

# Conception d'un étançonnement adapté aux excavations en milieu urbain

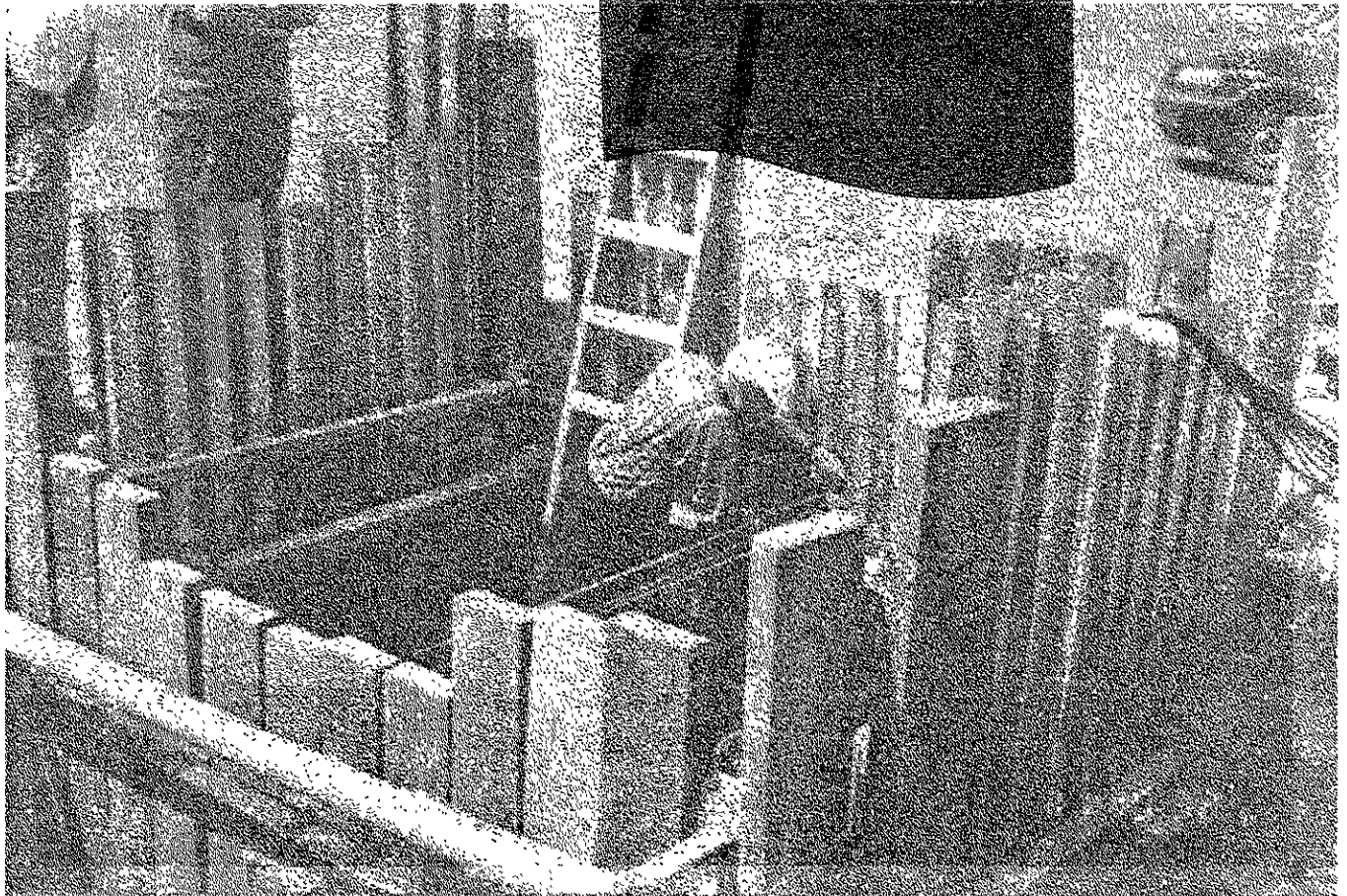
Phase 2

André Lan

# ÉTUDES ET RECHERCHES

Décembre 1999 R-235

RAPPORT



**IRSST**  
Institut de recherche  
en santé et en sécurité  
du travail du Québec

## La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

### ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal  
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications  
505, boul. de Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : (514) 288-1 551  
Télécopieur: (514) 288-7636  
Site internet : [www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)  
© Institut de recherche en santé  
et en sécurité du travail du Québec,

# Conception d'un étançonnement adapté aux excavations en milieu urbain

## Phase 2

André Lan et Jean Arteau  
Programme sécurité-ingénierie, IRSST

Martin Tremblay et Serge Gamelin,  
Ville de Montréal

Denis LeBeuf et Omar Chaallat,  
École de technologie supérieure

Jean-Marc Dugré, consultant

ÉTUDES ET  
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)



Cette publication est disponible  
en version PDF  
sur le site internet de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

## AVANT-PROPOS

---

Ce document constitue le rapport de l'activité « Conception d'un étançonnement adapté aux excavations en milieu urbain - Phase 2 » de l'IRSST. Dans le cadre de cette étude, l'École de technologie supérieure a évalué expérimentalement le système d'étançonnement VM2 conçu et développé conjointement par l'IRSST, la Ville de Montréal et monsieur Jean-Marc Dugré, ingénieur-conseil lors de la Phase 1 de ce projet.

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, monsieur André Lan, ing., a contribué activement à cette étude. Pour la Ville de Montréal, messieurs Serge Gamelin, ing., Martin Tremblay, ing., Robert de Repentigny, contremaître, et son équipe d'ouvriers ont contribué notamment à l'organisation et à la réalisation des travaux en chantier. Madame Sylvie Poulin de l'APSAM et l'ingénieur-conseil Jean-Marc Dugré ont contribué aux discussions tout au long de ce projet. Enfin, messieurs Jean-Yves Morency, ingénieur de recherche, et John Lescelleur, technicien senior à l'ÉTS, ont effectué les travaux d'instrumentation, d'acquisition et de traitement de données.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
1. PROBLÉMATIQUE .....	1
2. ORIGINE DE LA DEMANDE .....	1
3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE .....	2
4. DESCRIPTION DU SYSTÈME D'ÉTANÇONNEMENT VM 2 .....	2
5. ANALYSES STRUCTURALES .....	3
5.1 Critères de conception .....	3
5.2 Paramètres du sol .....	3
5.3 Hypothèses de calcul .....	5
5.4 Calcul de la poussée des terres .....	6
5.5 Choix des profilés pour les membrures du VM2 .....	6
6. MISE EN OEUVRE DU VM2 EN CHANTIER .....	10
6.1 Installation du VM2 .....	10
6.2 La poussée des terres sur les ouvrages de soutènement .....	18
7. PROGRAMME D'ESSAIS .....	20
7.1 Choix des sites .....	21
7.1.1 Critères de sélection des sites .....	21
7.1.2 Caractéristiques géotechniques des sites .....	22
8. INSTRUMENTATION DU VM2 .....	30
8.1 Jauges de déformation à corde vibrante .....	30
8.2 Extensomètres .....	31
8.3 Cellules de pression totale .....	31
8.4 Acquisition de données .....	32
9. DÉROULEMENT DES ESSAIS .....	42
9.1 Essais en laboratoire .....	42
9.2 Essais en chantier .....	42
10. RÉSULTATS DES ESSAIS .....	43
10.1 Essai N° 1 - remblai hétérogène .....	43
10.1.1 Mesure des pressions horizontales totales .....	43
10.1.2 Mesure des déplacements extensométriques .....	44
10.1.3 Mesure des moments fléchissants .....	44
10.1.4 Mesure des efforts axiaux .....	44

## TABLE DES MATIÈRES

	<b>Page</b>
10.2	Essai N° 2A - sable propre . . . . . 50
10.2.1	Déroulement de l'essai . . . . . 50
10.2.2	Mesure des pressions horizontales totales . . . . . 50
10.2.3	Mesure des déplacements extensométriques . . . . . 50
10.2.4	Mesure des moments fléchissants . . . . . 50
10.2.5	Mesure des efforts axiaux . . . . . 51
10.3	Essai N° 2B - sable propre plus surcharge . . . . . 51
10.3.1	Déroulement de l'essai . . . . . 51
10.3.2	Mesure des pressions horizontales totales . . . . . 51
10.3.3	Mesure des déplacements extensométriques . . . . . 51
10.3.4	Mesure des moments fléchissants . . . . . 51
10.3.5	Mesure des efforts axiaux . . . . . 52
10.4	Essai N° 3 - silt sablonneux . . . . . 64
10.4.1	Déroulement des essais . . . . . 64
10.4.2	Mesure des pressions horizontales totales . . . . . 64
10.4.3	Mesure des déplacements extensométriques . . . . . 65
10.4.4	Mesure de moments fléchissants . . . . . 65
10.4.5	Mesure des efforts axiaux . . . . . 65
11.	ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS D'ESSAIS . . . . . 71
11.1	Description de la démarche et des méthodes . . . . . 71
11.2	Analyse des résultats selon la méthode « A » . . . . . 72
11.2.1	Poussées (charges) sur les moises . . . . . 72
11.2.2	Moments fléchissants dans les moises longitudinales . . . . . 74
11.2.3	Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales . . . . . 76
11.2.4	Déplacements (flèches) dans les moises longitudinales . . . . . 77
11.3	Analyse des résultats selon la méthode « B » . . . . . 78
11.3.1	Poussées (charges) sur les moises . . . . . 78
11.3.2	Moments fléchissants dans les moises longitudinales . . . . . 80
11.3.3	Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales . . . . . 82
11.3.4	Déplacements (flèches) dans les moises longitudinales . . . . . 83
11.4	Analyse des résultats selon la méthode « C » . . . . . 85
11.4.1	Poussées (charges) sur les moises . . . . . 85
11.4.2	Moments fléchissants dans les moises longitudinales . . . . . 86
11.4.3	Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales . . . . . 88
11.4.4	Déplacements (flèches) dans les moises longitudinales . . . . . 89
11.5	Analyse des résultats selon la méthode « D » . . . . . 91
11.5.1	Poussée (charges) sur les moises . . . . . 91
11.5.2	Moments fléchissants dans les moises longitudinales . . . . . 92
11.5.3	Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales . . . . . 92

## TABLE DES MATIÈRES

	<b>Page</b>
11.5.4 Déplacements (flèches) dans les moises longitudinales .....	93
11.6 Synthèses des résultats .....	102
11.6.1 Poussées (charges) sur les moises .....	102
11.6.2 Moments fléchissants .....	103
11.6.3 Forces de cisaillement .....	103
11.6.4 Déplacements (flèches) .....	103
12. SYNTHÈSE ET CONCLUSION .....	109
12.1 Synthèse .....	109
12.2 Conclusion .....	110
13. RECOMMANDATIONS .....	112
14. REMERCIEMENTS .....	113
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	115
ANNEXES	
ANNEXE A - Instrumentation : schémas et caractéristiques techniques	
ANNEXE B - Données géotechniques de la Ville de Montréal pour le site de Rivière-des-Prairies	
ANNEXE C - Contenu du dossier des notes de calcul	

## LISTE DES TABLEAUX

	<b>Page</b>
Tableau 1 - Caractéristiques et résistances des moises utilisées dans les essais in-situ de la phase 2 .....	9
Tableau 2 - Description des essais .....	21
Tableau 3 - Résultats des analyses granulométriques .....	26
Tableau 4 - Masses volumiques in-situ, sites Francon et Rivière-des-Prairies .....	27
Tableau 5 - Déplacements extensiométriques des moises de l'essai N° 1 .....	48
Tableau 6 - Moments fléchissants expérimentaux de l'essai N° 1 .....	48
Tableau 7 - Efforts axiaux expérimentaux de l'essai N° 1 .....	49
Tableau 8 - Déplacements extensiométriques des moises de l'essai N° 2A .....	57
Tableau 9 - Moments fléchissants expérimentaux de l'essai N° 2A .....	57
Tableau 10 - Efforts axiaux expérimentaux de l'essai N° 2A .....	58
Tableau 11 - Déplacements extensiométriques des moises de l'essai N° 2B .....	62
Tableau 12 - Moments fléchissants expérimentaux de l'essai N° 2B .....	62
Tableau 13 - Efforts axiaux expérimentaux de l'essai N° 2B .....	63
Tableau 14 - Moments fléchissants expérimentaux de l'essai N° 3 .....	70
Tableau 15 - Efforts axiaux expérimentaux de l'essai N° 3 .....	70
Tableau 16 - Méthodes utilisées pour l'estimation expérimentale des poussées, moments, réactions et déplacements .....	72
Tableau 17A - Poussées (charges) dans les moises longitudinales selon la méthode « A » .....	73
Tableau 17B - Moments fléchissants dans les moises longitudinales selon la méthode « A » ..	75
Tableau 17C - Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales selon la méthode « A »	76
Tableau 17D - Déplacement des moises longitudinales selon la méthode «A» .....	78
Tableau 18A - Poussées (charges) dans les moises longitudinales selon la méthode « B » .....	79
Tableau 18B - Moments fléchissants dans les moises longitudinales selon la méthode « B » ..	81
Tableau 18C - Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales selon la méthode « B »	83
Tableau 18D - Déplacement des moises longitudinales selon la méthode « B » .....	84
Tableau 19A - Poussées (charges) dans les moises longitudinales selon la méthode « C » .....	86
Tableau 19B - Moments fléchissants dans les moises longitudinales selon la méthode « C » ..	87
Tableau 19C - Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales selon la méthode « C »	88
Tableau 19D - Déplacement des moises longitudinales selon la méthode « C » .....	90
Tableau 20A - Poussées (charges) dans les moises longitudinales selon la méthode « D » .....	98



## LISTE DES TABLEAUX

	<b>Page</b>
Tableau 20B - Moments fléchissants dans les moises longitudinales selon la méthode « D » . .	99
Tableau 20C - Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales selon la méthode « D »	100
Tableau 20D - Déplacement des moises longitudinales selon la méthode « D » . . . . .	101
Tableau 21 - Comparaison des charges sur les moises longitudinales (kN/m) selon les méthodes A, B, C et D . . . . .	105
Tableau 22 - Comparaison des moments fléchissants sur les moises longitudinales (kN.m) selon les méthodes A, B, C et D . . . . .	106
Tableau 23 - Comparaison des forces de cisaillement maximales (kN) dans les moises longitudinales selon les méthodes A, B, C et D . . . . .	107
Tableau 24 - Comparaison des déplacements (flèches) (mm) dans les moises longitudinales selon les méthodes A, B, C et D . . . . .	108

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 - Cadre type du système d'étançonnement VM2 .....	4
Figure 2 - Poussée des terres retenue pour la conception du VM2 .....	8
Figure 3 : a) Enveloppes des pressions apparentes des terres pour des charges mesurées sur des étançons dans du sable, b) Diagramme des pressions des terres suggéré pour la conception de blindage dans le sable (Terzaghi, Peck et Mesri, 1996) ..	19
Figure 4 : Pressions des terres mesurées sur des culées de pont dans le sable (Casagrande, 1973) .....	19
Figure 5 - Distribution granulométrique des sols pour les essais 1, 2A, 2B et 3 .....	24
Figure 6 - Courbes granulométriques au site de Rivière-des-Prairies .....	25
Figure 7 - Plan de localisation du site de Rivière-des-Prairies .....	28
Figure 8 - Rapport du puits d'exploitation à Rivière-des-Prairies .....	29
Figure 9 - Vue générale de l'emplacement des jauges de déformation et des extensomètres ..	33
Figure 10 - Emplacement des jauges le long des moises longitudinales supérieure et inférieure	36
Figure 11 - Emplacement des jauges sur les moises transversales supérieure et inférieure ....	37
Figure 12 - Emplacement des extensomètres .....	37
Figure 13 - Vue en élévation du côté instrumenté dans l'excavation pour les essais 1, 2A et 2B .....	38
Figure 14 - Vue en élévation côté instrumenté dans l'excavation Essai 3 du 26 juin 1997, site Rivière-des-Prairies (pas à l'échelle) .....	39
Figure 15 - Principales étapes pour la réalisation de l'essai N° 1 à la carrière Francon .....	45
Figure 16 - Variation de la pression horizontale sur la paroi du blindage en fonction de la profondeur .....	47
Figure 17 - Principales étapes pour la réalisation des essais 2A et 2B .....	53
Figure 18 - Distribution de la pression horizontale totale sur la paroi du blindage en fonction de l'élévation .....	56
Figure 19 - Dimension et emplacement de la surcharge de blocs de béton lors de l'essai 2B ..	59
Figure 20 - Distribution de la pression horizontale sur la paroi du blindage en fonction de l'élévation .....	61
Figure 21 - Principales étapes pour la réalisation de l'essai N° 3 du 26 juin 1997 .....	67
Figure 22 - Distribution de la pression totale sur la paroi du blindage en fonction de l'élévation pour l'essai N° .....	69

## LISTE DES FIGURES

	<b>Page</b>
Figure 23 - Scénarios de pression des terres sur la paroi de blindage lors de l'essai N° 1 . . . . .	94
Figure 24 - Scénarios de pression des terres sur la paroi du blindage lors de l'essai N° 2A . . . . .	95
Figure 25 - Scénarios de pression des terres sur la paroi du blindage lors de l'essai N° 2B . . . . .	96
Figure 26 - Scénarios de pression des terres sur la paroi du blindage lors de l'essai N° 3 . . . . .	97
Figure 27 - Renforcement des montants du cadre d'aluminium . . . . .	112

## LISTE DES PHOTOS

### Page

Photo 1 - Transport du VM2 assemblé sur le site d'essais .....	12
Photo 2 - Levage du VM2 par le Yab .....	12
Photo 3 - Levage du VM2 (suite) .....	13
Photo 4 - Excavation du puits d'essai (Carrière Francon) .....	13
Photo 5 - Mise en place de barres transversales pour supporter le cadre VM2 .....	14
Photo 6 - Dépôt du VM2 en fonds de puits (a) .....	14
Photo 7 - Dépôt du VM2 (b) .....	15
Photo 8 - Dépôt du VM2 dans l'excavation (c) .....	15
Photo 9 - Mise en place de quatre feuilles de pontage métallique autour du VM2 .....	16
Photo 10 - Mise en place des madriers .....	16
Photo 11 - Vue du blindage en bois .....	17
Photo 12 - Vue du blindage métallique .....	17
Photo 13 - Vue générale de la carrière Francon .....	22
Photo 14 - Jauges à corde vibrante installées sur une membrure femelle .....	34
Photo 15 - Moises inférieures .....	34
Photo 16 - Vue de près d'une jauge à corde vibrante et du câble la reliant au CR-10 .....	35
Photo 17 - Jauge sur moise transversale fixée près de l'appui sur la partie mâle .....	35
Photo 18 - Vue partielle de l'extensomètre et le câble le reliant au CR-10 .....	37
Photo 19 - Vue des cellules de pression totale fixées sur le blindage du côté chargé .....	40
Photo 20 - Vue du système d'acquisition de données CR-10 .....	41
Photo 21 - Vue du remblai hétérogène (matériel excavé) pour l'essai N°1 .....	46
Photo 22 - Mise en place du VM2 lors de l'essai N° 1 .....	46
Photo 23 - Déversement du sable sur la face instrumentée du VM2 .....	54
Photo 24 - Compactage du sable placé à la surface .....	54
Photo 25 - Vue de l'essai 2A .....	55
Photo 26 - Localisation des blocs de béton près du VM2 .....	60
Photo 27 - Vue de l'essai N° 2B .....	60
Photo 28 - Vue du VM2 monté pour l'essai 3 à Rivières-des-Prairies .....	66
Photo 29 - Glissement d'une paroi de silt .....	68
Photo 30 - Glissement sur la face instrumentée .....	68

## 1. PROBLÉMATIQUE

L'ensevelissement des travailleurs au fond des tranchées lors des affaissements, des glissements de terrain et de l'effondrement des parois cause au minimum 1,2 décès par an au Québec, soit environ 1 % des décès au Québec (Bouchard, 1989). Ces données sont corroborées par une étude américaine (Stanevick, R.L. et Middleton, D.C., 1988). Les accidents dans les chantiers d'excavation à ciel ouvert constituent l'un des problèmes les plus graves en sécurité du travail; les conséquences, en termes de pertes de vie ou de temps, sont considérables. Les travaux au fond de tranchées en milieu urbain sont souvent effectués sans étançonnement en raison de l'urgence des travaux et des profondeurs relativement faibles de ces excavations. L'examen de plusieurs cas d'effondrement montre une absence totale d'étançonnement et la présence de parois presque verticales. La présence de parois verticales dans un sol est une certitude d'effondrement à court, moyen ou long terme (Lafleur, 1986, Lafleur, 1988). Sur le plan technique, des systèmes de blindage ou d'étançonnements éprouvés existent. Les principaux systèmes disponibles sont composés de panneaux rigides qui sont souvent complexes et lourds à mettre en place, surtout pour les tranchées de moindre envergure comme c'est souvent le cas en milieu urbain.

De plus, les travaux d'excavation au centre-ville présentent des difficultés spécifiques, principalement liées à la nature du sol présent ainsi qu'à l'environnement physique rencontré (Tremblay, 1995). Les interventions de raccordement sur le réseau d'aqueduc croisent très souvent des réseaux de gaz et d'électricité puisque ces derniers sont moins profonds. Dans ces situations, les panneaux sont souvent bloqués par les conduites de gaz et d'électricité ou leur mise en oeuvre présente des sérieux risques d'accident pour les travailleurs. D'autre part, monter sur place un étançonnement sur mesure, fait de membrures de bois, est laborieux; un tel étançonnement implique la présence des travailleurs dans l'excavation alors qu'ils ne sont pas protégés contre les éboulements des parois d'excavation. Ce type d'étançonnement ne conviendrait surtout pas dans les sables et silts lâches.

## 2. ORIGINE DE LA DEMANDE

Lors de la phase 1 de cette étude, le système d'étançonnement VM2, pouvant atteindre 3,7 m (12') de profondeur, a été mis au point par conception et par expérimentation pour la Ville de Montréal. Les hypothèses de base retenues lors de cette étude sont celles spécifiques aux conditions de sols présents sur le territoire de la Ville de Montréal (Tremblay, 1994). Le VM2 permet de contourner les obstacles et a ainsi l'avantage de satisfaire plusieurs des contraintes rencontrées lors des

excavations en milieu urbain. Comme ce système émane d'un intervenant du milieu municipal, outre l'avantage de satisfaire plusieurs des contraintes rencontrées lors des excavations en milieu urbain, il possède un potentiel élevé de succès. Comme il apparaît très intéressant et très prometteur, il pourrait être utilisé dans plusieurs autres municipalités du Québec. Suite à une demande de la Ville de Montréal et de l'Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail secteur « affaires municipales » (APSAM), cette étude a été initiée en vue d'optimiser le système VM2 et de le généraliser dans plusieurs autres municipalités du Québec. Pour ce faire, il faut vérifier les hypothèses de conception retenues lors de la phase 1 et valider le système VM2 aux différents types de sols qui se trouvent dans les différentes municipalités du Québec.

### **3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE**

Le VM2 a été conçu en utilisant des hypothèses spécifiques aux conditions des sols présents sur le territoire de la Ville de Montréal. Pour dimensionner les membrures du VM2, plusieurs hypothèses ont été faites pour simplifier les calculs (Dugré, 1995). Certaines de ces hypothèses ont peut être conduit à surdimensionner les membrures du VM2. L'objectif de la présente étude vise à vérifier les hypothèses de calcul de la phase 1 afin d'optimiser le VM2 et à généraliser son utilisation dans plusieurs municipalités du Québec en le validant pour les différents types de sols les plus fréquemment rencontrés dans ces municipalités. Celles-ci disposeront dès lors d'un système d'étançonnement éprouvé qu'elles pourront utiliser sécuritairement pour des travaux d'excavation atteignant 12 pieds de profondeur.

### **4. DESCRIPTION DU SYSTÈME D'ÉTANÇONNEMENT VM 2**

Le VM 2 est constitué de quatre cadres en aluminium dans lesquels sont insérés verticalement des madriers ou des feuilles de pontage métalliques (le blindage) qui protègent contre l'éboulement des parois de l'excavation. Le blindage est lui-même retenu par des poutrelles horizontales télescopiques en acier (les moises), qui sont assemblées au cadre au moyen d'étriers. Les dimensions horizontales du VM2 atteignent 2,44 m x 2,44 m (8' x 8') par 3,7 m (12') de profondeur. La figure 1 illustre schématiquement un cadre type du VM2. Ce cadre est constitué d'une moise inférieure située à 0,76 m (2'6") du bas du blindage et d'une moise supérieure située à environ 0,305 m à 0,61 m (1 à 2") du haut du blindage. Ce dernier est fait de madriers 64 mm x 184 mm (3" x 8") ou de feuilles de pontage métallique.

## 5. ANALYSES STRUCTURALES

### 5.1 Critères de conception

Les principaux critères de conception de l'analyse structurale du VM2 (Lan et al, 1997) sont les suivants :

- Mise en place de l'étançonnement à partir du haut de l'excavation, sans qu'aucun travailleur ne soit obligé de descendre dans l'excavation;
- Étançonnement le plus léger possible pour qu'il soit plus facile à transporter et à manipuler manuellement par les travailleurs;
- Étançonnement facilement ajustable aux dimensions de l'excavation;
- Étançonnement permettant de s'ajuster aux obstacles rencontrés, par exemple le tuyau au fond de l'excavation, d'autres tuyaux à mi-hauteur (parallèle ou perpendiculaire au tuyau du fond).

### 5.2 Paramètres du sol

Le VM2 est conçu en ne considérant que des matériaux pulvérulents drainés et de faible compacité parce que selon les concepteurs, ils représentent, aux profondeurs d'utilisation du VM2 et pour le territoire de la Ville de Montréal, les conditions les plus défavorables pour la poussée des terres. En effet, il a été considéré que les sols cohésifs exerceraient, du moins à court terme, des poussées moindres par rapport aux sols pulvérulents. Les paramètres des sols ont été choisis par monsieur Martin Tremblay, ing., du laboratoire de la Ville de Montréal. Les paramètres considérés pour l'analyse sont :

- |                             |   |                        |
|-----------------------------|---|------------------------|
| • poids volumique total     | = | 18,0 kN/m <sup>3</sup> |
| • cohésion                  | = | 0 kPa                  |
| • angle de friction interne | = | 30 degrés              |
| • nappe phréatique          | = | aucune                 |

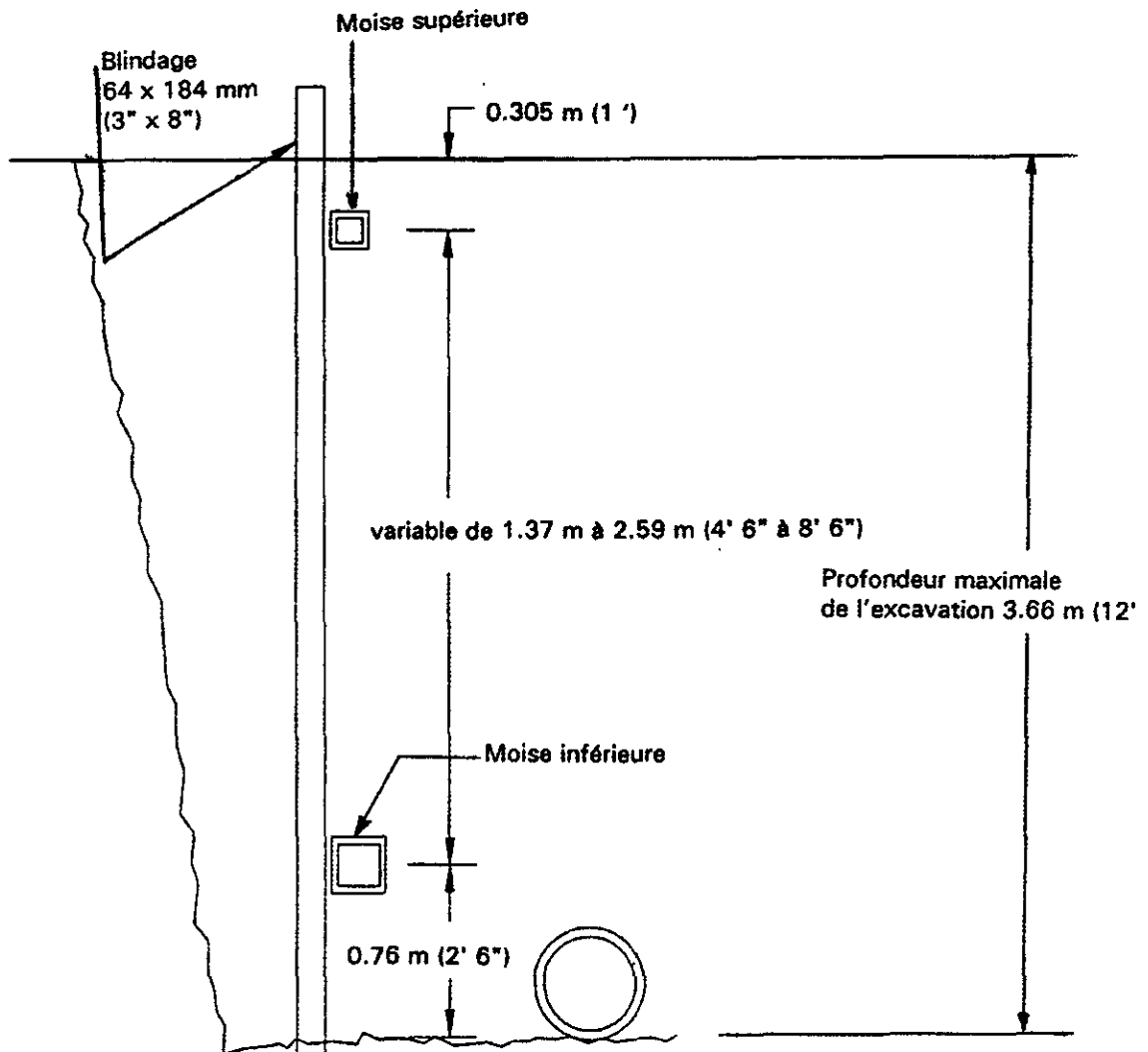


Figure 1 - Cadre type du système d'étançonnement VM2



### 5.3 Hypothèses de calcul

Les hypothèses pour calculer les poussées des terres sur le VM2 sont les suivantes :

- Le sol est en état d'équilibre plastique derrière le blindage;
- Aucune adhésion ou friction n'existe entre le sol et le blindage;
- La solution de Rankine s'applique.

Le coefficient de poussée active du sol ( $K_a$ ) est dérivé de l'équation de Rankine :

$$K_a = \frac{1 - \sin\phi'}{1 + \sin\phi'} \quad [1]$$

La contrainte horizontale ( $\sigma'_h$ ) s'exerçant sur le mur est ensuite évaluée par l'équation suivante :

$$\sigma'_h = K_a \cdot \sigma'_v \quad [2]$$

où  $\sigma'_v$  est la contrainte verticale effective à la profondeur désirée. La poussée des terres augmente linéairement avec la profondeur selon cette hypothèse. Si le sol est homogène, la poussée résultante totale ( $P_a$ ) s'appliquant sur le blindage s'obtient en intégrant la poussée des terres le long du plan vertical du blindage, soit :

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma \cdot H^2 \quad [3]$$

où  $\gamma$  = poids volumique total du sol ( $\gamma = \rho g$ ) et  $H$  = hauteur de sol derrière le blindage.

Tremblay (dans Lan et al. 1997 et communication personnelle, 13 juillet 1998) a formulé les hypothèses supplémentaires suivantes, rendues nécessaires par le contexte de l'utilisation du VM2 :

- L'état limite du VM2 est calculé en supposant que la poussée des terres s'applique simultanément sur tous les côtés du blindage. Ceci revient à supposer que les quatre parois de la tranchée cèdent simultanément et glissent jusqu'au blindage;
- Le glissement de terrain entraîne un tassement vertical de 1 pied du sol derrière la paroi du blindage. Par conséquent, la poussée des terres ne s'appliquera que sur une hauteur de 11 pieds;





Figure 2 - Poussée des terres retenue pour la conception du VM2

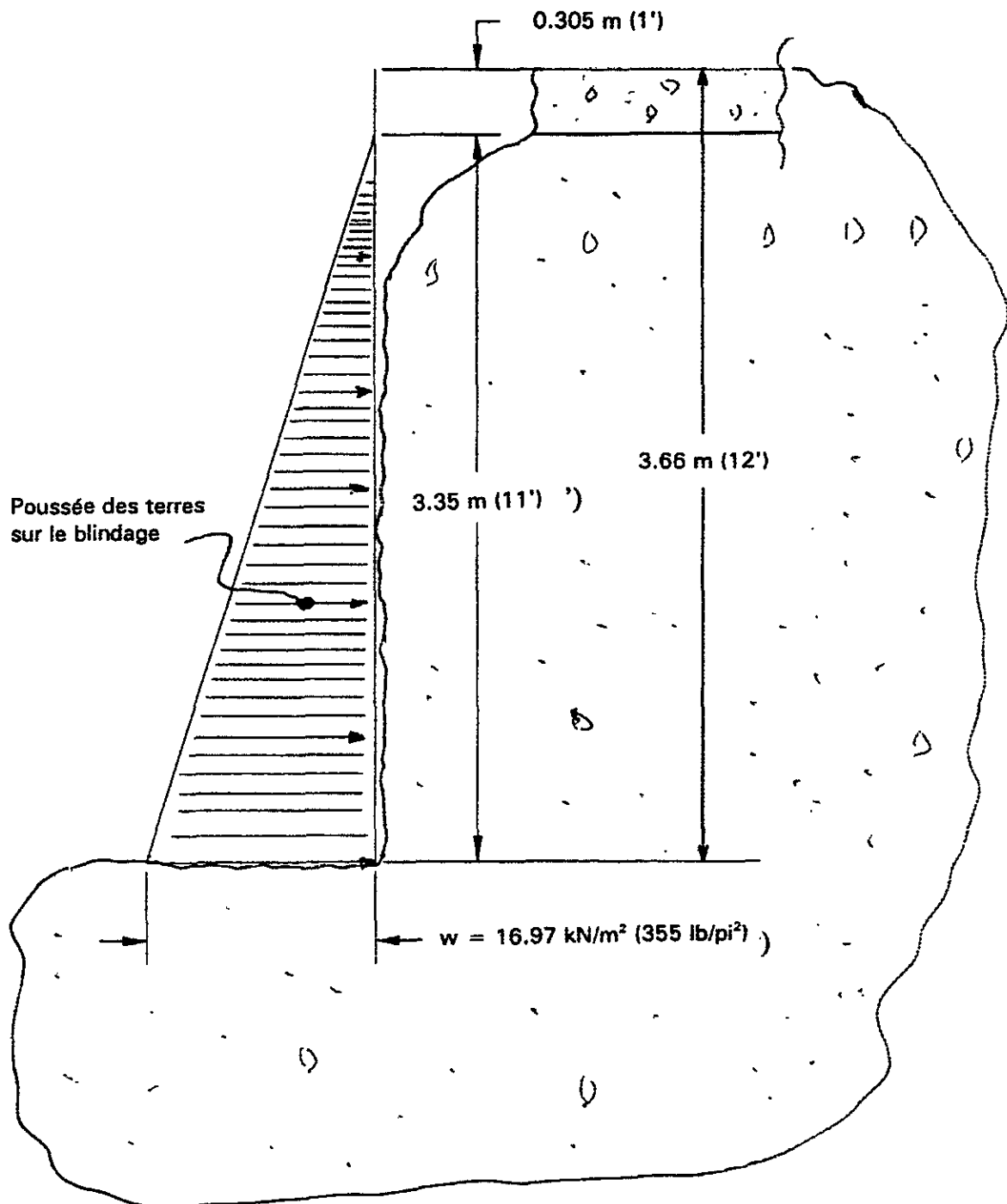


Tableau 1 - Caractéristiques et résistances des moises utilisées dans les essais in-situ de la phase 2

Moises	$w_r$ kN/m	$M_r$ (mâle et femelle) kN.m	$V_r$ (mâle et femelle) kN	Membrures - HSS acier						Poids total moise kg (li.)		
				Femelle			Mâle				Poids, kg/m (li./pi.)	
				Profilé	$M_r^{(a)}$ kNm	$V_r$ kN	Profilé	$M_r^{(a)}$ kNm	$V_r$ kN		Femelle	Mâle
Bas	25,0	21,1	32,5	127×127×4,8 (5"×5"×0,19")	32,4	253,6	102×102×6,4 (4"×4"×0,25")	25,6	271,6	17,9 (11,8)	18,2 (12)	56,4 (124)
Haut	4,0	3,5	4,55	102×76×4,8 (4"×3"×0,19")	16,6	203,7	76×51×4,8 (3"×2"×0,19")	8,1	151,8	12,2 (8,1)	8,3 (5,6)	31,1 (68,7)

Système VM2 :

- Contient quatre panneaux, chaque panneau étant fait d'un cadre d'aluminium et de deux moises (inférieure et supérieure).
- Chaque panneau pèse 94 kg (205 li.) environ.

(a) Pour une portée de 2.6 m.

## 6. MISE EN OEUVRE DU VM2 EN CHANTIER

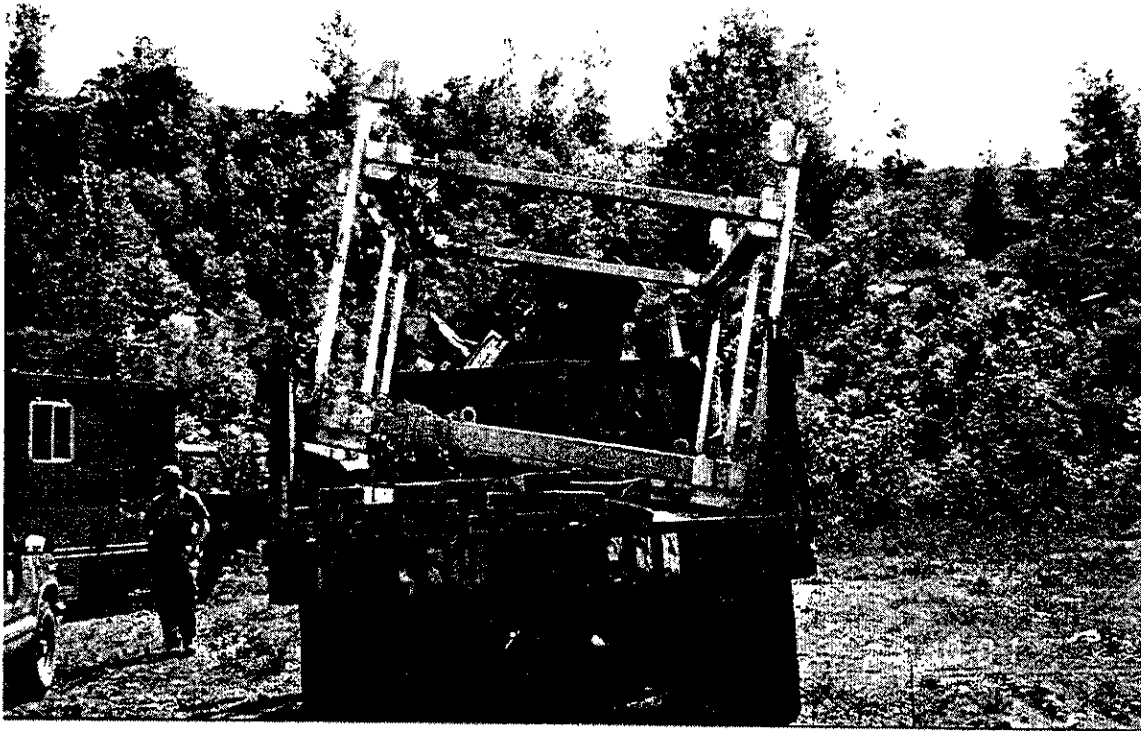
### 6.1 Installation du VM2

Bien que le VM2 puisse se défaire habituellement en quatre panneaux indépendants qui sont assemblés au chantier, celui utilisé dans le cadre de cette étude a été transporté au chantier complètement assemblé (photo 1). Sur le chantier, le VM2 est soulevé et déposé à côté de l'excavation à l'aide d'une grue (photos 2 et 3). Les travailleurs inspectent visuellement le système afin de s'assurer que tous les éléments sont intacts et fonctionnels. Puis l'excavation débute (photo 4). Le VM2 est ajusté aux dimensions de l'excavation (largeur, profondeur et en hauteur) en le soulevant pour faire glisser les moises ou le cadre télescopiques. Pour éviter toute surcharge lors de l'excavation, les matériaux de déblai sont déposés le plus loin possible du puits par la pelle rétrocaveuse. Les dimensions de l'excavation dépassent d'environ 1 pied celles de l'étançonnement.

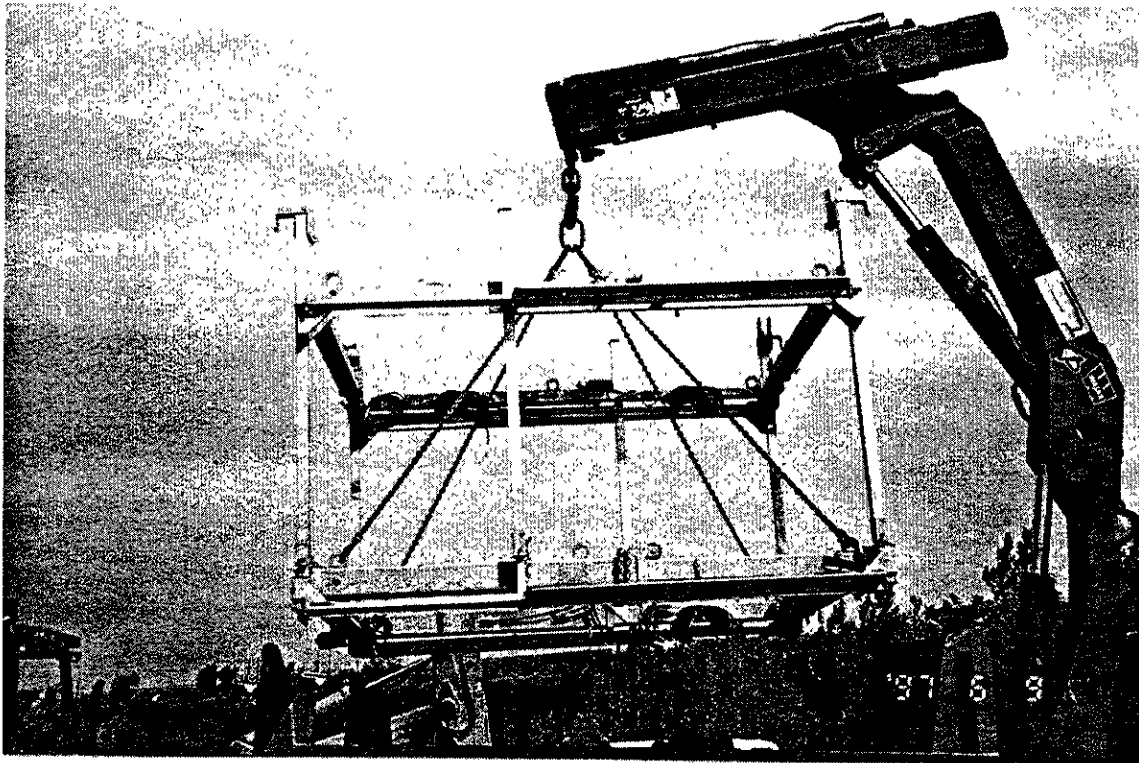
Les travailleurs déposent ensuite, au-dessus du puits d'excavation, deux barres transversales circulaires et deux barres carrées perpendiculaires aux deux barres circulaires et par-dessus de celles-ci (photo 5) pour supporter le cadre d'aluminium du VM2. À l'aide de la grue, le VM2 est levé et déposé au fond de l'excavation (photos 6, 7) de manière à ce que les crochets du cadre viennent s'agripper aux deux barres carrées pour suspendre le cadre (photo 8). Quatre feuilles de pontage métalliques sont ensuite déposées sur les barres de support afin de fermer l'espace libre autour du VM2 pour protéger les travailleurs contre les chutes. Ces feuilles constituent un accès au VM2 (photo 9) à partir duquel la pose du blindage se fait du haut de l'excavation (photo 10). Pour la campagne d'essai, des madriers en bois ont été utilisés sur la face instrumentée (photo 11) et des feuilles de pontage métalliques ont été utilisées sur les trois autres côtés (photo 12).

Lors de sa mise en oeuvre, le VM2 présente les caractéristiques des grandes pièces mises en place par une grue. Le mouvement télescopique des supports verticaux du cadre d'aluminium se fait difficilement dès qu'il y a de la terre qui entre dans l'espace entre les parties mâle et femelle. L'extension verticale du cadre des moises n'est pas toujours facile. Il faut que le mécanisme de levage applique une force toujours bien centrée pour éviter que les montants se coincent. La collaboration des travailleurs est requise pour s'assurer que le tout fonctionne bien. Lors des essais, l'installation du VM2 avec les travailleurs présents a pris beaucoup de temps puisqu'il y a beaucoup de pièces détachées à positionner et ajuster (madriers, tôles). Cependant, d'après la Ville de Montréal, l'équipe qui monte habituellement le VM2 au chantier le fait assez rapidement.

Après chaque essai, lorsque le système d'étançonnement VM2 a été sorti d'une excavation (carrière Francon après l'essai N° 2B et Rivières-des-Prairies après l'essai N° 3), il y a eu bris des montants verticaux. Durant le transport entre la carrière Francon et le site de Rivières-des-Prairies, un bris de ces montants a également été observé. Ces bris se sont produits à la base des montants en aluminium près des moises inférieures. Il existe à cet endroit une zone de faiblesse. Juste sous cette zone faible, il y a un encastrement donc une rigidité très élevée. La zone de faiblesse est causée probablement par le trou qui permet l'installation d'un goujon. Une première réparation des montants brisés a été effectuée par la Ville de Montréal; toutefois le montant d'aluminium s'est brisé une seconde fois au même endroit. Une plaque fût soudée mais elle s'arrête exactement à la zone faible.

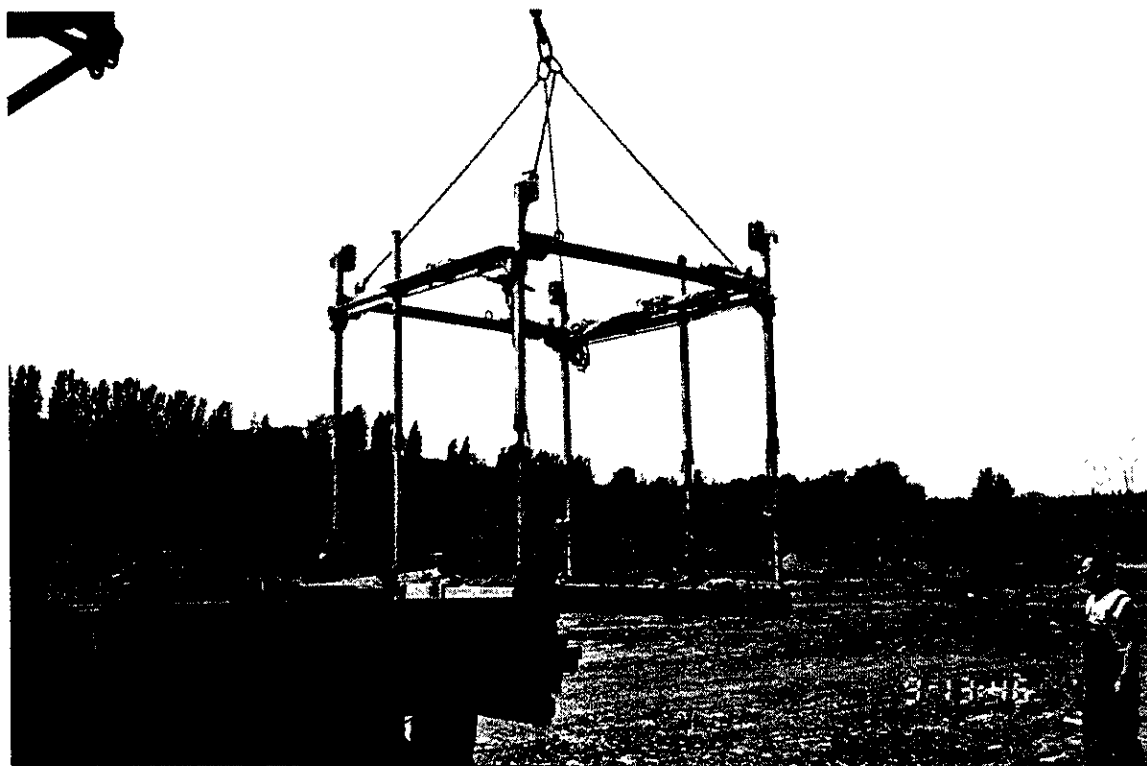


**Photo 1 - Transport du VM2 assemblé sur le site d'essais**



**Photo 2 - Levage du VM2 par le Yab**

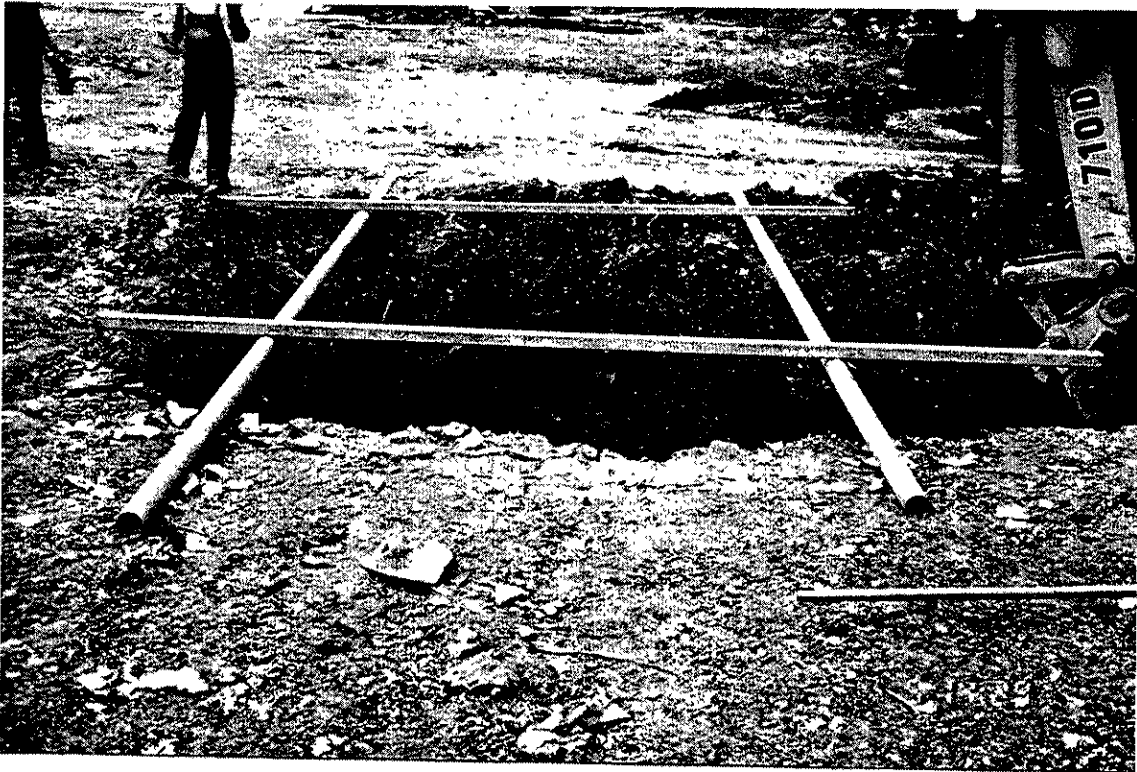




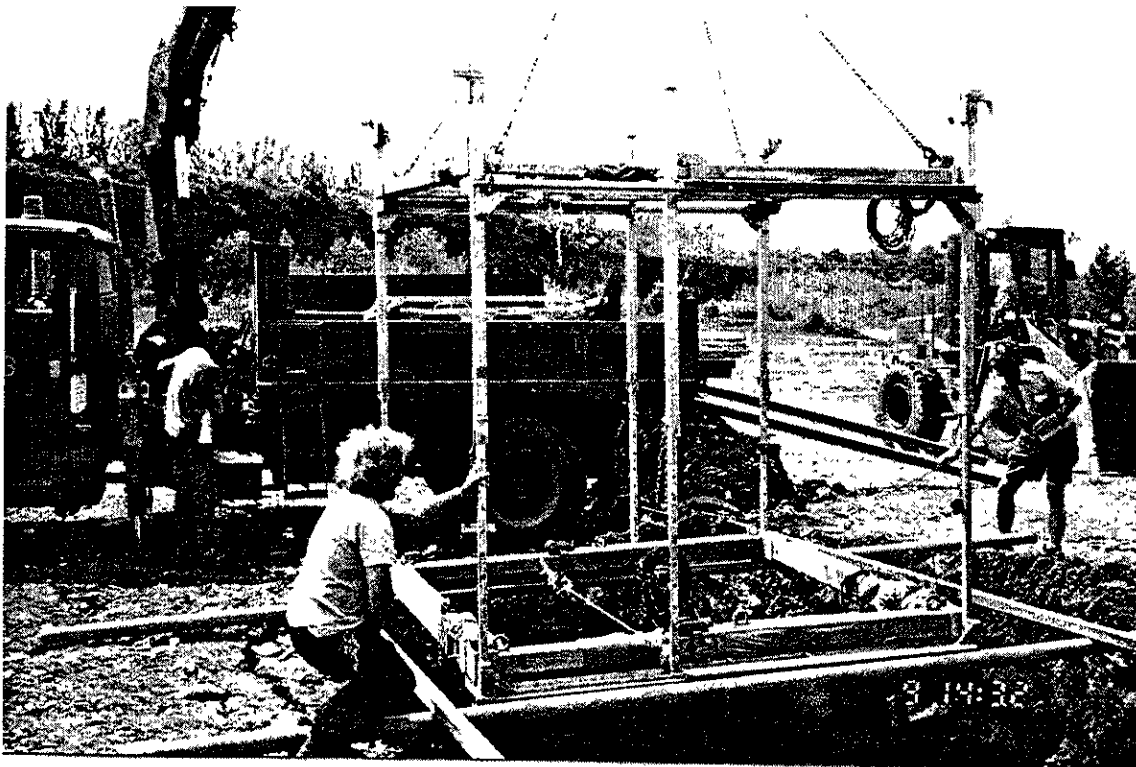
**Photo 3 - Levage du VM2 (suite)**



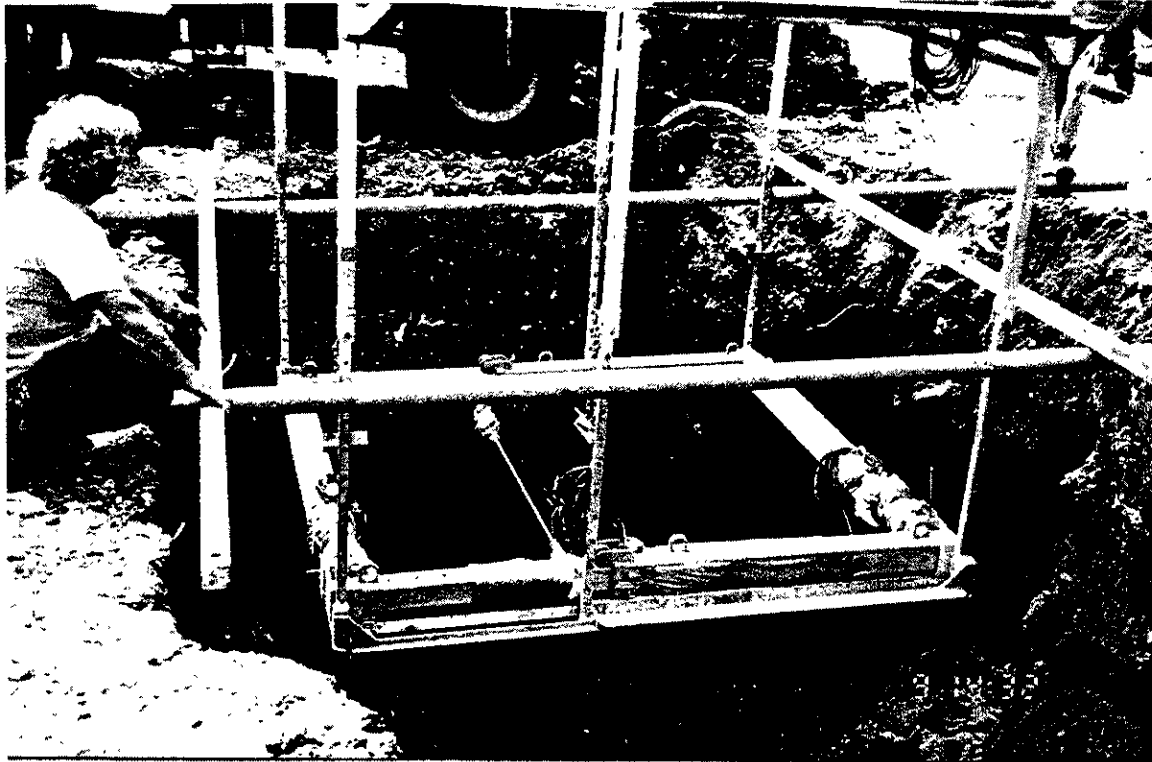
**Photo 4 - Excavation du puits d'essai (Carrière Francon)**



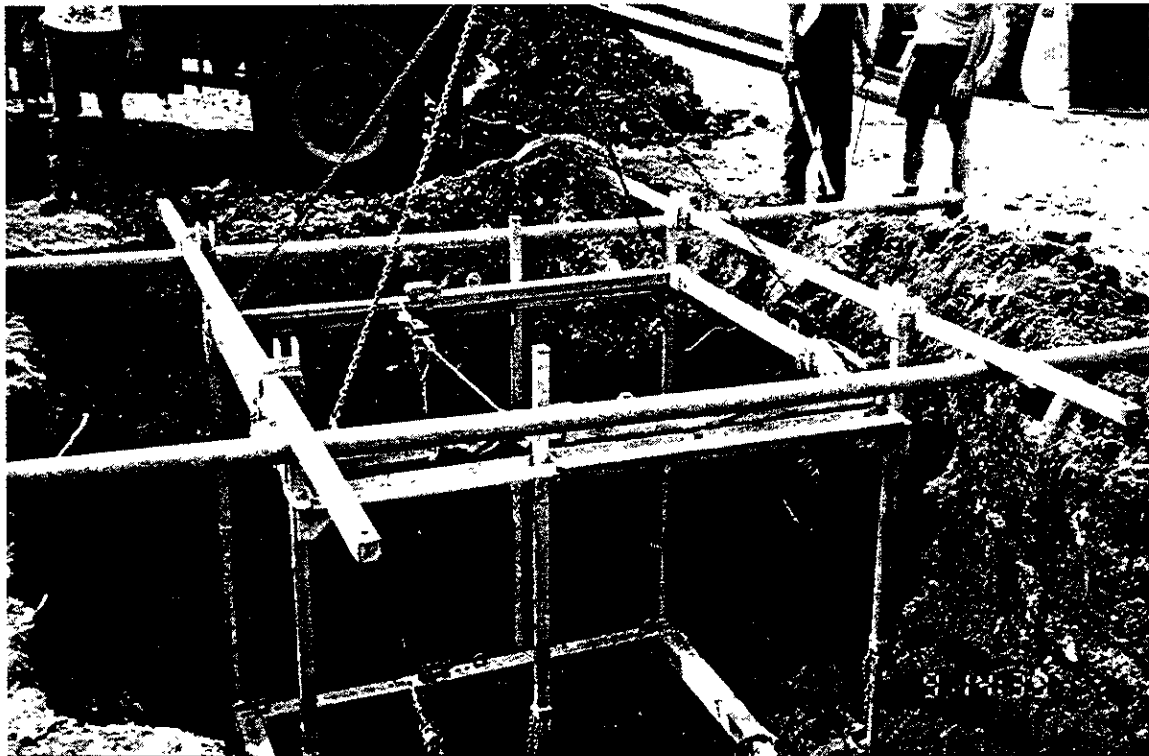
**Photo 5 - Mise en place de barres transversales pour supporter le cadre VM2**



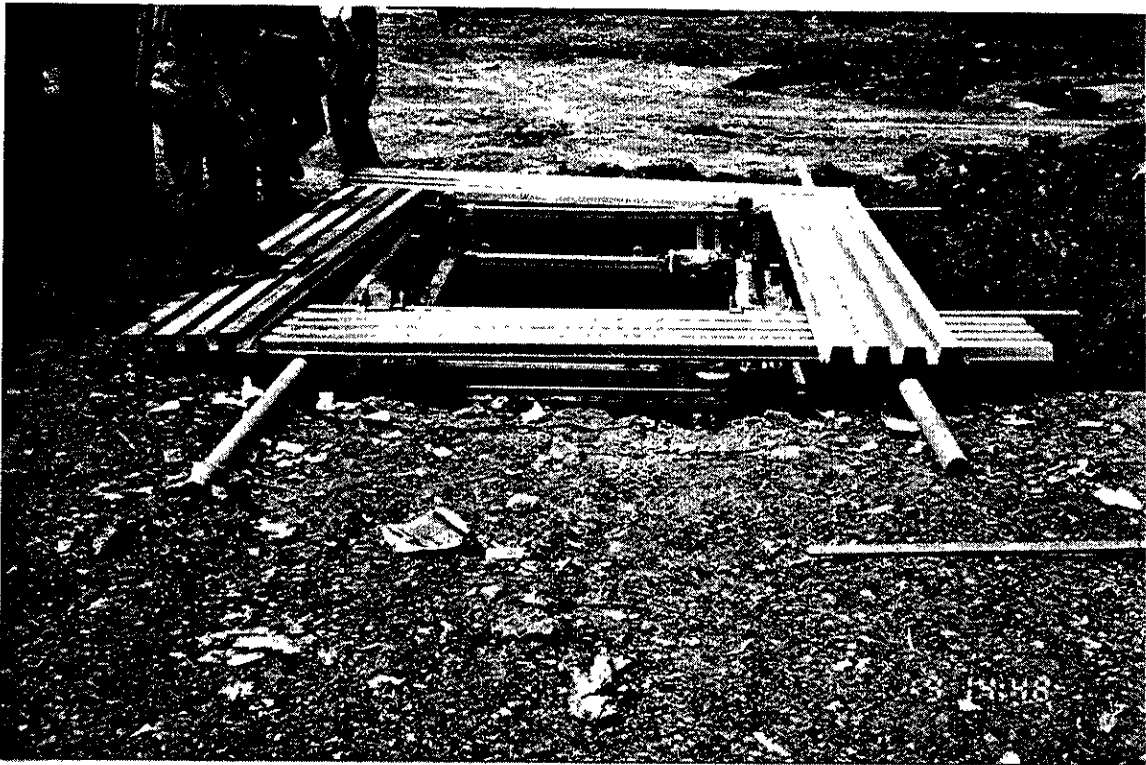
**Photo 6 - Dépôt du VM2 en fonds de puits (a)**



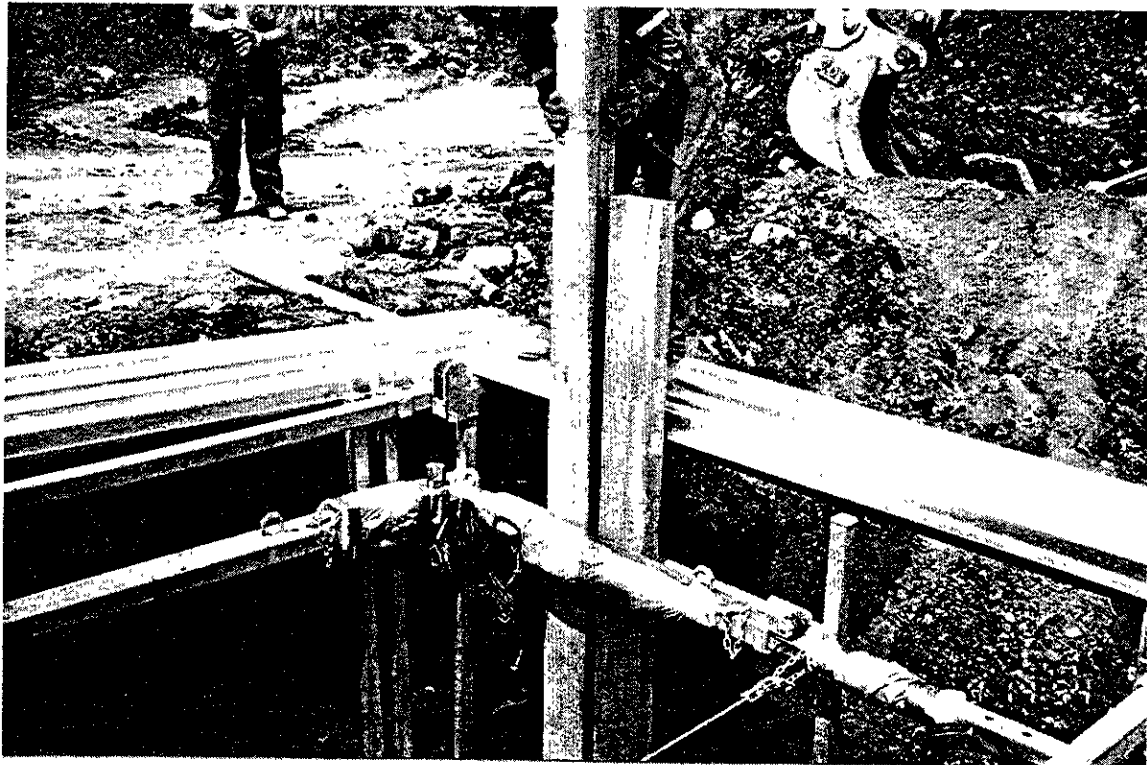
**Photo 7 - Dépôt du VM2 (b)**



**Photo 8 - Dépôt du VM2 dans l'excavation (c)**



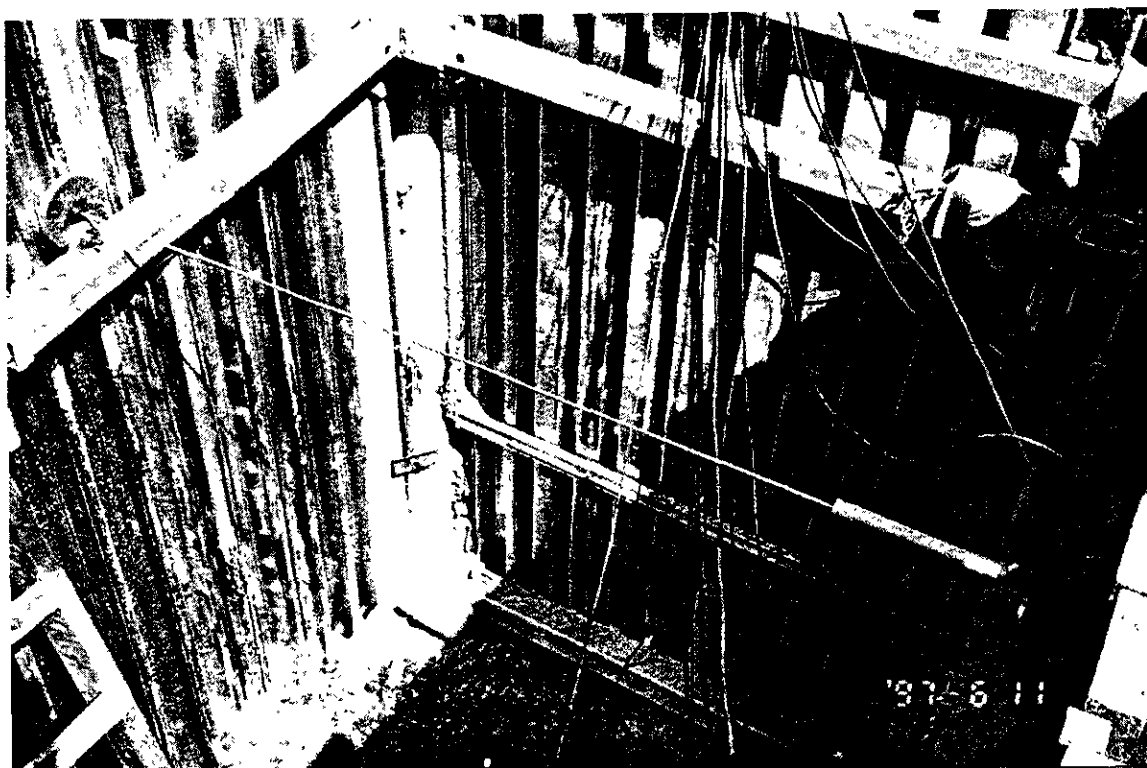
**Photo 9 - Mise en place de quatre feuilles de pontage métallique autour du VM2**



**Photo 10 - Mise en place des madriers**



**Photo 11 - Vue du blindage en bois**



**Photo 12 - Vue du blindage métallique**

## 6.2 La poussée des terres sur les ouvrages de soutènement

D'après le *Canadian Foundation Engineering Manual de la Société Canadienne de Géotechnique*, il n'y a pas de solutions théoriques générales disponibles pour calculer la poussée des terres sur les écrans flexibles ou semi-flexibles utilisés comme blindage pour les parois verticales des excavations. Le choix d'un diagramme approprié de pressions des terres représente une étape délicate dans la conception de systèmes de blindage. Une alternative aux diagrammes de poussée triangulaires, basés sur les théories de Coulomb ou de Rankine, consiste à utiliser les diagrammes empiriques de poussée apparente, tels que ceux proposés par Terzaghi, Peck et Mesri (Terzaghi et al, 1996). Ces diagrammes sont basés sur plusieurs séries de mesures de charge effectuées sur des étançons de blindage. Des exemples types de mesures sont présentés à la figure 3(a). Un diagramme de poussée recommandé par Terzaghi et al. (1996) pour la conception de blindage dans le sable est donné à la figure 3 (b). On remarquera que ce diagramme empirique a une forme rectangulaire et que le maximum est donné par la formule suivante :  $0,65 \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H$ .

Casagrande (Casagrande L., 1973) a compilé plusieurs séries de mesures de poussée horizontale des terres sur des murs de soutènement, notamment des culées de ponts ou de viaducs. La figure 4 montre un exemple type de ce genre de mesures. On peut constater immédiatement que la distribution des contraintes horizontales sur la paroi verticale s'éloigne considérablement de l'hypothèse triangulaire classique. Il n'existe pas, à notre connaissance, dans la littérature, de programmes de mesures de poussée horizontale des terres, effectués sur des blindages flexibles en bois de faible hauteur du type VM2.

Les blindages comme le VM2 représentent des systèmes de protection pour lesquels la poussée des terres se développe suite à un éboulement ou un glissement des parois verticales adjacentes de sol. Comme le VM2 ne s'appuie pas directement sur cette paroi, un effet dynamique inertiel additionnel peut, possiblement, se produire dans certains cas où la rupture est soudaine et implique une masse de sol importante. Il n'y a pas de données ou d'analyses disponibles dans la littérature scientifique sur ce phénomène.

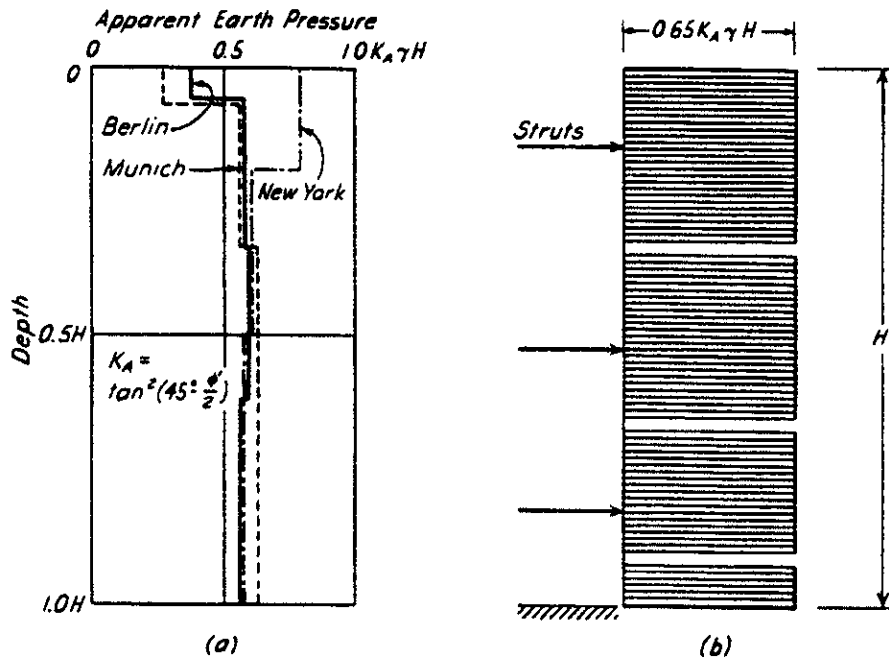


Figure 3 : a) Enveloppes des pressions apparentes des terres pour des charges mesurées sur des étançons dans du sable, b) Diagramme des pressions des terres suggéré pour la conception de blindage dans le sable (Terzaghi, Peck et Mesri, 1996)

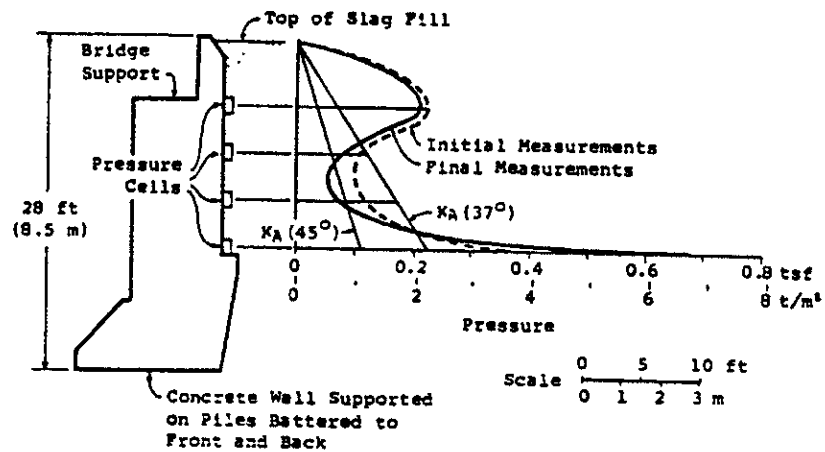


Figure 4 : Pressions des terres mesurées sur des culées de pont dans le sable (Casagrande, 1973)

## 7. PROGRAMME D'ESSAIS

Le programme d'essai a été réalisé par l'École de technologie supérieure (LeBoeuf, D., Chaalal, O., 1998). Les objectifs du programme d'essai en chantier sont les suivants :

- Mesure de la pression horizontale des terres sur le blindage en bois du VM2;
- Mesure des efforts de cisaillement et de flexion sur les moises longitudinales supérieures et inférieures du VM2;
- Mesure des déplacements horizontaux (flèches) des moises longitudinales supérieure et inférieure du VM2;
- Observations visuelles sur l'installation et le comportement en chantier du VM2.

Dans les ouvrages de mécanique des sols, il faut reconnaître que l'étude de blindage et la mesure de la poussée des terres sur des écrans à faible profondeur constituent un problème complexe, délicat et fort peu documenté en génie civil. Terzaghi, Peck et Mesri (1996) présentent un certain nombre de diagrammes de pressions apparentes sur des écrans de blindage dont les hauteurs dépassent largement celles du VM2. Les ouvrages de référence recommandent d'utiliser des diagrammes empiriques de poussées des terres. À notre connaissance, aucune mesure de pression sur des blindages temporaires n'a été publiée au Québec. Dès lors, dans le cadre de la présente étude, il semble logique et naturel de baser le programme d'instrumentation sur le principe de redondance, c'est-à-dire, mesurer expérimentalement une variable par différentes méthodes de mesure et comparer les valeurs obtenues pour assurer sa fiabilité. Par exemple, la poussée résultante sur les moises longitudinales peut être obtenue suivant les quatre méthodes suivantes :

- Directement des cellules de pression totale;
- Par calcul à partir des jauges de déformation sur les moises longitudinales;
- Par calcul des réactions mesurées sur les moises transversales perpendiculairement à la face instrumentée;
- Par les déplacements horizontaux mesurés par les extensomètres.



## 7.1 Choix des sites

### 7.1.1 Critères de sélection des sites

Les sites ont été choisis en fonction des objectifs de l'étude d'après les critères suivants :

- Essai 1 : un sol représentatif de la région de Montréal (charges de service);
- Essai 2 : un sol des plus défavorables pour le Québec (charges de service);
- Essai 3 : chargement à la rupture du pire des deux cas précédents.

D'après la géologie du quaternaire au Québec et l'expérience acquise dans les travaux d'excavation de l'ÉTS et de la Ville de Montréal, les argiles très sensibles de la mer de Champlain sont les sols les plus défavorables pour le Québec. Il a été convenu de ne pas tester pour cette catégorie de sol puisque le VM2 est conçu pour des matériaux pulvérulents drainés et de faible compacité. Ces matériaux représentent, aux profondeurs d'utilisation du VM2 et pour le territoire de la Ville de Montréal, les conditions les plus défavorables pour la poussée des terres. De plus, les excavations sont, en général, de courte durée et sont pratiquées dans la couche superficielle des dépôts argileux qui est normalement plus résistante. Cette résistance découle de la présence d'une croûte d'argile oxydée sur une épaisseur d'au moins 3 à 4 m dans la région de Montréal.

Donc, d'un commun accord de l'ensemble des intervenants et en considérant la nature des matériaux généralement rencontrés dans les travaux d'excavation sur le territoire montréalais, trois essais ont été réalisés. Le tableau 2 résume ces essais.

**Tableau 2 - Description des essais**

Essai	Site	Matériaux	Sollicitation
1	Carrière Francon	Sol naturel en place (remblai hétérogène)	Remblayage jusqu'à une hauteur de 3,6 m (12 pieds)
2A	Carrière Francon	Sable propre	Remblayage jusqu'à une hauteur de 3,6 m (12 pieds)
2B	Carrière Francon	Sable propre	Remblayage jusqu'à une hauteur de 3,6 m (12 pieds) + surcharge statique de 25 kPa
3	Rivière-des-Prairies	Silt sablonneux (sol naturel en place)	Rupture naturelle des parois et glissement provoqué par la pelle sur la face instrumentée

### 7.1.2 Caractéristiques géotechniques des sites

Les essais 1, 2A et 2B ont été réalisés à la carrière Francon. La photo 13 montre une vue générale du site. La topographie du site est généralement plane, le terrain est bien drainé et aucune nappe phréatique n'a été rencontrée dans les essais N<sup>os</sup> 1, 2A et 2B. Le matériau utilisé pour l'essai N<sup>o</sup> 1 est le sol en place de la Carrière Francon, constitué par un sol de remblais très hétérogène, comportant de nombreux débris de construction. La courbe granulométrique pour la fraction inférieure à 4 pouces est montrée à la figure 5 et des caractéristiques principales sont résumées au tableau 3. Les masses volumiques de ce sol, mesurées au nucléodensimètre nucléaire par les techniciens de la Ville de Montréal, sont présentées au tableau 4. La masse volumique humide ( $\rho_{\text{hum}}$ ) varie entre 1801 et 1934 kg/m<sup>3</sup> à une profondeur de 1,40 m et entre 2091 et 2175 kg/m<sup>3</sup> à une profondeur de 0,31 m. Le sol remblayé était dans un état de compacité lâche à moyenne.



**Photo 13 - Vue générale de la carrière Francon**

Pour les essais N<sup>os</sup> 2A et 2B, le sol de remblai de l'essai N<sup>o</sup> 1 a été complètement excavé et a été remplacé par un sable propre et sec dont la courbe granulométrique se retrouve à la figure 5. Le diamètre médian ( $D_{50}$ ) est de 0,35 mm et le coefficient d'uniformité ( $c_u$ ) est de 3,0. Une synthèse des caractéristiques granulométriques de ce sol est présentée au tableau 3. Les masses volumiques du sable ont été mesurées à la fin du remblayage, donc au niveau de la surface du terrain (tableau 4). Quatre mesures ont été effectuées et  $\rho_{hum}$  varie entre 1703 et 1729 kg/m<sup>3</sup>. Comme le sable était déversé directement en fond de tranchée et légèrement damé par le godet de la pelle, la compacité se situait entre lâche et moyenne.

L'essai N<sup>o</sup> 3 a été réalisé au site de Rivière-des-Prairies, dans l'est de l'île de Montréal. Le plan de localisation se trouve à la figure 7. Le concept de cet essai était légèrement différent des deux essais précédents et visait l'évaluation du comportement du VM2 pour un cas de sollicitation provoquée par un glissement d'une ou de plusieurs parois du sol en place. Dès lors, la description des conditions géologiques et géotechniques doit être faite de façon détaillée. Le rapport du puits d'exploration (figure 8) indique la présence d'une couche de silt sablonneux sur une épaisseur de 2,3 m reposant sur une couche d'argile silteuse grise, le silt sablonneux est relativement bien drainant et la nappe phréatique a été rencontrée à une profondeur de 1,60 m.

Les résultats de quatre analyses granulométriques (tableau 4) montraient que la fraction sablonneuse du silt varie entre 17 % et 32 % (trois essais). Un essai indique un faciès de sable silteux (profondeur de 2,3 m). La figure 5 présente les deux courbes granulométriques obtenues par tamisage mécanique au laboratoire de mécanique des sols. Les deux courbes granulométriques effectuées par le laboratoire de la Ville de Montréal se retrouvent à la figure 6. La masse volumique humide moyenne à une profondeur de 1,50 m est de 2009 kg/m<sup>3</sup>.

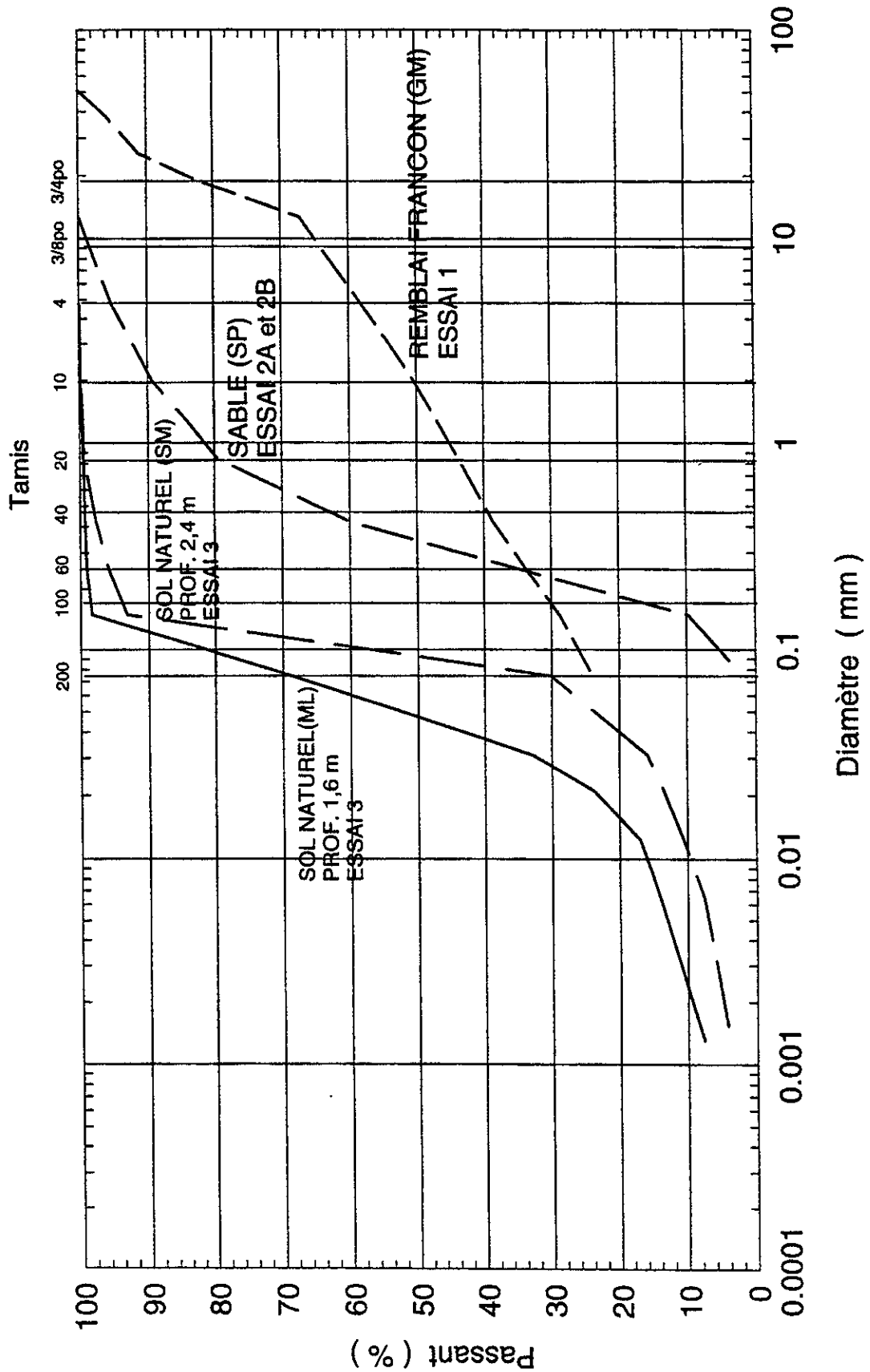


Figure 5 - Distribution granulométrique des sols pour les essais 1, 2A, 2B et 3

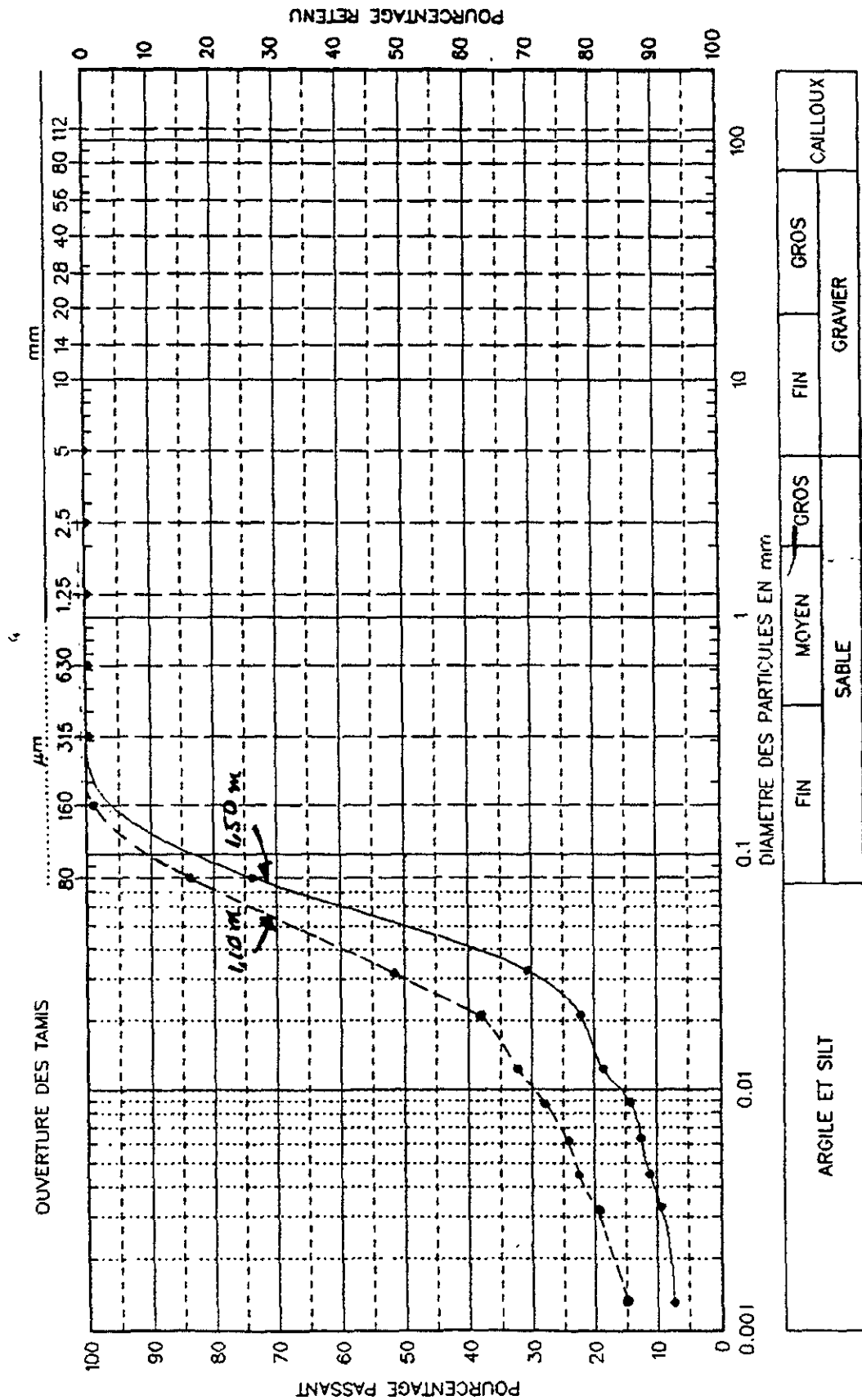


Figure 6 - Courbes granulométriques au site de Rivière-des-Prairies

Tableau 3 - Résultats des analyses granulométriques

Site	Essai	Analyse	Échantillon N°	Profondeur (m)	Granulométrie			
					Gravier (%)	Sable (%)	Silt et argile (%)	D <sub>50</sub> (mm)
Francon	N° 1	ÉTS	1	--	41	35	24	2,0
Francon	N°s 2A et 2B	ÉTS	2	--	4	95	~ 1%	0,35
R.D.P.	N° 3	ÉTS	3	1,6	0	32	68	0,045
R.D.P.	N° 3	ÉTS	4	2,4	0	70	30	0,09
R.D.P.	N° 3	V.D.M.	2	1,50	0	27	73	0,06
R.D.P.	N° 3	V.D.M.	1	1,10	0	17	83	0,03

**Tableau 4 - Masses volumiques in-situ, sites Francon et Rivière-des-Prairies**

Site	Essai	Mesure N°	Date	Profondeur (m)	$\rho_{humide}^{(b)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_D^{(c)}$ (%)	w <sup>(d)</sup>	Remarques
Francon	N° 1	1	10-06-97	1,40	1801	1673	7,7	Remblai hétérogène (e)
		2	"	1,40	1934	1803	7,3	
		3	"	1,40	1885	1749	7,8	
	4	11-06-97	0,30	2175	1974	10,2		
	5	"	0,30	2101	1908	10,1		
	6	"	0,30	2091	1915	9,2		
Francon	N°s 2A et 2B	1	11-06-97	0,00	1727	1671	3,3	Sable (e)
		2	"	0,00	1708	1661	2,8	
		3	"	0,00	1728	1682	2,7	
		4	"	0,00	1703	1669	2,0	
R.D.P.	N° 3	2	26-06-97	1,50	2003	1590	25,9	Silt sablonneux (f)
		1		1,50	2015	1592	26,6	

(a) Mesures effectuées au nucléodensimètre par les techniciens du laboratoire au service des travaux publics de la Ville de Montréal.

(b)  $\rho_{humide}$  = masse volumique du sol humide.

(c)  $\rho_d$  = masse volumique du sol sec.

(d) w = teneur en eau ( $M_{eau}/M_{solide}$ ).

(e) Mesures faites sur le sol remblayé contre la paroi instrumentée. Le sol a été tassé par la pelle dans sa partie supérieure.

(f) Mesures faites sur le sol en place au fond de l'excavation.

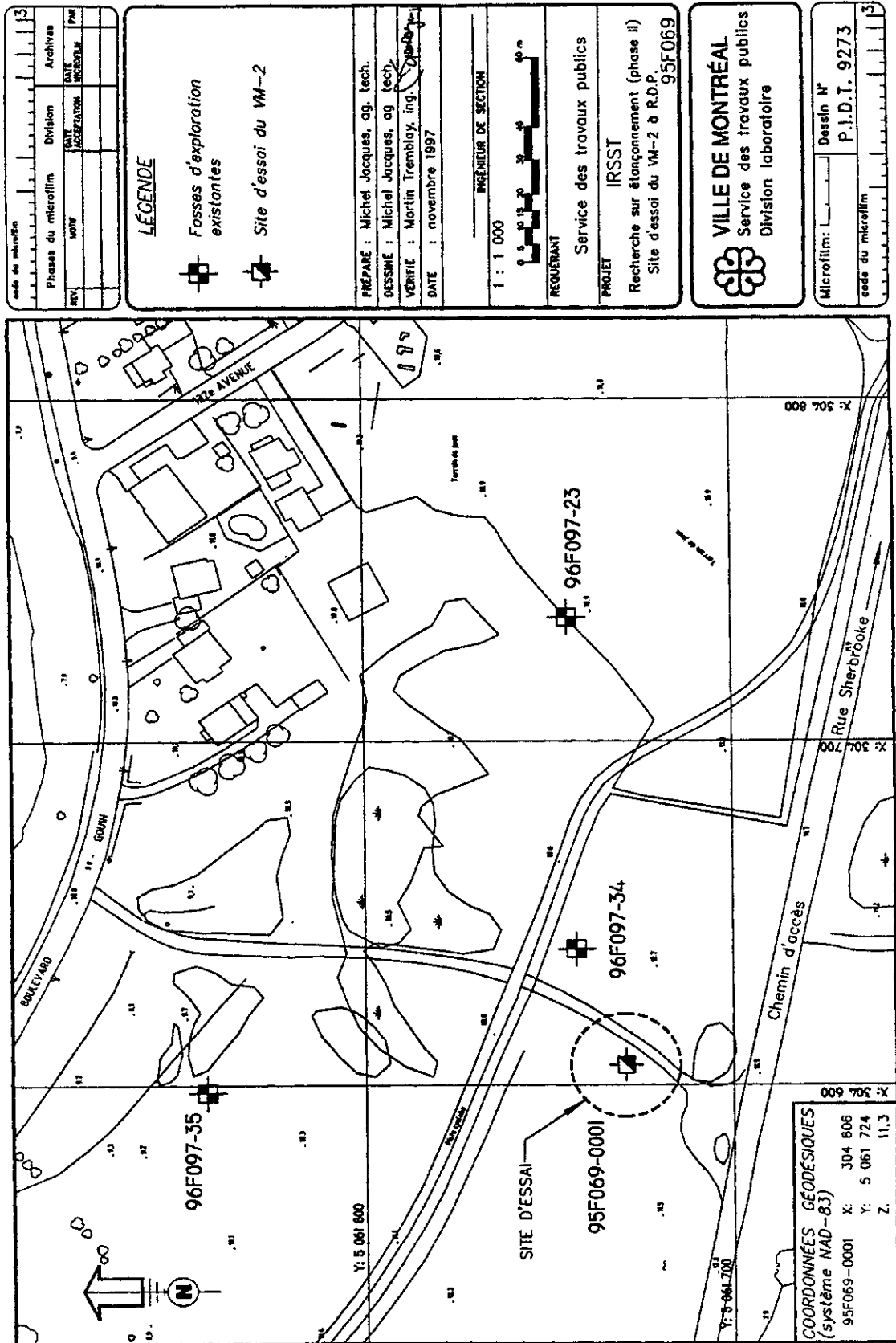


Figure 7 - Plan de localisation du site de Rivière-des-Prairies





Ville de Montréal  
 Service du génie  
 Module gestion des eaux  
 Laboratoire  
 999 rue de Louvain Est  
 Montréal H2M 1B3

# RAPPORT DE Puits D'EXPLORATION

Sondage: 95F069-0001

Coordonnées géodésiques (NAD-83) X: 304606 Y: 5061724 Z: 11.30 m			Plan P.I.D.T. No. 9273			
Projet : IRSST-Recherche sur étanchonnement/VM-2 (Phase 2)						
Localisation : Site d'enfouissement R.D.P., site d'essai du VM-2						
Requérant : Travaux publics				Site No.: IX-54		
Profondeur: 3.40 m		Niveau d'eau: 1.6 m		Date: 97-06-26		
Préparé: R. Despré		Vérifié: M. Tremblay, ing.		Approuvé: M. Tremblay, ing.		
PROFONDEUR (m)	STRATIGRAPHIE			ECHANTILLONS		RESULTATS D'ESSAIS ET REMARQUES
	NIVEAU (m) / PROFONDEUR	DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC	SYMBOLES	ECH. NUMERO	LOCALISATION	
11.30						
0.5	10.80 / 0.50	Silt sablonneux, un peu d'argile, traces de matières organiques; brun foncé.				
	10.50 / 0.80	Silt sablonneux, traces à un peu d'argile; brun clair, oxydation.				
1.0		Silt, un peu de sable à sablonneux, un peu d'argile à traces d'argile; brun et gris, oxydation		PU1-1		AG w = 26.6 %
1.5		Masse volumique à 1,5 m = 1591 kg/m <sup>3</sup> (w=26%)		PU1-2		AG w = 27.6 %
2.0	9.00 / 2.30	Argile silteuse				
2.5						
3.0						
3.5	7.90 / 3.40	FIN DE LA FOSSE				

Remarques. AG Analyse granulométrique  
 w Teneur en eau

Figure 3.4 Rapport de puits d'exploitation. Site Rivière des Prairies

Figure 8 - Rapport du puits d'exploitation à Rivière-de-Prairies

## 8. INSTRUMENTATION DU VM2

Le VM2 est instrumenté avec des jauges de déformation à corde vibrante, des extensomètres et des cellules de pression. La figure 9 donne une vue générale des emplacements de ces instruments. Les jauges de déformation ont été installées au laboratoire de l'École de technologie supérieure alors que les extensomètres et les cellules de pression ont été installés au site d'essais. Tous les instruments ont été vérifiés et testés au laboratoire de l'École de technologie supérieure avant le début des essais en chantier.

### 8.1 Jauges de déformation à corde vibrante

Les moises du VM2 sont instrumentées à l'aide de dix jauges extensométriques à corde vibrante. Les photos 14 à 17 montrent l'installation et le câblage des jauges. Même si le VM2 comprend huit moises sollicitées en flexion et en compression combinées, l'instrumentation est limitée aux deux moises, la moise inférieure (MI) et la moise supérieure (MS) du côté dit instrumenté ou chargé, pour mesurer la poussée des terres.

L'emplacement exact des jauges le long des moises est présenté à la figure 10. Les jauges numérotées de 1 à 3 sont installées sur la moise inférieure, tandis que les jauges 4 à 6 sur la moise supérieure. Sur la partie femelle et mâle de chaque moise, deux jauges sont placées approximativement au 3/10 de la portée à partir de chaque extrémité. La 3<sup>e</sup> jauge est placée sur la partie femelle au centre de la longueur de chevauchement entre la goupille et l'extrémité de la partie mâle. La longueur de ce chevauchement est d'environ 445 mm (18,5").

Les quatre moises transversales sont également instrumentées à l'aide de jauges à corde vibrante (une jauge par moise) afin d'évaluer la répartition des poussées (compression) entre ces quatre moises. Les jauges numérotées 7 et 8 sont soudées sur les MI, alors que les jauges numérotées 9 et 10 sont fixées sur les MS (voir figure 11). Les jauges sont placées sur la partie mâle des moises près de la jonction avec le cadre d'aluminium où elles seront le moins perturbées par un flambement ou fléchissement éventuels des moises.

Il est important de signaler ici que les lectures des jauges n'étaient initiées qu'après que l'espace entre les trois autres côtés et la paroi des excavations ait été remblayé. Cette manière de faire a permis de découpler l'effet combiné flexion-compression dans les moises et d'économiser ainsi sur le coût de l'instrumentation.

*Description des jauges extensométriques à corde vibrante :*

- *10 jauges extensométriques à corde vibrante de modèle SM-2W :*
  - ▶ *la plage de mesure est de 3300  $\mu$  déformation*
  - ▶ *fournisseur : ROCTEST*

## **8.2 Extensomètres**

Deux extensomètres coupés à longueur et ajustés en laboratoire, sont aussi placés entre les deux moises supérieures (MS du côté chargé et MS du côté opposé) et les deux moises inférieures correspondantes pour mesurer les déplacements (flèches) des moises (voir figure 11 et photo 18).

*Description des extensomètres :*

- *2 extensomètres (type à remblai) de modèle ERI-200 :*
  - ▶ *plage de mesure 100 mm*
  - ▶ *fournisseur : ROCTEST*

## **8.3 Cellules de pression totale**

Cinq cellules de pression totale sont placées à différentes profondeurs sur la paroi externe du côté instrumenté du VM2 pour mesurer les pressions horizontales exercées par la pression des terres sur la paroi (voir figures 13 et 14 et photo 19).

*Description des cellules de pression totale :*

- *Trois cellules de pression totale de modèle TPC-0 :*
  - ▶ *gamme d'étalonnage 0 à 150 psi*
  - ▶ *erreur maximale : 2,9 psi pour TPC1 et TPC3, et 1,06 psi pour TPC2*
  - ▶ *fournisseur : ROCTEST*
  
- *Deux cellules de pression totale de modèle EPC :*
  - ▶ *gamme d'étalonnage 0 à 50 psi*
  - ▶ *erreur maximale : 0,12 psi pour EPC1 et 0,14 psi pour EPC2*
  - ▶ *fournisseur : ROCTEST*

#### **8.4 Acquisition de données**

Pour acquérir les données de mesures en mode continu, l'ensemble des instruments de mesure sont reliés à un système d'acquisition de données de type CR-10 de ROCTEST. Ce système était laissé en chantier pour acquérir les données durant les essais. La photo 20 illustre le système d'acquisition.

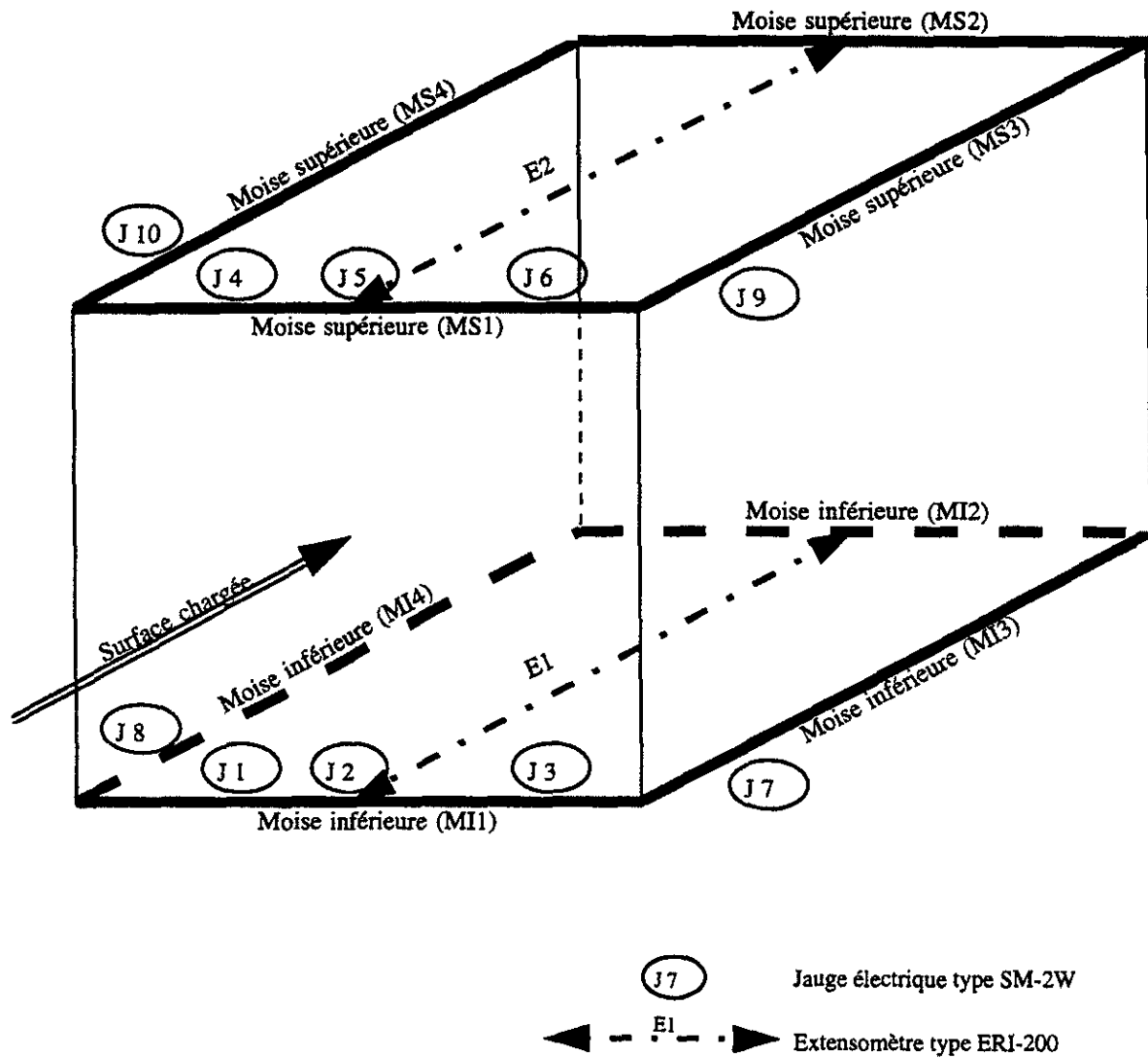
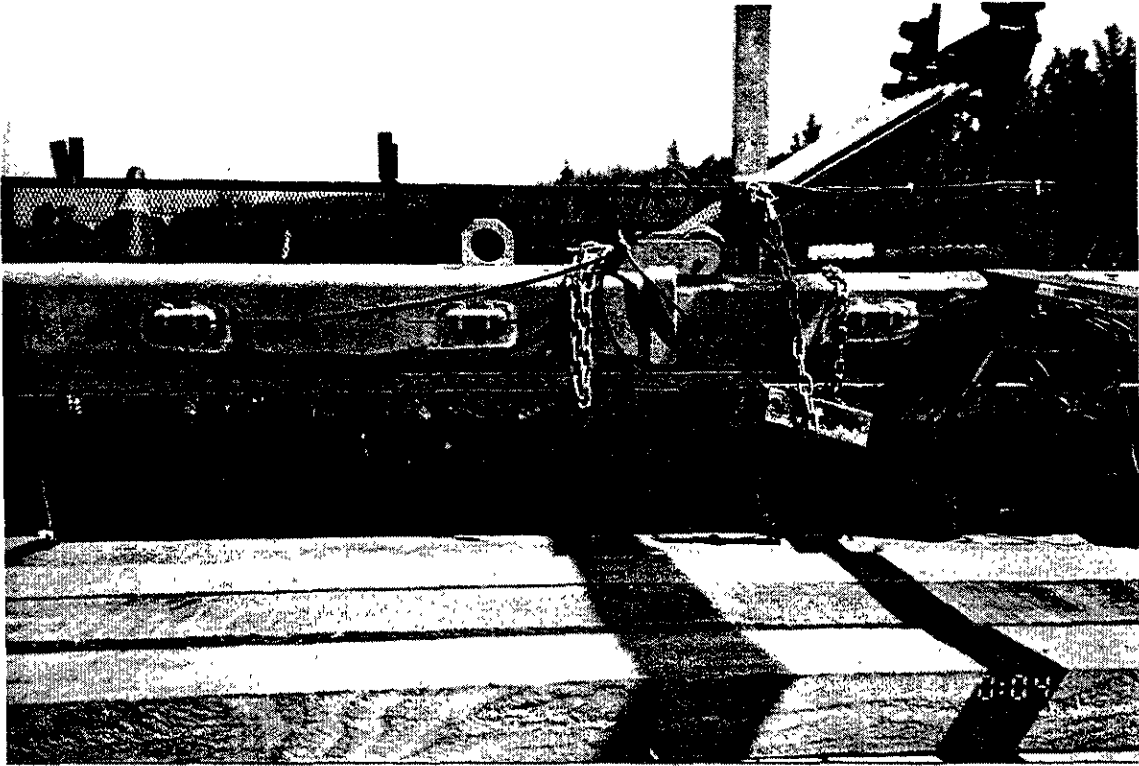
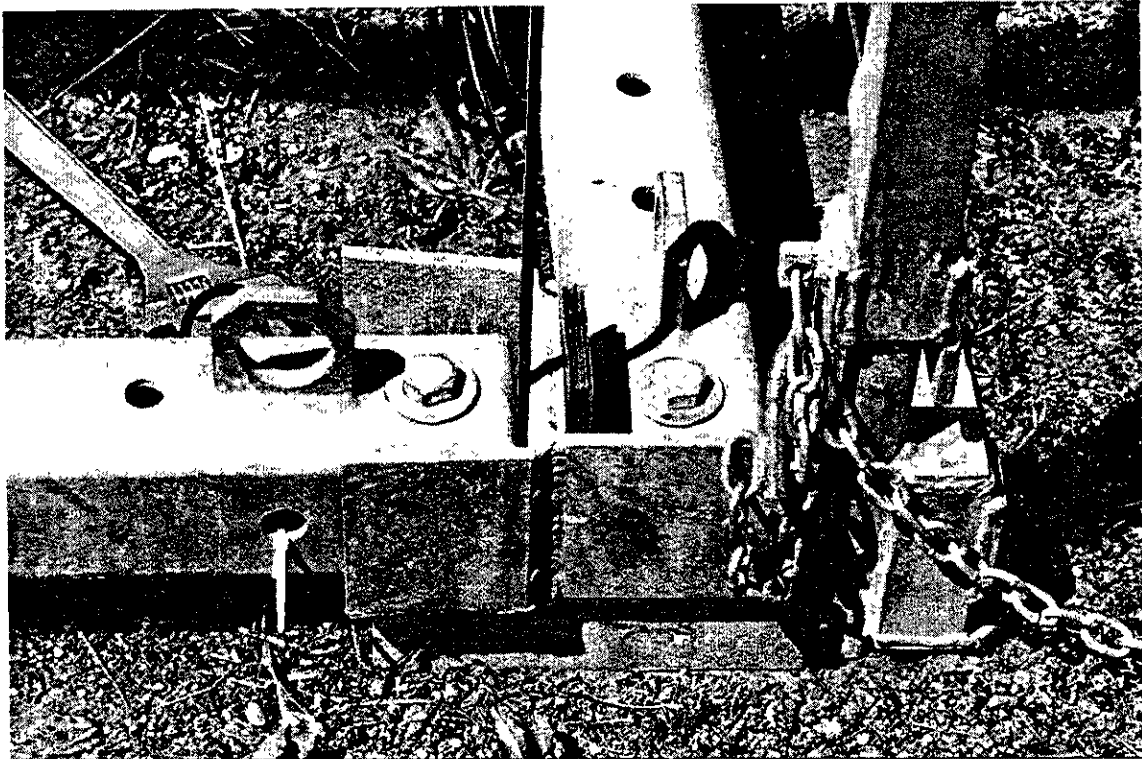


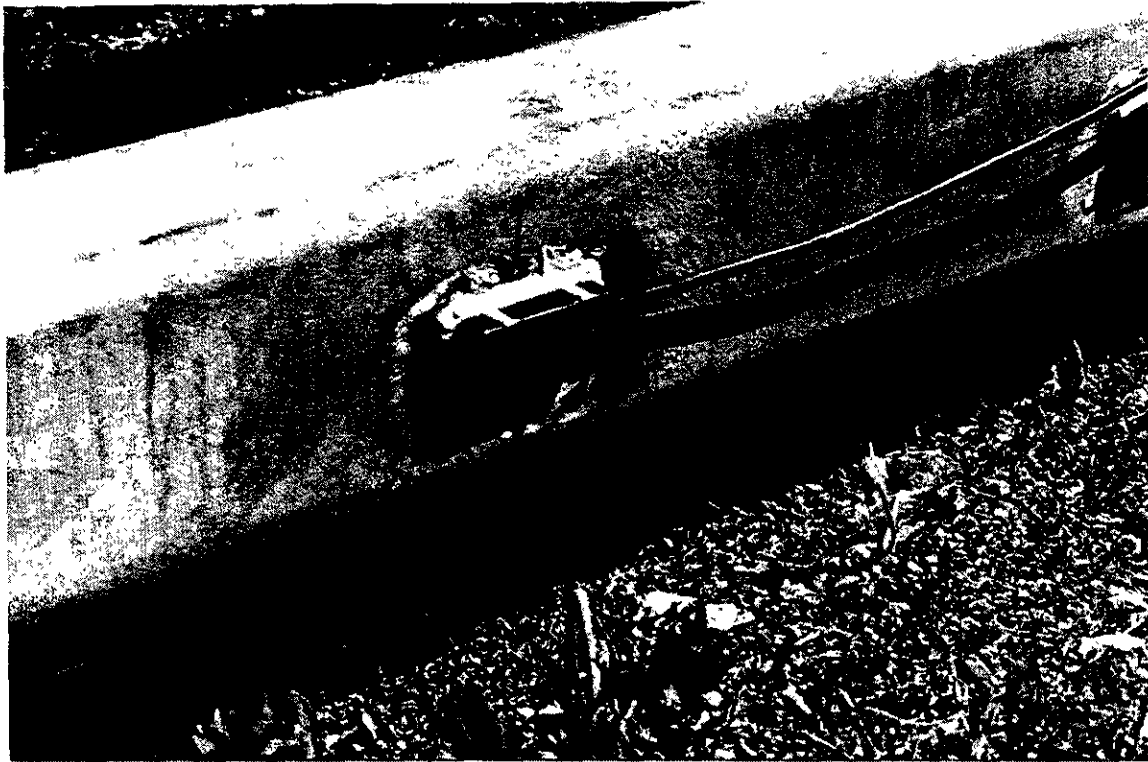
Figure 9 - Vue générale de l'emplacement des jauges de déformation et des extensomètres



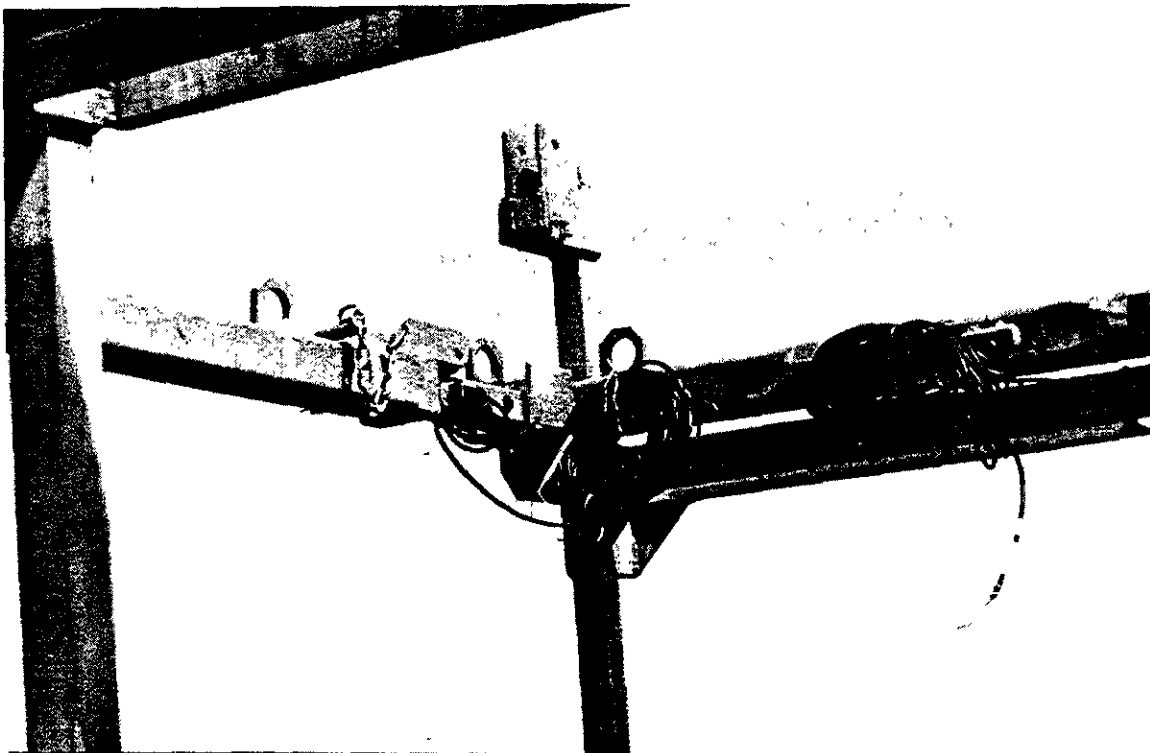
**Photo 14 - Jauges à corde vibrante installées sur une membrure femelle**



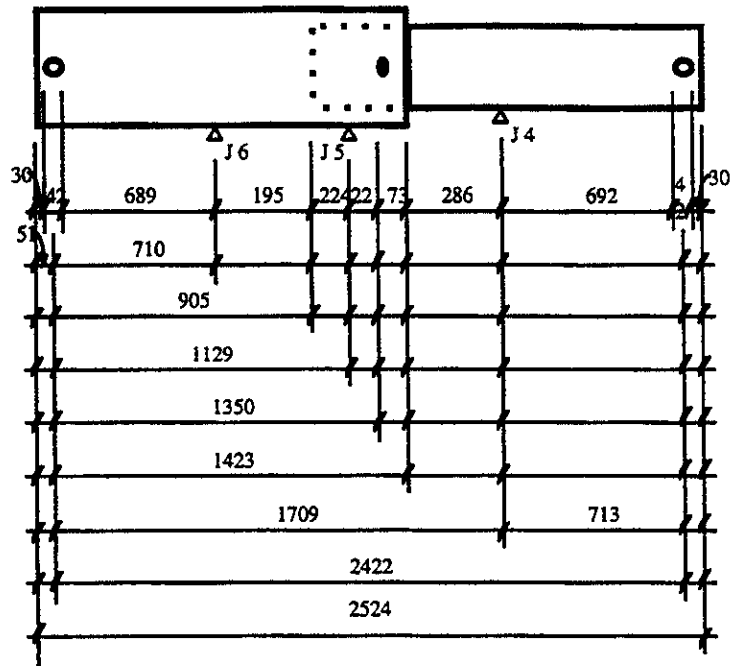
**Photo 15 - Moises inférieures**



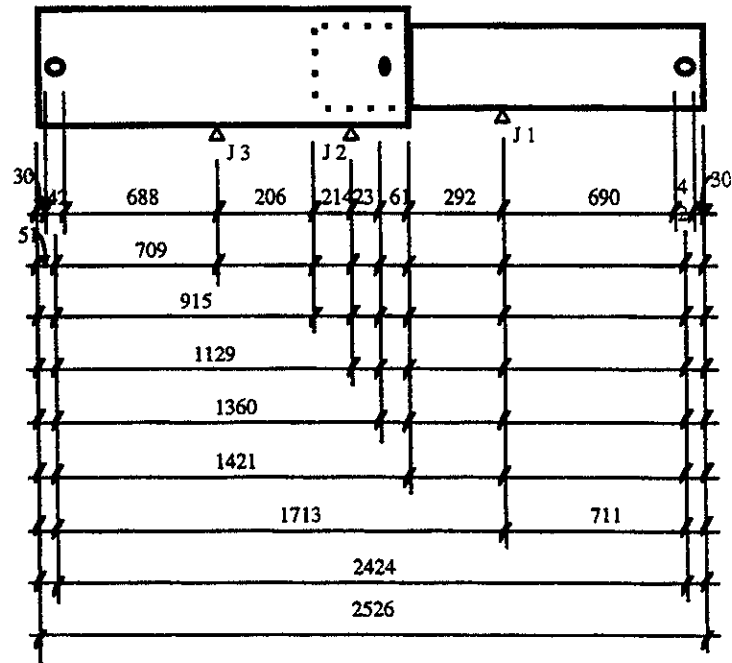
**Photo 16 - Vue de près d'une jauge à corde vibrante et du câble la reliant au CR-10**



**Photo 17 - Jauge sur moise transversale fixée près de l'appui sur la partie mâle**



(a) Moise supérieure (MS1)



(b) Moise inférieure (MI1)

Figure 10 - Emplacement des jauges le long des moises longitudinales supérieure et inférieure



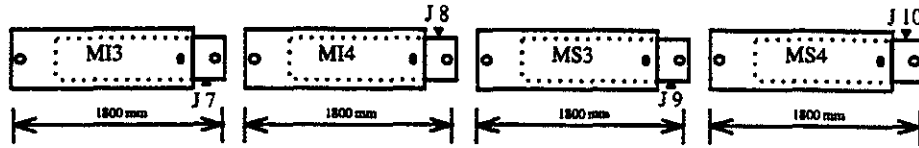


Figure 11 - Emplacement des jauges sur les moises transversales supérieure et inférieure

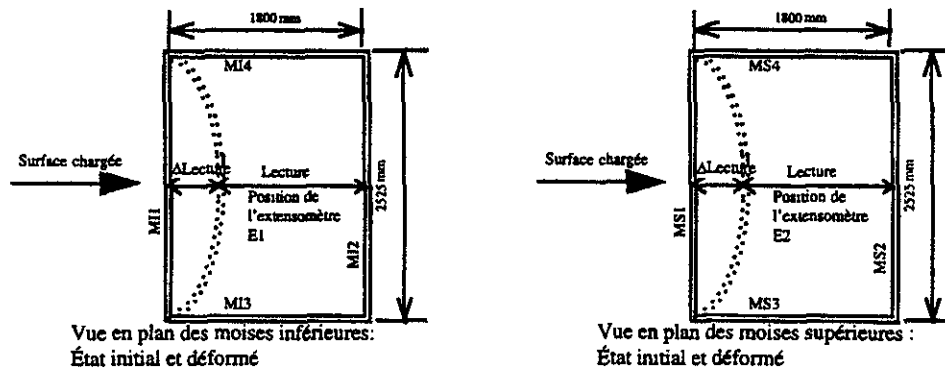


Figure 12 - Emplacement des extensomètres

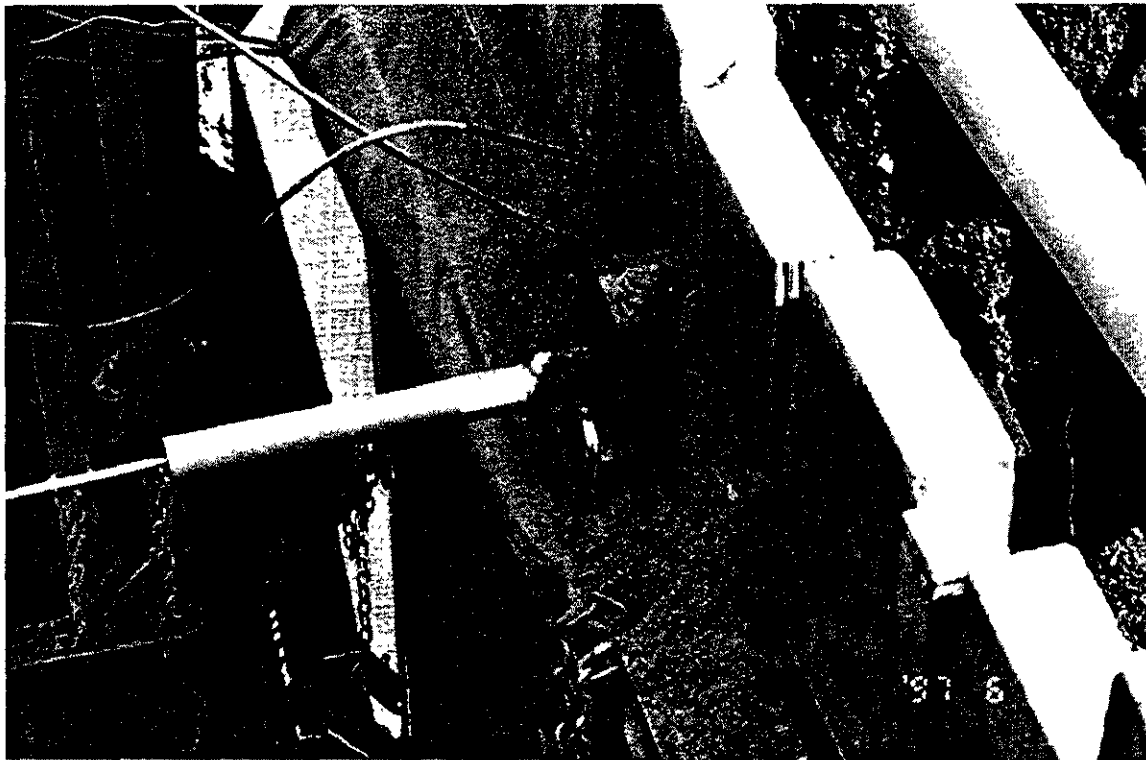


Photo 18 - Vue partielle de l'extensomètre et le câble le reliant au CR-10

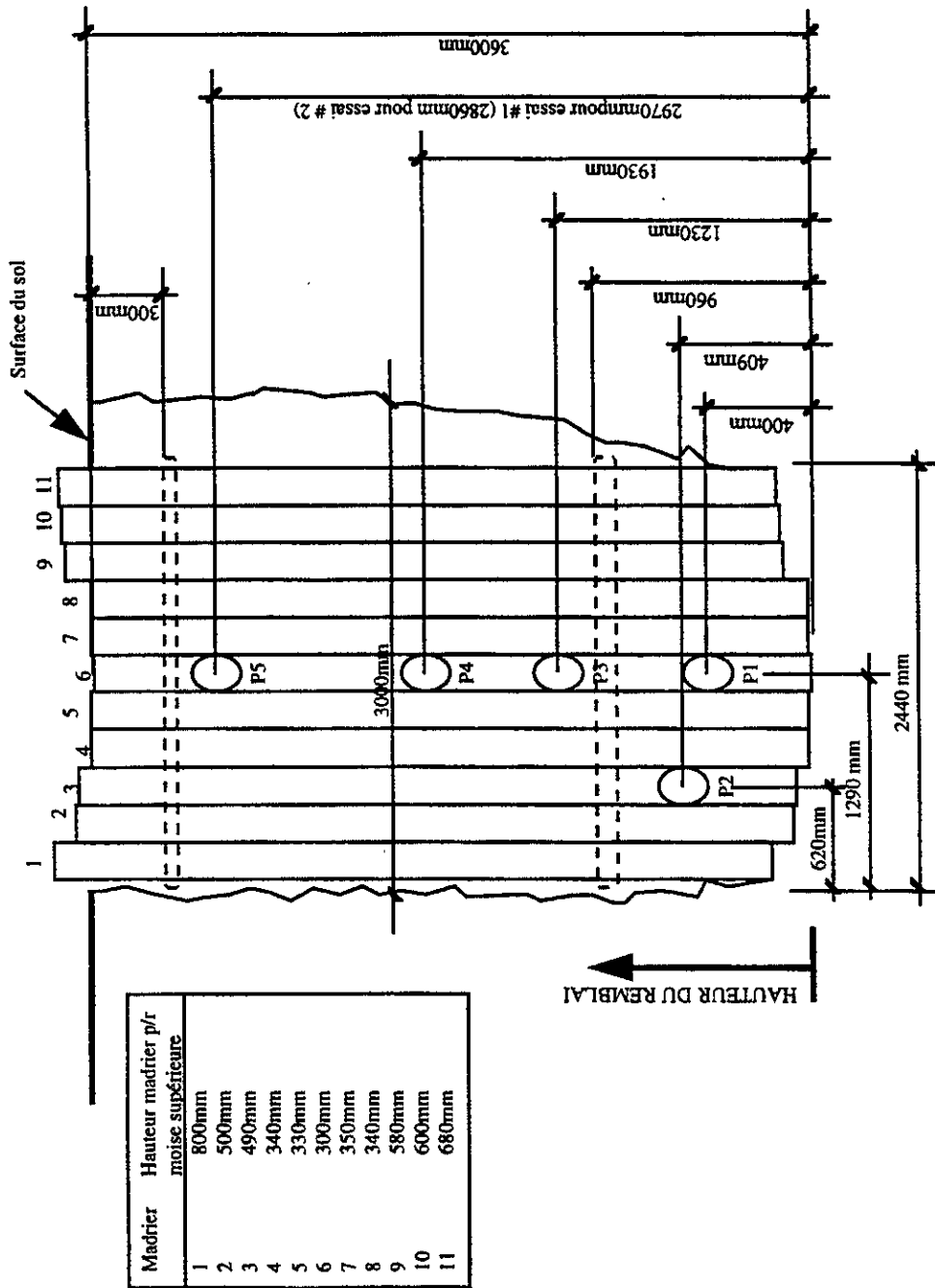
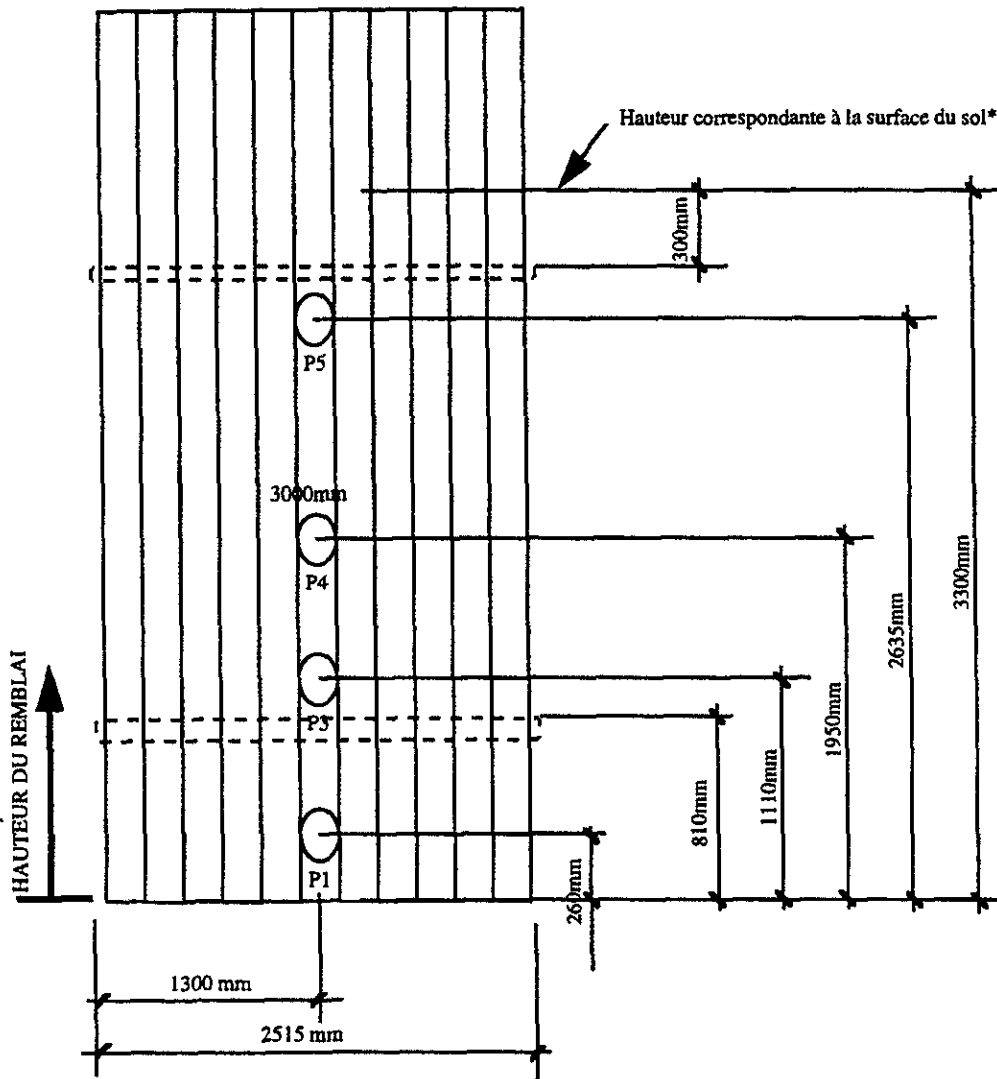
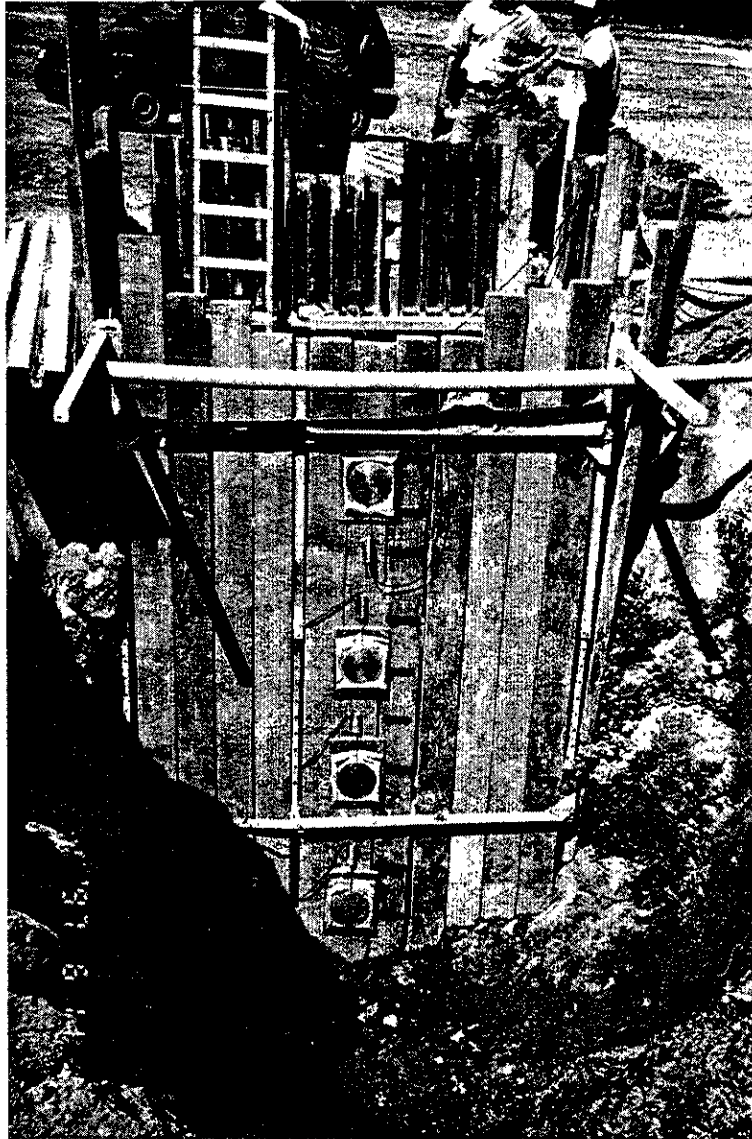


Figure 13 - Vue en élévation du côté instrumenté dans l'excavation pour les essais 1, 2A et 2B

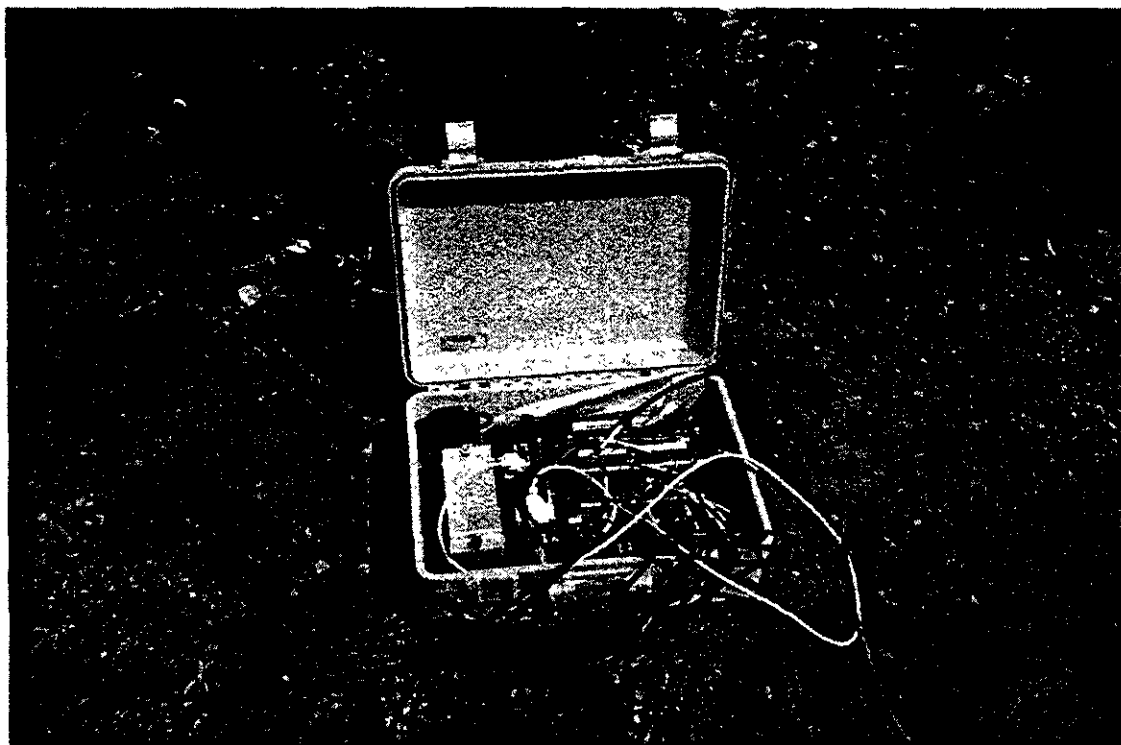


\* Noter que la hauteur du sol sur la surface instrumentée du blindage est d'environ 2,700 m.

Figure 14 - Vue en élévation côté instrumenté dans l'excavation Essai 3 du 26 juin 1997, site Rivière-des-Prairies (pas à l'échelle)



**Photo 19 - Vue des cellules de pression totale fixées sur le blindage du côté chargé**



**Photo 20 - Vue du système d'acquisition de données CR-10**

## **9. DÉROULEMENT DES ESSAIS**

### **9.1 Essais en laboratoire**

Les instruments de mesures ont été installés en laboratoire où quelques essais préliminaires ont permis de calibrer et de vérifier le bon fonctionnement des instruments. À la lumière de ces essais en laboratoire, plusieurs observations intéressantes ont été faites. Lors de la mise en charge de l'étançonnement, il a fallu insérer plusieurs plaques entre les éléments en flexion et en compression pour que le transfert des charges s'effectue par contact entre les moises plutôt que par les boulons et le cadre en aluminium. Une partie des charges transmises par les parois est reprise par le système d'étriers retenant les parois et n'est donc pas appliquée aux moises comme cela était prévu. Par ailleurs, le cadre en aluminium utilisé pour retenir les moises ne confère pas à la structure du VM2 une rigidité suffisante, si bien que des distorsions sont visibles dès que le chargement est quelque peu excentré. Ces observations rappellent donc qu'une attention particulière est à exercer lors des essais in-situ, notamment en ce qui a trait au transfert adéquat des charges de flexion aux moises d'une part, et au transfert des forces de compression par contact (et non par les boulons) d'autre part, pour assurer une distribution uniforme des contraintes axiales et par conséquent, une interprétation non erronée des résultats d'essais.

### **9.2 Essais en chantier**

Les trois premiers essais en chantier se sont déroulés à la carrière Francon et le quatrième essai s'est déroulé au site d'enfouissement de Rivière-des-Prairies au cours de juin 1997. Pour le premier essai (essai N° 1), deux excavations ont été requises pour trouver un site adéquat. La première excavation contenait du tout venant, entre autres, beaucoup de blocs et de matériaux de construction enfouis. Le remblayage de l'essai N° 1 sur le côté instrumenté s'est effectué avec le matériau original en place incluant plusieurs grands blocs de formes diverses. L'espace libre entre les trois autres côtés du VM2 et la paroi de la tranchée a été rempli au préalable avec le sol en place.

Le deuxième essai a été réalisé le 11 juin 1997 en deux étapes consécutives distinctes (essais N°s 2A et 2B) au même emplacement que l'essai N° 1. Pour l'essai N° 2A, le remblai hétérogène a été enlevé et remplacé par du sable propre du côté instrumenté. Une période d'attente d'environ 90 minutes a été observée pour permettre une stabilisation des instruments de mesure. Par la suite, l'essai N° 2B a été réalisé en appliquant une surcharge avec la mise en place des blocs de béton à une distance de 300 mm (12") de la face instrumentée, en plus du remblayage de sable de l'essai N° 2A.

Le troisième essai, essai N° 3, s'est déroulé le 26 juin 1997 au site de Rivière-des-Prairies. Plusieurs puits d'exploration ont été excavés avant de trouver un emplacement adéquat. Comme le matériau du site est constitué d'un silt sablonneux très lâche, une partie du blindage (madriers) a été fixée au cadre d'aluminium avant la mise en place du VM2 à l'intérieur de l'excavation. Il faut noter que les parois de l'excavation étaient très instables et qu'il n'a pas été possible d'installer, de façon satisfaisante, du blindage (tôle ondulée) sur les deux autres côtés du VM2.

## **10. RÉSULTATS DES ESSAIS**

### **10.1 Essai N° 1 - remblai hétérogène**

L'essai N° 1 a été réalisé à la carrière Francon sur une période de trois jours. La figure 15 résume les principales étapes de l'essai. La profondeur de l'excavation est de 3,6 m. Les photos 21 et 22 montrent l'hétérogénéité du matériau excavé. L'absence de nappe phréatique et la bonne tenue des parois de l'excavation ont laissé suffisamment de temps à l'équipe de la Ville de Montréal pour compléter sans problème l'assemblage du VM2. À partir des mesures expérimentales, l'ÉTS a effectué l'ensemble des calculs de la campagne d'essais. Ces calculs peuvent être consultés au département de génie de la construction de l'ÉTS.

#### ***10.1.1 Mesure des pressions horizontales totales***

Pour l'ensemble de la campagne d'essais, les pressions horizontales totales sur le blindage ont été mesurées à l'aide de cinq cellules de pression totale (modèles TPC et EPC manufacturés par ROCTEST). La figure 16 donne les résultats d'essais qui montrent que la contrainte horizontale sur le blindage n'augmente pas linéairement avec la profondeur, ce qui est conforme aux travaux de Terzaghi, Peck et Mesri (1996) et de Casagrande (1973). Cette distribution de la contrainte horizontale ne correspond pas à celle utilisée pour la conception du VM2.

Plusieurs facteurs, entre autres, la flexibilité du blindage et des moises, la séquence de chargement et le compactage du matériau peuvent influencer le développement de la contrainte horizontale sur un écran vertical. C'est un processus complexe et il ne faut pas s'attendre à une simple fonction de la profondeur de l'excavation. En outre, la présence de gros blocs de béton dans le sol remblayé a pu influencer les mesures de façon significative. La contrainte horizontale la plus élevée, 42,4 kPa, a été mesurée par la cellule P4 à une profondeur de 1,67 m sous la surface.

### ***10.1.2 Mesure des déplacements extensométriques***

La convergence de l'assemblage suite à l'opération de remblayage a été mesurée avec l'aide de deux extensomètres à corde vibrante placés entre les moises longitudinales supérieures et inférieures. L'axe des extensomètres coïncidait avec la direction de la poussée du remblayage. Le tableau 5 présente les deux déplacements mesurés. Ces valeurs représentent le déplacement total des moises longitudinales ( $MI_1$  et  $MS_1$ ) survenu après le remplissage des trois côtés libres du VM2 jusqu'à la fin du remblayage avec le sol naturel en place (remblai hétérogène). Un déplacement de 37,1 mm a été mesuré au niveau des moises inférieures. L'extensomètre placé entre les moises supérieures a enregistré un déplacement de 23,2mm.

### ***10.1.3 Mesure des moments fléchissants***

Les moments fléchissants ont été mesurés ponctuellement sur les moises longitudinales supérieure et inférieure avec l'aide de jauges électriques de type SM-2W. Les valeurs obtenues se trouvent au tableau 6. Ce tableau contient également un schéma qui permet de visualiser le positionnement des jauges électriques sur les moises supérieure et inférieure.

Seules les jauges J2 et J3 ont répondu de façon satisfaisante avec des moments de 2,9 et de 5,9 kN.m respectivement. Des problèmes de fonctionnement ont été rencontrés pour les quatre autres jauges et les moments fléchissants au site de ces jauges ont été mesurés avec l'aide du rapport des déplacements lus par les extensomètres. La procédure est expliquée en détail à la note de calcul A4 de l'annexe C. Le moment fléchissant maximum mesuré ou estimé est de 5,9 kN.m.

### ***10.1.4 Mesure des efforts axiaux***

Les réactions dans les quatre moises transversales ( $MI_3$ ,  $MI_4$ ,  $MS_3$ ,  $MS_4$ ) ont été mesurées avec l'aide de quatre jauges électriques de type SM-2W. Une seule jauge par moise a été utilisée, les réactions obtenues sont présentées au tableau 7. On y trouvera également un schéma graphique donnant l'emplacement des jauges sur les moises.

Une réaction en compression de 13,0 kN a été relevée au niveau de la moise  $MS_4$ . Des réactions positives en traction inattendues ont été mesurées au niveau des deux moises transversales inférieures.



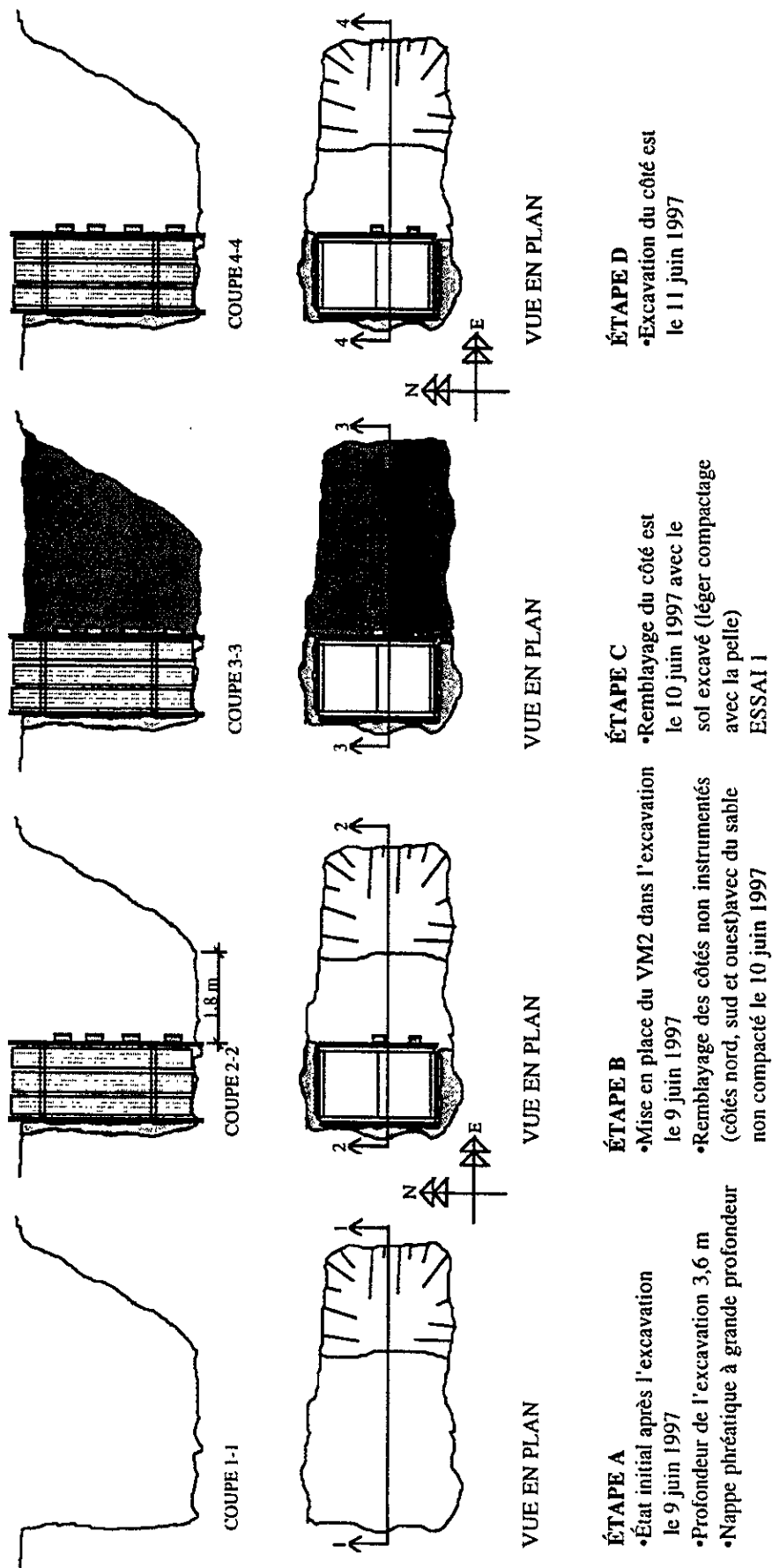
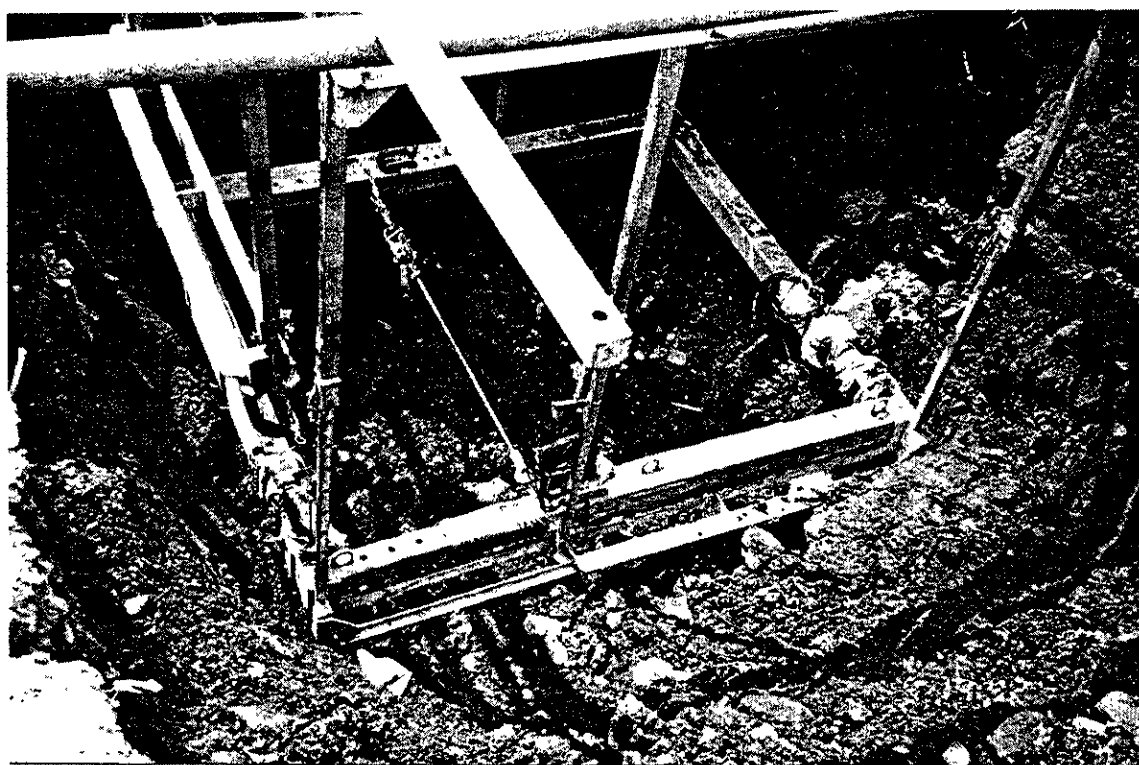


Figure 15 - Principales étapes pour la réalisation de l'essai N° 1 à la carrière Francon



**Photo 21 - Vue du remblai hétérogène (matériel excavé) pour l'essai N° 1**



**Photo 22 - Mise en place du VM2 lors de l'essai N° 1**

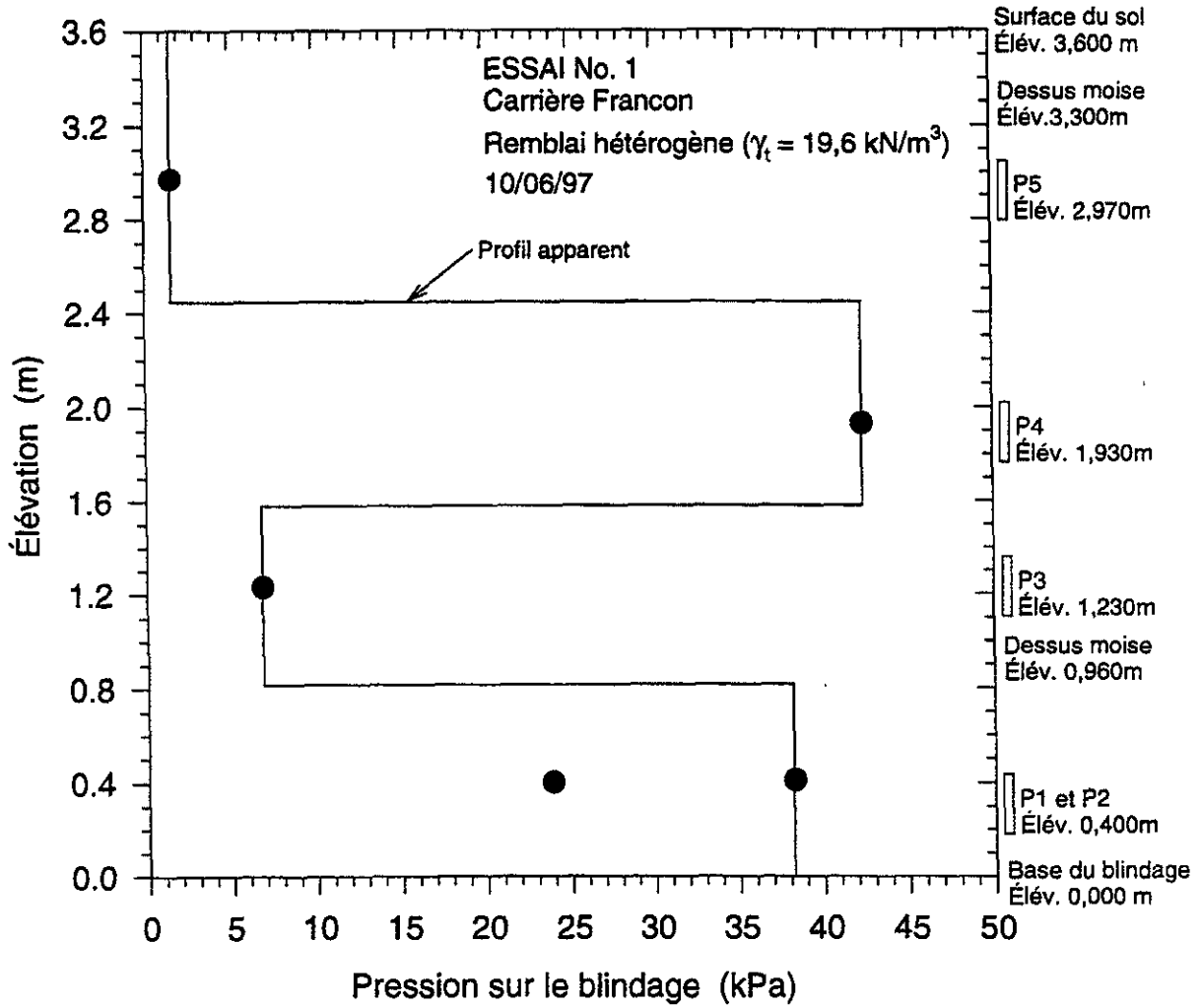
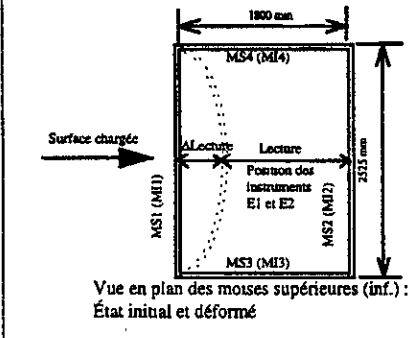


Figure 16 - Variation de la pression horizontale totale sur la paroi du blindage en fonction de la profondeur

(Site : carrière Francon, matériau : remblai hétérogène, date : 10 juin 1997)

 Vue en plan des moises supérieures (inf.) : État initial et déformé	No. instrument	Extensomètre	Élévation (m)	$\Delta$ Lecture (mV)	Déplacement mesuré <sup>(a, b)</sup> (mm)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Positionné entre MI1 et MI2	E1	ERI-200 #1	0,960	3 195,1	-37,1
Positionné entre MS1 et MS2	E2	ERI-200 #2	3,300	2 007,6	-23,2

<sup>(a)</sup> Déplacements des moises vers l'intérieur de l'étançonnement (-); vers l'extérieur de l'étançonnement (+)<sup>(b)</sup> Voir formule d'étalonnage et calculs-types à l'annexe A2

Tableau 5 - Déplacements extensiométriques des moises de l'essai N° 1

(Site : carrière Francon, matériau : remblai hétérogène, date : 10 juin 1997)

No. moise	No. instrument	Élévation (m)	$\Delta$ Lecture (L.U.)	Moment fléchissant <sup>(a)</sup> (jauges) (kN.m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MI1	J1	0,897	-	(5,9) <sup>(b)</sup>
	J2	0,897	167	2,9
	J3	0,897	335	5,9
MS1	J4	3,262	-	(1,2) <sup>(b)</sup>
	J5	3,262	-	(0,6) <sup>(b)</sup>
	J6	3,262	-	(1,2) <sup>(b)</sup>

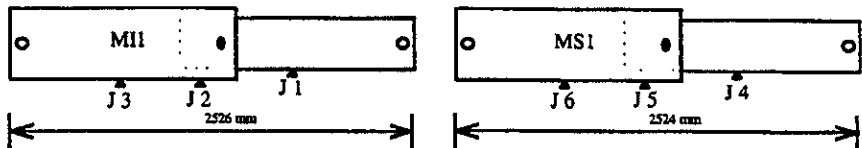
  

<sup>(a)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques type SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.1<sup>(b)</sup> Estimé sur la base du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres, voir l'annexe A4

Tableau 6 - Moments fléchissants expérimentaux de l'essai N° 1

(Site : carrière Francon, matériau : remblai hétérogène, date : 10 juin 1997)

No. moise	No. instrument	Élévation (m)	$\Delta$ Lecture (L.U.)	Effort axial <sup>(a, b)</sup> (jauges) (kN)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MI3	J7	0,897	25	11,6
MI4	J8	0,897	56	25,9
MS3	J9	3,262	-49	-10,4
MS4	J10	3,262	-61	-13,0

The diagram illustrates the experimental setup with four beams labeled MI3, MI4, MS3, and MS4. Each beam is 1800 mm long. Gauges J7, J8, J9, and J10 are positioned at the ends of the beams. The beams are spaced 1800 mm apart.

<sup>(a)</sup> Compression (-); traction (+)

<sup>(b)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques type SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.2

Tableau 7 - Efforts axiaux expérimentaux de l'essai N° 1

## 10.2 Essai N° 2A - sable propre

### 10.2.1 Déroulement de l'essai

L'essai N° 2A a été réalisé au même emplacement que l'essai N° 1 à la carrière Francon le 11 juin 1997. Le VM2 n'a donc pas été déplacé. L'objectif de cet essai visait, entre autres, à étudier le comportement du VM2 sous la poussée d'un sol granulaire de faible compacité et à simuler la poussée d'un sol type rencontré dans les municipalités du Québec. Pour ce faire, dans un premier temps, le remblai de l'essai N° 1 a été complètement déblayé. La profondeur de l'excavation est également de 3,6 m. La figure 17 illustre schématiquement les principales étapes du déroulement de cet essai. Le sable a été déversé et placé progressivement sans beaucoup de compactage sur toute la hauteur de la face instrumentée du VM2 (photo 23). La dernière couche de sable placée à la surface du terrain a été plus compactée par l'opérateur de la pelle rétrocaveuse (photo 24). La photo 25 illustre l'essai N° 2A à la fin du remblayage de sable.

### 10.2.2 Mesure des pressions horizontales totales

La figure 18 illustre graphiquement les pressions horizontales en fonction de la profondeur de l'excavation mesurée par les cinq cellules TPC et EPC. Les contraintes horizontales les plus élevées ont été mesurées par les cellules P1 et P4, soit 35,1 kPa et 33,6 kPa.

### 10.2.3 Mesure des déplacements extensométriques

Le tableau 8 donne les flèches mesurées par les deux extensomètres lors du remblayage de sable. Les flèches sont légèrement inférieures à celles observées lors de l'essai N° 1. Sur la moise inférieure, la flèche est de 28,6 mm et sur la moise supérieure, la flèche est de 18,9 mm.

### 10.2.4 Mesure des moments fléchissants

Le tableau 9 donne les moments fléchissants mesurés (ou estimés) avec les jauges électriques pour l'essai N° 2A. Comme lors de l'essai N° 1, seules les jauges J2 et J3 de la moise inférieure MI<sub>1</sub> ont donné des résultats satisfaisants, avec des moments de 3,0 kN.m et de 6,3 kN.m, respectivement. Les moments au niveau des jauges J1, J4, J5 et J6 ont été estimés approximativement sur la base du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres.

### ***10.2.5 Mesure des efforts axiaux***

Le tableau 10 présente les réactions mesurées directement par des jauges électriques dans les quatre moises transversales ( $MI_3$ ,  $MI_4$ ,  $MS_3$ ,  $MS_4$ ). Une réaction maximale en compression de 12,6 kN a été mesurée dans la moise supérieure  $MS_4$ . Encore ici, comme pour l'essai N° 1, les moises inférieures transversales ne semblent pas supporter de charge importante en compression.

## **10.3 Essai N° 2B - sable propre plus surcharge**

### ***10.3.1 Déroulement de l'essai***

L'essai N° 2B visait à étudier le comportement du VM2 sous un niveau de sollicitation statique se rapprochant de la limite ultime de la structure. Pour ce faire, une surcharge de blocs de béton a été appliquée sur le remblai de sable de l'essai N° 2A. La figure 17 illustre les principales étapes de l'essai N° 2B. La figure 19 illustre les dimensions et l'emplacement de la surcharge de blocs de béton. La première rangée de blocs a été placée à une distance de 300 mm du blindage instrumenté (figure 19). Les photos 26 et 27 illustrent une vue générale de l'essai N° 2B. La surcharge appliquait une pression de contact de 25 kPa.

### ***10.3.2 Mesure des pressions horizontales totales***

La figure 20 illustre les contraintes horizontales totales mesurées par les cinq cellules. La contrainte horizontale maximale est observée à une profondeur de 1,67 m. En général, une augmentation de la poussée horizontale a été relevée par toutes les cellules, sauf pour la cellule P1.

### ***10.3.3 Mesure des déplacements extensométriques***

Le tableau 11 donne les flèches mesurées par les extensomètres après la mise en place de la surcharge. Des augmentations de 12 % et de 53 % ont été notées pour les moises inférieure et supérieure, respectivement.

### ***10.3.4 Mesure des moments fléchissants***

Le tableau 12 présente les moments fléchissants mesurés (ou estimés) pour les moises longitudinales ( $MI_1$  et  $MS_1$ ) lors de l'essai N° 2B. Les jauges J4, J5 et J6 de la moise supérieure n'ont pas fonctionné et seules des valeurs estimées y sont présentées. Une augmentation de 27 % du moment fléchissant a été relevée au niveau des jauges J2 et J3 suite à la mise en place des blocs de béton.

### **10.3.5**    *Mesure des efforts axiaux*

Les réactions mesurées dans les moises transversales lors de l'essai N° 2B sont présentées au tableau 13. La réaction maximale est de 16,2 kN (moise MS<sub>4</sub>), soit une augmentation de 29 % par rapport à l'essai N° 2A. Les réactions des moises inférieures sont, pour toutes fins pratiques, négligeables (-0.5 pour MI3 et + 3.5 pour MI4).



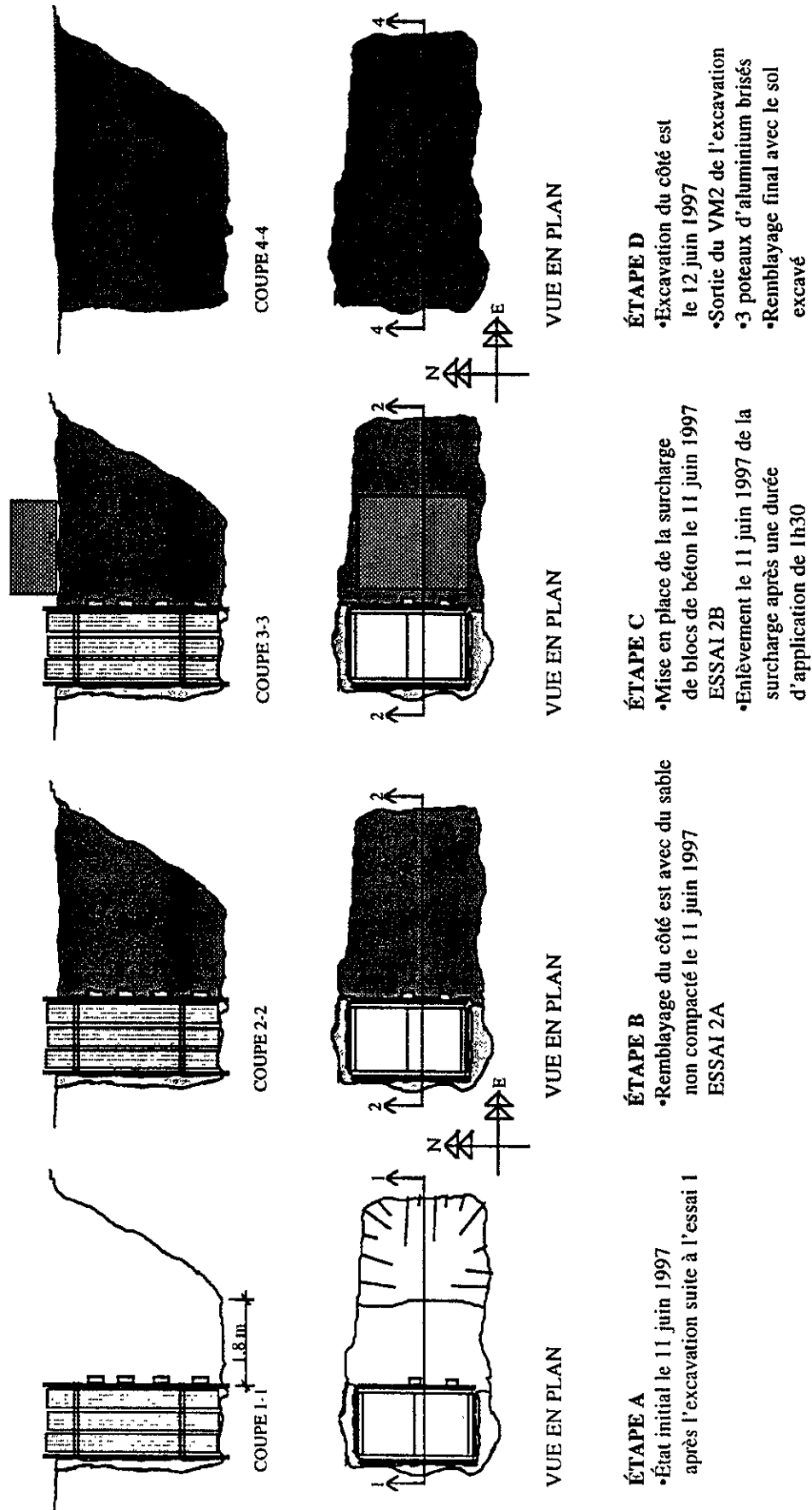
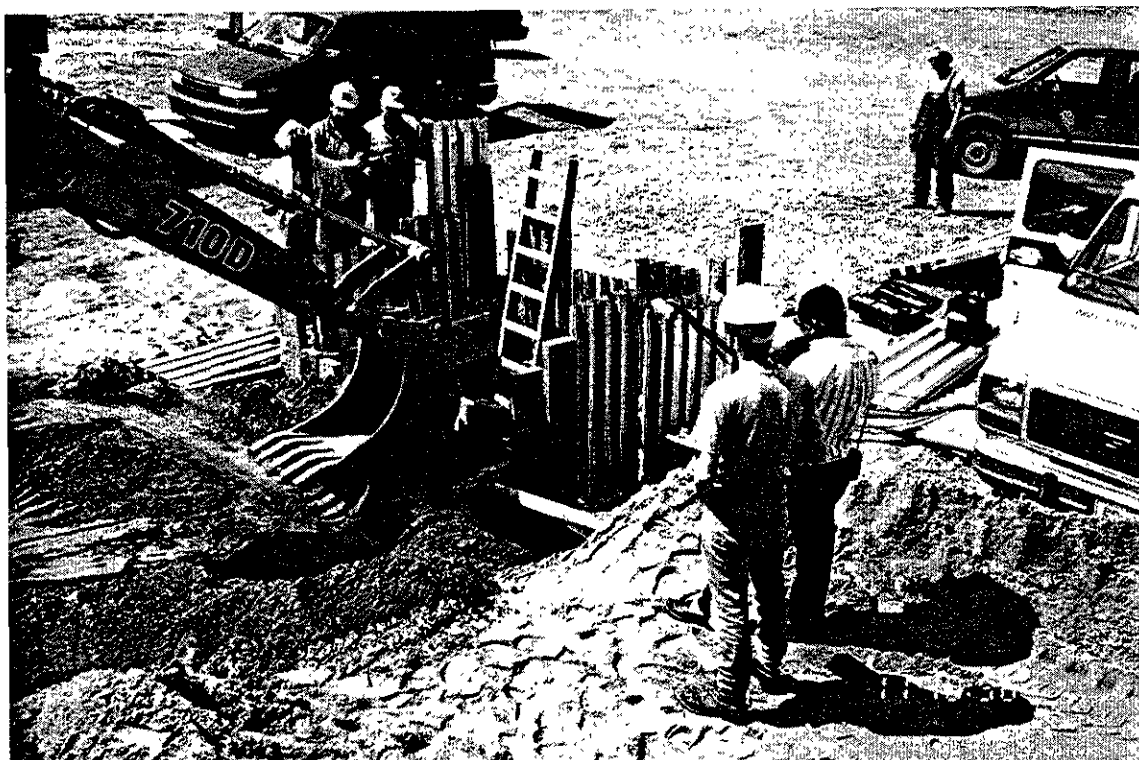


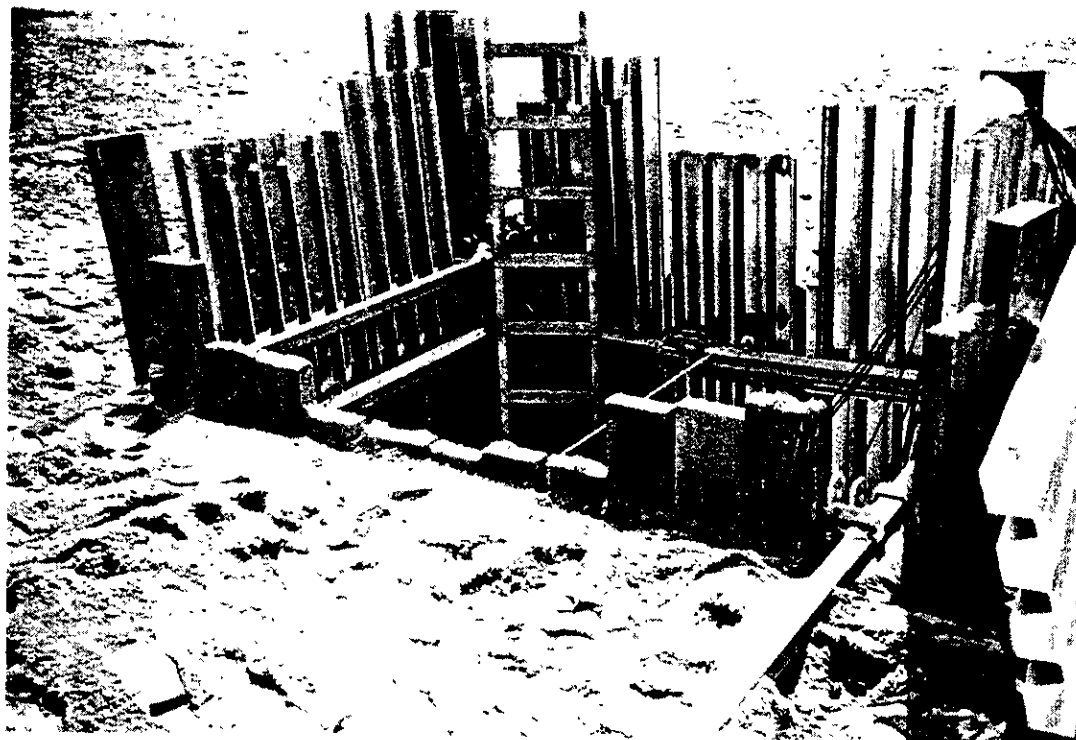
Figure 17 - Principales étapes pour la réalisation des essais 2A et 2B



**Photo 23 - Déversement du sable sur la face instrumentée du VM2**



**Photo 24 - Compactage du sable placé à la surface**



**Photo 25 - Vue de l'essai 2A**

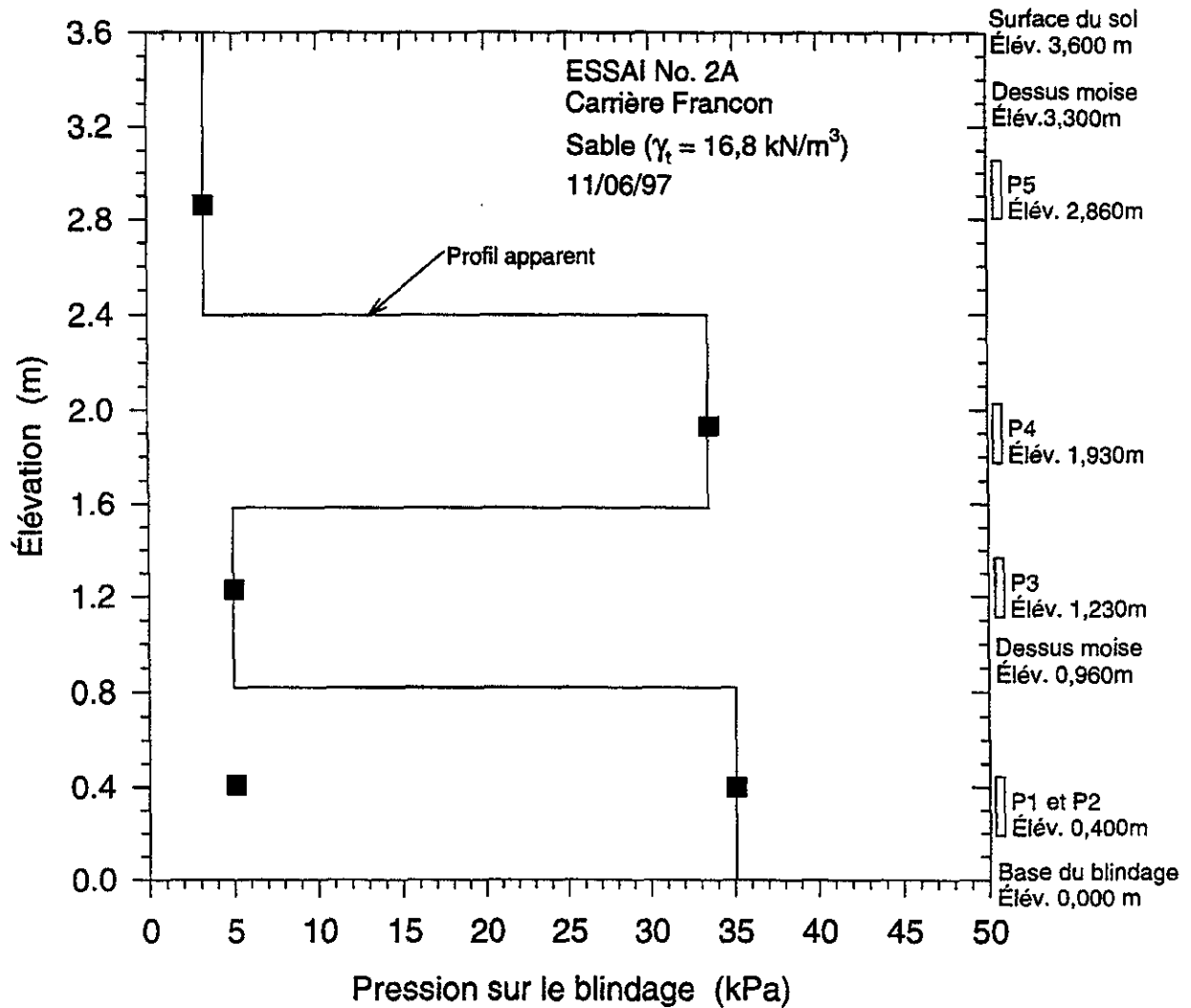
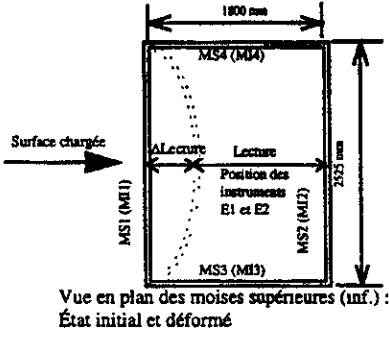


Figure 18 - Distribution de la pression horizontale totale sur la paroi du blindage en fonction de l'élévation

(Site : carrière Francon, matériau : sable, date : 11 juin 1997)

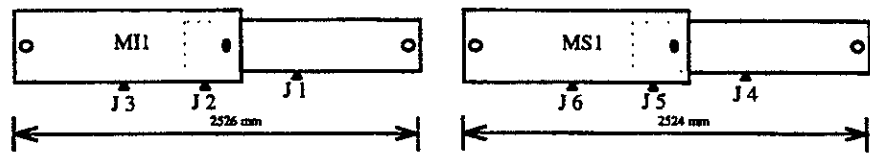
 <p>Vue en plan des moises supérieures (inf.) : État initial et déformé</p>	No. instrument	Extensomètre	Élévation (m)	ΔLecture (mV)	Déplacement mesuré <sup>(a, b)</sup> (mm)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Positionné entre MI1 et MI2	E1	ERI-200 #1	0,960	2 462,9	-28,6
Positionné entre MS1 et MS2	E2	ERI-200 #2	3,300	1 632,0	-18,9

<sup>(a)</sup> Déplacements des moises vers l'intérieur de l'étançonnement (-); vers l'extérieur de l'étançonnement (+)  
<sup>(b)</sup> Voir formule d'étalonnage et calculs-types à l'annexe A2

Tableau 8 - Déplacements extensiométriques des moises de l'essai N° 2A

(Site : carrière Francon, matériau : sable, date : 11 juin 1997)

No. moise	No. instrument	Élévation (m)	ΔLecture (L.U.)	Moment fléchissant <sup>(a)</sup> (jauges) (kN.m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MI1	J1	0,897	-	(6,3) <sup>(b)</sup>
	J2	0,897	172	3,0
	J3	0,897	357	6,3
MS1	J4	3,262	-	(1,4) <sup>(b)</sup>
	J5	3,262	-	(0,7) <sup>(b)</sup>
	J6	3,262	-	(1,4) <sup>(b)</sup>



<sup>(a)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques type SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.1  
<sup>(b)</sup> Estimé sur la base du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres, voir l'annexe A4

Tableau 9 - Moments fléchissants expérimentaux de l'essai N° 2A

(Site : carrière Francon, matériau : sable, date : 11 juin 1997)

No. moise	No. instrument	Élévation (m)	$\Delta$ Lecture (L.U.)	Effort axial <sup>(a, b)</sup> (jauges) (kN)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MI3	J7	0,897	1	0,5
MI4	J8	0,897	6	2,8
MS3	J9	3,262	-52	-11,1
MS4	J10	3,262	-59	-12,6

  
<sup>(a)</sup> Compression (-); traction (+)<sup>(b)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques type SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.2

Tableau 10 - Efforts axiaux expérimentaux de l'essai N° 2A

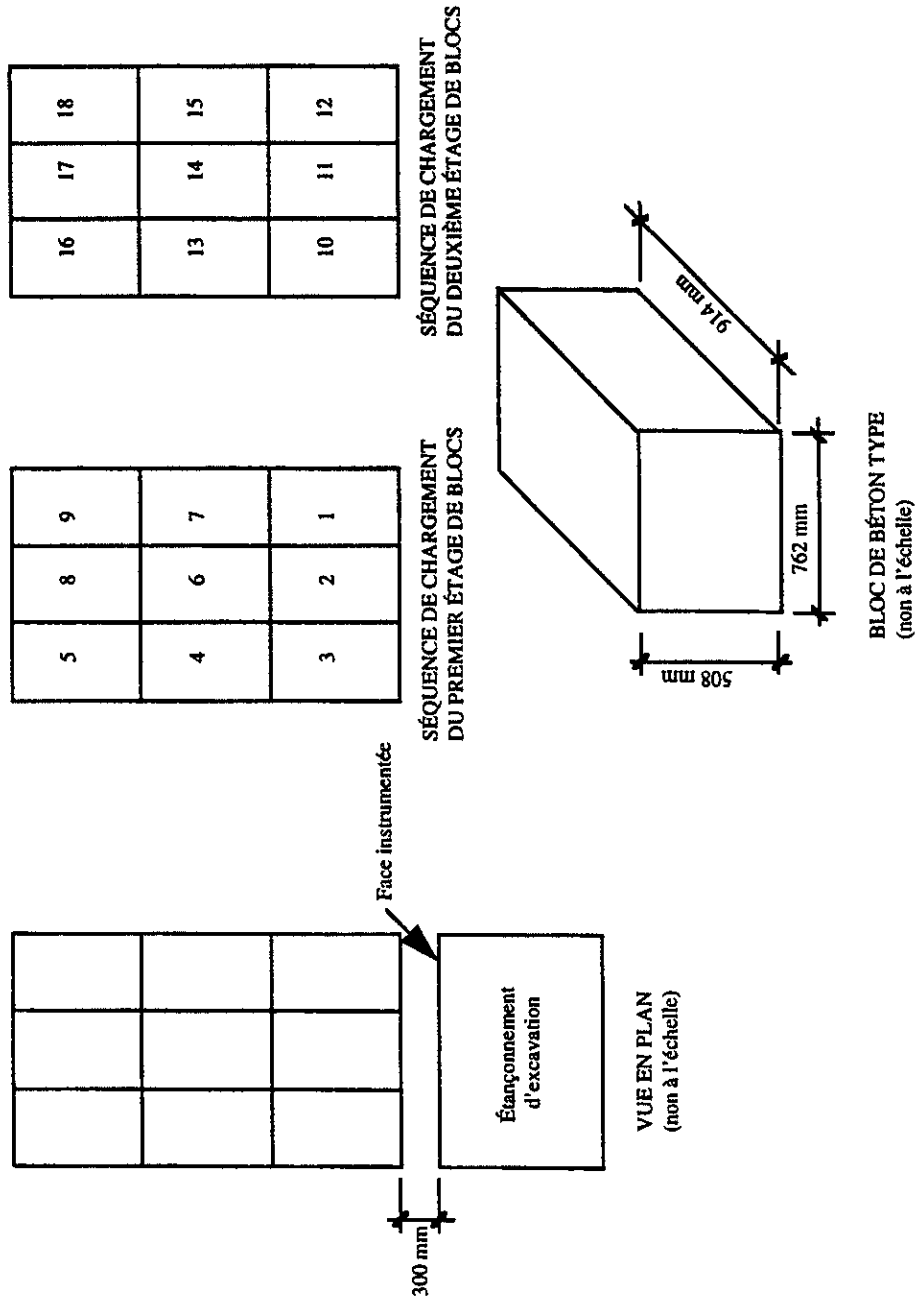
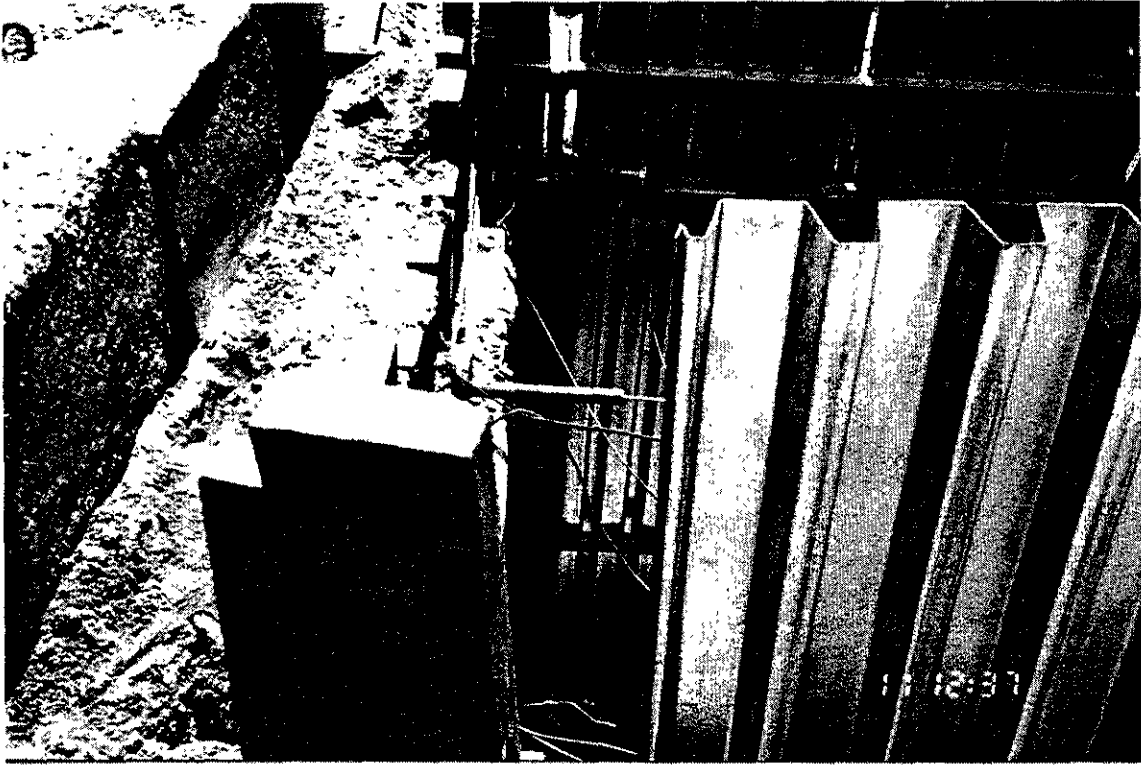
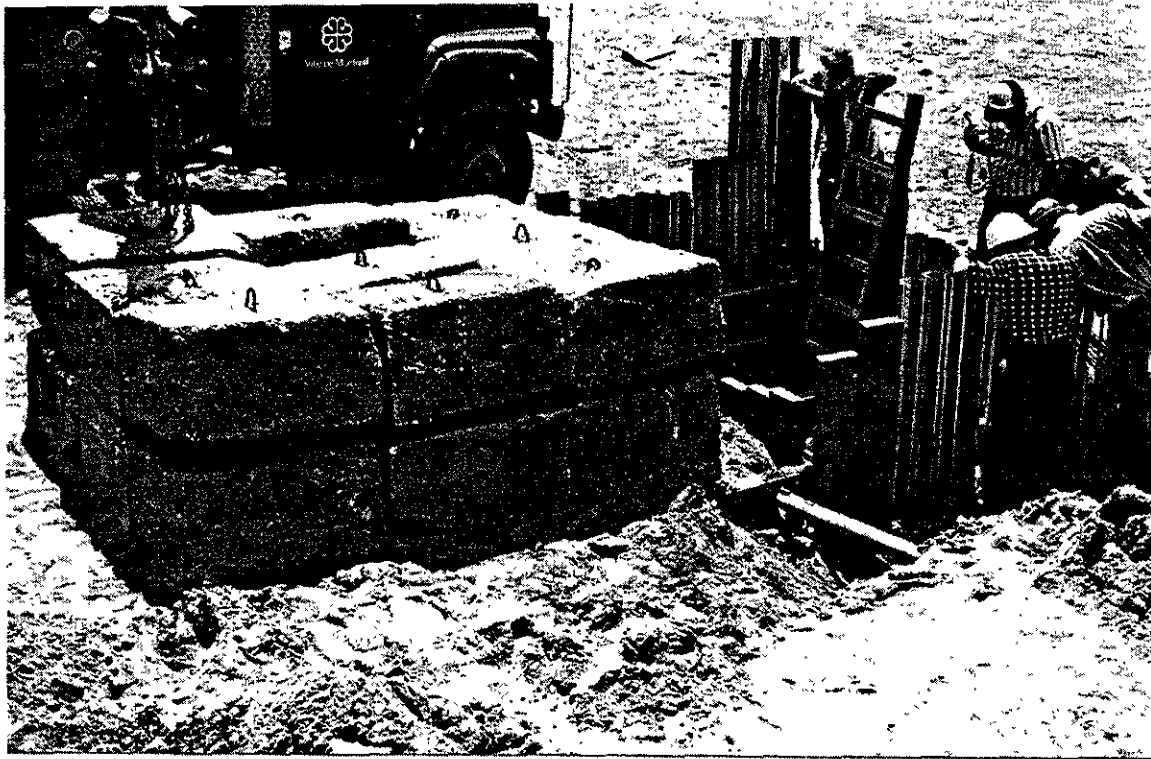


Figure 19 - Dimension et emplacement de la surcharge de blocs de béton lors de l'essai 2B



**Photo 26 - Localisation des blocs de béton près du VM2**



**Photo 27 - Vue de l'essai N° 2B**



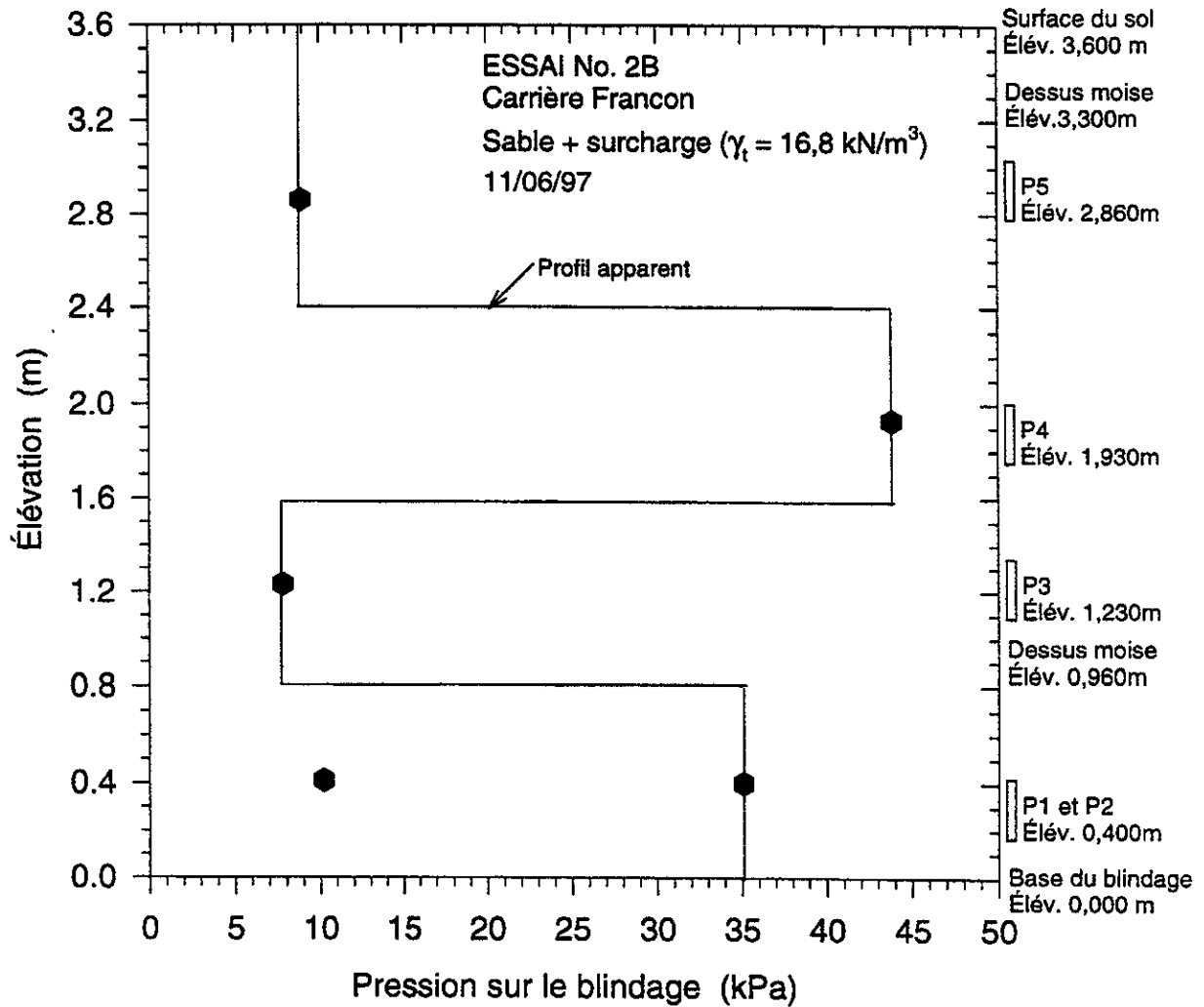
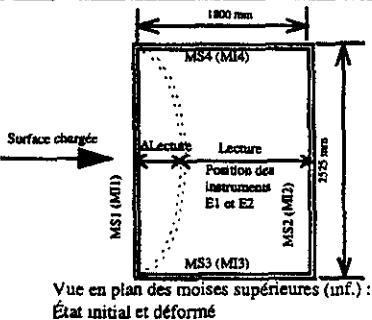


Figure 20 - Distribution de la pression horizontale sur la paroi du blindage en fonction de l'élévation

(Site : carrière Francon, matériau : sable + surcharge, date : 11 juin 1997)

	No. instrument	Extensomètre	Élévation (m)	$\Delta$ Lecture (mV)	Déplacement mesuré <sup>(a, b)</sup> (mm)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Positionné entre MI1 et MI2	E1	ERI-200 #1	0,960	2 745,0	-31,9
Positionné entre MS1 et MS2	E2	ERI-200 #2	3,300	2 500,0	-28,9

<sup>(a)</sup> Déplacements des moises vers l'intérieur de l'étaiement (-); vers l'extérieur de l'étaiement (+)<sup>(b)</sup> Voir formule d'étalonnage et calculs-types à l'annexe A2

Tableau 11 - Déplacements extensiométriques des moises de l'essai N° 2B

(Site : carrière Francon, matériau : sable + surcharge, date : 11 juin 1997)

No. moise	No. instrument	Élévation (m)	$\Delta$ Lecture dû à la surcharge uniquement (L.U.)	Moment fléchissant <sup>(a)</sup> dû à la surcharge (jauges) (kN.m)	Moment fléchissant <sup>(c)</sup> total (kN.m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
MI1	J1	0,897	154	2,1	(8,4) <sup>(d)</sup>
	J2	0,897	47	0,8	3,8
	J3	0,897	98	1,7	8,0
MS1	J4	3,262	-	(2,1) <sup>(b)</sup>	(3,5) <sup>(d)</sup>
	J5	3,262	-	(0,8) <sup>(b)</sup>	(1,5) <sup>(d)</sup>
	J6	3,262	-	(1,7) <sup>(b)</sup>	(3,1) <sup>(d)</sup>

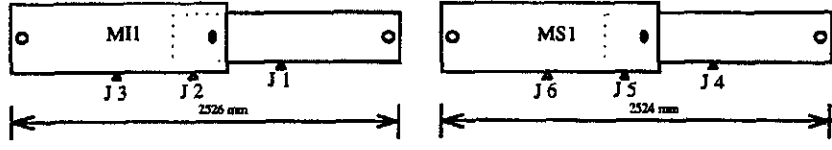
  

<sup>(a)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques type SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.1 (moment dû à la surcharge uniquement)<sup>(b)</sup> Estimé sur la base du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres, voir l'annexe A4 (moment dû à la surcharge uniquement)<sup>(c)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques types SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.1 (moment Essai 2A + surcharge)<sup>(d)</sup> Estimé; exemple de calcul pour J1 : 8,4 = 6,3 (voir TABLEAU 4.7, Essai 2A) + 2,1 (surcharge)

Tableau 12 - Moments fléchissants expérimentaux de l'essai N° 2B

(Site : carrière Francon, matériau : sable + surcharge, date : 11 juin 1997)

No. moise	No. instrument	Élévation (m)	$\Delta$ Lecture (L.U.)	Effort axial <sup>(a, b)</sup> (jauges) (kN)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MI3	J7	0,897	-1	-0,5
MI4	J8	0,897	8	3,7
MS3	J9	3,262	-61	-13,0
MS4	J10	3,262	-76	-16,2

<sup>(a)</sup> Compression (-); traction (+)

<sup>(b)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques type SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.2

Tableau 13 - Efforts axiaux expérimentaux de l'essai N° 2B

## 10.4 Essai N° 3 - silt sablonneux

### 10.4.1 Déroulement des essais

L'essai au site de Rivière-des-Prairies a été réalisé pour observer le comportement du VM2 lorsqu'il est soumis à une sollicitation brusque provoquée par un éboulis ou un glissement des parois. Cette situation présente un intérêt pratique évident puisqu'elle survient quelques fois sur les chantiers. Cependant, la poussée résultante peut être différente de celle obtenue par l'hypothèse de Rankine, qui est à la base de la conception du VM2. **L'essai N° 3 représente donc un cas spécial qui ne peut être relié directement aux trois premiers essais (1, 2A et 2B).** Pour simuler le glissement, un coin de sol a été poussé sur la face blindée par la pelle rétrocaveuse. Ce faisant, la poussée des terres a peut-être été augmentée artificiellement, à faible profondeur.

Le sol du site N° 3 est un silt sablonneux jusqu'à une profondeur de 2,3 m qui repose sur une argile grise homogène. La nappe phréatique est à une profondeur de 1,6 m. Le silt sablonneux est de faible compacité et offre un temps de tenue très faible. Pour ces raisons, le blindage de madriers (sur deux faces) a été installé avant de déposer le VM2 en fond d'excavation (photo 28). L'excavation a atteint une profondeur de 3,3 m.

L'essai N° 3 s'est entièrement déroulé le 26 juin 1997. Un résumé des opérations est présenté à la figure 21. Comme le sol était très instable, de nombreux glissements partiels de la paroi se sont produits durant la mise en place du VM2 et la préparation de l'essai (voir photo 29).

La photo 30 présente une vue du glissement provoqué sur la face instrumentée. La hauteur de sol sur le blindage, à ce moment, était alors de 2,7 m. Les glissements partiels ont considérablement déformé et tordu le VM2.

### 10.4.2 Mesure des pressions horizontales totales

Quatre cellules au total ont été utilisées lors de cet essai pour mesurer la pression horizontale sur le blindage. La figure 22 illustre graphiquement les résultats des mesures de pressions totales. La cellule P1 à la base du blindage a été coincée par un glissement après le dépôt du VM2 en fond d'excavation et n'a pas donné des résultats fiables par la suite. Les mesures rapportées sur ce tableau font suite au glissement provoqué (photo 30). Rappelons que le sol n'était chargé que sur une hauteur de 2,7 m.

Une contrainte horizontale maximale de 33,6 kPa a été enregistrée par la cellule P4 à l'élévation 1,95 m. Il faut remarquer que les contraintes horizontales mesurées peuvent avoir été fortement influencées par la poussée du godet de la pelle mécanique faite pour provoquer la rupture.

#### ***10.4.3 Mesure des déplacements extensométriques***

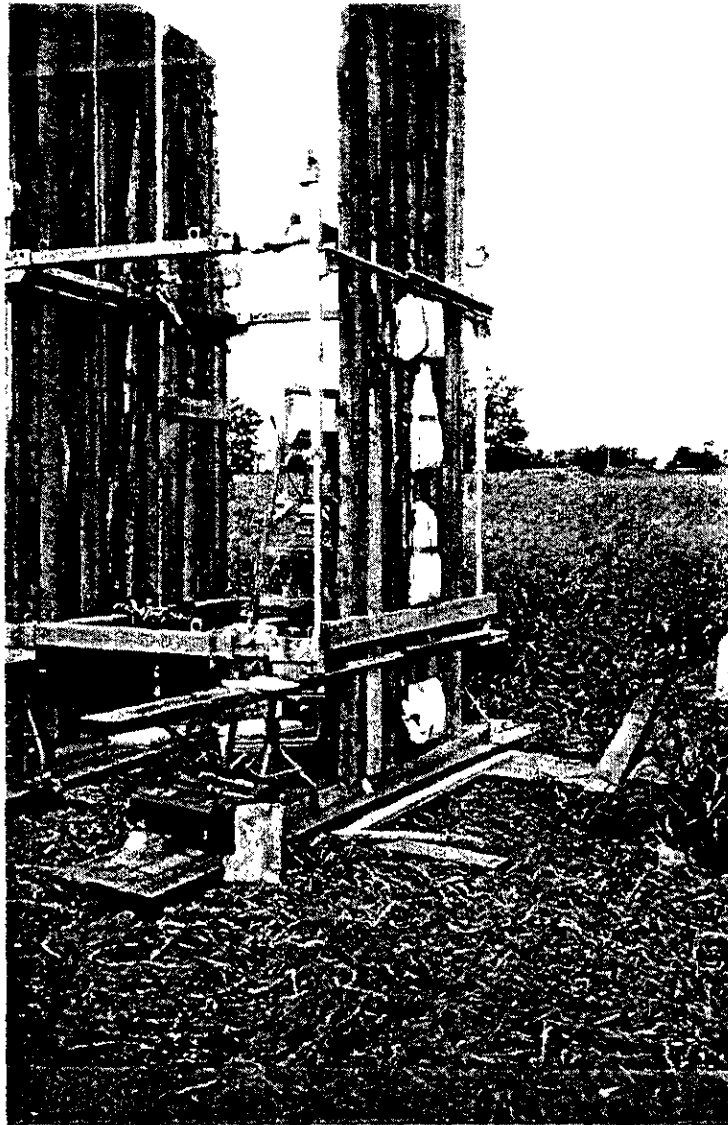
La flèche enregistrée par l'extensomètre E1, au niveau des moises inférieures est de 28,1 mm. L'extensomètre a relevé un déplacement des moises vers l'extérieur de l'étançonnement de 5,6 mm.

#### ***10.4.4 Mesure de moments fléchissants***

Les moments fléchissants ont été mesurés par trois jauges (de type SM-2W) sur la moise inférieure (MI<sub>1</sub>) et deux (2) jauges (SM-2W) sur la moise supérieure. Le tableau 14 résume les résultats. La jauge J6 n'a pas fonctionné pendant l'essai; la valeur qui lui est attribuée au tableau 14 est estimée sur la base du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres. Un moment fléchissant maximum de 12,2 kN.m a été observé au niveau de la jauge J1, sur la partie mâle de la moise.

#### ***10.4.5 Mesure des efforts axiaux***

Le tableau 15 donne les réactions horizontales mesurées au niveau des quatre moises transversales. Les résultats indiquent que les moises inférieures ont supporté plus de charges que les moises supérieures. Les charges sur ces dernières sont pour toutes fins pratiques négligeables (-4,0 kN pour MS3 et + 3,8 kN pour MS4). Ceci est attribuable au fait que le bloc de sol a glissé sous le niveau de la moise inférieure lors de sa rupture (voir figure 21). Un effort maximal de 31,5 kN a été enregistré par la jauge J8 (moise inférieure MI<sub>4</sub>).



**Photo 28 - Vue du VM2 monté pour l'essai 3 à Rivière-des-Prairies**

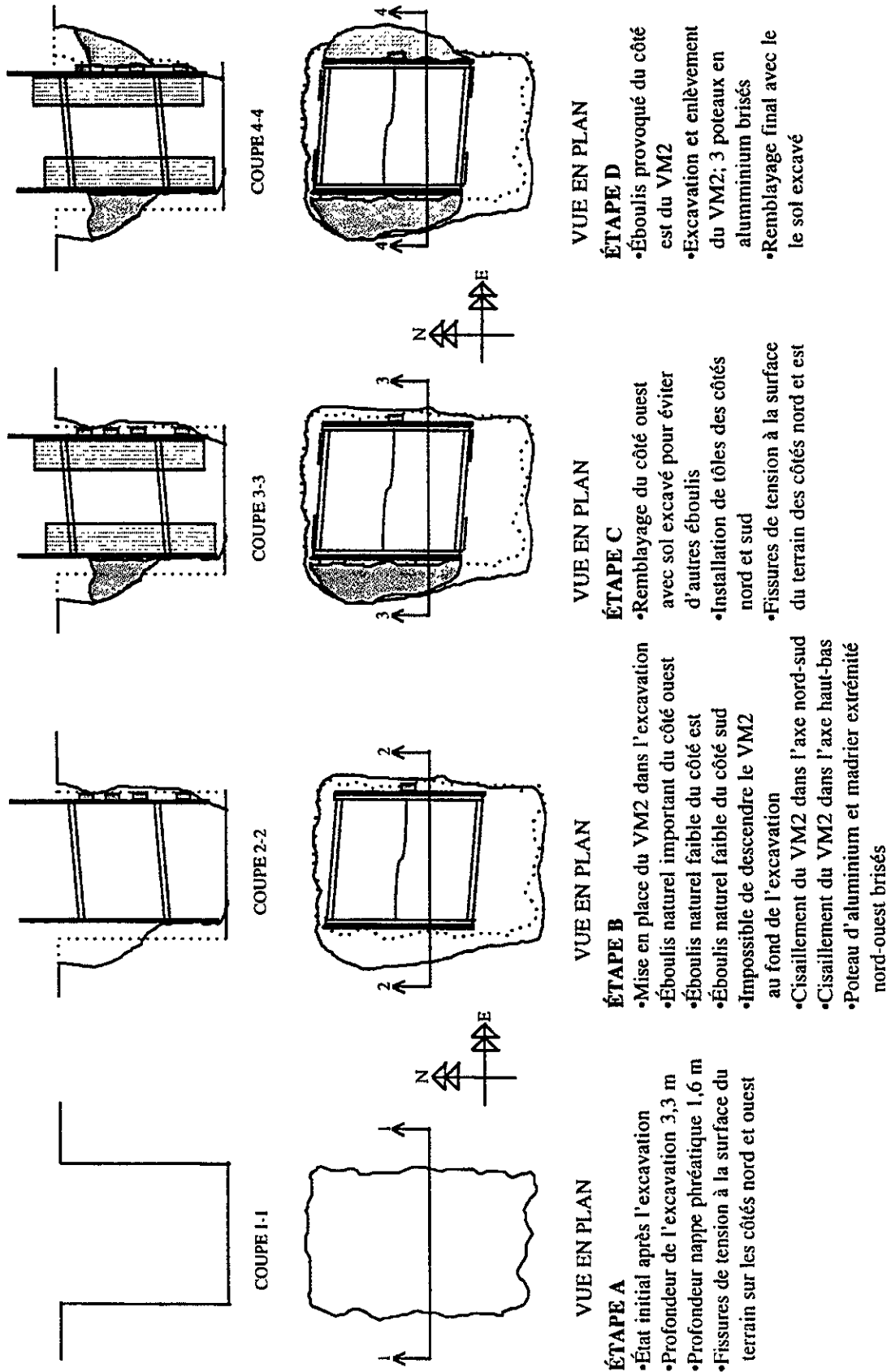


Figure 21 - Principales étapes pour la réalisation de l'essai N° 3 du 26 juin 1997



**Photo 29 - Glissement d'une paroi de silt**



**Photo 30 - Glissement sur la face instrumentée**



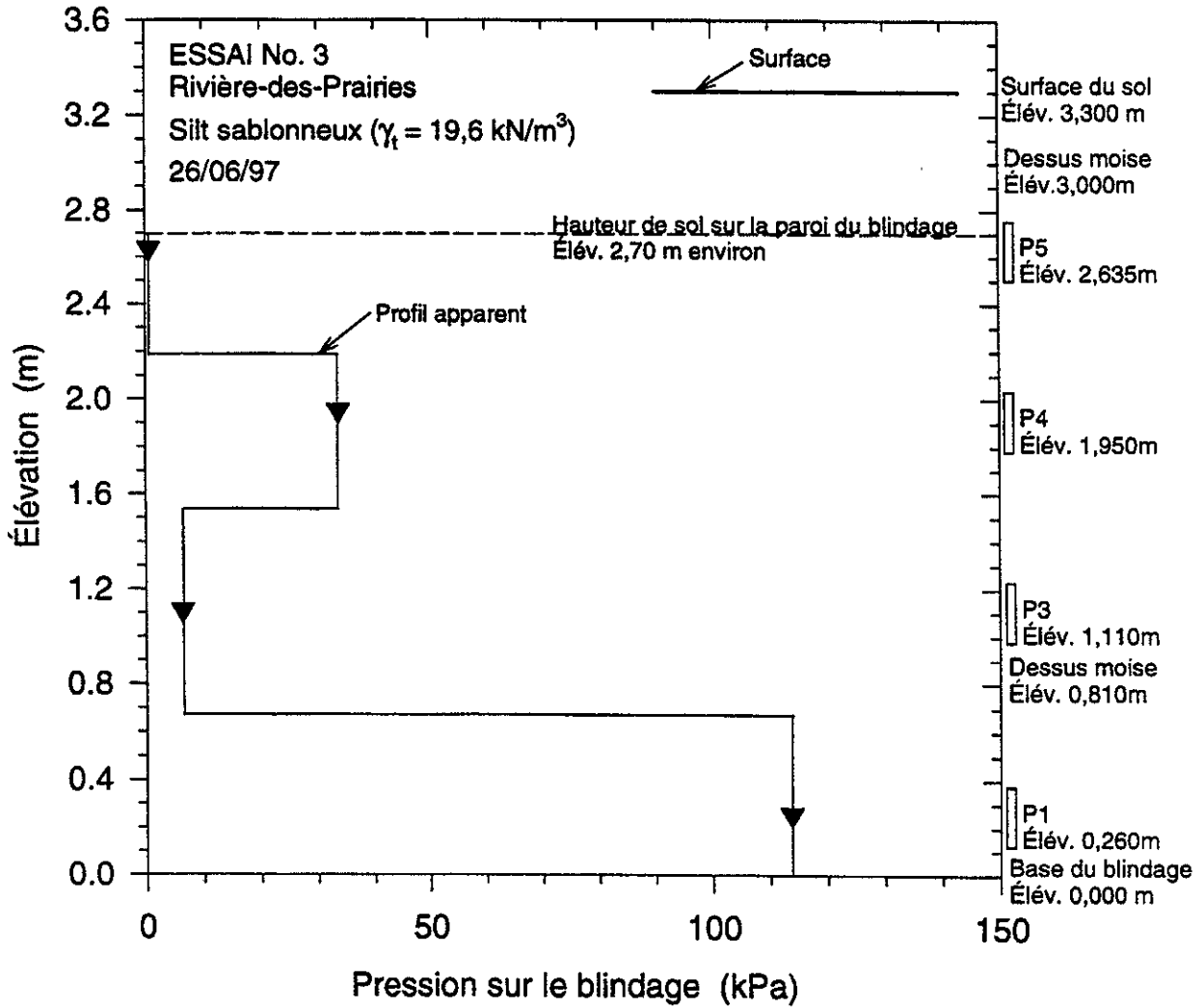


Figure 22 - Distribution de la pression totale sur la paroi du blindage en fonction de l'élévation pour l'essai N° 3

(Site : Rivière-des-Prairies, matériau : sable et sable silteux, date : 26 juin 1997)

No. moise	No. instrument	Élévation	$\Delta$ Lecture	Moment fléchissant <sup>(a)</sup> (jauges) (kN.m)
(1)	(2)	(m)	(L.U.)	(5)
MI1	J1	0,747	907	12,2
	J2	0,747	358	6,3
	J3	0,747	659	11,6
MS1	J4	2,962	306	1,2
	J5	2,962	744	6,4
	J6	2,962	-	(1,2) <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques type SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.1

<sup>(b)</sup> Estimé sur la base du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres, voir l'annexe A4

Tableau 14 - Moments fléchissants expérimentaux de l'essai N° 3

(Site : Rivière-des-Prairies, matériau : sable et sable silteux, date : 26 juin 1997)

No. moise	No. instrument	Élévation	$\Delta$ Lecture	Effort axial <sup>(a, b)</sup> (jauges) (kN)
(1)	(2)	(m)	(L.U.)	(5)
MI3	J7	0,747	-27	-12,5
MI4	J8	0,747	-68	-31,5
MS3	J9	2,962	-19	-4,0
MS4	J10	2,962	18	3,8

<sup>(a)</sup> Compression (-); traction (+)

<sup>(b)</sup> Mesuré à partir des jauges électriques type SM-2W, voir calculs-types à l'annexe A3.2

Tableau 15 - Efforts axiaux expérimentaux de l'essai N° 3

## 11. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS D'ESSAIS

### 11.1 Description de la démarche et des méthodes

Pour évaluer expérimentalement les poussées des terres et le comportement structural du VM2 sous charge, quatre quantités structurales ont été mesurées expérimentalement en chantier, entre autres :

- les poussées et les charges sur les moises;
- les moments de flexion dans les moises;
- les forces de cisaillement dans les moises; et
- les flèches subies par les moises.

Les données expérimentales relatives au comportement de la structure ont été colligées à partir du VM2 « tel que fabriqué ». Ces données peuvent différer du comportement de la structure « telle que conçue ». Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette différence de comportement. En plus des aléas reliés à l'instrumentation en conditions de chantier (chocs, chaleur, humidité, poussière, etc.), les défauts touchant en particulier le cheminement et le transfert des charges, l'effet des assemblages, l'effet des « rotules » et l'effet tridimensionnel lors des essais préliminaires en laboratoire, ainsi que la complexité du mécanisme des poussées de terre qui est fort différent de l'hypothèse de Rankine ou de Coulomb, sont autant de facteurs difficiles à cerner en théorie. Par conséquent, il semble logique et naturel d'évaluer les quantités énumérées plus haut selon quatre méthodes couvrant la totalité de l'instrumentation, donc selon quatre sources différentes d'information.

Les quatre méthodes retenues sont :

- **Méthode « A »** : les charges, les moments de flexion, les forces de cisaillement et les flèches sont estimés à partir des lectures des jauges fixées sur les moises longitudinales  $MI_1$  et  $MS_1$  du côté instrumenté du VM2.
- **Méthode « B »** : les charges, les moments de flexion, les forces de cisaillement et les flèches sont estimés à partir des lectures des jauges fixées sur les moises transversales  $MI_3$ ,  $MI_4$ ,  $MS_3$  et  $MS_4$ .
- **Méthode « C »** : les charges, les moments de flexion, les forces de cisaillement et les flèches sont estimés à partir des lectures des extensomètres.

- **Méthode « D »** : les charges, les moments de flexion, les forces de cisaillement et les flèches sont estimés à partir des lectures des cellules de pression totale.

Le tableau 16 résume ces quatre méthodes.

**Tableau 16 - Méthodes utilisées pour l'estimation expérimentale des poussées, moments, réactions et déplacements**

MÉTHODES	DESCRIPTION	QUANTITÉS ÉVALUÉES PAR CHACUNE DES MÉTHODES
<b>A</b>	Estimations basées sur lectures des jauges des moises $MI_1$ et $MS_1$ .	1. POUSSÉES ET CHARGES
<b>B</b>	Estimations basées sur lectures des jauges des moises transversales $MI_3$ , $MI_4$ , $MS_3$ et $MS_4$ .	2. MOMENTS DE FLEXION
<b>C</b>	Estimations basées sur lectures extensométriques.	3. CISAILLEMENTS
<b>D</b>	Estimations basées sur lectures des cellules de pression totale.	4. DÉFORMATIONS (FLÈCHES)

Pour chacune des méthodes A, B, C et D, les résultats d'essai sont analysés en fonction des quatre quantités retenues ci-haut, à savoir : (a) les poussées ou les charges sur les moises longitudinales, (b) les moments fléchissants et (c) les forces de cisaillement dans les moises, et (d) les déplacements (flèches) au centre des moises longitudinales.

## 11.2 Analyse des résultats selon la méthode « A »

### 11.2.1 Poussées (charges) sur les moises

Le tableau 17A donne les résultats de quatre essais pour fins de comparaison. La colonne (5) donne la charge uniformément répartie  $w$  mesurée expérimentalement par les jauges sur les moises. La colonne (6) donne la charge uniformément répartie  $w_f$  avec laquelle les moises ont été conçues lors de la phase 1. La colonne (7) donne la charge uniformément répartie théorique à laquelle peuvent résister les moises; cette charge est calculée en se basant sur l'hypothèse d'une poutre uniformément

chargée et ne tient donc pas compte de l'effet de rotule. La colonne (8) donne la charge uniformément répartie théorique à laquelle peuvent résister les moises en tenant compte de l'effet de rotule. Dans les colonnes (7) et (8), les valeurs minimales de la charge uniformément répartie correspondent aux poutres HSS mâles alors que les valeurs maximales correspondent aux poutres HSS femelles. Les résultats montrent que les poussées expérimentales sont largement inférieures aux poussées de design ou théoriques et ce, pour tous les essais. Par ailleurs, les valeurs obtenues pour le site N° 3 sont plus élevées que celles des trois autres essais.

**Tableau 17A - Poussées (charges) dans les moises longitudinales selon la méthode « A »**

Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	Charge uniformément répartie (w), kN/m			
				Expérimentale	Lan 1997	Résistance	
				w <sup>(a)</sup>	w <sub>r</sub> <sup>(b)</sup> design	w <sup>(c)</sup> théorique résistée par les moises min. à max. (7)	w théorique avec effet de rotule min. à max. (8)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
N° 1	10-06-97	MI1	0,897	8,7	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	--	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 2A	11-06-97	MI1	0,897	9,2	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	--	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 2B	11-06-97	MI1	0,897	11,7	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	--	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 3	26-06-97	MI1	0,747	17,2	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	2,962	9,8	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1

- (a) Estimation basée sur la formule de la charge uniformément répartie en fonction des moments fléchissants moyens mesurés avec les jauges, voir les notes de calcul D1 à D4 de l'annexe C.
- (b) Charge uniformément répartie de design selon Lan et al. (1997), p. 16.
- (c) Charge uniformément répartie correspondant au moment résistant  $w_r = 8 M_r/L^2$ .

### ***11.2.2 Moments fléchissants dans les moises longitudinales***

Le tableau 17B donne les résultats de quatre essais pour fins de comparaison. La colonne (6) donne les valeurs expérimentales des moments fléchissants obtenues par lectures des jauges. La colonne (7) donne les moments fléchissants de design  $M_f$  des moises lors de la phase 1. La colonne (8) donne les moments fléchissants résistants théoriques des moises. Les résultats montrent que les valeurs expérimentales sont dans l'ensemble inférieures aux valeurs de design et aux moments résistants. Certaines valeurs expérimentales manquantes (colonne 6) ont été estimées sur la base de rapport de déplacements extensométriques entre moises MI et MS.

**Tableau 17B - Moments fléchissants dans les moises longitudinales selon la méthode « A »**

Essai (1)	Date (2)	N° moise (3)	N° instrument (4)	Élévation (m) (5)	Moment fléchissant, kNm		
					Expérimental M (6)	Lan 1997 M <sub>r</sub> design <sup>(e)</sup> (7)	Résistant M <sub>r</sub> moises <sup>(f)</sup> (8)
No. 1	10-06-97	MI1	J1	0,897	5,9 <sup>(a,b)</sup>	15,2	25,6
			J2	0,897	2,9 <sup>(b)</sup>	9,5	32,4
			J3	0,897	5,9 <sup>(b)</sup>	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	1,2 <sup>(a,b)</sup>	2,4	8,1
			J5	3,262	0,6 <sup>(a,b)</sup>	1,5	16,6
			J6	3,262	1,2 <sup>(a,b)</sup>	2,4	16,6
No. 2A	11-06-97	MI1	J1	0,897	6,3 <sup>(a,c)</sup>	15,2	25,6
			J2	0,897	3,0 <sup>(c)</sup>	9,5	32,4
			J3	0,897	6,3 <sup>(c)</sup>	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	1,4 <sup>(a,c)</sup>	2,4	8,1
			J5	3,262	0,7 <sup>(a,c)</sup>	1,5	16,6
			J6	3,262	1,4 <sup>(a,c)</sup>	2,4	16,6
No. 2B	11-06-97	MI1	J1	0,897	8,4 <sup>(a,d)</sup>	15,2	25,6
			J2	0,897	3,8 <sup>(d)</sup>	9,5	32,4
			J3	0,897	8,0 <sup>(d)</sup>	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	3,5 <sup>(a,d)</sup>	2,4	8,1
			J5	3,262	1,5 <sup>(a,d)</sup>	1,5	16,6
			J6	3,262	3,1 <sup>(a,d)</sup>	2,4	16,6
/No. 3	26-06-97	MI1	J1	0,747	12,2 <sup>(e)</sup>	15,2	25,6
			J2	0,747	6,3 <sup>(e)</sup>	9,5	32,4
			J3	0,747	11,6 <sup>(e)</sup>	15,2	32,4
		MSI	J4	2,962	1,2 <sup>(e)</sup>	2,4	8,1
			J5	2,962	6,4 <sup>(e)</sup>	1,5	16,6
			J6	2,962	1,2 <sup>(e)</sup>	2,4	16,6

- (a) Estimé sur la base du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres, voir la note de calcul A4 de l'annexe C.
- (b) Voir tableau 6.
- (c) Voir tableau 9.
- (d) Voir tableau 12.
- (e) Voir tableau 14.
- (f) Estimation basée sur les charges uniformément réparties de design selon Lan et al. (1997), p. 16, aux positions des jauges sur les moises longitudinales.
- (g) Estimation basée sur la valeur du moment résistant aux positions des jauges sur les moises longitudinales.

### 11.2.3 Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales

Le tableau 17C donne les résultats de quatre essais à l'étude pour fins de comparaison. La colonne (6) donne les réactions (cisaillement) des moises longitudinales estimées sur la base des lectures des jauges fixées sur les moises longitudinales  $MI_1$  et  $MS_1$ . La colonne (7) donne les valeurs de cisaillement de design des moises lors de la phase 1. La colonne (8) donne les valeurs théoriques résistantes des moises. Les résultats montrent que les forces de cisaillement expérimentales dans les moises inférieures (MI) sont systématiquement inférieures aux valeurs de design. Pour les essais N°s 1, 2A et 2B, les valeurs expérimentales de cisaillement ne sont pas disponibles pour les moises supérieures, en raison de problèmes de mesures.

**Tableau 17C - Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales selon la méthode « A »**

Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	Réaction (cisaillement), kN		
				Expérimentale	Lan 1997	Résistance
(1)	(2)	(3)	(5)	$V^{(a,b)}$ (6)	$V_r^{(a,c)}$ (7)	$V_r^{(d)}$ moises (8)
N° 1	10-06-97	MI	0,897	-10,9	-31,6	253,6
		MS	3,262	--	-5,1	151,8
N° 2A	11-06-97	MI	0,897	-11,5	-31,6	253,6
		MS	3,262	--	-5,1	151,8
N° 2B	11-06-97	MI	0,897	-14,8	-31,6	253,6
		MS	3,262	--	-5,1	151,8
N° 3	26-06-97	MI	0,747	-22,5	-31,6	253,6
		MS	2,962	-12,4	-5,1	151,8

(a) Compression (-); traction (+).

(b) Basée sur la formule des efforts axiaux en fonction des moments fléchissants moyens mesurés avec les jauges, voir les notes de calcul D1 à D4 de l'annexe C.

(c) Basée sur les charges uniformément réparties de design selon Lan et al. 1997, p. 16.

(d) Basée sur la résistance au cisaillement des parois verticales des HSS des moises.



#### ***11.2.4 Déplacements (flèches) dans les moises longitudinales***

Le tableau 17D donne les flèches expérimentales de quatre essais pour fins de comparaison. Les flèches sont calculées ou estimées par les formules classiques de la résistance des matériaux en fonction de la charge uniformément répartie. La flèche expérimentale est obtenue en fonction des moments calculés à partir de jauges de déformations sur les moises  $MI_1$  et  $MS_1$ . Les déplacements expérimentaux dans les moises supérieures n'ont pu être estimés par cette approche pour les sites N<sup>os</sup> 1, 2A et 2B en raison de problèmes de mesures. La colonne (5) donne les déplacements (flèches) obtenus expérimentalement. La colonne (6) donne les flèches calculées avec les valeurs de design de la phase 1. La colonne (7) donne la flèche théorique obtenue lorsque la poutre est uniformément chargée avec un moment nominal  $M_n$ , sans effet de rotule. La colonne (8) donne la flèche avec effet de rotule. Les résultats montrent que pour les moises inférieures, les valeurs expérimentales sont largement en deçà des déplacements de design ou ceux correspondant au moment nominal des profilés.

**Tableau 17D - Déplacement des moises longitudinales selon la méthode «A»**

Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	Déplacements, mm			
				Expérimental	Lan 1997	Déplacement correspondant à $M_n$	
				$\Delta^{(a,b)}$	$\Delta_{design}^{(a,c)}$	$\Delta$ basée sur section uniforme <sup>(d)</sup> min. à max.	$\Delta$ avec effet de rotule <sup>(e)</sup> min. à max.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
N° 1	10-06-97	MI1	0,897	-4,2	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	--	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 2A	11-06-97	MI1	0,897	-4,4	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	--	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 2B	11-06-97	MI1	0,897	-5,6	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	--	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 3	26-06-97	MI1	0,747	-8,5	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	2,962	-15,7	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5

- (a) Déplacement des moises vers l'intérieur de l'étançonnement (-); vers l'extérieur de l'étançonnement (+).
- (b) Basée sur la formule des déplacements en fonction des moments fléchissants moyens mesurés avec les jauges, voir les notes de calcul D1 à D4 de l'annexe C.
- (c) Basée sur les charges uniformément réparties de design, selon Lan et al. 1997, p. 16, aux positions des jauges sur les moises longitudinales.
- (d)  $\Delta^{min} = 5w_n L^4/384EI^{male}$ ;  $\Delta^{max} = 5w_n L^4/384EI^{femelle}$ ;  $w_n = 8M_n/L^2$ .
- (e) Moment nominal  $M_n = M_r/\phi_s = M_r/0,9$ ;  $\Delta^{MI} = -0,48144 w_n$ ;  $\Delta^{MS} = -1,6022 w_n$ ;  $w_n$  correspond à  $M_{max} = M_n$ .

### 11.3 Analyse des résultats selon la méthode « B »

#### 11.3.1 Poussées (charges) sur les moises

Le tableau 18A donne les résultats pour les quatre essais pour fins de comparaison. La colonne (5) donne la charge uniformément répartie  $w$  mesurée expérimentalement par les jauges sur les moises longitudinales. La colonne (6) donne la charge uniformément répartie  $w_f$  avec laquelle les moises ont été conçues lors de la phase 1. La colonne (7) donne la charge uniformément répartie théorique

à laquelle peuvent résister les moises; cette charge est calculée en se basant sur l'hypothèse d'une poutre uniformément chargée et ne tient donc pas compte de l'effet de rotule. La colonne (8) donne la charge uniformément répartie théorique à laquelle peuvent résister les moises en tenant compte de l'effet de rotule. Dans les colonnes (7) et (8), les valeurs minimales de la charge uniformément répartie correspondent aux poutres HSS mâles alors que les valeurs maximales correspondent aux poutres HSS femelles. Les résultats montrent que pour cette approche, la résultante globale des poussées expérimentales est systématiquement inférieure à celle de design et de résistance. Ceci est également vrai pour les poussées sur la moise inférieure. Pour les moises supérieures, la poussée expérimentale dépasse les valeurs de design mais reste inférieure à la valeur théorique pour les essais N°s 1, 2A et 2B.

**Tableau 18A - Poussées (charges) dans les moises longitudinales selon la méthode « B »**

Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	Charge uniformément répartie (w), kN/m			
				Expérimentale	Lan 1997	Résistance	
				w	w <sub>r</sub> <sup>(b)</sup> design	w <sup>(c)</sup> théorique résistée par les moises min. à max.	w théorique avec effet de rotule min. à max.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
N° 1	10-06-97	MI1	0,897	14,8 <sup>(a)</sup>	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	9,3	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 2A	11-06-97	MI1	0,897	1,3 <sup>(a)</sup>	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	9,4	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 2B	11-06-97	MI1	0,897	1,3 <sup>(a)</sup>	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	11,6	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 3	26-06-97	MI1	0,747	17,4	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	2,962	0,1	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1

<sup>(a)</sup> Valeurs expérimentales non disponibles. Estimation basée sur la formule de la charge uniformément répartie en fonction des moments fléchissants moyens mesurés avec les jauges, voir les notes de calcul D1 à D4 de l'annexe C.

<sup>(b)</sup> Charge uniformément répartie de design selon Lan et al. (1997), p. 16.

<sup>(c)</sup> Charge uniformément répartie correspondant au moment résistant  $w_r = 8 M_r/L^2$ .

### ***11.3.2 Moments fléchissants dans les moises longitudinales***

Le tableau 18B donne les résultats de quatre essais pour fins de comparaison. La colonne (6) donne les valeurs expérimentales des moments fléchissants obtenues par lectures des jauges. La colonne (7) donne les moments fléchissants de design  $M_f$  des moises lors de la phase 1. La colonne (8) donne les moments fléchissants résistants théoriques des moises. Les résultats montrent que pour les moises supérieures (MS), les valeurs expérimentales sont supérieures aux valeurs de design et inférieures aux moments résistants. Sauf pour l'essai N° 3, les moments expérimentaux de la moise inférieure n'ont pu être déterminés pour les raisons de problèmes de mesures par cette méthode.

**Tableau 18B - Moments fléchissants dans les moises longitudinales selon la méthode « B »**

Essai (1)	Date (2)	N° moise (3)	N° instrument (4)	Élévation (m) (5)	Moment fléchissant, kNm		
					Expérimental $M^{(a)}$ (6)	Lan 1997 $M, design^{(c)}$ (7)	Résistant $M, moises^{(d)}$ (8)
N° 1	10-06-97	MI1	J1	0,897	9,0 <sup>(a)</sup>	15,2	25,6
			J2	0,897	5,7 <sup>(a)</sup>	9,5	32,4
			J3	0,897	9,0 <sup>(a)</sup>	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	5,6	2,4	8,1
			J5	3,262	3,4	1,5	16,6
			J6	3,262	5,6	2,4	16,6
N° 2A	11-06-97	MI1	J1	0,897	0,8 <sup>(a)</sup>	15,2	25,6
			J2	0,897	0,5 <sup>(a)</sup>	9,5	32,4
			J3	0,897	0,8 <sup>(a)</sup>	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	5,6	2,4	8,1
			J5	3,262	3,4	1,5	16,6
			J6	3,262	5,6	2,4	16,6
N° 2B	11-06-97	MI1	J1	0,897	0,8 <sup>(a)</sup>	15,2	25,6
			J2	0,897	0,5 <sup>(a)</sup>	9,5	32,4
			J3	0,897	0,8 <sup>(a)</sup>	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	7,0	2,4	8,1
			J5	3,262	4,2	1,5	16,6
			J6	3,262	7,0	2,4	16,6
N° 3	26-06-97	MI1	J1	0,747	10,6	15,2	25,6
			J2	0,747	6,7	9,5	32,4
			J3	0,747	10,6	15,2	32,4
		MS1	J4	2,962	0,1	2,4	8,1
			J5	2,962	0,0	1,5	16,6
			J6	2,962	0,1	2,4	16,6

- (a) Valeurs expérimentales non disponibles; estimées à partir des rapports de lectures de jauges. Valeurs non retenues pour l'analyse.
- (b) Basée sur la formule du moment fléchissant en fonction des efforts axiaux moyens mesurés avec les jauges, voir les notes de calcul D1 à D4 de l'annexe C.
- (c) Basée sur les charges uniformément réparties de design, selon Lan et al. 1997, p. 16, aux positions des jauges sur les moises longitudinales.
- (d) Basée sur la valeur des moments résistant aux positions des jauges sur les moises longitudinales.

### ***11.3.3 Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales***

Le tableau 18C donne les résultats de quatre essais à l'étude pour fins de comparaison. La colonne (6) donne les réactions (cisaillement) des moises longitudinales estimées sur la base des lectures des jauges fixées sur les moises transversales  $MI_3$ ,  $MI_4$ ,  $MS_3$ ,  $MS_4$ . La colonne (7) donne les valeurs de cisaillement de design des moises lors de la phase 1. La colonne (8) donne les valeurs théoriques résistantes des moises. Les résultats montrent que cinq valeurs expérimentales sur huit (08) relatives aux moises inférieures et une valeur (01) sur huit (08) relatives aux moises supérieures indiquent des réactions positives contrairement à ce que l'on pouvait prévoir. Selon l'ÉTS, ceci est attribuable, en grande partie, au transfert de charge qui semble ne pas se faire selon le cheminement prévu. De plus, les forces de cisaillement expérimentales dans les moises supérieures (MS) pour les essais N<sup>os</sup> 1, 2A et 2B sont nettement inférieures aux valeurs de résistance.

**Tableau 18C - Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales selon la méthode « B »**

Essai (1)	Date (2)	N° moise (3)	N° instrument (4)	Élévation (m) (5)	Réaction (cisaillement), kN		
					Expérimentale	Lan 1997	Résistance
					V (6)	V <sub>r</sub> (7)	V <sub>r</sub> moises <sup>(f)</sup> (8)
N° 1	10-06-97	MI3	J7	0,897	11,6 <sup>(a,b)</sup>	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	25,9 <sup>(a,b)</sup>	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-10,4 <sup>(a,b)</sup>	-5,1	151,8
		MS4	J10	3,262	-13,0 <sup>(a,b)</sup>	-5,1	
N° 2A	11-06-97	MI3	J7	0,897	0,5 <sup>(a,c)</sup>	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	2,8 <sup>(a,c)</sup>	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-11,1 <sup>(a,c)</sup>	-5,1	151,8
		MS4	J10	3,262	-12,6 <sup>(a,c)</sup>	-5,1	
N° 2B	11-06-97	MI3	J7	0,897	-0,5 <sup>(a,d)</sup>	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	3,7 <sup>(a,d)</sup>	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-13,0 <sup>(a,d)</sup>	-5,1	151,8
		MS4	J10	3,262	-16,2 <sup>(a,d)</sup>	-5,1	
N° 3	26-06-97	MI3	J7	0,747	-12,5 <sup>(a,e)</sup>	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,747	-31,5 <sup>(a,e)</sup>	-31,6	
		MS3	J9	2,962	-4,0 <sup>(a,e)</sup>	-5,1	151,8
		MS4	J10	2,962	3,8 <sup>(a,e)</sup>	-5,1	

(a) Compression (-); traction (+).

(b) Voir tableau 7.

(c) Voir tableau 10.

(d) Voir tableau 13.

(e) Voir tableau 15.

(f) Basée sur la résistance au cisaillement des parois verticales des HSS des moises.

#### 11.3.4 Déplacements (flèches) dans les moises longitudinales

Le tableau 18D donne les flèches expérimentales de quatre essais pour fins de comparaison. Les flèches ont été calculées ou estimées par les formules classiques de la résistance des matériaux en fonction de la charge uniformément répartie qui est estimée en fonction des réactions calculées à partir de jauges de déformations sur les moises inférieures MI<sub>3</sub>, MI<sub>4</sub>, MS<sub>3</sub>, MS<sub>4</sub>. La colonne (5) donne les déplacements (flèches) obtenus expérimentalement. La colonne (6) donne les flèches

calculées avec les valeurs de design de la phase 1. La colonne (7) donne la flèche théorique obtenue lorsque la poutre est uniformément chargée avec un moment nominal  $M_n$ , sans effet de rotule. La colonne (8) donne la flèche avec effet de rotule. Les résultats montrent que les déplacements expérimentaux dans les moises inférieures pour les essais N° 1, 2A et 2B sont positifs, donc vers l'extérieur de l'étançonnement, en raison de problèmes de mesures sur les jauges des moises transversales inférieures relevés plus haut. Pour les moises supérieures, les valeurs expérimentales sont supérieures aux déplacements de design mais inférieures aux déplacements correspondant au moment nominal des profilés.

**Tableau 18D - Déplacement des moises longitudinales selon la méthode « B »**

				Déplacements, mm			
				Expérimental	Lan 1997	Déplacement correspondant à $M_n$	
Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	$\Delta^{(a,b)}$	$\Delta_{design}^{(a,c)}$	$\Delta$ basée sur section uniforme <sup>(d)</sup> min. à max. (7)	$\Delta$ avec effet de rotules <sup>(e)</sup> min. à max. (8)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
N° 1	10-06-97	MI1	0,897	7,2	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	-14,4	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 2A	11-06-97	MI1	0,897	0,7	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	-15,1	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 2B	11-06-97	MI1	0,897	0,6	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	-18,6	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 3	26-06-97	MI1	0,747	-8,4	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	2,962	-0,2	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5

- (a) Déplacement des moises vers l'intérieur de l'étançonnement (-); vers l'extérieur de l'étançonnement (+).
- (b) Basée sur la formule des déplacements en fonction des moments fléchissants moyens mesurés avec les jauges, voir les notes de calcul D1 à D4 de l'annexe C.
- (c) Basée sur les charges uniformément réparties de design, selon Lan et al. 1997, p. 16, aux positions des jauges sur les moises longitudinales.
- (d)  $\Delta^{min} = 5w_n L^4/384EI^{male}$ ;  $\Delta^{max} = 5w_n L^4/384EI^{femelle}$ ;  $w_n = 8M_n/L^2$ .
- (e) Moment nominal  $M_n = M_r/\phi_s = M_r/0,9$ ;  $\Delta^{MI} = -0,48144 w_n$ ;  $\Delta^{MS} = -1,6022 w_n$ ;  $w_n$  correspondant à  $M_{max} = M_n$ .



## 11.4 Analyse des résultats selon la méthode « C »

### 11.4.1 Poussées (charges) sur les moises

Le tableau 19A donne les résultats de quatre essais pour fins de comparaison. La colonne (5) donne la charge uniformément répartie  $w$  mesurée expérimentalement par des lectures extensométriques. La colonne (6) donne la charge uniformément répartie  $w_f$  avec laquelle les moises ont été conçues lors de la phase 1. La colonne (7) donne la charge uniformément répartie théorique à laquelle peuvent résister les moises; cette charge est calculée en se basant sur l'hypothèse d'une poutre uniformément chargée et ne tient donc pas compte de l'effet de rotule. La colonne (8) donne la charge uniformément répartie théorique à laquelle peuvent résister les moises en tenant compte de l'effet de rotule. Dans les colonnes (7) et (8), les valeurs minimales de la charge uniformément répartie correspondent aux poutres HSS mâles alors que les valeurs maximales correspondent aux poutres HSS femelles. Les résultats montrent que les poussées expérimentales dans les moises inférieures sont largement supérieures aux poussées de design ou théoriques et ce, pour tous les essais. Il est à remarquer que la poussée sur MI obtenue pour l'essai N° 1 est plus élevée que celles des trois autres essais. Les poussées expérimentées par les moises du haut bien que supérieures à celles de design, sont de même ordre de grandeur que les poussées auxquelles théoriquement les moises résisteraient (voir colonnes (7) et (8)).

**Tableau 19A - Poussées (charges) dans les moises longitudinales selon la méthode « C »**

Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	Charge uniformément répartie (w), kN/m			
				Expérimentale	Lan 1997	Résistance	
				w <sup>(a)</sup>	w <sub>r</sub> <sup>(b)</sup> design	w <sup>(c)</sup> théorique résistée par les moises min. à max. (7)	w théorique avec effet de rotule min. à max. (8)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
N° 1	10-06-97	MI1	0,897	77,1	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	14,5	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 2A	11-06-97	MI1	0,897	59,4	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	11,8	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 2B	11-06-97	MI1	0,897	66,3	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	3,262	18,0	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1
N° 3	26-06-97	MI1	0,747	58,4	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1
		MS1	2,962	(-3,5)	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1

(a) Estimation basée sur la formule de la charge uniformément répartie en fonction des déplacements moyens mesurés avec les extensomètres, voir les notes de calcul D1 à D4 de l'annexe C.

(b) Charge uniformément répartie de design selon Lan et al. (1997), p. 16.

(c) Charge uniformément répartie correspondant au moment résistant  $w_r = 8 M_r/L^2$ .

#### 11.4.2 Moments fléchissants dans les moises longitudinales

Le tableau 19B donne les résultats de quatre essais pour fins de comparaison. La colonne (6) donne les valeurs expérimentales des moments fléchissants obtenues par lectures extensométriques. La colonne (7) donne les moments fléchissants de design  $M_f$  des moises lors de la phase 1. La colonne (8) donne les moments fléchissants résistants théoriques des moises. Les résultats montrent que dans les moises supérieures les valeurs expérimentales sont dans l'ensemble supérieures aux valeurs de design et inférieures aux moments résistants. À l'opposé, dans les moises inférieures, elles sont nettement supérieures aux valeurs de design et de résistance.

**Tableau 19B - Moments fléchissants dans les moises longitudinales selon la méthode « C »**

Essai	Date	N° moise	N° instrument	Élévation (m)	Moment fléchissant, kNm		
					Expérimental	Lan 1997	Résistant
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	M <sup>(a)</sup>	M <sub>r</sub> design <sup>(b)</sup>	M <sub>r</sub> moises <sup>(c)</sup>
					(6)	(7)	(8)
N° 1	10-06-97	MI1	J1	0,897	46,8	15,2	25,6
			J2	0,897	29,4	9,5	32,4
			J3	0,897	46,8	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	8,8	2,4	8,1
			J5	3,262	5,3	1,5	16,6
			J6	3,262	8,8	2,4	16,6
N° 2A	11-06-97	MI1	J1	0,897	36,1	15,2	25,6
			J2	0,897	22,7	9,5	32,4
			J3	0,897	36,0	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	7,2	2,4	8,1
			J5	3,262	4,3	1,5	16,6
			J6	3,262	7,2	2,4	16,6
N° 2B	11-06-97	MI1	J1	0,897	40,3	15,2	25,6
			J2	0,897	25,3	9,5	32,4
			J3	0,897	40,2	15,2	32,4
		MS1	J4	3,262	10,9	2,4	8,1
			J5	3,262	6,6	1,5	16,6
			J6	3,262	10,9	2,4	16,6
N° 3	26-06-97	MI1	J1	0,747	35,5	15,2	25,6
			J2	0,747	22,3	9,5	32,4
			J3	0,747	35,5	15,2	32,4
		MS1	J4	2,962	(-2,1)	2,4	8,13
			J5	2,962	(-1,3)	1,5	16,6
			J6	2,962	(-2,1)	2,4	16,6

(a) Basée sur la formule du moment fléchissant en fonction des efforts des déplacements mesurés avec les extensomètres, voir les notes de calcul D1 à D4 à l'annexe C.

(b) Basée sur les charges uniformément réparties de design, selon Lan et al. 1997, p. 16, aux positions des jauges sur les moises longitudinales.

(c) Basée sur la valeur des moments résistant aux positions des jauges sur les moises longitudinales.

### 11.4.3 Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales

Le tableau 19C donne les résultats de quatre essais à l'étude pour fins de comparaison. La colonne(6) donne les réactions (cisaillement) des moises longitudinales estimées sur la base des lectures extensométriques et des formules classiques d'élasticité. La colonne (7) donne les valeurs de cisaillement de design des moises lors de la phase 1. La colonne (8) donne les valeurs théoriques résistantes des moises. Les résultats montrent que les forces de cisaillement expérimentales dans les moises inférieure (MI) et supérieure (MS) sont généralement plus élevées que les valeurs de design mais nettement inférieures au cisaillement résistant.

**Tableau 19C - Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales selon la méthode « C »**

Essai (1)	Date (2)	N° moise (3)	N° instrument (4)	Élévation (m) (5)	Réaction (cisaillement), kN		
					Expérimentale $V^{(a,b)}$ (6)	Lan 1997 $V_f^{(a,c)}$ (7)	Résistance $V_r$ moises <sup>(d)</sup> (8)
N° 1	10-06-97	MI3	J7	0,897	-97,3	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	-97,3	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-18,3	-5,1	151,8
		MS4	J10	3,262	-18,3	-5,1	
N° 2A	11-06-97	MI3	J7	0,897	-75,0	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	-75,0	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-14,9	-5,1	151,8
		MS4	J10	3,262	-14,9	-5,1	
N° 2B	11-06-97	MI3	J7	0,897	-83,7	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	-83,7	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-22,8	-5,1	151,8
		MS4	J10	3,262	-22,8	-5,1	
N° 3	26-06-97	MI3	J7	0,747	-73,7	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,747	-73,7	-31,6	
		MS3	J9	2,962	-4,4	-5,1	151,8
		MS4	J10	2,962	-4,4	-5,1	

(a) Compression (-); traction (+).

(b) Basée sur la formule des efforts axiaux en fonction des déplacements moyens mesurés avec les jauges, voir les notes de calcul D1 à D4 de l'annexe C.

(c) Basée sur les charges uniformément réparties de design, selon Lan et al. 1997, p. 16.

(d) Basée sur la résistance au cisaillement des parois verticales des HSS des moises.

#### ***11.4.4 Déplacements (flèches) dans les moises longitudinales***

Le tableau 19D donne les flèches expérimentales de quatre essais pour fins de comparaison. Les flèches sont directement mesurées à l'aide d'extensomètres. La colonne (5) donne les déplacements (flèches) obtenus expérimentalement. La colonne (6) donne les flèches calculées avec les valeurs de design de la phase 1. La colonne (7) donne la flèche théorique obtenue lorsque la poutre est uniformément chargée avec un moment nominal  $M_n$ , sans effet de rotule. La colonne (8) donne la flèche avec effet de rotule. Les résultats montrent que les déplacements expérimentaux dans les moises supérieures et inférieures sont généralement nettement supérieurs aux flèches de design. Par ailleurs, ils sont supérieurs aux déplacements correspondant au moment nominal ( $\Delta_n$ ) dans les moises inférieures (MI) et comparables à  $\Delta_n$  dans le cas de moises supérieures (MS). Le plus grand déplacement observé est celui relatif à l'essai N° 1 atteignant la valeur de  $L/70$ , où  $L$  est la portée de la moise. Si on considère une valeur limite pratique de  $L/200$ , on constate que pour ce cas de chargement les moises inférieures apparaissent sous-dimensionnées.

Tableau 19D - Déplacement des moises longitudinales selon la méthode « C »

Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	Déplacements, mm			
				Expérimental $\Delta$	Lan 1997 $\Delta_{design}^{(f)}$	Déplacement correspondant à $M_n$	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	$\Delta$ basée sur section uniforme <sup>(g)</sup> min. à max. (7)	$\Delta$ avec effet de rotule <sup>(h)</sup> min. à max. (8)
N° 1	10-06-97	MI1	0,897	-37,1 <sup>(a,b)</sup>	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	-23,2 <sup>(a,b)</sup>	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 2A	11-06-97	MI1	0,897	-28,6 <sup>(a,c)</sup>	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	-18,9 <sup>(a,c)</sup>	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 2B	11-06-97	MI1	0,897	-31,9 <sup>(a,d)</sup>	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	3,262	-23,0 <sup>(a,d)</sup>	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5
N° 3	26-06-97	MI1	0,747	-28,1 <sup>(a,e)</sup>	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0
		MS1	2,962	5,6 <sup>(a,e)</sup>	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5

(a) Déplacement des moises vers l'intérieur de l'étançonnement (-); vers l'extérieur de l'étançonnement (+); peut inclure un déplacement de rotule dont le maximum est estimé à 4mm environ.

(b) Voir tableau 5.

(c) Voir tableau 8.

(d) Voir tableau 11.

(e) Voir tableau 15.

(f) Basée sur les charges uniformément réparties de design selon Lan et al. 1997, p. 16, aux positions des jauges sur les moises longitudinales.

(g)  $\Delta^{min} = 5w_n L^4/384EI^{male}$ ;  $\Delta^{max} = 5w_n L^4/384EI^{femelle}$ ;  $w_n = 8M_n/L^2$ .

(h) Moment nominal  $M_n = M_r/\phi_s = M_r/0,9$ ;  $\Delta^{MI} = -0,48144 w_n$ ;  $\Delta^{MS} = -1,6022 w_n$ ;  $w_n$  correspondant à  $M_{r,max} = M_n$ .

## 11.5 Analyse des résultats selon la méthode « D »

La méthode D est basée sur la lecture de pression totale des cellules de pression disposées à des profondeurs différentes sur la face instrumentée du blindage. Elle donne donc des valeurs ponctuelles à l'emplacement des cellules et non une distribution complète des poussées le long de la paroi du blindage. Dans le cadre de ce projet, trois hypothèses ou scénarios ont été formulés pour relier les points correspondant aux valeurs ponctuelles :

- Scénario B : les points sont directement reliés entre eux;
- Scénario C : une surface d'influence moyenne est attribuée à chacune des valeurs ponctuelles de pression;
- Scénario D : la distribution des pressions horizontales est rectangulaire et uniforme, elle est basée sur la valeur maximale enregistrée par les cellules.

Les scénarios B, C et D relatifs aux essais N<sup>os</sup> 1, 2A, 2B et 3 sont présentés aux figures 23 à 26, respectivement. Le scénario A correspond quant à lui, aux hypothèses de design mais sans la réduction de 15 % utilisée par Lan et al. (1997) et à une pleine hauteur de chargement de 12 pieds (3,6 m) pour tenir compte des conditions des essais réalisés dans le cadre de ce projet.

### 11.5.1 Poussée (charges) sur les moises

Le tableau 20A donne les résultats de quatre essais pour fins de comparaison. La colonne (5) donne la charge uniformément répartie  $w$  mesurée expérimentalement par les cellules de pression totales suivant le scénario B. La colonne (6) donne la charge uniformément répartie  $w$  mesurée expérimentalement par les cellules de pression totales suivant le scénario C. La colonne (7) donne la charge uniformément répartie  $w$  mesurée expérimentalement par les cellules de pression totales suivant le scénario D. La colonne (8) donne la charge uniformément répartie  $w_f$  avec laquelle le prototype VM2 a été conçu lors de la phase 1. La colonne (9) donne la charge uniformément répartie  $w_f$  avec laquelle les moises ont été conçues lors de la phase 1. La colonne (10) donne la charge uniformément répartie théorique à laquelle peuvent résister les moises; cette charge est calculée en se basant sur l'hypothèse d'une poutre uniformément chargée et ne tient donc pas compte de l'effet de rotule. La colonne (11) donne la charge uniformément répartie théorique à laquelle peuvent résister les moises en tenant compte de l'effet de rotule. Dans les colonnes (10) et (11), les valeurs minimales de la charge uniformément répartie correspondent aux poutres HSS mâles alors que les

valeurs maximales correspondent aux poutres HSS femelles. Les résultats montrent que les poussées expérimentales dans les moises inférieures sont largement supérieures aux poussées de design ou théoriques. Ceci est vrai pour tous les essais et tous les scénarios. Il est à remarquer que les valeurs des MI obtenues pour le site N° 3 sont plus élevées que celles des trois autres essais. Les valeurs expérimentales dans les moises supérieures (MS) bien que supérieures aux valeurs de design, sont de même ordre de grandeur que les valeurs théoriques, excepté pour le scénario D où les valeurs correspondantes sont nettement supérieures.

### ***11.5.2 Moments fléchissants dans les moises longitudinales***

Le tableau 20B donne les résultats de quatre essais pour fins de comparaison. Les colonnes (6), (7) et (8) donnent les valeurs expérimentales des moments fléchissants suivant les scénarios B, C et D. Ces moments fléchissants expérimentaux sont estimés sur la base des formules classiques en élasticité en fonction de la charge répartie, laquelle est estimée en fonction des lectures des cellules de pression totale. La colonne (9) donne les moments fléchissants obtenus avec la charge uniformément répartie  $w_f$  avec laquelle le prototype VM2 a été conçu lors de la phase 1. La colonne (10) donne les moments fléchissants de design  $M_f$  des moises lors de la phase 1. La colonne (11) donne les charges uniformément réparties théoriques auxquelles peuvent résister les moises sans effet de rotule. Les résultats montrent que les moments fléchissants expérimentaux dans les moises inférieures (MI) sont comparables aux moments résistants pour les scénarios B et C et leur sont supérieurs pour le scénario D. Dans les moises supérieures, les moments expérimentaux sont sinon inférieurs, comparables aux moments résistants pour les scénarios B et C. Ils sont par ailleurs supérieurs aux moments résistants pour le scénario D.

### ***11.5.3 Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales***

Le tableau 20C donne les résultats de quatre essais à l'étude pour fins de comparaison. Les colonnes (6), (7) et (8) donnent les valeurs expérimentales des réactions (cisaillement) suivant les scénarios B, C et D. Ces réactions des moises longitudinales sont estimées sur la base des lectures des cellules de pression totale. La colonne (9) donne les réactions obtenues avec la charge uniformément répartie  $w_f$  avec laquelle le prototype VM2 a été conçu lors de la phase 1. La colonne (10) donne les réactions de design  $V_f$  des moises lors de la phase 1. La colonne (11) donne les réactions théoriques auxquelles peuvent résister les moises. Les résultats montrent que les forces de cisaillement expérimentales dans les moises inférieures (MI) comme supérieures (MS) sont généralement nettement plus élevées que les valeurs de design, mais restent bien en deçà des résistances au cisaillement des HSS.



#### ***11.5.4 Déplacements (flèches) dans les moises longitudinales***

Le tableau 20D donne les flèches expérimentales de quatre essais pour fins de comparaison. Les colonnes (5), (6) et (7) donnent les valeurs expérimentales des flèches suivant les scénarios B, C et D. Ces flèches sont estimées sur la base des formules classiques en élasticité en fonction de la charge répartie, laquelle est estimée en fonction des lectures des cellules de pression totale. La colonne (8) donne les flèches obtenues avec la charge uniformément répartie  $w_f$  avec laquelle le prototype VM2 a été conçu lors de la phase 1. La colonne (9) donne les flèches avec la charge uniformément répartie de design  $w_f$  lors de la phase 1. La colonne (10) donne les flèches lorsque la poutre est uniformément chargée avec un moment nominal  $M_n$ , sans effet de rotule. La colonne (11) donne la flèche avec effet de rotule. Les résultats montrent que les déplacements expérimentaux dans les moises supérieure et inférieure du scénario B, bien que nettement supérieurs au déplacement de design, sont comparables aux déplacements correspondant au moment nominal. Les valeurs expérimentales des scénarios C et D sont quant à elles nettement supérieures aux valeurs de design et généralement supérieures aux déplacements correspondant au moment nominal des profilés.

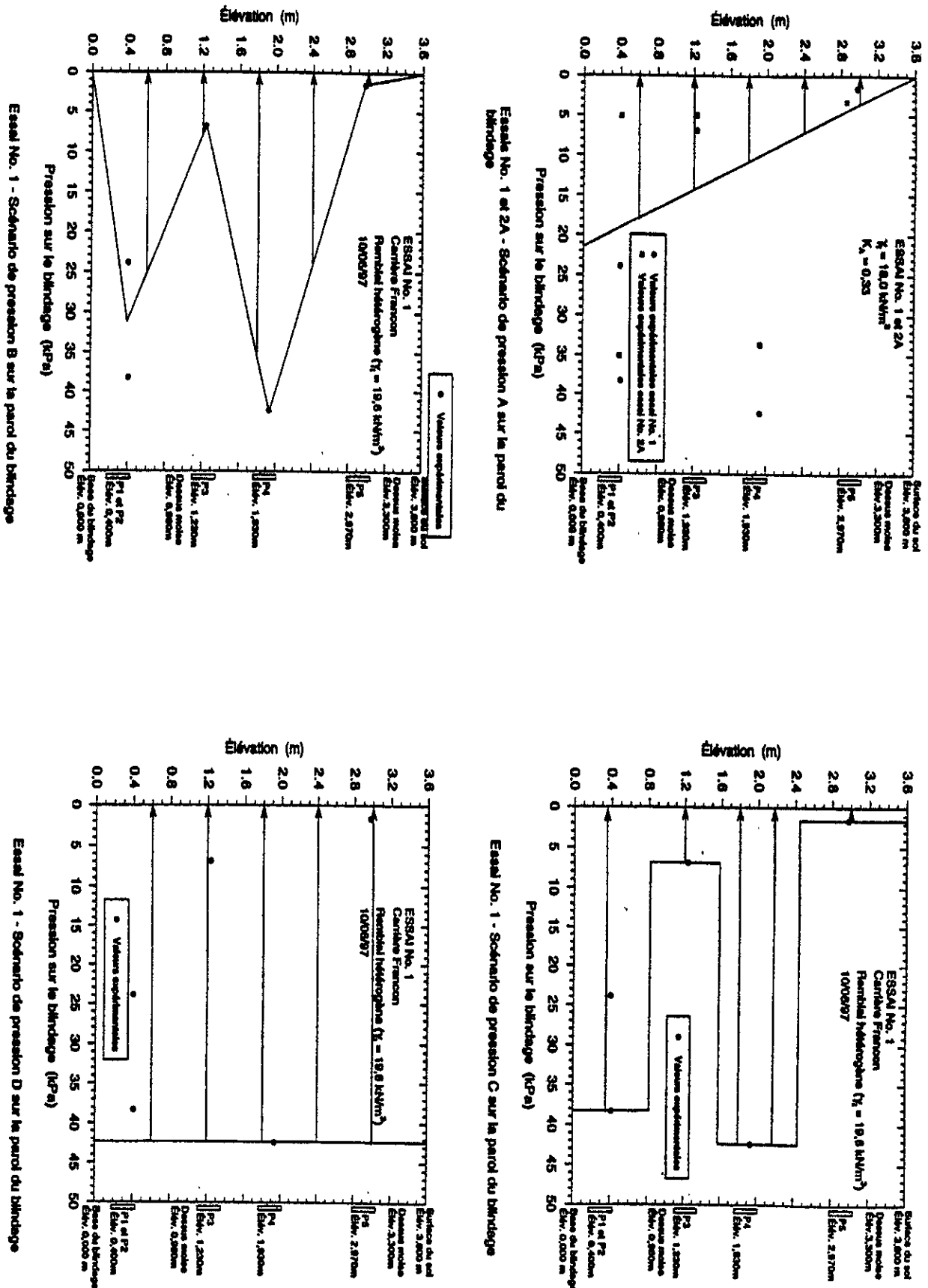


Figure 23 - Scénarios de pression des terres sur la paroi de blindage lors de l'essai N° 1

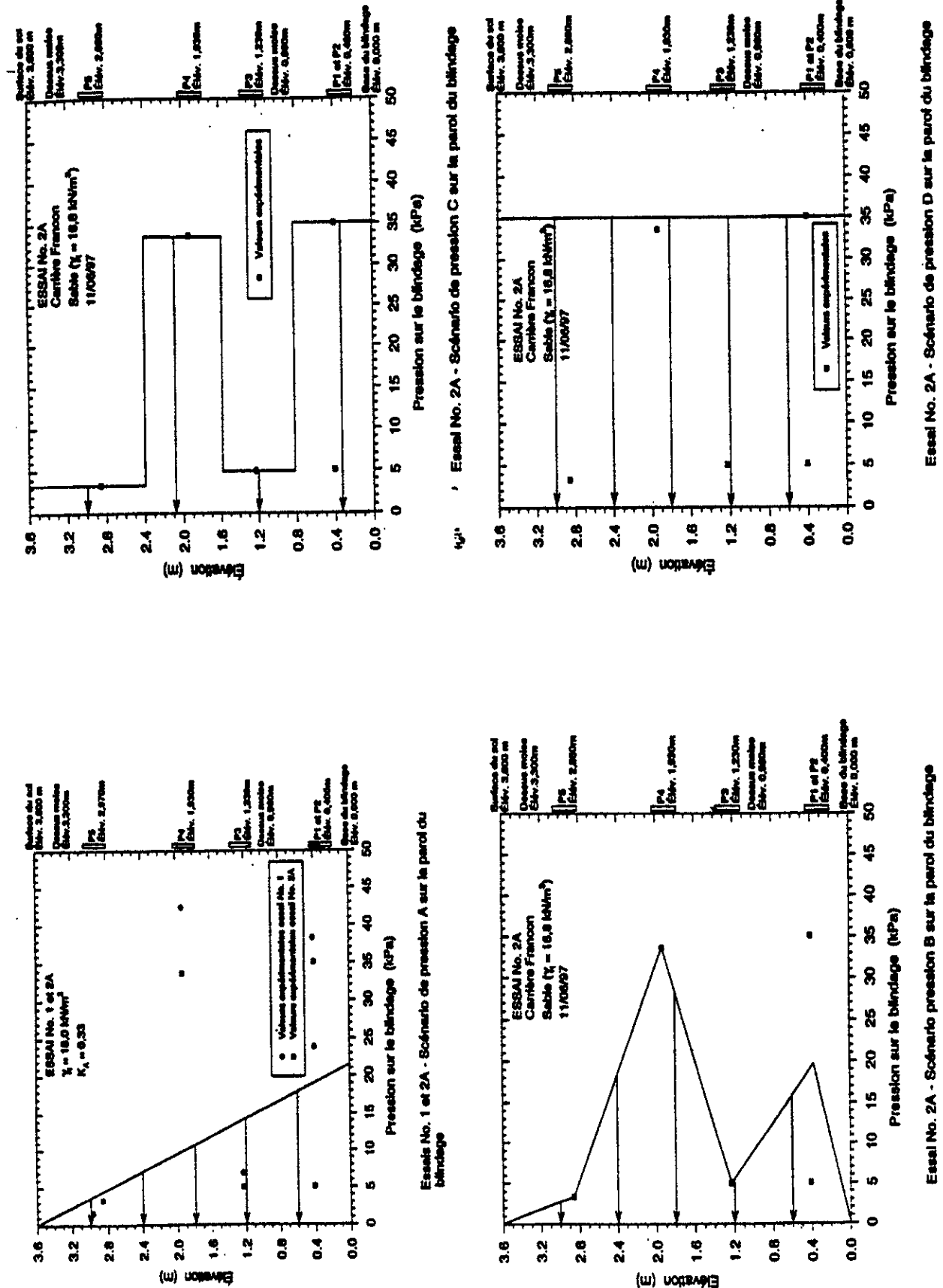
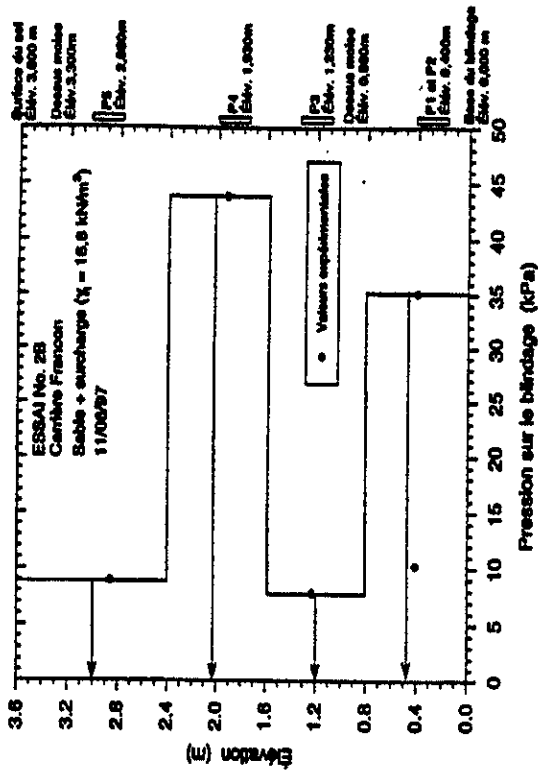
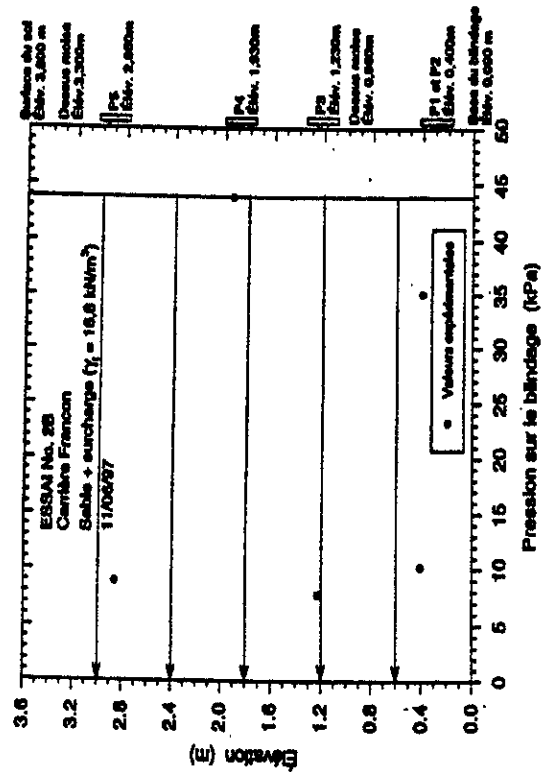


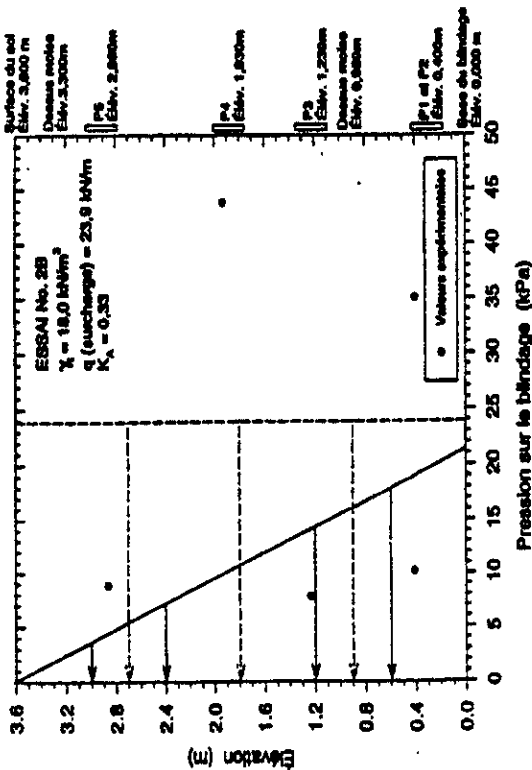
Figure 24 - Scénarios de pression des terres sur la paroi du blindage lors de l'essai N° 2A



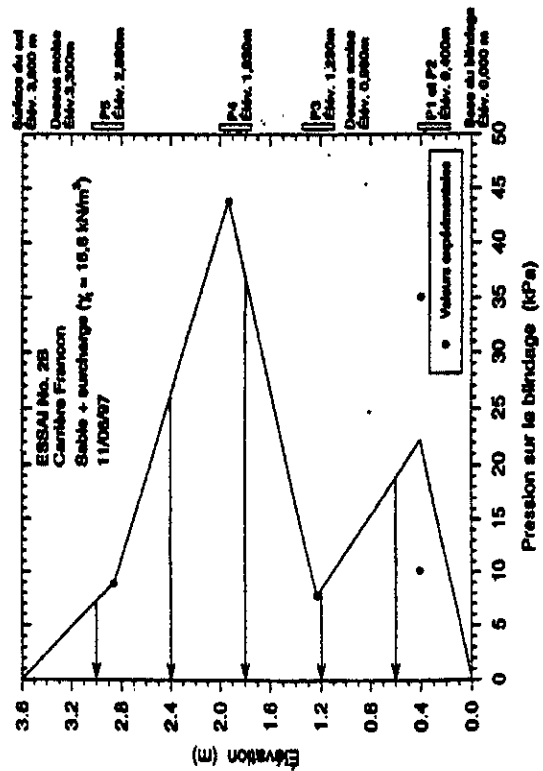
Essai No. 2B - Scénario de pression C sur la paroi du blindage



Essai No. 2B - Scénario de pression D sur la paroi du blindage

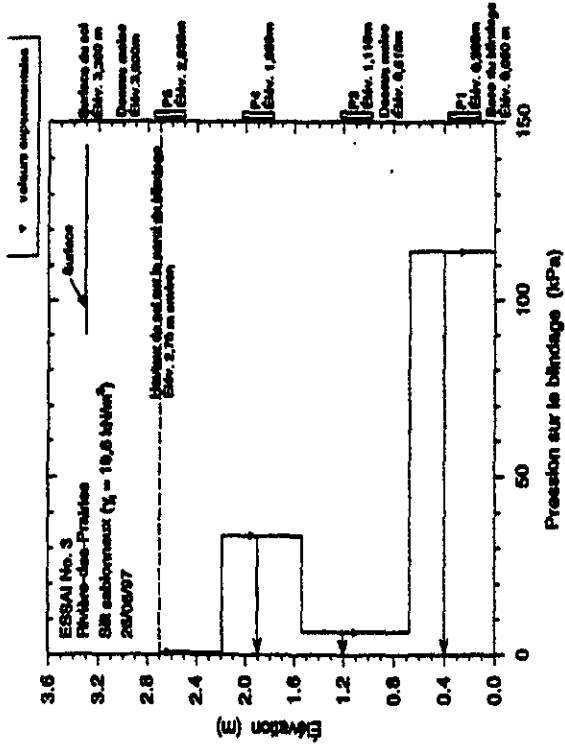


Essai No. 2B - Scénario de pression A sur la paroi du blindage

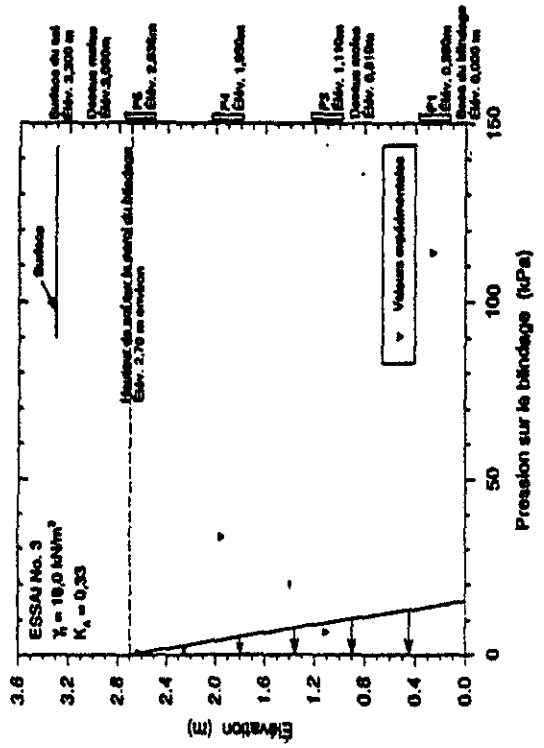


Essai No. 2B - Scénario de pression B sur la paroi du blindage

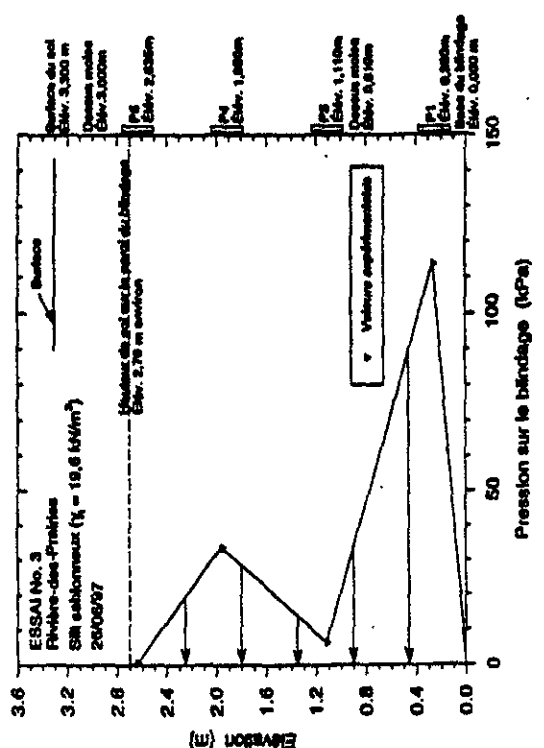
Figure 25 - Scénarios de pression des terres sur la paroi du blindage lors de l'essai N° 2B



1 Essai No. 3 - Scénario de pression C sur le paroi du blindage



· Essai No. 3 - Scénario de pression A sur le paroi du blindage



Essai No. 3 - Scénario de pression B sur le paroi du blindage

Figure 26 - Scénarios de pression des terres sur la paroi du blindage lors de l'essai N° 3

Tableau 20A - Poussées (charges) dans les moises longitudinales selon la méthode « D »

Charge uniformément répartie (w), kN/m											
Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	Expérimentale				Lan 1997		Résistance	
				Scénario B <sup>(e)</sup>	Scénario C <sup>(b)</sup>	Scénario D <sup>(c)</sup>	Scénario A <sup>(e)</sup>	w <sub>f</sub> <sup>(d)</sup> design	w <sub>r</sub> <sup>(f)</sup> théorique résistée par les moises min. à max. (10)	w théorique avec effet de rotule min. à max. (11)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
N° 1	10-06-97	MII	0,897	47,1	61,9	94,4	33,6	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1	
		MSI	3,262	15,5	13,3	58,3	4,9	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1	
N° 2A	11-06-97	MII	0,897	32,6	53,1	78,1	33,6	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1	
		MSI	3,262	13,7	10,7	48,3	4,9	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1	
N° 2B	11-06-97	MII	0,897	41,5	61,8	97,5	86,7	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1	
		MSI	3,262	21,5	21,1	60,2	37,8	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1	
N° 3	26-06-97	MII	0,747	88,3	108,9	--	20,2	25,0	30,3 à 38,4	31,2 à 41,1	
		MSI	2,962	6,1	0,3	--	1,5	4,0	9,6 à 19,6	9,1 à 21,1	

(a) Basée sur les pressions mesurées avec les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B2 de l'annexe C et figures 23 à 26.

(b) Basée sur les pressions mesurées avec les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B6 de l'annexe C et figures 23 à 26.

(c) Basée sur la pression maximale mesurée sur les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B7 de l'annexe C et figures 23 à 26.

(d) Charge uniformément répartie de design selon Lan et al. 1997, p. 16.

(e) Basée sur les valeurs Lan et al. 1997, p. 4, sans la réduction de 15 % de la poussée Rankine, voir les notes de calcul B1 et B4 de l'annexe C.

(f) Charge uniformément répartie correspondant aux moments résistants  $w_r = 8M_r/L^2$ .

Rapport de recherche

Tableau 20B - Moments fléchissants dans les moises longitudinales selon la méthode « D »

Essai (1)	Date (2)	N° moise (3)	N° instrument (4)	Élévation (m) (5)	Moments fléchissants, kNm						Résistance $M_r$ moises <sup>(f)</sup> (11)
					Expérimental			Lan 1997			
					Scénario B <sup>(e)</sup> (6)	Scénario C <sup>(e)</sup> (7)	Scénario D <sup>(e)</sup> (8)	Scénario A <sup>(e)</sup> (9)	$M_r$ design <sup>(e)</sup> (10)		
N° 1	10-06-97	MII	J1	0,897	28,6	37,6	57,3	20,4	15,2	25,6	
			J2	0,897	18,0	23,6	36,0	12,8	9,5	32,4	
			J3	0,897	28,6	37,6	57,2	20,4	15,2	32,4	
		MSI	J4	3,262	9,4	8,1	35,4	3,0	2,4	8,1	
			J5	3,262	5,7	4,8	21,2	1,8	1,5	16,6	
			J6	3,262	9,4	8,1	35,4	3,0	2,4	16,6	
N° 2A	11-06-97	MII	J1	0,897	19,8	32,3	47,5	20,4	15,2	25,6	
			J2	0,897	12,5	20,3	29,8	12,8	9,5	32,4	
			J3	0,897	19,8	32,3	47,4	20,4	15,2	32,4	
		MSI	J4	3,262	8,3	6,5	29,8	3,0	2,4	8,1	
			J5	3,262	5,0	3,9	17,6	1,8	1,5	16,6	
			J6	3,262	8,3	6,5	29,3	3,0	2,4	16,6	
N° 2B	11-06-97	MII	J1	0,897	25,2	37,5	59,2	52,6	15,2	25,6	
			J2	0,897	15,8	23,6	37,2	33,1	9,5	32,4	
			J3	0,897	25,2	37,6	59,2	52,6	15,2	32,4	
		MSI	J4	3,262	13,1	12,8	36,6	23,0	2,4	8,1	
			J5	3,262	7,8	7,7	21,9	13,7	1,5	16,6	
			J6	3,262	13,1	12,8	36,5	23,0	2,4	16,6	
N° 3	26-06-97	MII	J1	0,747	53,6	66,1	7,7	7,7	15,2	25,6	
			J2	0,747	33,7	41,5	12,2	12,2	9,5	32,4	
			J3	0,747	53,6	66,1	0,9	0,9	15,2	32,4	
		MSI	J4	2,962	3,7	0,2	0,6	0,6	2,4	8,13	
			J5	2,962	2,2	0,1	0,9	0,9	1,5	16,6	
			J6	2,962	3,7	0,2	0,6	0,6	2,4	16,6	

(a) Basée sur les pressions mesurées avec les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B5 de l'annexe C et figures 23 à 26.

(b) Basée sur les pressions mesurées avec les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B6 de l'annexe C et figures 23 à 26.

(c) Basée sur la pression maximale mesurée sur les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B7 de l'annexe C et figures 23 à 26.

(d) Basée sur les valeurs Lan et al. 1997, p. 4, sans la réduction de 15 % de la poussée du Coulomb, voir les notes de calcul B1 et B4 de l'annexe C.

(e) Basée sur les charges uniformément réparties de design selon Lan et al. 1997, p. 16, aux positions des jauges sur les moises longitudinales.

(f) Basée sur la valeur du moment résistant aux positions des jauges sur les moises longitudinales.

Tableau 20C - Réactions (cisaillements) dans les moises longitudinales selon la méthode « D »

Essai (1)	Date (2)	N° moise (3)	N° instrument (4)	Élévation (m) (5)	Réactions (cisaillement), kN					Résistance V <sub>r</sub> moises <sup>(g)</sup> (11)
					Expérimental			Lan 1997		
					Scénario B <sup>(a,b)</sup> (6)	Scénario C <sup>(a,c)</sup> (7)	Scénario D <sup>(a,d)</sup> (8)	Scénario A <sup>(a,e)</sup> (9)	V <sub>r</sub> design <sup>(f)</sup> (10)	
N° 1	10-06-97	MI3	J7	0,897	-59,5	-78,2	-119,2	-42,4	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	-59,5	-78,2	-119,2	-42,4	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-19,6	-16,8	-73,6	-6,2	-5,1	
		MS4	J10	3,262	-19,6	-16,8	-73,6	-6,2	-5,1	
N° 2A	11-06-97	MI3	J7	0,897	-41,2	-67,1	-98,7	-42,4	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	-41,2	-67,1	-98,7	-42,4	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-17,3	-13,6	-60,9	-6,2	-5,1	
		MS4	J10	3,262	-17,3	-13,6	-60,9	-6,2	-5,1	
N° 2B	11-06-97	MI3	J7	0,897	-52,4	-78,0	-123,1	-109,5	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,897	-52,4	-78,0	-123,1	-109,5	-31,6	
		MS3	J9	3,262	-27,2	-26,6	-76,0	-47,6	-5,1	
		MS4	J10	3,262	-27,2	-26,6	-76,0	-47,6	-5,1	
N° 3	26-06-97	MI3	J7	0,747	-111,5	-137,5		-25,5	-31,6	253,6
		MI4	J8	0,747	-111,5	-137,5		-25,5	-31,6	
		MS3	J9	2,962	-7,7	-0,4		-1,9	-5,1	
		MS4	J10	2,962	-7,7	-0,4		-1,9	-5,1	

Compression (-); traction (+).

Basée sur les pressions mesurées avec les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B5 de l'annexe C.

Basée sur les pressions mesurées avec les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B6 de l'annexe C.

Basée sur la pression maximale mesurée sur les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 et B7 de l'annexe C.

Basée sur les valeurs Lan et al. 1997, p. 4, sans la réduction de 15 % de la poussée du Coulomb, voir les notes de calcul B1 et B4 de l'annexe C.

Basée sur les charges uniformément réparties de design selon Lan et al. 1997, p. 16.

Basée sur la résistance au cisaillement des parois des HSS des moises.

(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g)



Tableau 20D - Déplacement des moises longitudinales selon la méthode « D »

Essai	Date	N° moise	Élévation (m)	Expérimental				Lan 1997			Déplacement correspondant à $M_n$	
				Scénario B <sup>(a,b)</sup>	Scénario C <sup>(a,c)</sup>	Scénario D <sup>(a,d)</sup>	Scénario A <sup>(a,e)</sup>	$\Delta_{design}^{(f)}$	$\Delta$ basée sur section uniforme <sup>(g)</sup> min. à max. (10)	$\Delta$ avec effet de rotule <sup>(h)</sup> min. à max. (11)		
				(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)		
N° 1	10-06-97	MII	0,897	-22,7	-29,8	-45,4	-16,2	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0		
		MSI	3,262	-24,9	-21,3	-93,4	-7,9	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5		
N° 2A	11-06-97	MII	0,897	-15,7	-25,6	-37,6	-16,2	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0		
		MSI	3,262	-21,9	-17,2	-77,3	-7,9	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5		
N° 2B	11-06-97	MII	0,897	-20,0	-29,7	-46,9	-41,7	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0		
		MSI	3,262	-34,5	-33,7	-96,5	-60,5	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5		
N° 3	26-06-97	MI1	0,747	-42,5	-52,4		-9,7	-12,0	29 à 37	16,7 à 22,0		
		MS1	2,962	-9,8	-0,5		-2,4	-6,4	41 à 84	17,7 à 37,5		

(a) Déplacement des moises vers l'intérieur de l'étaiement (-); vers l'extérieur de l'étaiement (+).

(b) Voir tableau 5.

(c) Basée sur les pressions mesurées avec les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 à B6 de l'annexe C.

(d) Basée sur la pression maximale mesurée avec les cellules de pression totale, voir les notes de calcul B1 à B7 de l'annexe C.

(e) Basée sur les valeurs de Lan et al. 1997, p. 4 sans la réduction de 15 % de la poussée de Coulomb, voir les notes de calcul B1 à B4 de l'annexe C.

(f) Basée sur les charges uniformément réparties de design selon Lan et al. 1997, p. 16, aux positions des jauges sur les moises longitudinales.

(g)  $\Delta^{min} = 5W_n L^4/384EJ^{male}$ ;  $\Delta^{max} = 5W_n L^4/384EJ^{female}$ ;  $W_n = 8M_n/L^2$

(h) Moment nominal  $M_n = M_f/\phi_s$ ;  $\Delta^{MI} = -0,48144 W_n$ ;  $\Delta^{MS} = -1,6022 W_n$

## 11.6 Synthèses des résultats

À la lumière des résultats présentés ci-haut, force est de constater que les quatre méthodes basées sur l'expérimentale donnent des résultats différents. Il importe maintenant de les comparer afin d'identifier les méthodes les plus fiables. La synthèse des résultats sur la base de cette identification permettrait de comparer avec les hypothèses de design d'une part et de formuler des recommandations d'autre part. Par conséquent, pour chacune des quantités structurales retenues (poussées, moments, cisaillements et flèches), les résultats seront analysés en fonction des méthodes d'évaluation A, B, C et D.

### 11.6.1 Poussées (charges) sur les moises

Le tableau 21 résume les résultats des poussées obtenus par les quatre méthodes d'évaluation retenues pour fins d'analyse et de comparaison. Les colonnes (3) à (7) donnent les valeurs expérimentales des charges sur les moises. La colonne (8) donne la charge de design. Pour la méthode D, seuls les scénarios B et C sont retenus pour analyse, car ils donnent des valeurs s'écartant de celles observées en chantier.

Les résultats montrent que les valeurs expérimentales selon les méthodes A (Jauges sur MI1 et MS1) et B (Jauges sur moises transversales) sont nettement inférieures à celles des méthodes C (extensométrie) et D (cellule de pression totale). Les lectures selon les méthodes C et D sont les plus fiables puisqu'elles sont des mesures directes de flèches et de poussées. Elles évitent donc le cumul des erreurs de conversion. D'autre part, aux lectures des jauges, la mesure des poussées se fait à l'amont et ne subit donc pas les interférences inhérentes au cheminement et transfert de charges et qui peuvent être non négligeables dans le cas du VM2, compte tenu des jeux entre les pièces d'assemblage du VM2. Par ailleurs, les mesures de poussées et d'extensométrie sont directes et donc fiables, contrairement aux valeurs extrapolées à partir des lectures des jauges.

Partant de cette hypothèse, qui du reste sera retenue pour la suite de cette étude, les résultats montrent que les valeurs des méthodes C et D sont de même ordre de grandeur et sont nettement supérieures aux valeurs de design. Par ailleurs, elles restent supérieures aux valeurs théoriques correspondant à la résistance des moises (colonne 9) dans les moises inférieures (MI) et comparables aux valeurs théoriques dans les moises supérieures (MS). Il faut noter ici que les valeurs les plus élevées sont celles relatives à la méthode C (extensométrie). En réalité, ces valeurs correspondent aux flèches totales lues et pourraient contenir en plus des déplacements reliés au flambement des

moises transversales supposés négligeables, un déplacement initial attribuable à la rotule. Ce déplacement initial estimé à 4 mm environ, représente 11 % sur le déplacement maximum (voir tableau 20D). Il est important de noter que les lectures extensométriques sont prises après la mise à zéro des extensomètres immédiatement après le chargement des trois autres faces non instrumentées du VM2. Les lectures sont donc entièrement attribuables aux déplacements des moises du côté instrumenté. Si l'on retranche de  $w$ , méthode C (colonne 6), ce pourcentage, la valeur réelle se rapprocherait davantage de celles de la méthode D.

### ***11.6.2 Moments fléchissants***

Le tableau 22 donne les résultats pertinents pour les quatre méthodes d'évaluation. Là aussi, en plus des valeurs expérimentales, les moments de design et de résistance (colonnes 8 et 9) sont également présentés pour fins de comparaison.

Encore ici, les valeurs expérimentales selon les méthodes A et B sont nettement inférieures à celles des méthodes C et D. On observe que les valeurs selon ces dernières méthodes sont nettement supérieures aux valeurs de design. Par ailleurs, elles sont supérieures aux moments de résistance dans les moises inférieures (MI) et leur sont comparables dans les moises supérieures (MS).

### ***11.6.3 Forces de cisaillement***

Les forces de cisaillement expérimentales, de design et de résistance sont résumées dans le tableau 23. Les valeurs expérimentales selon les méthodes C et D sont nettement supérieures à celles des méthodes A et B ainsi que celles des valeurs de design. Elles restent néanmoins bien en deçà des valeurs de résistance.

### ***11.6.4 Déplacements (flèches)***

Le tableau 24 regroupe les déplacements (flèches) expérimentaux selon les différentes méthodes ainsi que les flèches de design et ceux correspondant au moment nominal des moises, ( $\Delta_n$ ) pour comparaison et analyse.

On observe que les valeurs expérimentales selon les méthodes C et D sont du même ordre de grandeur, en particulier si l'on tient compte du déplacement initial dû à la rotule. Elles sont nettement supérieures aux valeurs de design. Par ailleurs, elles sont généralement plus élevées que

les valeurs de  $\Delta_n$  dans les moises supérieures. Il peut être instructif de noter que le déplacement maximum atteint par la méthode C est de 37.1 mm (Essai N° 1) soit de l'ordre de  $L/70$ , ce qui est élevé pour une structure normale.

**Tableau 21 - Comparaison des charges sur les moises longitudinales (kN/m) selon les méthodes A, B, C et D**

Essai	Moise	w Méthode A (3)	w Méthode B (4)	w Méthode C (5)	w Méthode D (Scénario B) (6)	w Méthode D (Scénario C) (7)	w <sub>r</sub> Design (8)	w Théorique avec effet de rotule min. à max. (9)
N° 1	MI	8,7	14,8	77,1	47,1	61,9	25,0	31,2 à 41,1
	MS	--	9,3	14,5	15,5	13,3	4,0	9,1 à 21,1
N° 2A	MI	9,2	(1,3)	59,4	32,6	53,1	25,0	31,2 à 41,1
	MS	--	9,4	11,8	13,7	10,7	4,0	9,1 à 21,1
N° 2B	MI	11,7	(1,3)	66,3	41,5	61,8	25,0	31,2 à 41,1
	MS	--	11,6	18,0	21,5	21,1	4,0	9,1 à 21,1
N° 3	MI	17,2	17,4	58,4	88,3	108,9	25,0	31,2 à 41,1
	MS	9,8	0,1	(-3,5)	6,1	0,3	4,0	9,1 à 21,1

0 Valeurs estimées.

Tableau 22 - Comparaison des moments fléchissants sur les moises longitudinales (kN.m) selon les méthodes A, B, C et D

Essai	Moise	M Méthode A	M Méthode B	M Méthode C	M Méthode D (Scénario B)	M Méthode D (Scénario C)	M <sub>r</sub> Design	M <sub>r</sub> <sup>(a)</sup>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
N° 1	MI	(5,9)	(9,0)	46,8	28,6	37,6	15,2	25,6
	MS	(1,2)	5,6	8,8	9,4	8,1	2,4	8,1
N° 2A	MI	(6,3)	(0,8)	36,1	19,8	32,3	15,2	25,6
	MS	(1,4)	5,6	7,2	8,3	6,5	2,4	8,1
N° 2B	MI	(8,4)	(0,8)	40,3	25,2	37,5	15,2	25,6
	MS	(3,5)	7,0	10,9	13,1	12,8	2,4	8,1
N° 3	MI	12,2	10,6	35,5	53,6	66,1	15,2	25,6
	MS	1,2	0,1	(2,1)	3,7	0,2	2,4	8,1

(a) Basée sur la poutre mâle.

() Moment estimé.

**Tableau 23 - Comparaison des forces de cisaillement maximales (kN) dans les moises longitudinales selon les méthodes A, B, C et D**

Essai	Moise	V Méthode A (3)	V Méthode B (4)	V Méthode C (5)	V Méthode D (Scénario B) (6)	V Méthode D (Scénario C) (7)	V <sub>r</sub> Design (8)	V <sub>r</sub> (9)
N° 1	MI	-10,9	11,6	-97,3	-59,5	-78,2	-31,6	253,6
	MS	--	-13,0	-18,3	-19,6	-16,8	-5,1	151,8
N° 2A	MI	-11,5	0,5	-75,0	-41,2	-67,1	-31,6	253,6
	MS	--	-12,6	-14,9	-17,3	-13,6	-5,1	151,8
N° 2B	MI	-14,8	-0,5	-83,7	-52,4	-78,0	-31,6	253,6
	MS	--	-16,2	-22,8	-27,2	-26,6	-5,1	151,8
N° 3	MI	-22,5	-31,5	-73,7	-111,5	-137,5	-31,6	253,6
	MS	-12,4	-4,0	-4,4	-7,7	-0,4	-5,1	151,8

**Tableau 24 - Comparaison des déplacements (flèches) (mm) dans les moises longitudinales selon les méthodes A, B, C et D**

Essai	Moise	$\Delta$ Méthode A (3)	$\Delta$ Méthode B (4)	$\Delta$ Méthode C (5)	$\Delta$ Méthode D (Scénario B) (6)	$\Delta$ Méthode D (Scénario C) (7)	$\Delta$ Design (Lan, 1997) (8)	$\Delta_n^{(e)}$ (9)
N° 1	MI	-4,2	7,2	-37,1	-22,7	-29,8	-12,0	[16,7 - 22,0]
	MS	--	-14,4	-23,2	-24,9	-21,3	-6,4	[17,7 - 37,5]
N° 2A	MI	-4,4	0,7	-28,6	-15,7	-25,6	-12,0	[16,7 - 22,0]
	MS	--	-15,1	-18,9	-21,9	-17,2	-6,4	[17,7 - 37,5]
N° 2B	MI	5,6	0,6	-31,9	-20,0	-29,7	-12,0	[16,7 - 22,0]
	MS	--	-18,6	-23,0	-34,5	-33,7	-6,4	[17,7 - 37,5]
N° 3	MI	-8,5	-8,4	-28,1	-42,5	-52,4	-12,0	[16,7 - 22,0]
	MS	-15,7	0,2	5,6	-9,8	-0,5	-6,4	[17,7 - 37,5]

(e)  $\Delta_n$  correspond au moment nominal ( $M_n$ ).



## 12. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

### 12.1 Synthèse

La présente étude visait à évaluer la performance du VM2 sous des conditions de chantier typiques de la région de Montréal et des conditions typiques des municipalités du Québec. Pour réaliser cette étude, deux objectifs spécifiques ont été définis : (a) évaluation expérimentale des hypothèses reliées à la poussée des terres et (b) évaluation expérimentale du comportement structural du système d'éтанçonnement en vue d'une comparaison avec les valeurs de conception.

Quatre essais ont été réalisés sur deux sites ciblés. Les essais N<sup>os</sup> 1, 2A et 2B ont été réalisés à la carrière Francon alors que l'essai N<sup>o</sup> 3 a été réalisé au site d'enfouissement de Rivière-des-Prairies. L'essai N<sup>o</sup> 1 a été réalisé avec un matériau granulaire fortement hétérogène. Ce type de sol est largement répandu sur l'île de Montréal. L'essai N<sup>o</sup> 2A a été réalisé avec un sable propre et uniforme. L'essai N<sup>o</sup> 2B a été réalisé en ajoutant une surcharge statique de 25 kPa au sable propre et uniforme de l'essai N<sup>o</sup> 2A. Le matériau de ces essais a été choisi pour représenter le cas de chargement à la base de la conception du VM2. Dans les trois premiers essais cités, les pressions de terre se développaient au fur et à mesure du déversement du matériau de remblayage en fond d'excavation du côté de la paroi instrumentée. Le quatrième essai (essai N<sup>o</sup> 3) a été réalisé à Rivière-des-Prairies dans un matériau silto-sablonneux. Le but poursuivi par cet essai était surtout d'évaluer le comportement du VM2 lors d'un accident provoqué par le glissement brusque des parois verticales de l'excavation sur le blindage. À noter que la rupture a été provoquée par la poussée du godet de la pelle mécanique sur le sol, ce qui aurait pu influencer défavorablement (à la hausse) les poussées des terres mesurées lors de cet essai.

La performance du VM2 a été évaluée d'après les quatre critères suivants :

- Les poussées des terres;
- Les moments fléchissants dans les moises;
- Les forces de cisaillement;
- Les déplacements.

Quatre types d'instrumentation ont été utilisés : (a) les jauges de déformations fixées sur les moises longitudinales, les jauges de déformations fixées sur les moises transversales, les extensomètres et les cellules de pression totale fixées sur le blindage de bois.

## 12.2 Conclusion

Lors de tous les essais (N<sup>os</sup> 1, 2a, 2B et 3), aucune rupture globale ou locale des éléments structuraux du VM2, ou abandon de charges ou manifestation d'une déformation plastique structurale n'a été observée, malgré le fait que les conditions d'essais étaient plus sévères que les hypothèses utilisées pour la conception du VM2. Cependant, plusieurs difficultés ont été rencontrées lors des manipulations du VM2. Le cadre en aluminium manque de rigidité d'ensemble. Des bris de montants verticaux du VM2 et des soudures de certains étriers ont été observés durant le transport et pendant l'enlèvement du cadre de l'excavation. De plus, le positionnement du VM2 à l'intérieur de l'excavation s'est révélé une opération délicate, notamment lorsque la qualité mécanique du terrain est médiocre. Le transfert de la poussée sur le blindage vers les moises ne se fait pas de manière satisfaisante comme cela était prévu par le concepteur à cause de défauts de fabrication des assemblages et des joints du VM2. Ces problèmes peuvent être résolus lors de la fabrication du VM2 en assurant un contrôle adéquat de la qualité des soudures.

Les résultats expérimentaux obtenus par lectures des pressions totales et extensométriques (méthodes C et D) montrent que les poussées des terres sont conformes à celles observées expérimentalement par Terzaghi, K., Peck, R.B. et Mesri, G. (Terzaghi, K. et Peck, R.B. et Mesri, G., 1996). Elles ne suivent pas la distribution triangulaire supposée par les concepteurs; elles sont plutôt en forme de dents de scie. Les poussées mesurées sont supérieures en intensité aux valeurs utilisées lors de la conception. Elles sont également supérieures aux valeurs théoriques correspondant à la résistance des moises dans les moises inférieures (MI) et comparables aux valeurs théoriques dans les moises supérieures (MS). Pour résister aux pressions mesurées par les méthodes C et D, il faudrait une moise faite d'un HSS 178 x 178 x 6,4 et d'un HSS 152 x 152 x 8,0, alors que la moise du VM2 soumise aux essais est faite d'un HSS 102 x 102 x 6,4 et d'un HSS 127 x 127 x 4,8. Ce changement de profilés engendrera un poids supplémentaire de 200 kg (440 livres) pour les quatre moises inférieures.

À la lumière des résultats expérimentaux, si les pressions mesurées par les méthodes C et D sont les pressions réelles qui agissent sur les moises du VM2, celles-ci auraient rupturé pendant les essais, plus particulièrement lors de l'essai avec la surcharge de blocs de béton. Or, aucune rupture n'a été observée pendant les essais. Par conséquent, les moises inférieures faites d'un HSS 102 x 102 x 6,4 et d'un HSS 127 x 127 x 4,8 sont suffisamment résistantes pour les cas de charges auxquelles elles ont été soumises. Il n'y a pas lieu de les remplacer par des profilés plus gros. Avec les aléas reliés à l'instrumentation et à l'expérimentation en conditions de chantier, une question se pose; peut-on

tracer la distribution de pression sur la paroi du blindage à partir de cinq mesures ponctuelles de cellules de pressions totales placées à différentes profondeurs du côté instrumenté (photo 19)? Nous pensons que des essais supplémentaires sont nécessaires pour corroborer les résultats obtenus par les méthodes C et D.

Les moments fléchissants expérimentaux (méthodes C et D) sont supérieurs aux valeurs de design. Ils sont supérieurs aux moments de résistance dans les moises inférieures (MI) et leur sont comparables dans les moises supérieures (MS). Les forces de cisaillement dans les moises bien que supérieures aux forces de cisaillement de calcul sont nettement inférieures aux cisaillements de résistance. Quant aux déplacements mesurés, ils sont nettement supérieurs aux valeurs de design. Ils sont de l'ordre de  $L/70$  dans les moises inférieures où  $L$  représente la portée de la moise, ce qui est élevé du point de vue structural.

Même si les résultats obtenus par lectures des pressions totales et extensométriques (méthodes C et D) indiquent que la moise inférieure est sous-dimensionnée pour les conditions de charges, il faut retenir que le VM2 a réussi avec succès à toute la campagne d'essais. Même si le VM2 a été soumis à des essais sévères aux conditions de chargement qui ne seront jamais atteintes dans les travaux municipaux courants, il n'y a pas de rupture globale ou de rupture locale d'une membrure et aucune déformation plastique excessive n'a été observée. Nous pouvons conclure que le VM2 est un système d'étançonnement sécuritaire qui répond aux besoins pour lesquels il a été conçu. Cependant, il ne convient pas aux sols mous ou très sensibles, en particulier lorsque la rupture des parois d'excavation peut survenir très rapidement et de façon subite.

### 13. RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus lors de la série de quatre essais sévères avec des conditions de chargement qui ne seront jamais atteintes lors des travaux courants dans les municipalités du Québec confirment que le VM2 est sécuritaire et qu'il rencontre son objectif principal qui est d'assurer la protection des travailleurs lors des travaux d'excavation en milieu urbain. Le cadre en aluminium du VM2 manque de rigidité. Ce cadre a été retenu lors de la conception du VM2 afin d'alléger le poids pour permettre la manutention manuelle. Puisque le VM2 est maintenant manutentionné avec une grue, le cadre peut être fait en acier ou les montants verticaux en aluminium peuvent être renforcés aux points faibles afin de prévenir les bris (figure 27). Les soudures en aluminium seront faites selon les normes en vigueur. Les connexions et les assemblages, y compris les étriers, devraient être revus afin de privilégier un cheminement adéquat des poussées dans la structure résistante. En incorporant cet ensemble de mesures relatives à la fabrication et au contrôle de la qualité, les plans et devis de la phase 1 peuvent être utilisés pour concevoir des systèmes VM2 pour les sols des municipalités du Québec.

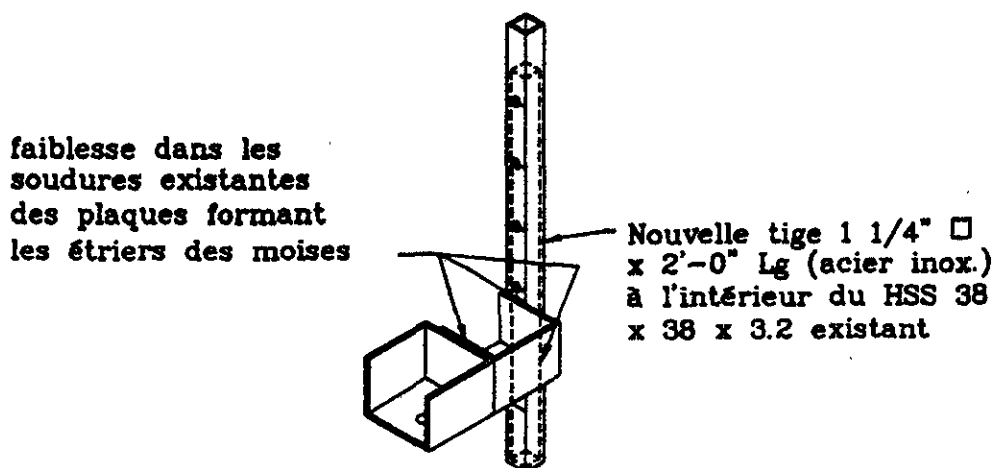


Figure 27 - Renforcement des montants du cadre d'aluminium

#### **14. REMERCIEMENTS**

Nous remercions le personnel du Service des travaux publics et du Laboratoire de la Ville de Montréal pour leur excellente collaboration dans le cadre de cette étude. La Ville de Montréal a fourni le VM2, les ressources matérielles, les ressources humaines et l'infrastructure pour réaliser les essais à la carrière Francon et au site d'enfouissement à Rivière-des-Prairies. Nous soulignons, entre autres, la contribution de monsieur Robert de Repentigny, contremaître, qui avec son équipe de cols-bleus ont assuré le bon déroulement et la qualité des essais de validation du VM2.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bouchard, P., « Tableau synthèse des accidents reliés à l'effondrement de parois d'excavation et enquêtés par les services d'inspection ». CSST. Document interne (1989).

Casagrande, L., « Comments on Conventional Design of Retaining Structures », *ASCE J. Soil Mech.*, vol. 99, N° SM2, (1973).

Dugré, J.-M., « Conception d'un étançonnement adapté au milieu urbain, Validation structurale », (1995).

Lafleur, J., « Safety code for workers in excavations upgraded in Quebec ». *Geotechnical News*, p. 38-39, (décembre 1986).

Lafleur, J., Silvestry, V., Asselin, R. et Soulié, M., « Short-term behaviour of a test excavation in soft Champlain Sea Clay ». *Can. Geotech. J.*, vol. 25, p. 705-715 (1988).

Lan, A., Arteau, J., Tremblay, M., Gamelin, S. et Dugré, J.-M., « Conception d'un étançonnement adapté au milieu urbain - Phase I », *Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec*, Rapport R-156, Montréal, (1997).

LeBoeuf, D. et Chaallal, O., « Conception d'un étançonnement adapté aux excavations en milieu urbain », Rapport N° ÉTS.LMS-DDSR.98.10, (octobre 1998).

Stanevick, R.L. et Middleton, D.C., « An explanatory analysis of excavation cave-in fatalities ». *Professional Safety*, p. 24-28, (février 1988).

Terzaghi, K., Peck, R.B. et Mesri, G., « Soil Mechanics in Engineering Practice », *3<sup>rd</sup> Edition*, *J. Wiley & Sons*, p. 549. (1996).

Tremblay, M., Projet de recherche conjointe IRSST / Ville de Montréal, « Conception d'un étançonnement adapté aux excavations en milieu urbain », (1995).

Tremblay, M., « Développement d'un nouveau système de blindage pour les tranchées de faible profondeur », APSAM, Colloque sur la sécurité dans les tranchées et les excavations, (1994).

# **ANNEXE A**

**INSTRUMENTATION : SCHÉMAS ET CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES**

Modèles	TPC-O, EPC	TPC-M
Applications	Sol	Ciment et roche
Liquide de remplissage	Huile	Mercure
Dimensions du plateau	23 cm (9 pouces) de diamètre Autres dimensions sur demande	
Épaisseur du plateau à pression normale	6,35 mm (0,25 pouces)	
Longueur hors tout de la cellule	Sans tube de repressuration 53 cm (21 pouces)	Avec tube de repressuration 84 cm (33 pouces)
Largeur hors tout de la cellule	23 cm (9 pouces)	
Diamètre du boîtier du transducteur de pression	3,5 cm (1,375 pouces)	
Champ d'opération nominal	25, 50, 100, 250, 500, 1000 et 3000 psi	
Sensibilité	0,1 % F.S. minimum	
Résolution	0,025 % F.S. minimum	
Précision	0,5 % F.S. minimum	
Champ d'opération du thermistor	-40 °C à + 65 °C (-40 °F + 150 °F)	
Précision du thermistor	±1 °C (±2 °F)	
Température d'opération	-29 °C à + 65 °C (-20 °F à +150 °F)	
Sensibilité thermique	0,1 % F.S./ °C (moins de 0,05 % F.S. / °F)	

Tableau A.1 : Caractéristiques techniques des cellules de pression totale - série TPC et ED



<b>Modèle:</b>	<b>SM-2W</b>
<b>Gamme de mesure:</b>	<b>3300 <math>\mu</math>déformation</b>
<b>Sensibilité moyenne:</b>	<b>0.1 <math>\mu</math>sec/<math>\mu</math>m/m</b>
<b>Température d'utilisation:</b>	<b>-40°C à +65°C</b>
<b>Thermistance:</b>	<b>Standard</b>
<b>Précision de la thermistance:0.5°C</b>	<b>0.5°C</b>
<b>Câble électrique:</b>	<b>4 conducteurs, 24 AWG avec blindage</b>
<b>Longueur active de la jauge:</b>	<b>5.08 cm (2 po.)</b>
<b>Facteur de la jauge:</b>	<b>0.3911</b>
<b>Dimensions hors-tout:</b>	<b>4.3 x 5.7 x 0.6 cm</b>
<b>Jauges incluant lamelles:</b>	<b>1.27 x 6.4 x 0.6 cm</b>
<b>Poste de lecture:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MB-6T</li> <li>- MB-6, MB-6L, MB-6LU &amp; ancien SR-11</li> <li>- Système d'Acquisition de Données SENS-LOG.</li> </ul>
<b>Outils d'installation:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gabarit de réglage</li> <li>- gabarit de perçage</li> <li>- feuille métallique (pour essai de soudure par points)</li> </ul>
<b>Options:</b>	<b>Protection contre la foudre monté à l'intérieur de l'assemblage bobine/aimant</b>
<b>Accessoires:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poste de soudure par points modèle 700, IRAD GAGE</li> <li>- Pincettes pour réglage de la tension initiale</li> <li>- Assemblage bobine/aimant pour la jauge (couvercle)</li> <li>- Outils d'installation</li> <li>- Ensemble à épissure étanche</li> </ul>
<b>Modèle optionnel:</b>	<b>SM-2W HOT pour haute température</b>

Tableau A.2 : Spécifications techniques de jauges extensométriques à corde vibrante IRAD-GAGE modèle SM-2W

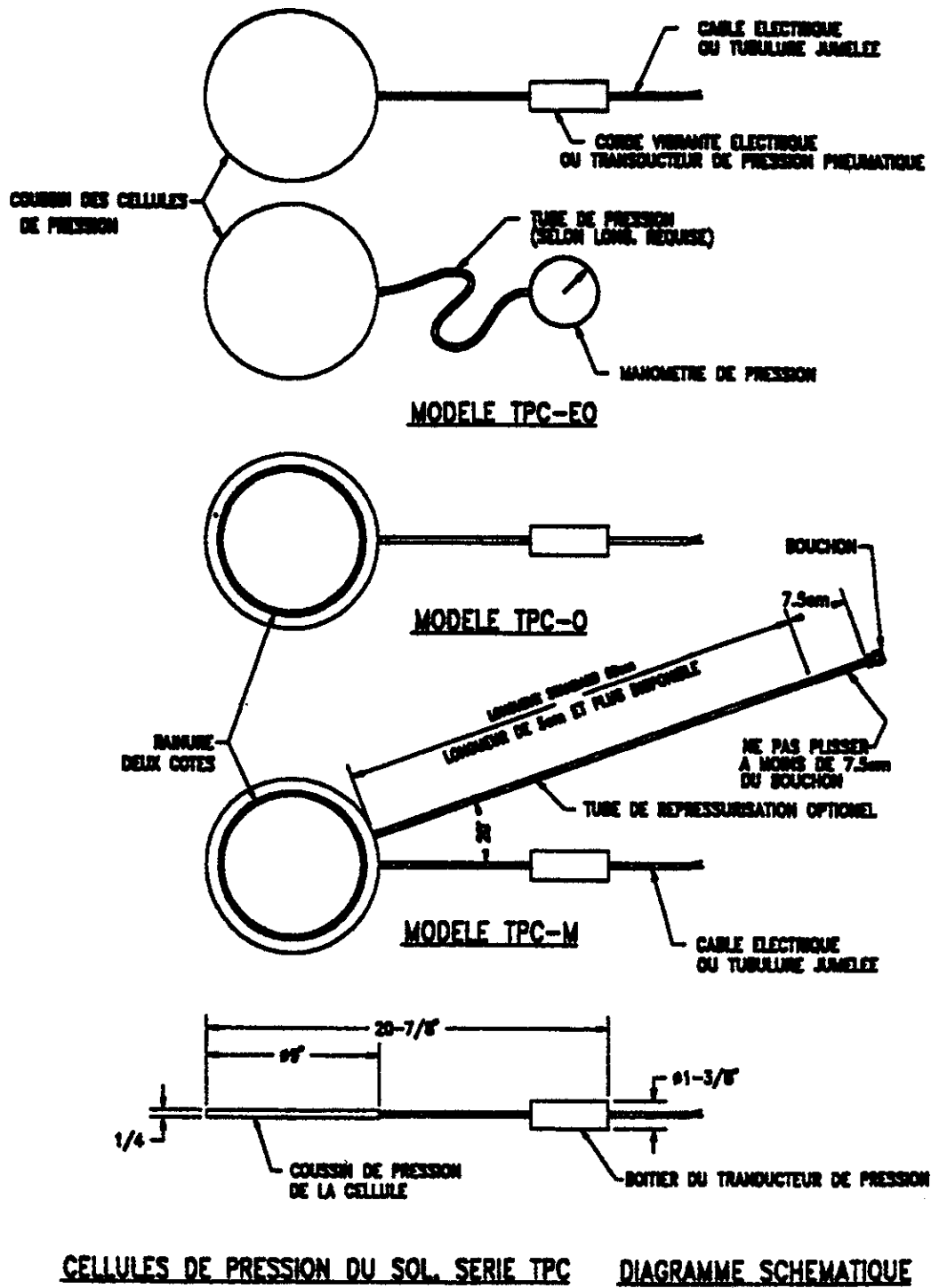
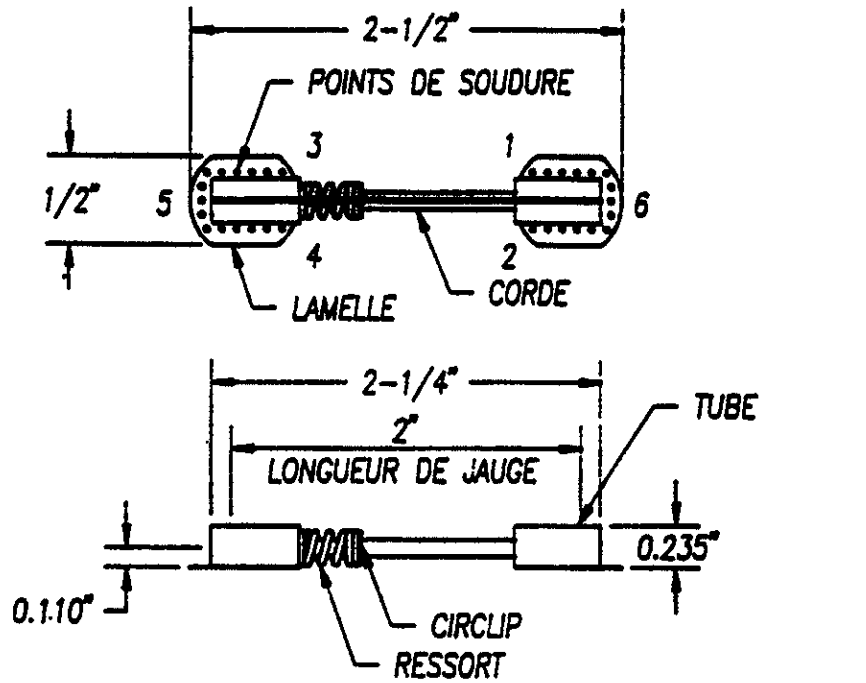


Figure A.1 : Cellules de pression du sol - série TPC  
 Diagramme schématique

### JAUGE EXTENSOMETRIQUE SM-2W



### ASSEMBLAGE BOBINE / AIMANT

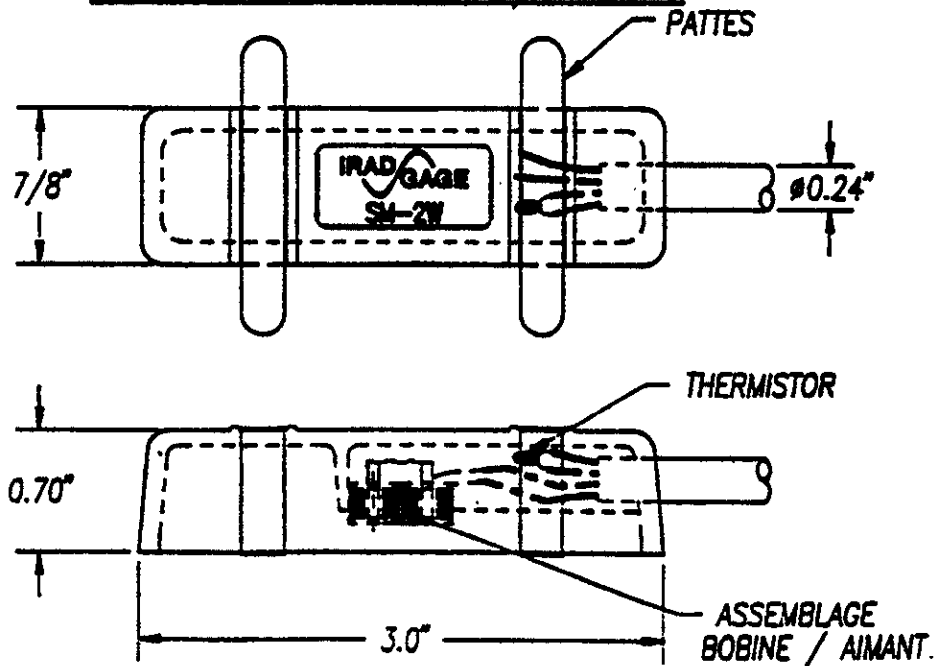
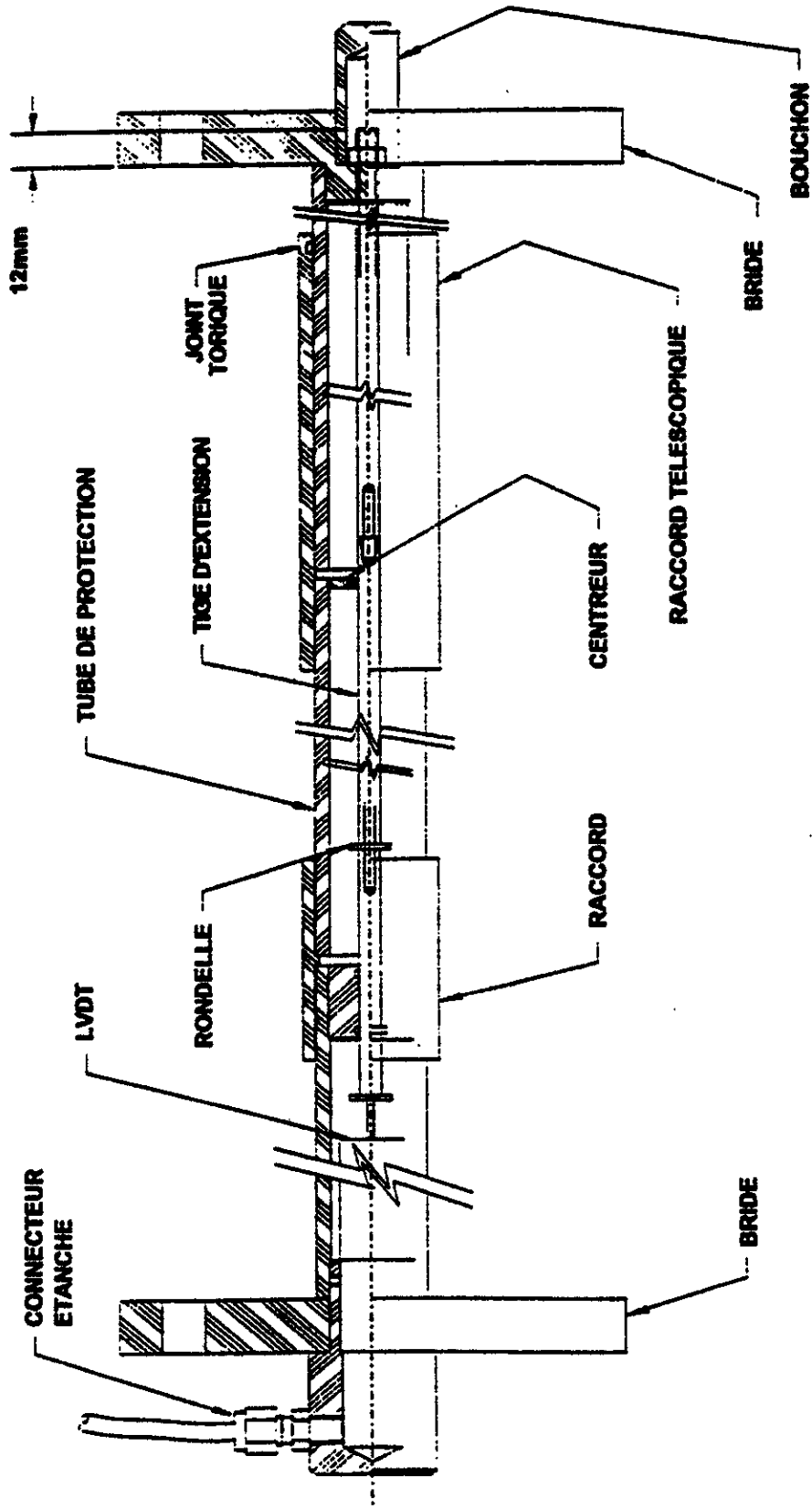


Figure A.2 : Jauge extensométrique à corde vibrante IRAD-GAGE, modèle SM-2W



**EXTENSOMETRE DE REMBLAI ERI-200**

Figure A.3 : Extensomètre de remblai ERI-200

# **ANNEXE B**

**DONNÉES GÉOTECHNIQUES DE LA VILLE DE MONTRÉAL**

**POUR LE SITE DE RIVIÈRE-DES-PRAIRIES**



**Ville de Montréal**  
 Service des travaux publics  
 Module du génie de l'environnement  
 Laboratoire  
 999, rue de Louvain Est  
 Montréal H2M 1B3

**Rapport d'analyse**  
 (Granulométrie)  
 BNQ 2501-25

Objet : IRSST/Recherche sur étançonnement VM-2 (phase 2), site R.D.P.	Numéro : 97GR61,62
Date de la demande : 97.06.26	Date du rapport : 97.12.16
Requérant : IRSST-ETS	Exécuté par : Bernard Jetté

Description: silt, un peu d'argile et de sable. Traces de petits herbages.

IDENTIFICATION		TAMISAGE		
		retenu cumulé	pourcentage retenu passant	
No. Laboratoire :	1660 H-28			
No. Sondage :	97GR61	112 mm	0.0	100.0
No. Echantillon :	1	80 mm	0.0	100.0
Profondeur de :	1.10 à 1.10	56 mm	0.0	100.0
		40 mm	0.0	100.0
		28 mm	0.0	100.0
Poids utilisés		20 mm	0.0	100.0
		14 mm	0.0	100.0
		10 mm	0.0	100.0
poids total :	454.9	5 mm	0.0	100.0
		2,50 mm	0.0	100.0
poids de la tare :	0.0	1,25 mm	0.1	100.0
sol humide + tare :	0.0	630 µm	0.4	99.9
sol sec + tare :	0.0	315 µm	0.7	99.8
poids total sec :	454.9	160 µm	3.0	99.3
teneur en eau (w %) :	0.0	80 µm	72.0	84.2

sédimentométrie HYDROMETRE 152H      tamis d'écritement : 80 µm  
 poids sec utilisé : 38.35  
 densité rel. estimée : 2.700      a : 0.990

Temps en minutes	TEMP. C	R	DR	Diamètre µm	% passant partiel	% passant total
2.00	24.7	29.0	5.4	30.7	60.9	51.3
5.00	24.7	22.8	5.4	20.3	44.8	37.8
15.00	24.7	20.0	5.2	11.9	38.2	32.2
30.00	24.6	17.9	5.2	8.5	32.7	27.6
60.00	24.5	16.3	5.2	6.1	28.6	24.1
120.00	24.3	15.4	5.2	4.4	26.3	22.2
242.00	24.1	14.0	5.2	3.1	22.6	19.1
1415.00	24.0	12.0	5.2	1.3	17.5	14.8

Vérifié par	Approuvé par	Ce rapport ne doit pas servir aux fins de publicité.	Le chef de division
-------------	--------------	--	---------------------

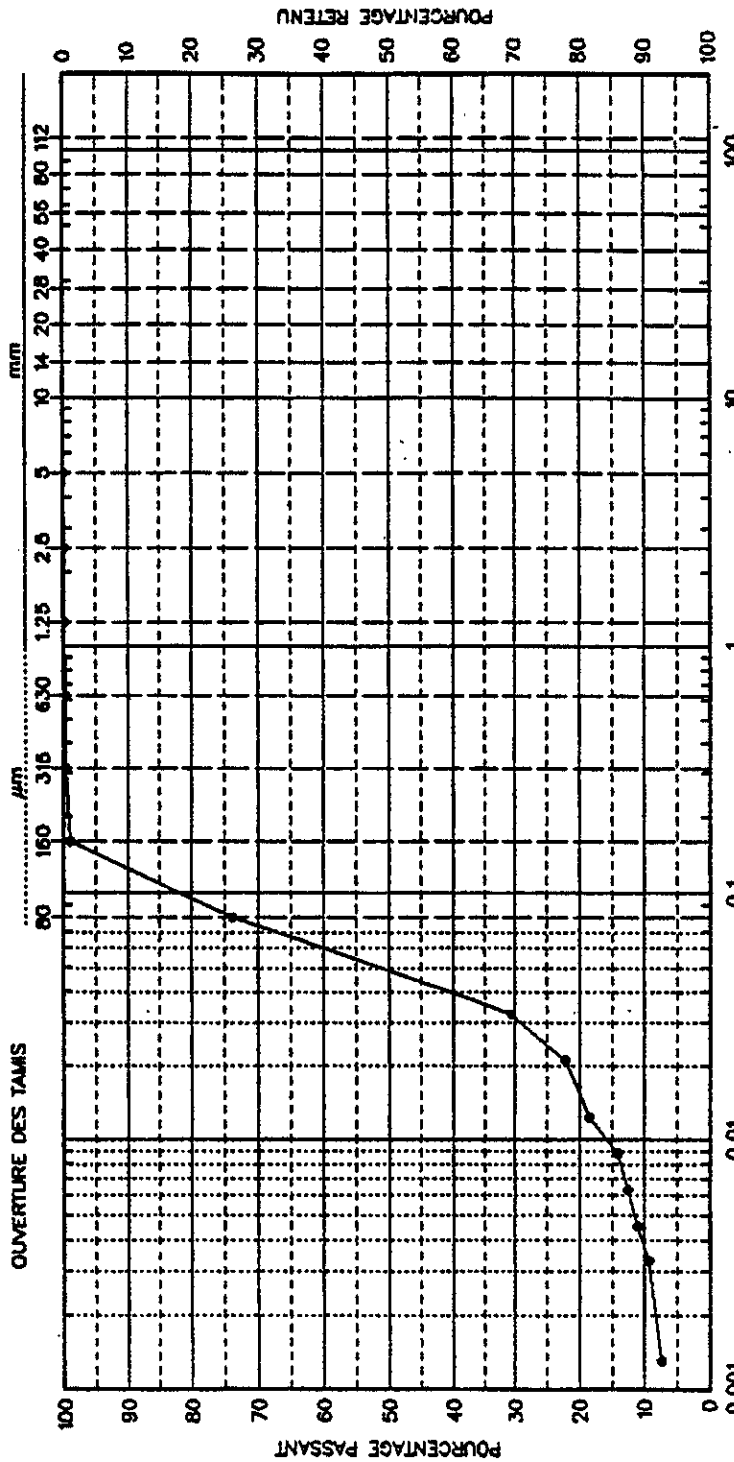
**Rapport d'analyse**  
Analyse granulométrique  
BNQ 2501-025

ECHANTILLON N°: 1661  
PROFONDEUR: 1.50 à 1.50  
DATE D'ESSAI: 97.07.04

PROJET: IRSST/Recherche sur étançonnement VM-2 (phase 2), site R.D.P.

LOCALISATION:

SONDAGE N°: 95F069-1 / 2



ARGILE ET SILT	SABLE		GRAVIER		CAILLOUX
	FIN	MOYEN	GROS	GROS	

Exécuté par *[Signature]* Vérifié par *[Signature]*

Le chef de division, *[Signature]*

Ce rapport ne doit pas servir aux fins de publicité.

08.02.174-B (02-01)



**Ville de Montréal**  
 Service des travaux publics  
 Module du génie de l'environnement  
 Laboratoire  
 999, rue de Louvain Est  
 Montréal H2M 1R3

**Rapport d'analyse**  
 (Teneur en eau)  
 BNQ 2501-170

Objet : IRSST/Recherche sur étançonnement VM-2 (phase 2), site R.D.P.	Numéro : 97GR61,62
	Date du rapport : 97.12.16
Date de la demande : 97.06.26	Exécuté par : Bernard Jetté
Requérant : IRSST-ETS	

Description: Silt, un peu d'argile et de sable. Traces de petits herbages.

**IDENTIFICATION**

No. Laboratoire : 1660 H-28  
 No. Sondage : 97GR61  
 No. Echantillon : 1  
 Profondeur de : 1.10 à 1.10

**Poids utilisés**

poids de la tare : 4778.00  
 sol humide + tare : 13204.00  
 sol sec + tare : 11426.00  
 poids total sec : 6648.00  
 teneur en eau (w %) : 26.7

Vérifié par 	Approuvé par 	Ce rapport ne doit pas servir aux fins de publicité.	Le chef de division 
-----------------	------------------	--	-------------------------







**Ville de Montréal**  
 Service des travaux publics  
 Module du génie de l'environnement  
 Laboratoire  
 999, rue de Louvain Est  
 Montréal H2M 1B3

**Rapport d'analyse**  
 (Granulométrie)  
 BNQ 2501-25

Objet : IRSST/Recherche sur étançonnement VM-2 (phase 2), site R.D.P.	Numéro : 957069
	Date du rapport : 98.04.15
Date de la demande : 95.05.15	Exécuté par : Bernard Jetté

Requérants: IRSST-ETS

Description: silt sableux, traces d'argile. Traces de petite herbes.

IDENTIFICATION		TAMISAGE		
		retenu cumul.	pourcentage retenu passant	
No. Laboratoire :	1661 H-28			
No. Sondage :	1	112 mm	0.0	0.0
No. Echantillon :	2	80 mm	0.0	0.0
Profondeur de :	1.50 à 1.50	56 mm	0.0	0.0
		40 mm	0.0	0.0
		28 mm	0.0	0.0
		20 mm	0.0	0.0
		14 mm	0.0	0.0
		10 mm	0.0	0.0
		5 mm	0.1	0.0
		2,50 mm	0.2	0.1
		1,25 mm	0.4	0.1
		630 µm	0.7	0.2
		315 µm	1.2	0.3
		160 µm	3.5	1.0
		80 µm	94.2	26.2
Poids utilisés				
poids total :	360.0			
poids de la tare :	0.0			
sol humide + tare :	0.0			
sol sec + tare :	0.0			
poids total sec :	360.0			
teneur en eau (w %) :	0.0			

sédimentométrie HYDROMETRE 152H tamis d'écralement : 80 µm  
 poids sec utilisé : 39.48

densité rel. estimée : 2.700 a : 0.990

Temps en minutes	TEMP. C	R	DR	Diamètre µm	% passant	
					partiel	total
2.00	24.7	21.8	5.2	32.3	41.6	30.7
5.00	24.7	17.2	5.2	21.0	30.0	22.2
15.00	24.6	15.0	5.0	12.3	25.0	18.5
30.00	24.5	12.8	5.2	8.8	19.1	14.1
60.00	24.5	12.0	5.2	6.3	17.0	12.6
120.00	24.2	11.2	5.2	4.5	15.0	11.1
223.00	24.1	10.3	5.2	3.3	12.7	9.4
1396.00	24.0	9.2	5.2	1.3	10.0	7.4

Vérifié par 	Approuvé par 	Ce rapport ne doit pas servir aux fins de publicité.	Le chef de division 
-----------------	------------------	--	-------------------------

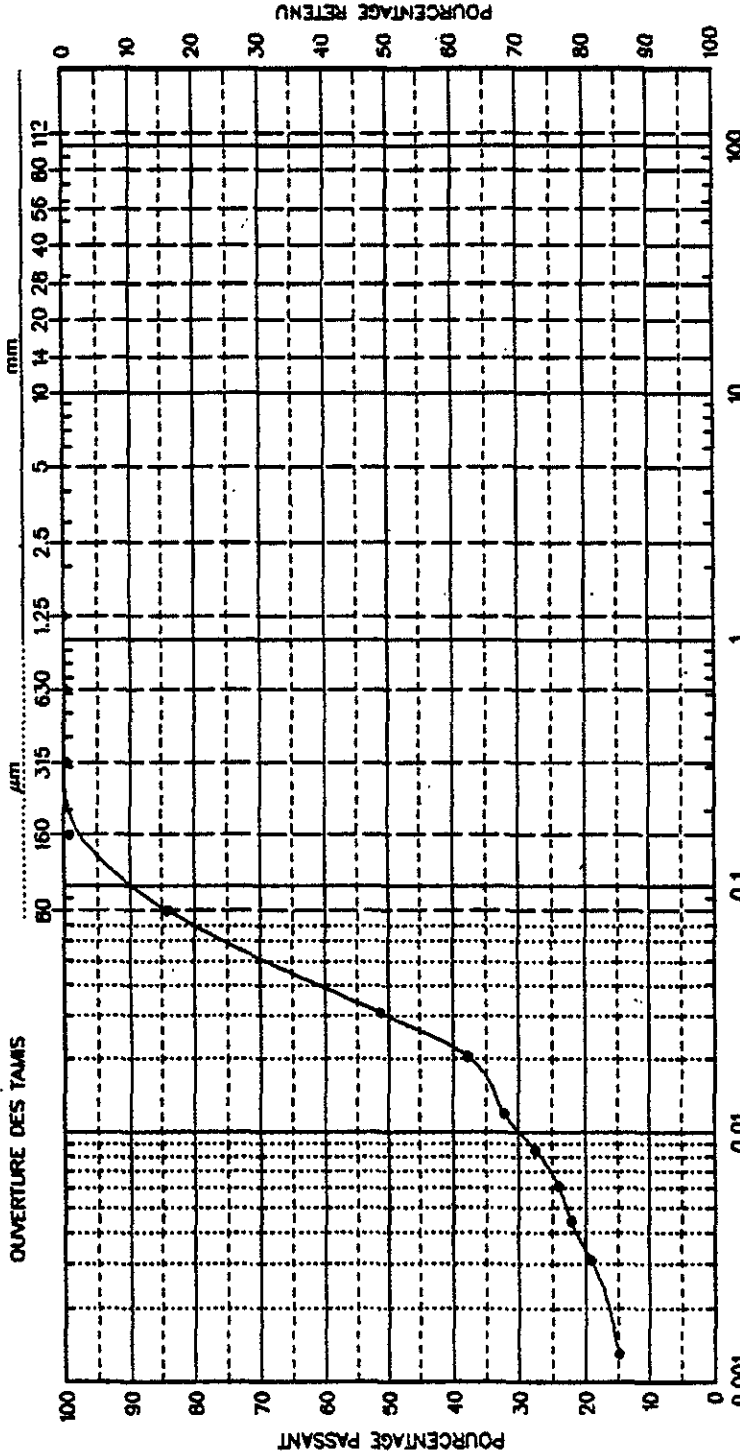
**Rapport d'analyse**  
 Analyse granulométrique  
 BNO 2501-025

ECHANTILLON N°: 1660  
 PROFONDEUR: 1.10 à 1.10  
 DATE D'ESSAI: 97.07.04

PROJET: IRSST/Recherche sur étançonnement VM-2 (phase 2), site R.D.P.

LOCALISATION:  
 SONDAGE N°: 97GR61,62-97GR61 / 1

Ville de Montréal  
 Service des travaux publics  
 Module du génie de l'environnement  
 Laboratoire  
 909, rue de Louvain Est  
 Montréal H2M 1B3



ARGILE ET SILT		SABLE		GRAVIER		CAILLOUX	
FIN	MOYEN	GROS	FIN	GROS	CAILLOUX	CAILLOUX	CAILLOUX
0.001	0.01	0.1	0.25	0.5	2	4.75	75

Exécuté par  
*[Signature]*  
 Vérifié par  
*[Signature]*  
 Le chef de division  
*[Signature]*

Ce rapport ne doit pas servir à des fins de publicité.

04.05.174.0 (p.1-2)



Ville de Montréal  
 Service des travaux publics  
 Module du génie de l'environnement  
 Laboratoire  
 999, rue de Louvain Est  
 Montréal H2M 1R3

## Rapport d'analyse

(Teneur en eau)  
 BNQ 2501-170

Objet : IRSST/Recherche sur étançonnement VM-2 (phase 2), site R.D.P.	Numéro : 95F069
	Date du rapport : 98.04.15
Date de la demande : 95.05.15	Exécuté par : Bernard Jetté
Requérant : IRSST-ETS	

Description: Silt sablonneux, traces d'argile. Traces de petits herbages.

### IDENTIFICATION

No. Laboratoire : 1661 H-28  
 No. Sondage : 1  
 No. Echantillon : 2  
 Profondeur de : 1.50 à 1.50

### Poids utilisés

poids de la tare	:	2517.00
sol humide + tare	:	15449.00
sol sec + tare	:	12652.00
poids total sec	:	10135.00
teneur en eau (w %)	:	27.6

Vérifié par 	Approuvé par 	Ce rapport ne doit pas servir aux fins de publicité.	Le chef de division 
-----------------	------------------	--	-------------------------



Rapport de recherche



**Ville de Montréal**  
 Service des travaux publics et  
 de l'environnement  
 Laboratoire  
 999, rue de Louvain Est  
 Montréal (Québec) H2M 1B3

**Rapport d'analyse**  
(compactage - nucléodensimètre)

<b>Objet</b> IRSST - ÉTS / Recherche conjointe, étançonnement VM-2 Site Rivière-des-Prairies Date de l'essai : 1997-06-26 Date de la demande	<b>Numéro</b> 95F-069F		
	<b>Date du rapport</b>	Année 98	Mois 07
	Jour 10		
	<b>Exécuté par</b> E. Gancia		

**Requérant**  
 IRSST - Direction des opérations - Programme sécurité-ingénierie

**Structure**  Fondation de chaussée      **Type de matériau** Silt sablonneux

Autre Sol en place au fond de l'excavation      **Entrepreneur**

Exigences	% Proctor	Optimum		Masse volumique humide
<input type="checkbox"/> Modifié <input type="checkbox"/> Standard <input type="checkbox"/> Plancher d'essai				

Essai no	Localisation Profondeur (m)	Teneur en eau en %	Masse volumique à sec en kg / m <sup>3</sup>	compactage en %
1	1,5	26,6	1592	2015
2	1,5	25,9	1590	2003

**Remarques**

Vérifié par ML/SB/ob	Ce rapport ne doit pas servir aux fins de publicité	Le chef de division 
-------------------------	---	-------------------------

# **ANNEXE C**

## **CONTENU DU DOSSIER DES NOTES DE CALCUL**

**P.S.**

**LES NOTES DE CALCUL DE L'ANNEXE C PEUVENT ÊTRE CONSULTÉES AU  
DÉPARTEMENT DE CONSTRUCTION DE L'ÉTS**

### A) INSTRUMENTATION : ÉTALONNAGE ET CALCULS-TYPES

Notes de calcul A1	:	Formule d'étalonnage cellules de pression totale. (Calcul type, calcul erreur de lecture + feuille d'étalonnage). Calcul effet température sur cellule.
Notes de calcul A2	:	Formule d'étalonnage extensomètre (Calculs types, feuille d'étalonnage)
Notes de calcul A3	:	Calculs types jauges de déformation A3.1 ⇔ Calcul pour moments fléchissants A3.2 ⇔ Calcul pour efforts axiaux
Notes de calcul A4	:	Calcul moment fléchissant à l'aide du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres.
Notes de calcul A5	:	Calcul efforts axiaux à l'aide du rapport des déplacements mesurés aux extensomètres.

### B) COMPARAISON DES MOMENTS OBTENUS AVEC LES MOMENTS OBTENUS PAR LES SCÉNARIOS DE PRESSION

Notes de calcul B1	:	Schémas scénario de pression A, B, C et D
Notes de calcul B2	:	Calcul scénario de pression A pour essais n° 1 et n° 2. (Toutes les équations de base sont présentées au début de l'annexe B2)
Notes de calcul B3	:	Calcul scénario de pression A pour essai n° 2B
Notes de calcul B4	:	Calcul scénario de pression A pour essai n° 3
Notes de calcul B5	:	Calcul scénario de pression B pour essais n° 1, 2A, 2B et 3
Notes de calcul B6	:	Calcul scénario de pression C pour essais n° 1, 2A, 2B et 3
Notes de calcul B7	:	Calcul scénario de pression D pour essais n° 1, 2A et 2B

**C) CALCUL DES DÉPLACEMENTS**

- Notes de calcul C1 : Considérations générales  
(La méthode et les équations et les calculs)
- Notes de calcul C2 : Calcul du déplacement à la position des extensomètres avec  
une charge uniformément répartie
- Notes de calcul C3 : Calculs types des déplacements avec scénario de pression  
(voir résultat Annexe B2 à B7)

**D) COMPARAISON DES VALEURS MESURÉES**

- Notes de calcul D1 : Comparaison des valeurs mesurées essai n° 1
- Notes de calcul D2 : Comparaison des valeurs mesurées essai n° 2A
- Notes de calcul D3 : Comparaison des valeurs mesurées essai n° 2B
- Notes de calcul D4 : Comparaison des valeurs mesurées essai n° 3