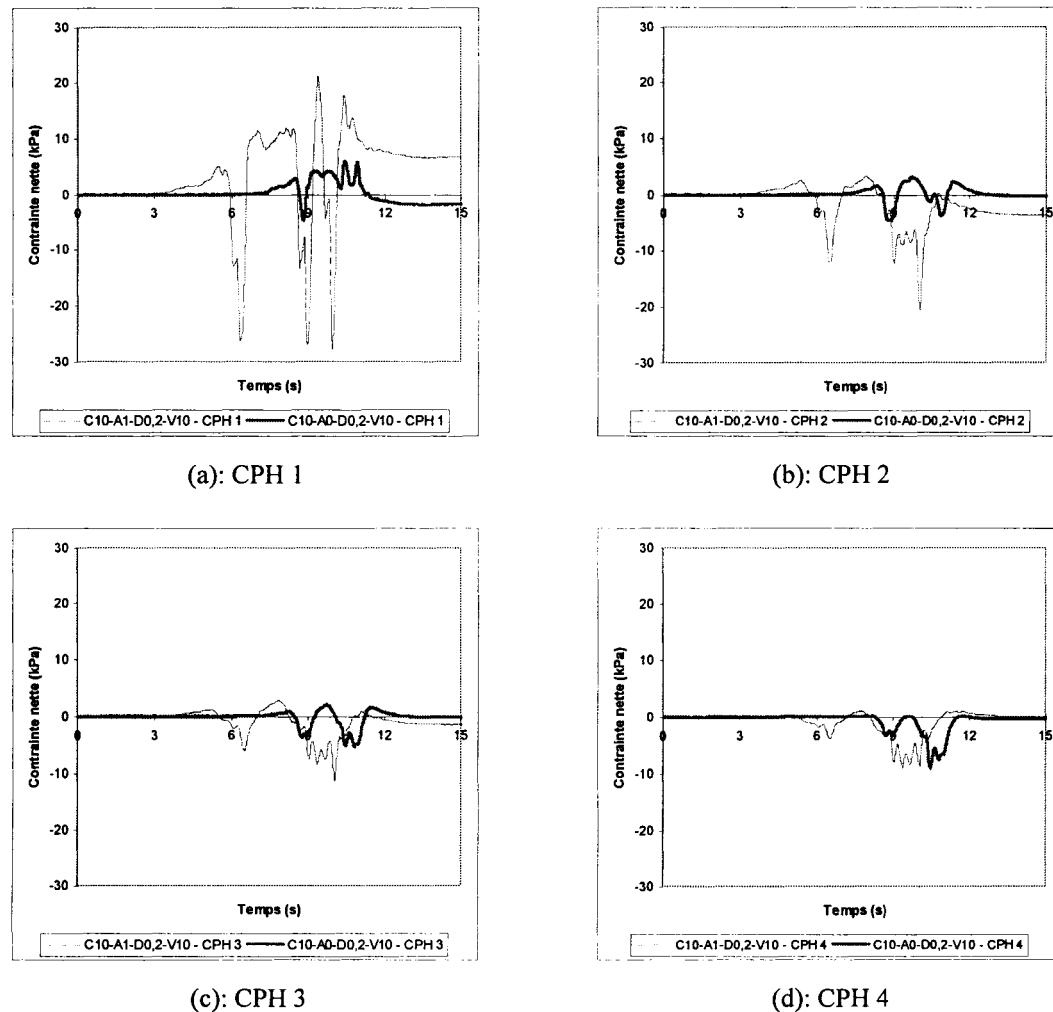


Figure 4.9 Effet du dos d'âne – Essai C10-A0/1-V10-D0,2

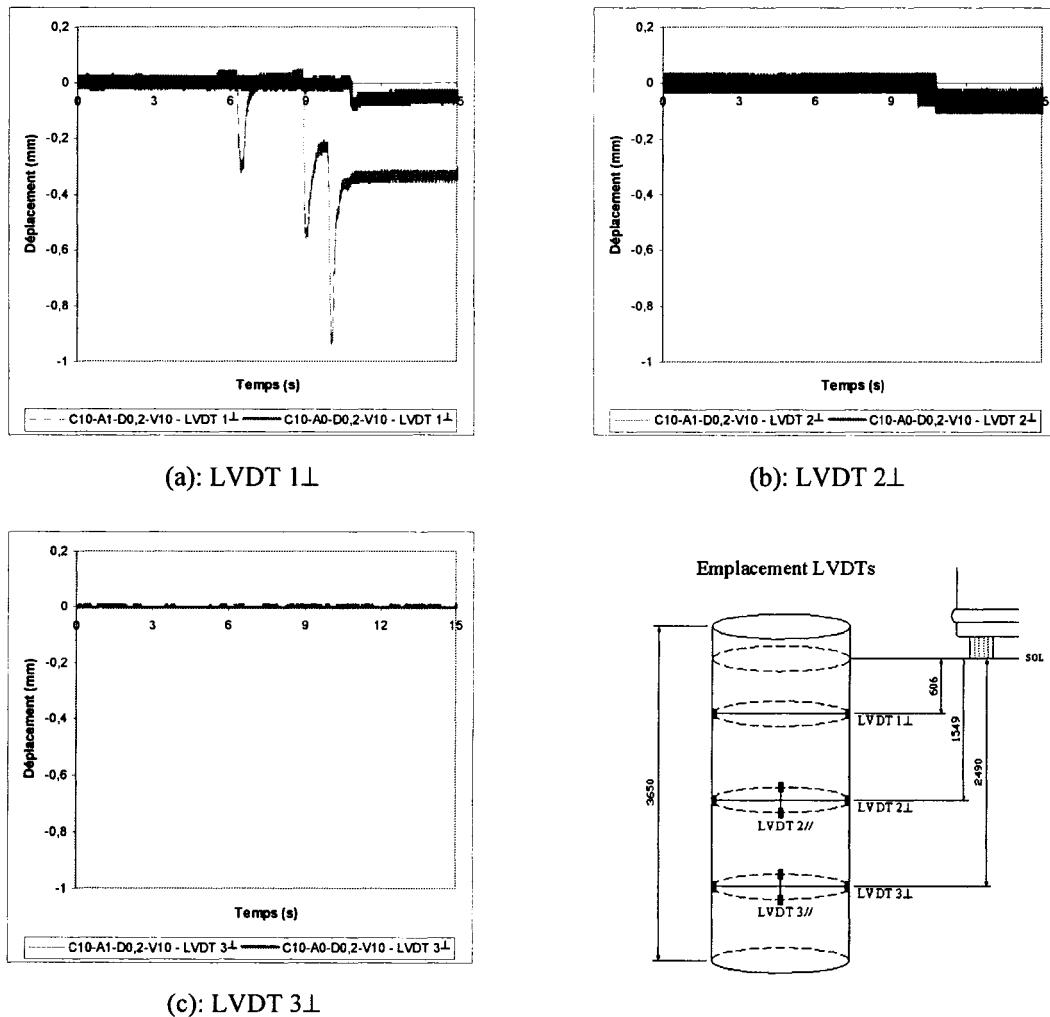


Figure 4.10 *Effet du dos d'âne – Essai C10-A0/1-V10-D0,2*

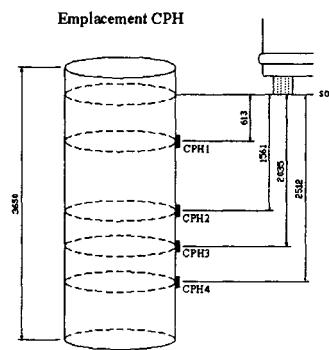
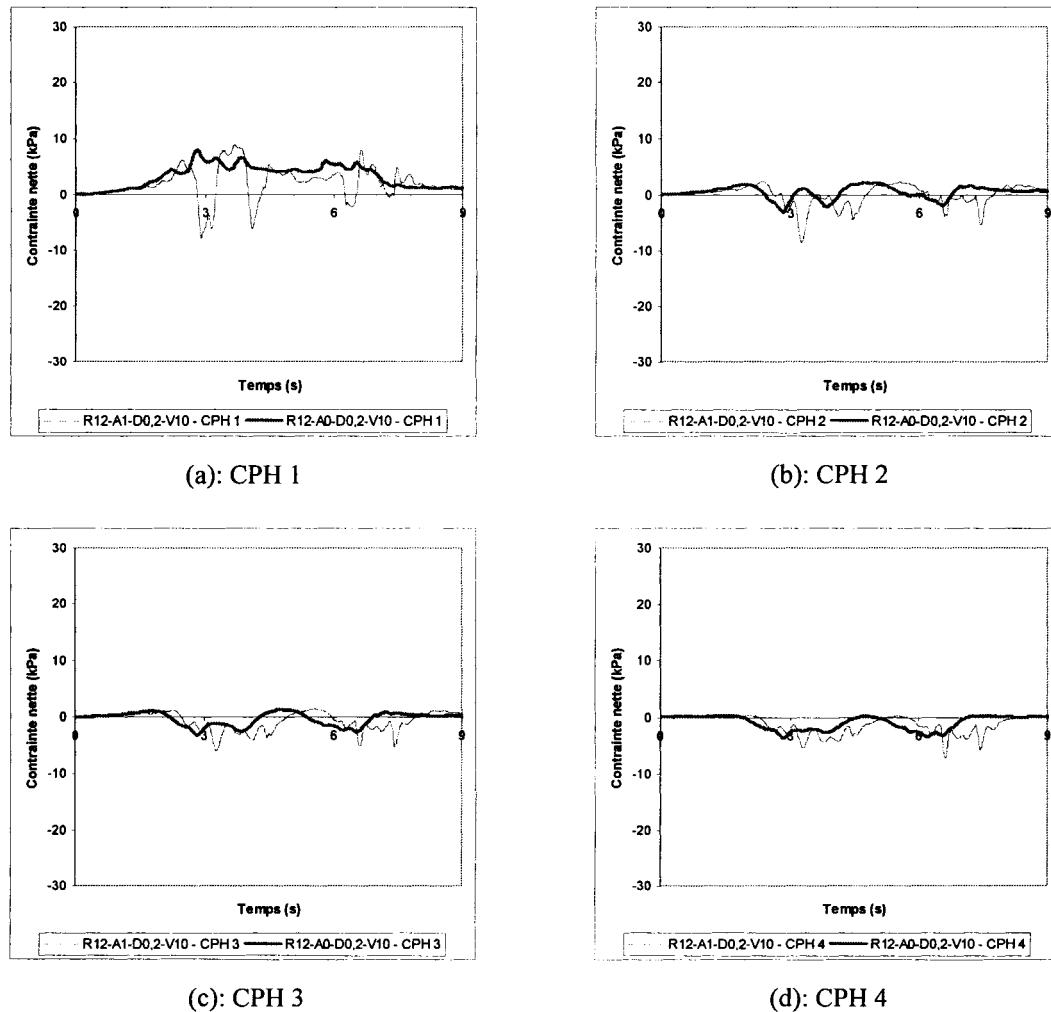


Figure 4.11 Effet du dos d'âne – Essai R12-A0/1-V10-D0,2

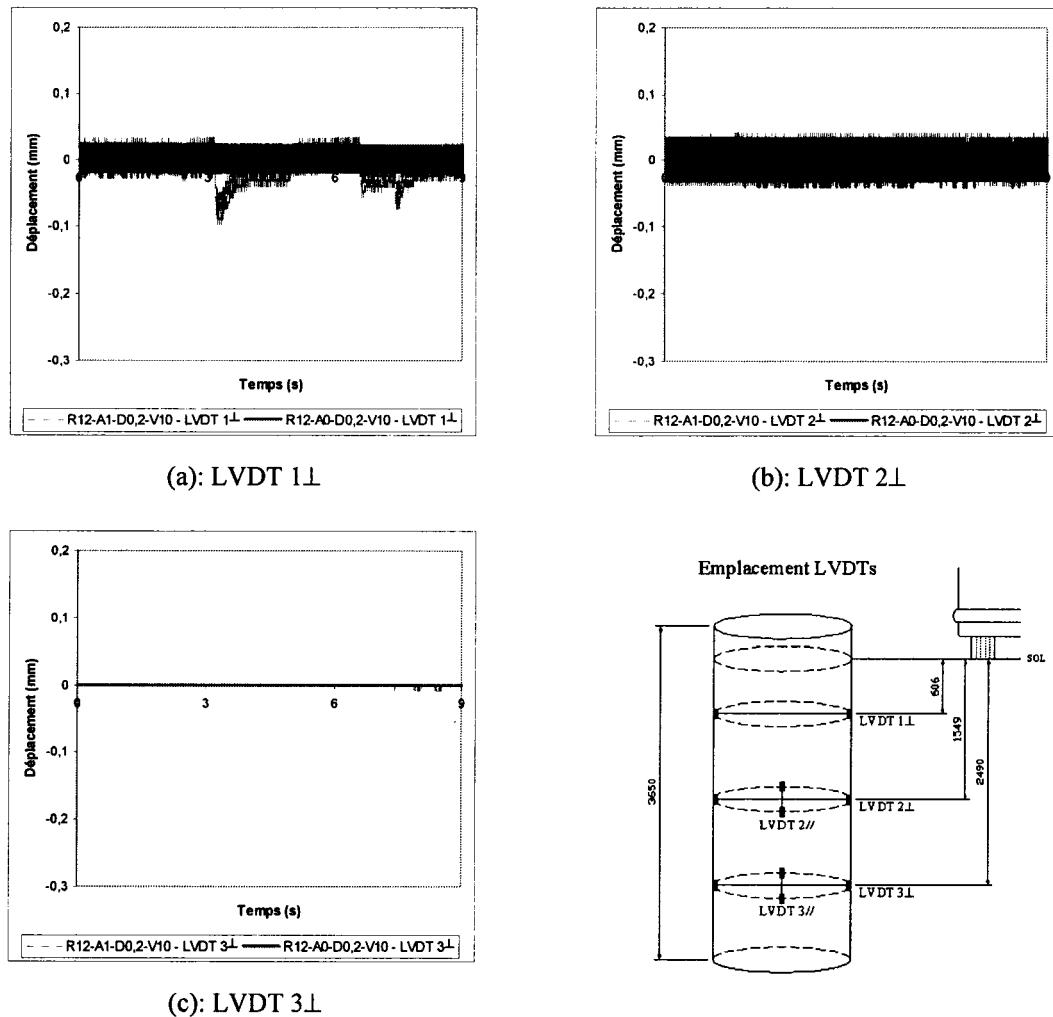


Figure 4.12 *Effet du dos d'âne – Essai R12-A0/1-V10-D0,2*

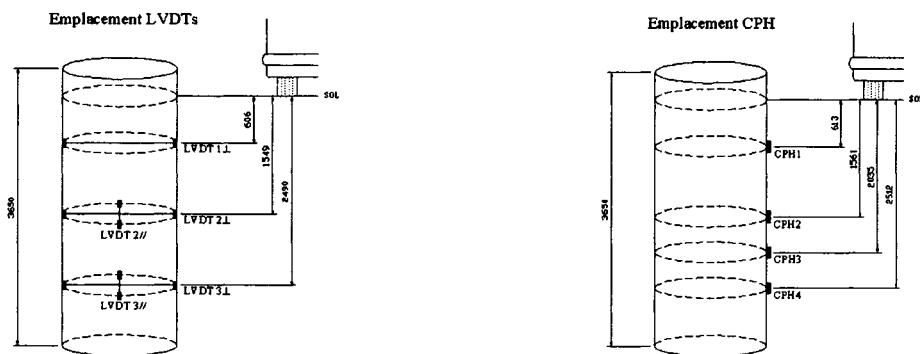
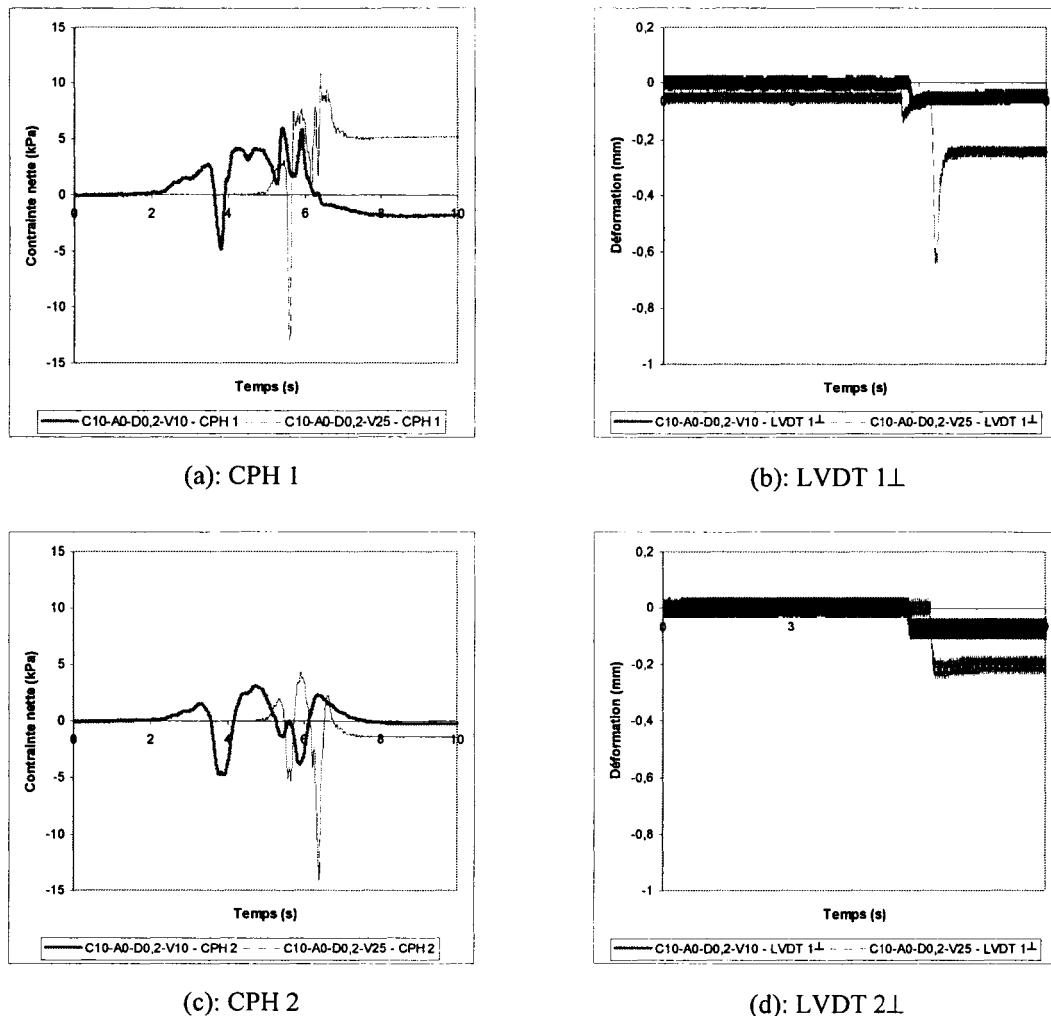


Figure 4.13 *Effet de la vitesse – Essai C10-A0-V10/25-D0,2*

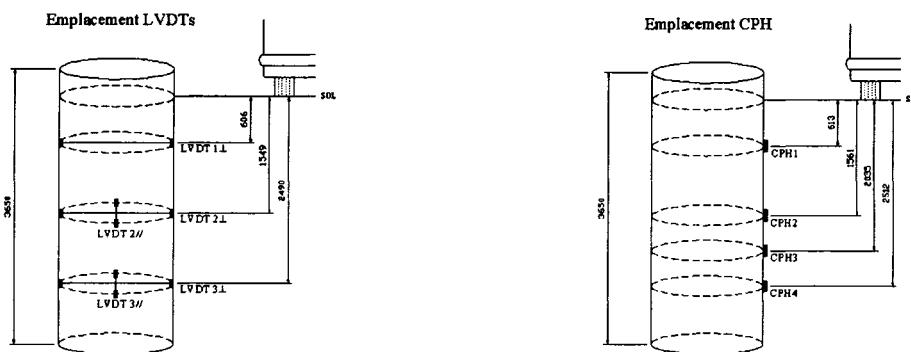
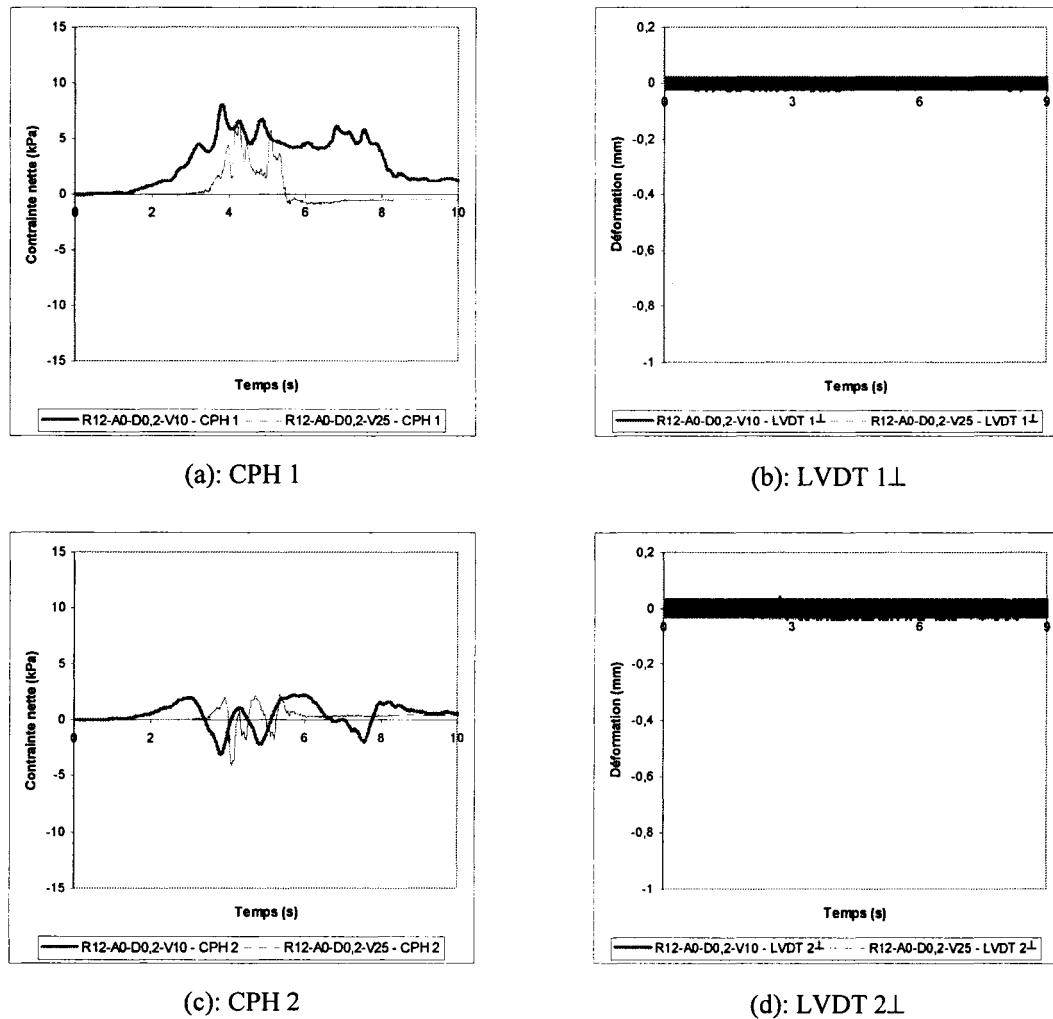
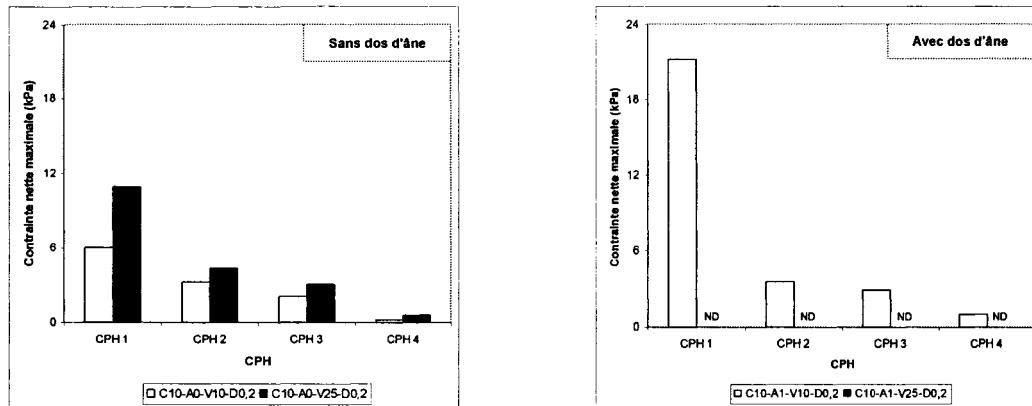
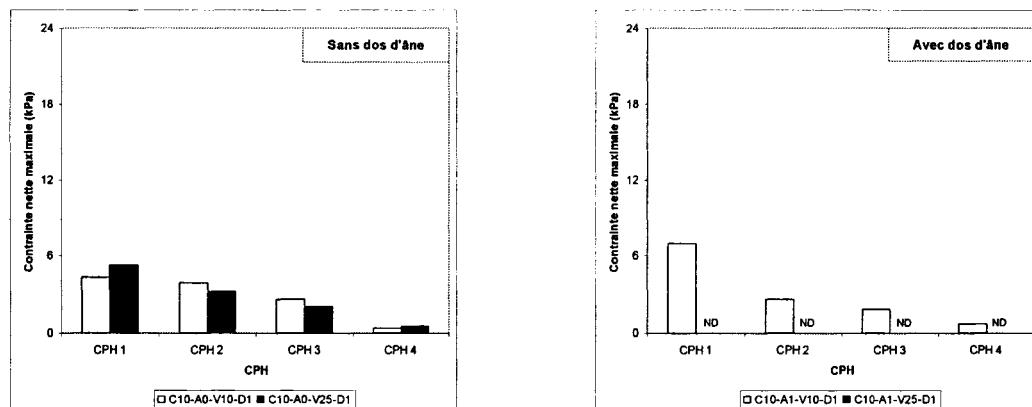


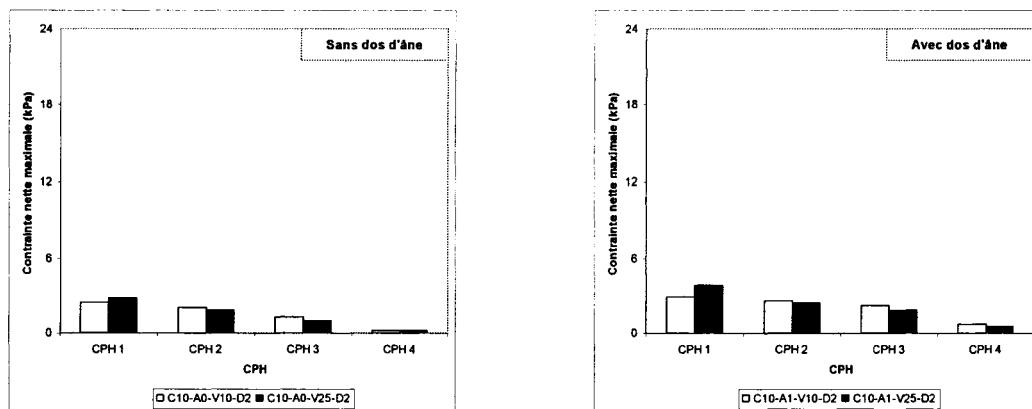
Figure 4.14 *Effet de la vitesse – Essai R12-A0-V10/25-D0,2*



(a): D0,2

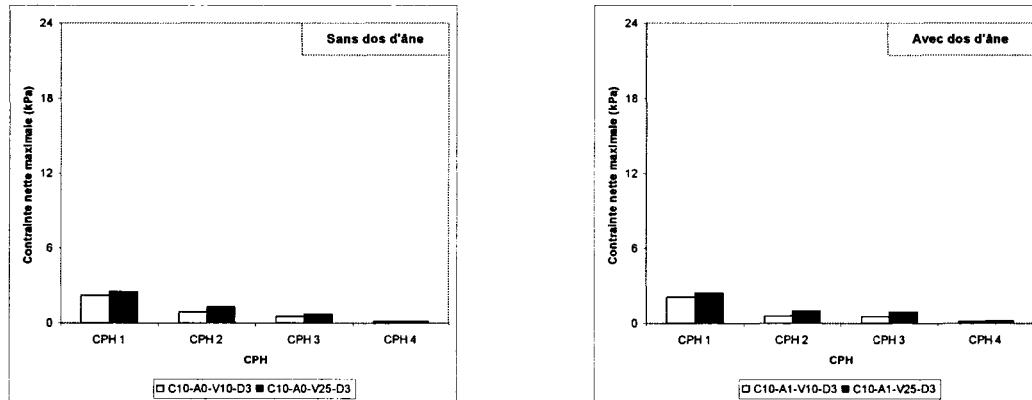


(b): D1

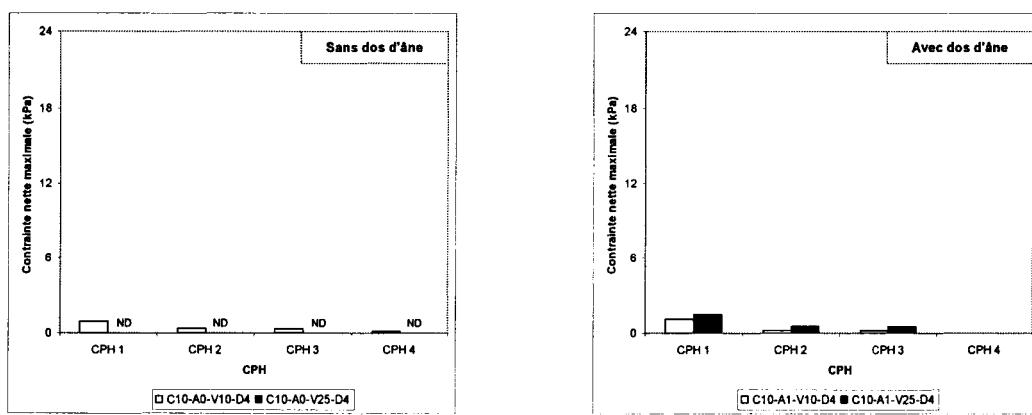


(c): D2

Figure 4.15 Effets combinés – Essai C10-A0/1-V10/25 - CPH



(d): D3



(e): D4

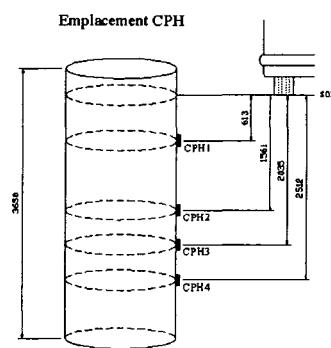


Figure 4.15 *Effets combinés – Essai C10-A0/1-V10/25 – CPH (suite)*

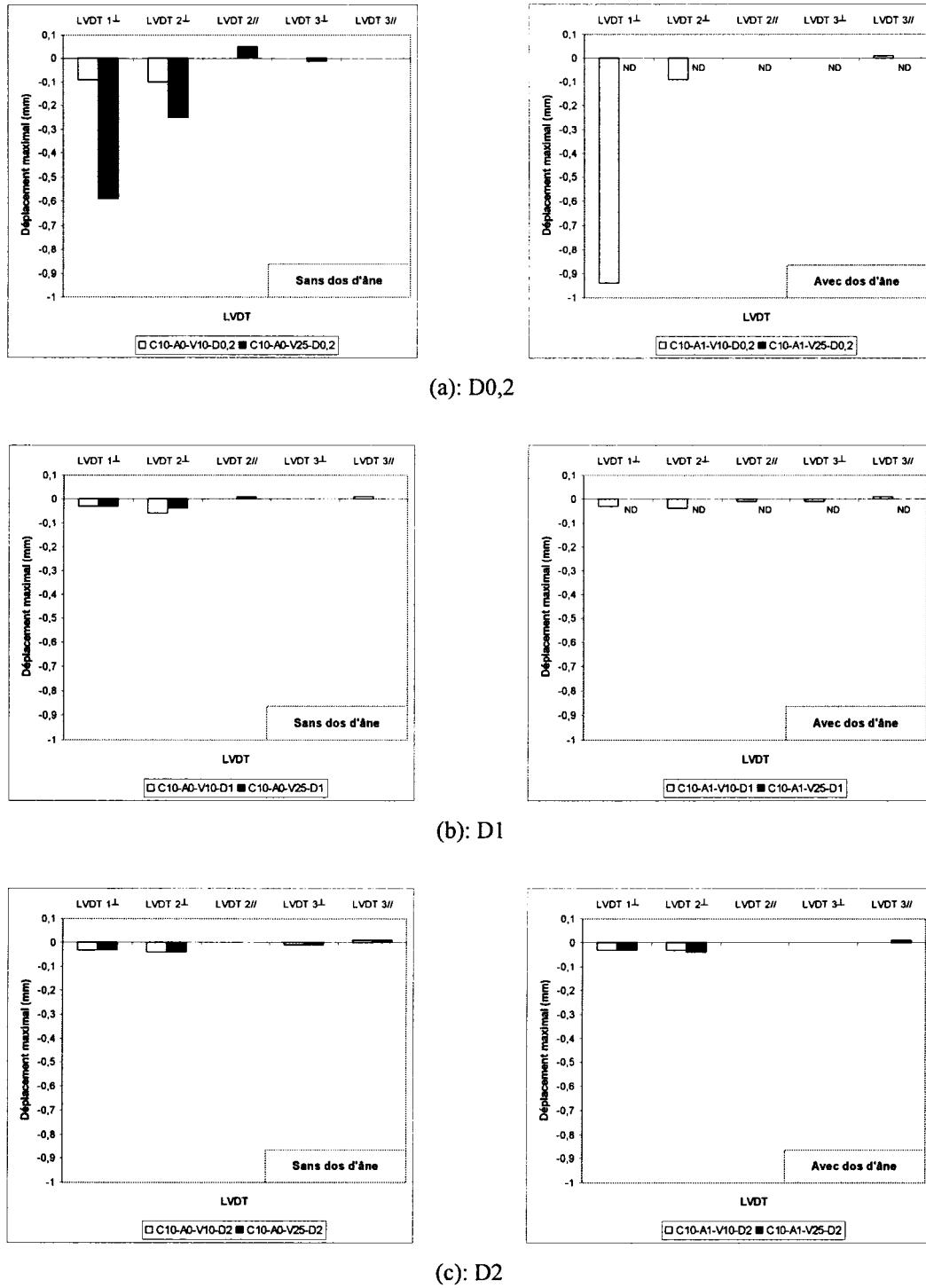
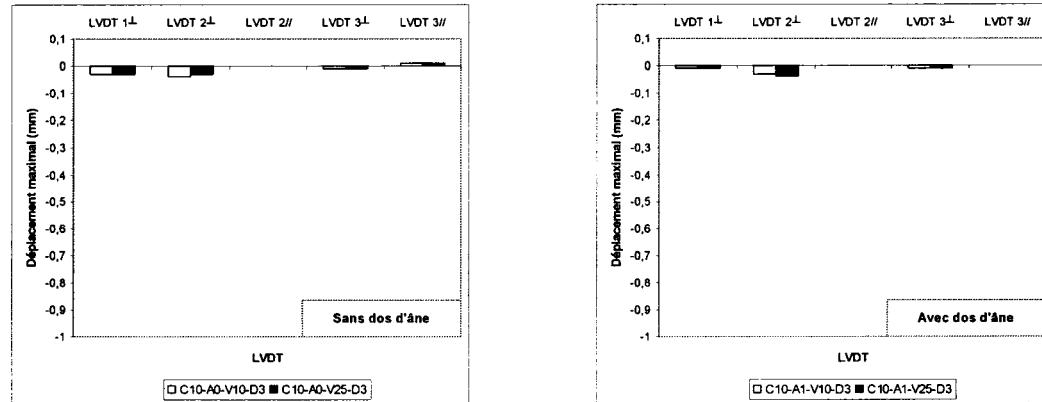
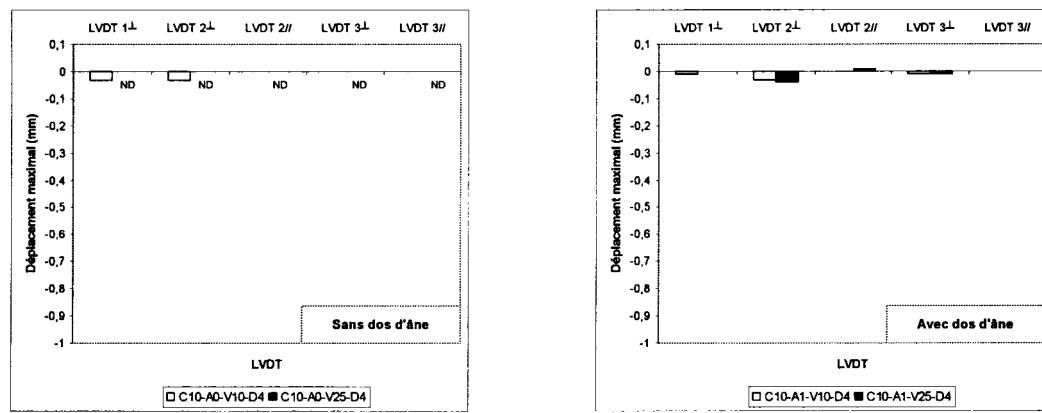


Figure 4.16 Effects combinés – Essai C10-A0/I-V10/25 - LVDTs



(d): D3



(e): D4

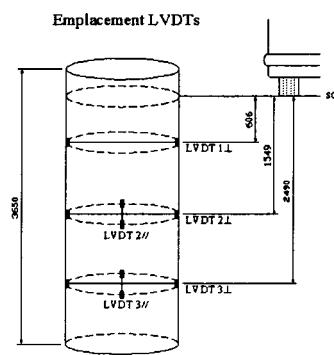
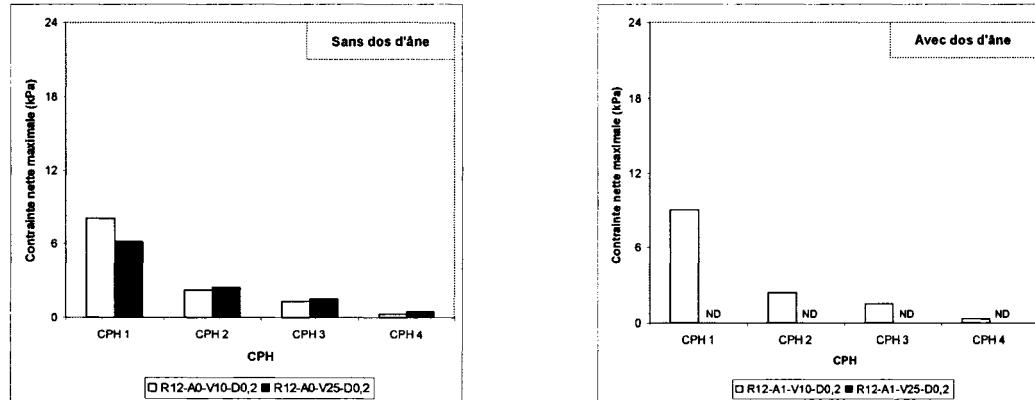
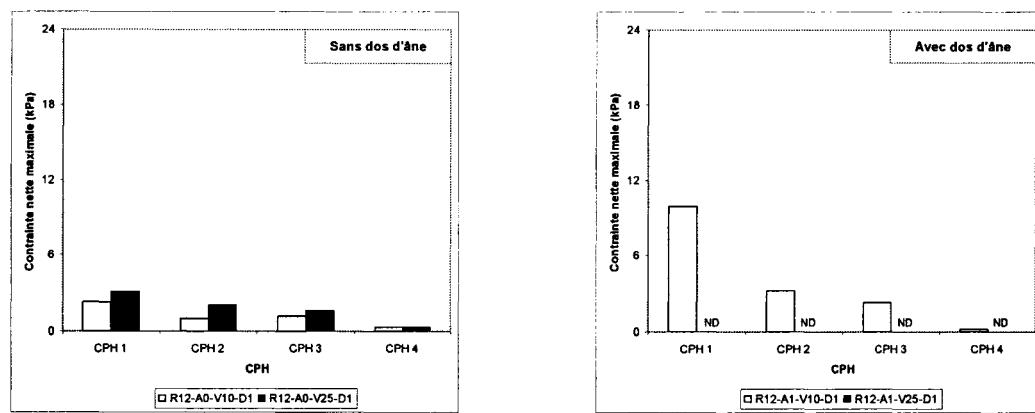


Figure 4.16 Effets combinés – Essai C10-A0/1-V10/25 - LVDTs (suite)



(a): D0,2



(b): D1

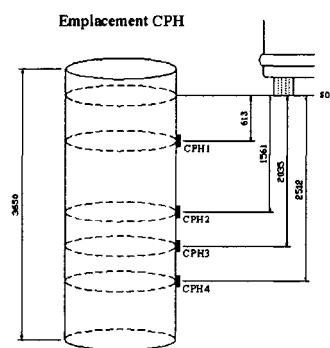
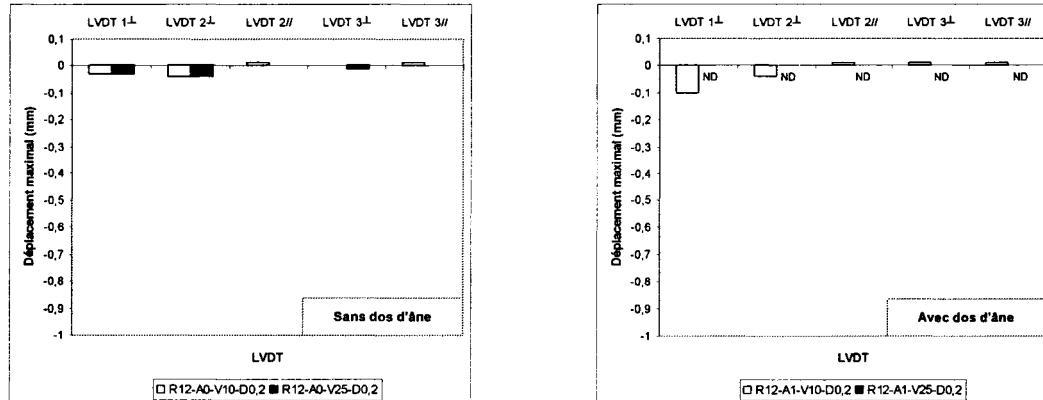
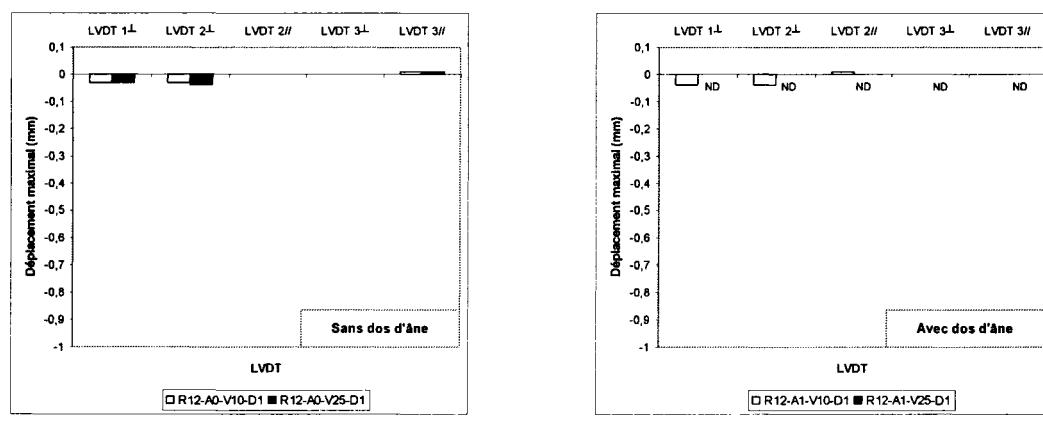


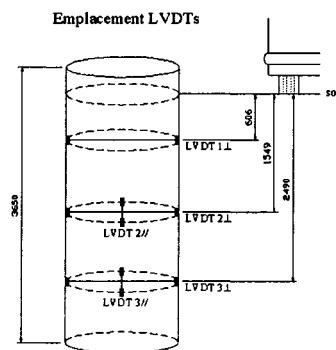
Figure 4.17 Effets combinés – Essai R12-A0/1-V10/25 - CPH



(a): D0,2



(b): D1

**Figure 4.18** *Effets combinés – Essai R12-A0/I-V10/25 - LVDTs*

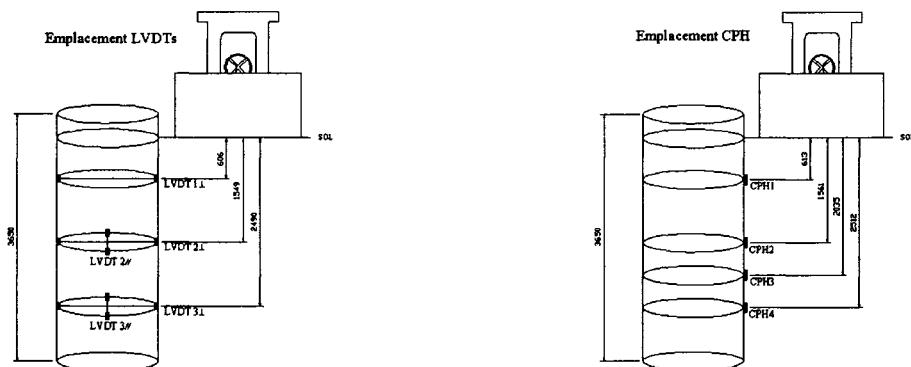
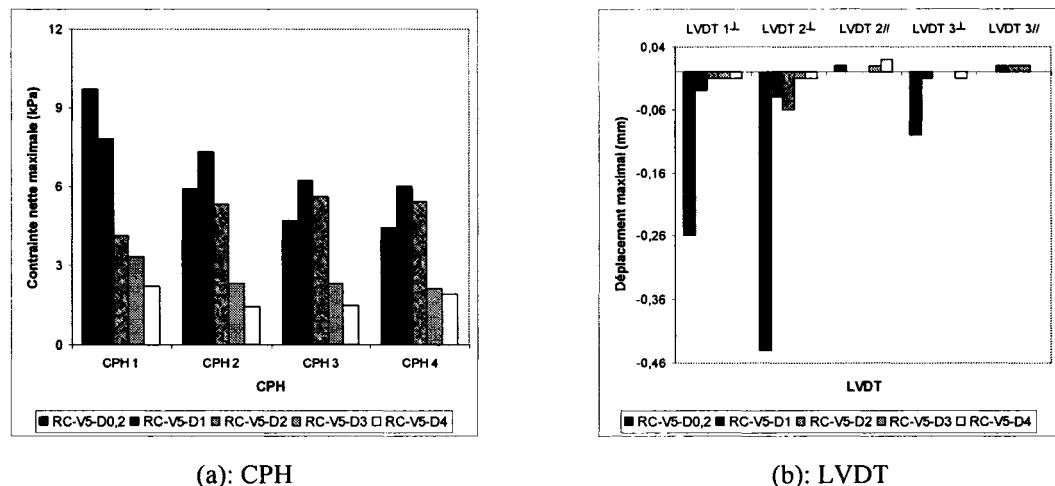


Figure 4.19 *Effet de la distance - Essai RC-V5-D0,2/1/2/3/4*

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le TTAOG-1500 a été soumis à plusieurs essais en laboratoire et en chantier pour déterminer s'il permet lors des travaux de courte durée de :

- a. Déposer des matériaux à une distance inférieure à 1,2 mètre du sommet des parois;
- b. Autoriser la circulation routière ou de la machinerie lourde à une distance inférieure à 3,0 mètres du sommet des parois.

Malgré les sévères conditions en chantier, les systèmes d'instrumentation (CPH et LVDT), comme le système d'acquisition de données, ont bien fonctionné tout au long de la campagne d'essais et ont été fort performants. Aussi, ils pourraient être avantageusement utilisés pour d'autres essais similaires.

Les essais en chantier ont permis de constater que plusieurs facteurs pouvaient affecter les efforts induits dans le TTAOG-1500 comme la distance en tête d'étaconnement, la présence d'un dos d'âne et la vitesse de circulation des camions. De façon générale, la diminution de la distance en tête d'étaconnement, la présence d'un dos d'âne et l'augmentation de la vitesse de circulation augmentent les contraintes nettes et les déplacements nets dans les tuyaux.

Cependant, il y a lieu de noter que le déplacement net maximal obtenu lors des essais en chantier est seulement de 0,94 mm alors que la limite admise en pratique pour les tuyaux flexibles enterrés est de 5 % du diamètre du tuyau, soit 75,1 mm. De plus, le TTAOG-1500 a été soumis à des essais sévères en terme de conditions de chargement en chantier, lesquelles sont rarement rencontrées lors de travaux municipaux courants. Mais, en dépit de ces conditions de chargement exceptionnelles, aucune rupture, globale ou locale, du tuyau ni aucune déformation plastique excessive n'ont été observées.

Ceci nous conduit à conclure que le TTAOG-1500 est un système d'éstançonnement sécuritaire qui permet de déposer des matériaux ne dépassant pas 45 kPa à une distance supérieure de 600 mm du sommet des parois. Également, ce système permet la circulation routière ou la machinerie lourde à une distance de 1000 mm du sommet des parois, pour autant que leurs conditions de poids et de vitesse soient comparables à celles testées dans le cadre de cette étude et que les travaux soient de courte durée et que le TTAOG-1500 soit confiné dans le sol.

Enfin, les recommandations générales suivantes découlant des résultats de cette recherche, peuvent être énoncées :

- a. Les résultats de cette recherche ont révélé que la théorie de Rankine ne peut pas s'appliquer dans le cas des tuyaux flexibles. En effet, les réponses enregistrées lors du passage des camions, ont indiqué que le comportement et les mécanismes de déformation ne correspondent pas aux observations classiques sur les écrans verticaux rigides. Aussi, il serait intéressant de poursuivre d'autres études spéciales sur le comportement des tuyaux flexibles sous des charges horizontales;
- b. Suite aux résultats concluants obtenus lors des essais conduits sur le TTAOG-1500, il serait intéressant de mener d'autres investigations sur un TTAOG-1500, mais d'épaisseur plus mince; ceci offre en plus de gains économiques en terme de matériaux, une manutention plus aisée et plus de sécurité pour les cols bleus;
- c. Il y aurait lieu également de mener d'autres investigations sur l'influence du confinement sur la performance d'un TTAOG-1500.

BIBLIOGRAPHIE

- ASTM. 1997. *D 2412-96, Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading*, The Annual Book of ASTM Standards, Volume 08.04, 1294 p.
- Atlanta Equipment. 2006. « *Atlanta Equipment* ». En ligne. <<http://www.trenchbox.com>>. Consulté le 3 janvier 2006.
- Burns, J., et R. M. Richard. 1964. *Attenuation of Stresses for Buried Cylinders*, Proc., Symposium of Soil-Structure Interaction, Univ. of Arizona Eng. Research Lab., Tucson, Arizona, AZ, p. 378-392.
- Chaallal, Omar et Denis Leboeuf. 2003. *Validation d'un étançonnement fait d'un tuyau de polyéthylène haute densité (PEHD) ou de profilés métalliques normalement utilisés pour les ponceaux et les égouts*, IRSST, Rapport R-336, 140 p.
- Chaallal, Omar, Denis Leboeuf, Abdelhak Bousselham et Ian Cucurull. 2006. *Recensement des systèmes d'étançonnement et de blindage disponibles au Québec*. Rapport Technique remis à IRSST, École de technologie supérieure et Université Laval, 84 pages.
- Cormier. 2004. « *Cormier Shoring Inc* ». En ligne. <<http://www.cormiershoring.com>>. Consulté le 11 février 2006.
- Efficiency production Inc. 2003. « *Efficiency Production Trench Boxes* ». En ligne. <<http://www.epi-shields.com>>. Consulté le 2 mars 2006.
- Équipement NCN Ltée. 2006. *Équipement NCN Ltée*, support CD.
- GME. 2004. « *Griswold Machine & Engineering, Inc.* ». En ligne. <<http://www.gme-shields.com>>. Consulté le 23 février 2006.
- Moser, Alma. 1990. *Buried Pipe Design*, McGraw-Hill Inc.: New-York, 219 p.
- Pro-tec. Février 2005. « *Pro-tec Equipment: Your Best Source for Trench Shields, Slide Rail, Stone Save* ». En ligne. <<http://www.pro-tecequipment.com>>. Consulté le 2 mars 2006.
- Speed shore. « *Speed Shore Corporation – Trench Safety and Shoring Equipment* ». En ligne. <<http://www.speedshore.com>>. Consulté le 25 mai 2006.

Tremblay, Martin. 2004. *Formation sur l'éstançonnement des tranchées; volet sur les équipements d'éstançonnement*. Service des infrastructures et de l'environnement, division des laboratoires, 32 p.

Watkins, Reynold King et Loren Runar Anderson. 2000. *Structural Mechanics of Buried Pipes*, CRC Press LLC, 444 pages.

Watkins Reynold King et Alma Moser. 1971. *Response of Corrugated Steel Pipe to External Soil Pressures*, Highway Research Record 373, p. 88-112.