

50376
1996
252

Numéro d'ordre :

Année 1996

**Université des Sciences et Technologies de Lille
Laboratoire de Mécanique de Lille (URA CNRS 1441)**

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par

Stéphane QUEBAUD

ingénieur EUDIL en Géotechnique-Génie Civil

**pour obtenir le titre de DOCTEUR
de l'Université des Sciences et Technologies de Lille**

Spécialité Génie Civil

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU PERCEMENT DE GALERIES PAR BOUCLERS À PRESSION DE TERRE : AMÉLIORATION DU CREUSEMENT PAR L'UTILISATION DES PRODUITS MOUSSANTS

Soutenu le 18 juin 1996

Devant la commission d'examen formée de :

J.-P. HENRY	EUDIL	Directeur de thèse
F. HOMAND	ENSG	Rapporteur
R. KASTNER	INSA de Lyon	Rapporteur
E. LECA	LCPC	Examineur
M. MERMET	PN <i>Microtunnels</i>	Examineur
C. MIGNONAT	FCB	Examineur
E. MOREL	EUDIL	Examineur
A. SCHWENZFEIER	CETu	Examineur
I. SHAHROUR	EC Lille	Président
J.-F. SHAO	EUDIL	Examineur



REMERCIEMENTS

Le travail qui fait l'objet du présent mémoire a été effectué au sein de l'équipe Mécanique des Matériaux Fragiles du Laboratoire de Mécanique de Lille (URA CNRS 1441). Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont permis de mener à bien ce travail et plus particulièrement :

- Monsieur le Professeur Jean-Pierre HENRY, qui m'a accueilli et permis d'effectuer ce travail sous sa direction ;
- Madame HOMAND, Professeur à l'ENSG et Monsieur KASTNER, Professeur à l'INSA de Lyon, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail ;
- Messieurs LECA, du LCPC, MERMET, du Projet National *Microtunnels*, MIGNONAT, de FCB, MOREL et SHAO, de l'EUDIL, et SCHWENZFEIER, du CETu, pour leur participation au jury ;
- Monsieur SHAHROUR, Professeur à l'École Centrale de Lille, pour avoir présidé mon jury.

Je tiens à exprimer ma gratitude au Projet National *Microtunnels* qui m'a permis d'effectuer ce travail de recherche en assurant en partie son support financier.

Je remercie de même Madame RETIF, documentaliste au CETu, pour m'avoir si gentiment reçu et pour le temps qu'elle m'a accordé.

J'adresse également mes remerciements aux collègues et amis du laboratoire, dont le soutien et l'aide m'ont été très précieux au cours de ces années ; je citerai en particulier Malek SIBAÏ, ingénieur de recherche et Bruno HAUBREUX, technicien, qui m'ont permis de mener à bien le travail expérimental. Ma reconnaissance va tout particulièrement à Djimedo KONDO, Maître de Conférences à l'EUDIL, pour l'aide précieuse et les conseils judicieux qu'il m'a apportés dans la dernière ligne droite de ce travail.

Que mes amis proches soient remerciés pour leur soutien chaleureux tout au long de ma thèse.

Quant à mes parents, je ne peux que leur être reconnaissant, pour m'avoir permis d'arriver là où je suis.

Enfin, que dire de plus à mon fils Márcio - pour qui le fait de partager la vie de deux parents étudiants en thèse n'a pas toujours été des plus passionnants -, et à ma femme Mirian, qui, malgré le peu de temps dont elle disposait, a toujours su m'apporter réconfort et soutien, sinon qu'*ils sont formidables*.

*Science sans conscience
n'est que ruine de l'âme.*

(François Rabelais)

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DES BOUCLIERS À PRESSION DE BOUE ET À PRESSION DE TERRE	5
1. INTRODUCTION	6
2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	8
2.1. Le bouclier à pression de boue	8
2.2. Le bouclier à pression de terre	10
2.2.1. Le convoyeur à vis	12
3. COMPARAISON ENTRE LES DEUX TECHNIQUES	15
3.1. Domaine d'utilisation	15
3.2. Contrôle de la stabilité du front	18
3.2.1. Contrôle de l'excavation	18
3.2.2. Influence de la nature de l'agent de soutènement	19
3.2.3. Effet de la pression hydrostatique	20
3.2.4. Intervention dans la chambre	20
3.3. Traitement des déblais	21
3.4. Coût du tunnelier	22
4. CONCLUSION	26
CHAPITRE 2 : UTILISATION DES MOUSSES CHIMIQUES LORS DU PERCEMENT PAR BOUCLIERS À PRESSION DE TERRE	27
1. INTRODUCTION	28
2. UTILISATION DES MOUSSES	29
2.1. Le béton cellulaire	29
2.2. Les opérations de forage	31
3. CARACTÉRISATION DE LA MOUSSE	32

3.1. Les produits tensioactifs	32
3.1.1. Mode d'action	32
3.1.2. Familles de tensioactifs - Applications	33
3.2. Caractéristiques, formation et stabilité de la mousse	34
3.2.1. Caractéristiques	34
3.2.2. Processus de stabilité et de destruction	36
3.2.3. Comportement de la mousse sous pression	38
3.3. Génération	39
4. APPLICATION AUX TRAVAUX SOUTERRAINS	42
4.1. Action de la mousse sur le sol excavé	42
4.2. Procédé d'injection de mousse	44
4.2.1. Système de régulation de l'injection	46
4.2.2. Les adjuvants à la mousse	47
5. CONCLUSION	49

CHAPITRE 3 : MISE AU POINT D'UN LABORATOIRE D'ESSAIS DES PRODUITS MOUSSANTS **50**

1. INTRODUCTION	51
2. PRÉSENTATION DU LABORATOIRE D'ESSAIS DES PRODUITS MOUSSANTS	52
2.1. Caractérisation de la mousse	52
2.1.1. Les produits tensioactifs	52
2.1.1.1. <i>L'essai de moussage</i>	53
2.1.2. Génération de la mousse	55
2.1.3. Essais de caractérisation	56
2.1.3.1. <i>L'essai de génération</i>	56
2.1.3.2. <i>L'essai de consistance</i>	56
2.1.3.3. <i>L'essai de demi-vie</i>	58
2.1.3.4. <i>L'essai de comportement sous pression</i>	58
2.2. Caractérisation du mélange sol/mousse	59
2.2.1. L'essai de comportement	59
2.2.2. L'essai d'affaissement	61
2.2.3. L'essai d'adhérence	62
2.2.4. L'essai de perméabilité	62
2.2.5. L'essai d'imprégnation	65
	(ii)

3. RÉALISATION D'UNE CAMPAGNE D'ESSAIS	67
3.1. Choix des sols étudiés	67
3.2. Choix des produits testés	69
3.3. Démarche à suivre dans le cadre d'une étude	69
4. CONCLUSION	71
CHAPITRE 4 : ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX - RÉFLEXIONS GÉNÉRALES ET LIMITES DES ESSAIS RETENUS	72
<hr/>	
1. INTRODUCTION	73
2. CHOIX DES SOLS ET DES PRODUITS	74
2.1 Caractéristiques des sols étudiés	74
2.2 Évaluation des produits retenus	74
3. ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	77
3.1. Essais sur la mousse	77
3.1.1. L'essai de génération	77
3.1.2. L'essai de consistance	79
3.1.3. L'essai de demi-vie	80
3.1.4. L'essai de comportement sous pression	82
3.2. Essais sur le mélange sol/mousse	83
3.2.1. Essais réalisés avec le sol <i>S1</i>	83
3.2.1.1. <i>Résultats des essais de comportement de mélanges sol/mousse</i>	83
3.2.1.2. <i>Résultats des essais de perméabilité</i>	89
3.2.1.3. <i>Conclusions sur le sol S1</i>	89
3.2.2. Essais réalisés avec le sol <i>S2</i>	90
3.2.2.1. <i>Résultats des essais de comportement de mélanges sol/mousse</i>	90
3.2.2.2. <i>Résultats des essais de perméabilité</i>	95
3.2.2.3. <i>Résultats des essais d'imprégnation</i>	96
3.2.2.4. <i>Conclusions sur le sol S2</i>	97
3.2.3. Essais réalisés avec le sol <i>SG1</i>	100
3.2.3.1. <i>Résultats des essais de comportement de mélanges sol/mousse</i>	101
3.2.3.2. <i>Résultats des essais de perméabilité</i>	102
3.2.3.3. <i>Conclusions sur le sol SG1</i>	102
3.2.4. Essais réalisés avec le sol <i>L1</i>	103
3.2.4.1. <i>Conclusions sur le sol L1</i>	105

4. RÉFLEXIONS GÉNÉRALES ET LIMITES DES ESSAIS RETENUS	106
4.1. Essais sur la mousse	106
4.1.1. La génération de mousse	106
4.1.2. L'essai de demi-vie	108
4.2. Essais sur le mélange sol/mousse	109
4.2.1. L'essai de malaxage	109
4.2.2. L'essai d'affaissement	110
4.2.3. L'essai d'adhérence	110
4.2.4. L'essai de perméabilité	111
4.2.5. L'essai d'imprégnation	112
5. CONCLUSION	115
CONCLUSION GÉNÉRALE - PERSPECTIVES	117
<hr/>	
CONCLUSION GÉNÉRALE	118
PERSPECTIVES	119
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	121
<hr/>	
ANNEXES	128
<hr/>	
ANNEXE 1	129
ANNEXE 2	133
ANNEXE 3	137
ANNEXE 4	141
ANNEXE 5	145
ANNEXE 6	152
ANNEXE 7	157
ANNEXE 8	162
ANNEXE 9	163
ANNEXE 10	167

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1 :	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN BOUCLIER POUR TERRAINS MEUBLES.....	6
FIGURE 1-2 :	SCHÉMA DE PRINCIPE DU BOUCLIER À PRESSION DE BOUE [D'APRÈS UN DOCUMENT FCB].....	9
FIGURE 1-3 :	MODE D'ACTION DES DEUX TYPES DE CAKE [D'APRÈS BOUYAT - 1991].....	10
FIGURE 1-4 :	SCHÉMA DE PRINCIPE DU BOUCLIER À PRESSION DE TERRE [D'APRÈS UN DOCUMENT FCB].....	11
FIGURE 1-5 :	DISPOSITIF DE LA DOUBLE VIS DU STOREBÆLT [D'APRÈS WALLIS - 1990].....	13
FIGURE 1-6 :	DISPOSITIF DE L'ESSAI DÉVELOPPÉ PAR KAWASAKI [D'APRÈS SATO ET AL - 1990].....	14
FIGURE 1-7 :	RÉSULTATS DES ESSAIS RÉALISÉS AVEC LE SYSTÈME MCS [D'APRÈS SATO ET AL - 1990].....	14
FIGURE 1-8 :	GÉOMÉTRIE DES DEUX TYPES DE VIS [D'APRÈS ARNOL ET AL - 1993].....	17
FIGURE 1-9 :	ÉVOLUTION DES VALEURS DE α SELON LA TECHNIQUE DE BOUCLIER UTILISÉE [D'APRÈS REDA - 1994].....	23
FIGURE 2-1 :	INFLUENCE DU POURCENTAGE D'AIR OCCLUS SUR L'OUVRABILITÉ D'UN BÉTON [D'APRÈS VENUAT - 1984].....	30
FIGURE 2-2 :	ORIENTATION PRÉFÉRENTIELLE DES MOLÉCULES TENSIOACTIVES AUX INTERFACES [D'APRÈS MYERS - 1992].....	33
FIGURE 2-3 :	REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES CANAUX DE PLATEAU-GIBBS [D'APRÈS MYERS - 1992].....	37
FIGURE 2-4 :	PRINCIPAUX PARAMÈTRES DÉCRIVANT UNE MOUSSE.....	41
FIGURE 2-5 :	ASPECT DE LA MOUSSE CHIMIQUE.....	43
FIGURE 2-6 :	LOCALISATION DES POINTS D'INJECTION SUR UN BOUCLIER À PRESSION DE TERRE [D'APRÈS UN DOCUMENT SIKA].....	46
FIGURE 2-7 :	PRINCIPE DE RÉGULATION D'UN BANC DE GÉNÉRATION DE MOUSSE.....	47
FIGURE 3-1 :	SCHÉMA DE L'ESSAI DE MOUSSAGE.....	54
FIGURE 3-2 :	SCHÉMA DU BANC DE GÉNÉRATION DE MOUSSE [D'APRÈS QUEBAUD ET AL - 1996].....	55
FIGURE 3-3 :	PRINCIPE DE L'ESSAI DE CONSISTANCE.....	57
FIGURE 3-4 :	SCHÉMA DU DISPOSITIF DE DEMI-VIE.....	58
FIGURE 3-5 :	SCHÉMA DU DISPOSITIF DE MALAXAGE.....	60
FIGURE 3-6 :	PRINCIPE DE L'ESSAI D'AFFAISSEMENT [D'APRÈS DUPAIN ET AL - 1995].....	61
FIGURE 3-7 :	SCHÉMA DU DISPOSITIF D'ADHÉRENCE.....	62
FIGURE 3-8 :	SCHÉMA DU PERMÉAMÈTRE À CHARGE CONSTANTE.....	63
FIGURE 3-9 :	SCHÉMA DE LA CELLULE DE CONFINEMENT.....	66
FIGURE 3-10 :	DÉMARCHE À SUIVRE DANS LE CADRE D'UNE ÉTUDE.....	70
FIGURE 4-1 :	PRODUIT <i>TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE ΔP_{GM} EN FONCTION DE Q POUR K VARIABLE.....	77
FIGURE 4-2 :	COMPLEXE <i>TENSIO 1/POLY 1</i> - ÉVOLUTION DE ΔP_{GM} EN FONCTION DE Q AVEC ET SANS POLYMÈRE.....	79

FIGURE 4-3 :	PRODUIT <i>TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE LA VITESSE DE DRAINAGE DE LA PHASE LIQUIDE EN FONCTION DU TEMPS.....	81
FIGURE 4-4 :	COMPLEXE <i>TENSIO 1/POLY 1</i> - VARIATION DU VOLUME DE LA MOUSSE EN FONCTION DE LA PRESSION DE CONFINEMENT	82
FIGURE 4-5 :	MÉLANGE <i>S1/TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE G_p POUR K VARIABLE ET W_{SAT}	84
FIGURE 4-6 :	MÉLANGE <i>S1/TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE G_p POUR C_{AM} VARIABLE.....	85
FIGURE 4-7 :	MÉLANGE <i>S1/TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE G_p POUR W VARIABLE	85
FIGURE 4-8 :	MÉLANGE <i>S1/TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE L'ANGLE LIMITE D'ADHÉRENCE α POUR W VARIABLE	86
FIGURE 4-9 :	MÉLANGE <i>S1/TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE G_p ET DE A EN FONCTION DE Co_{AM}	87
FIGURE 4-10 :	MÉLANGE <i>S2/TENSIO 1</i> - ASPECT DU MÉLANGE LORS D'UN ESSAI DE MALAXAGE	91
FIGURE 4-11 :	MÉLANGES <i>S2/TENSIO 1</i> ET <i>S2/TENSIO 2</i> - COMPARAISON DE L'ÉVOLUTION DE G_p ET DE A	93
FIGURE 4-12 :	MÉLANGE <i>S2/TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE k EN FONCTION DE T_f	95
FIGURE 4-13 :	MÉLANGE <i>S2/TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE LA PROFONDEUR D'IMPRÉGNATION EN FONCTION DU TEMPS.....	97
FIGURE 4-14 :	MÉLANGE <i>S2/TENSIO 1</i> - ÉTAT DE FLUIDITÉ PLASTIQUE	98
FIGURE 4-15 :	ASPECT DU SOL <i>SG1</i>	100
FIGURE 4-16 :	MÉLANGE <i>SG1/TENSIO 1</i> - ESSAI DE MALAXAGE.....	102
FIGURE 4-17 :	MÉLANGE <i>SG1/TENSIO 1</i> - ESSAI D'AFFAISSEMENT	103
FIGURE 4-18 :	MÉLANGE <i>L1/TENSIO 1</i> - ESSAI DE MALAXAGE	105
FIGURE 4-19 :	GÉNÉRATEUR MODIFIÉ.....	107
FIGURE 4-20 :	PRINCIPE DE L'ESSAI D'ACCROCHAGE [D'APRÈS ISHIMOTO ET AL - 1995].....	112
FIGURE 4-21 :	DISPOSITIF D'IMPRÉGNATION [D'APRÈS HERRENKNECHT ET AL - 1995].....	113
FIGURE 4-22 :	PROFIL D'IMPRÉGNATION	114

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1 :	DIMENSIONS DES BLOCS POUVANT ÊTRE ÉVACUÉS PAR LES VIS [D'APRÈS REDA - 1994]	18
TABLEAU 1-2 :	VALEURS DE α ET DE LA PUISSANCE NÉCESSAIRE SELON LE TYPE DE BOUCLIER [D'APRÈS UN DOCUMENT FCB] [D'APRÈS NISHITAKE ET AL - 1993]	24
TABLEAU 2-1 :	INFLUENCE DE LA PRESSION DE CONFINEMENT SUR LE TEMPS DE DRAINAGE DE LA MOUSSE [D'APRÈS RAND ET AL - 1983]	39
TABLEAU 2-2 :	ACTION DE LA MOUSSE SUR LES PARAMÈTRES CARACTÉRISANT LE FONCTIONNEMENT D'UN BOUCLIER À PRESSION DE TERRE [D'APRÈS QUEBAUD ET AL - 1996]	44
TABLEAU 4-1 :	FORMULE RFSTMA - APPLICATION AUX SOLS $S1, S2, SG1$	74
TABLEAU 3-2 :	RÉSULTATS DES ESSAIS DE MOUSSAGE EFFECTUÉS AVEC <i>TENSIO 1</i> ET <i>POLY 1</i>	75
TABLEAU 3-3 :	RÉSULTATS DES ESSAIS DE MOUSSAGE EFFECTUÉS AVEC <i>TENSIO 2</i>	75
TABLEAU 4-4 :	PRODUIT <i>TENSIO 1</i> - INFLUENCE DE C_{AM} SUR L'ÉVOLUTION DE ΔP_{GM}	78
TABLEAU 4-5 :	COMPLEXE <i>TENSIO 1/POLY 1</i> - ESSAI DE CONSISTANCE	80
TABLEAU 4-6 :	PRODUIT <i>TENSIO 1</i> - ÉVOLUTION DE LA DURÉE DE DEMI-VIE POUR DES MOUSSES DE DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES	81
TABLEAU 4-7 :	MÉLANGE $S1/TENSIO 1$ - VALEURS DE CO_{AM} ET DE T_i POUR $A=12$ CM	88
TABLEAU 4-8 :	MÉLANGE $S1/TENSIO 1$ - VALEURS DE G_p POUR $A=12$ CM	88
TABLEAU 4-9 :	MÉLANGE $S2/TENSIO 1$ - VALEURS DE CO_{AM} ET DE T_i POUR $A=12$ CM	91
TABLEAU 4-10 :	MÉLANGE $S2/TENSIO 1$ - VALEURS DE G_p POUR $A=12$ CM	92
TABLEAU 4-11 :	MÉLANGE $S2/TENSIO 2$ - VALEURS DE CO_{AM} ET DE T_i POUR $A = 12$ CM	94
TABLEAU 4-12 :	MÉLANGE $S2/TENSIO 2$ - VALEURS DE G_p POUR $A = 12$ CM	94
TABLEAU 4-13 :	MÉLANGE $S2/TENSIO 1$ - ÉVOLUTION DE T_i POUR $k \leq 10^{-6}$ M/S	95
TABLEAU 4-14 :	MÉLANGE $S2/TENSIO 1$ - INFLUENCE DU POLYMÈRE SUR LA PERMÉABILITÉ DU MÉLANGE	96
TABLEAU 4-15 :	MÉLANGE $SG1/TENSIO 1$ - ÉVOLUTION DE T_i, CO_{AM} ET G_p POUR $A = 12$ CM	101
TABLEAU 4-16 :	MÉLANGE $SG1/TENSIO 1$ - UTILISATION DE L'ADJUVANT <i>POLY 1</i>	101

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La réalisation d'ouvrages souterrains dans des terrains meubles et aquifères impose de plus en plus le choix de boucliers à front confiné. Parmi ces derniers, les techniques les plus utilisées sont incontestablement celles des boucliers à pression de boue et à pression de terre. La préoccupation croissante vis-à-vis de l'environnement donne cependant l'avantage au bouclier à pression de terre, car celui-ci permet l'évacuation des déblais en décharge sans qu'il soit nécessaire de les traiter.

Ce choix de plus en plus fréquent d'un bouclier à pression de terre pour des projets variés a rapidement mis en évidence des problèmes liés à l'utilisation de ce type de machine dans certains sols, car elle était prévue à l'origine pour les sols meubles cohérents, présentant un degré de plasticité peu élevé. La recherche de l'élargissement du domaine d'utilisation de ce type de bouclier a récemment abouti au développement d'additifs, qui présentent l'avantage d'être biodégradables, non-toxiques et non-polluants. Parmi ceux-ci, la mousse chimique, dont les applications industrielles sont nombreuses, figure en bonne place, en raison de ses qualités. Cette dernière, générée à partir d'un mélange en proportions variables d'air, d'eau, de produit moussant et d'adjuvants éventuels, permet en effet de conférer au terrain excavé les qualités requises pour que le fonctionnement d'un bouclier à pression de terre soit optimal.

Malgré le succès du bouclier à pression de terre, cette technique est cependant loin d'être maîtrisée en France : les études concernant ce type de machine ont en effet été réalisées pour la plupart au Japon, et n'ont pas fait l'objet d'une diffusion très large, par volonté de garder un certain savoir-faire ou pour des raisons de secrets industriels [REDA - 1994]. De même, si l'utilisation de la mousse chimique dans le cadre de travaux de tunnelage apparaît pourtant dans quelques publications, les résultats obtenus lors des essais préliminaires réalisés en laboratoire n'ont quasiment pas été publiés. La technique du bouclier à pression de terre suscite donc de nombreuses questions, que l'on retrouve à travers le lancement récent de deux projets nationaux français, *Eupalinos 2000* et *Microtunnels*, lancés respectivement en 1995 et en 1993.

Le Projet National *Microtunnels*, dont le but est la promotion des travaux sans tranchées, comprend en particulier un thème d'étude sur l'apport des additifs dans l'amélioration du percement par microtunneliers à pression de terre, technique dont l'utilisation, à l'instar des machines de grand diamètre, est soumise à des préoccupations vis-à-vis de l'environnement.

Dans le cadre de l'étude expérimentale de l'interaction sol-structure, une collaboration entre le Laboratoire de Mécanique de Lille et l'entreprise SADE a permis en 1992 le suivi d'un chantier de microtunnel, à Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne) [QUEBAUD - 1992]. L'ouvrage, un collecteur d'une longueur de 800 m et d'un diamètre intérieur de 1200 mm, a été réalisé avec un microtunnelier à pression de terre, dont la conception est proche de celle d'un tunnelier. La nature des terrains rencontrés, principalement les alluvions modernes, limono-argileux, très collants et très compacts, a rapidement posé des problèmes (difficultés d'extraction, sollicitation importante des organes de fonctionnement de la machine et difficulté à obtenir une pression satisfaisante dans la chambre). Afin de remédier à cela, la SADE a décidé de tester des techniques permettant une meilleure excavation. Son choix s'est porté sur le procédé d'injection de mousse proposé par l'entreprise FCB¹.

L'analyse de l'évolution des paramètres de conduite de la machine a rapidement permis de mettre en évidence l'apport de la mousse lors du creusement, en matière de réduction de paramètres comme le couple en tête, le couple de la vis, la pression dans la chambre, mais aussi d'amélioration dans l'excavation des déblais (meilleur aspect des marins en sortie de vis, moins de collage, remplissage des

¹ Fives Cail Babcock, groupe Fives-Lille

bennes optimal). Trop de facteurs sont cependant rentrés en ligne de compte sur ce chantier pour que l'on puisse vraiment juger de l'action de la mousse. Malgré cela, les résultats tirés de cette expérimentation ont montré la nécessité de poursuivre l'étude de l'action de la mousse dans le cadre du percement par boucliers à pression de terre, en suivant toutefois la démarche détaillée ci-après.

En premier lieu, il était indispensable de connaître le fonctionnement d'un bouclier à pression de terre, mais également les caractéristiques que doit présenter le sol excavé pour que ce fonctionnement soit optimal. La connaissance des produits utilisés pour la formation de la mousse, mais également les caractéristiques de cette dernière, en particulier dans le cadre d'une utilisation dans les travaux souterrains, s'avéraient de même indispensables.

En second lieu, l'analyse du cahier des charges reprenant les paramètres de fonctionnement d'un bouclier à pression de terre a permis la mise en place d'un laboratoire d'essais des produits moussants. Ce dernier devait permettre la caractérisation de la mousse, ainsi que l'étude de différents mélanges sol/mousse.

Cette première étape a laissé la place à une seconde, plus "opérationnelle", puisqu'elle consistait en la réalisation d'une campagne d'essais, après avoir choisi des sols-types, présentant des caractéristiques bien distinctes, représentatives des problèmes rencontrés lors du creusement avec un bouclier à pression de terre.

Les résultats des essais ont permis non seulement de connaître les limites du matériel existant dans le laboratoire d'essais, mais également de proposer des modifications ou des améliorations de ce matériel pour la suite de la campagne d'essais.

Le travail présenté dans ce mémoire, mené en continuité après l'expérimentation du chantier de Vitry-sur-Seine, tente d'apporter une contribution à l'étude du percement de galeries par boucliers à pression de terre, en s'intéressant tout particulièrement à l'amélioration du creusement par l'utilisation des produits moussants. Il s'inscrit tout naturellement dans la logique du Projet National *Microtunnels*, qui a assuré une partie du support financier de l'étude.

Le premier chapitre présente dans un premier temps les boucliers à pression de boue et à pression de terre, puis compare dans un deuxième temps ces deux techniques, que ce soit au niveau du domaine d'utilisation, du contrôle de la stabilité du front, mais aussi du traitement des déblais ; la notion de coût de tunnelier est également abordée.

Le deuxième chapitre s'attache aux applications industrielles des mousses, et plus particulièrement à celles qui sont à l'origine de l'utilisation de la mousse avec les boucliers à pression de terre. L'étude de la mousse est ensuite abordée, tant au niveau des produits tensioactifs nécessaires à sa formation, qu'à ses caractéristiques et sa stabilité. Enfin, l'application aux travaux souterrains est abordée, décrivant l'action de la mousse sur le sol excavé, ainsi que le procédé d'injection de mousse.

Le troisième chapitre décrit le laboratoire d'essais des produits moussants qui a été monté afin d'étudier l'apport de ces derniers. Cette étude passe par la caractérisation de la mousse elle-même, mais surtout par celle du mélange sol/mousse. Il décrit également la campagne d'essais réalisée, en présentant les sols étudiés, les produits utilisés, mais aussi la démarche à suivre dans le cadre de cette étude.

Le dernier chapitre présente enfin dans un premier temps les résultats obtenus avec les différents essais, tant au niveau de la mousse elle-même que des différents mélanges sol/mousse. La réalisation de ces essais ayant montré les limites du matériel utilisé, une critique des essais, mais également une réflexion sur les modifications à apporter au matériel existant ou sur le développement de nouveaux matériels est donc faite dans un deuxième temps.

En dernier lieu, le point est fait sur la contribution de ce travail à l'étude du percement de galeries par boucliers à pression de terre, et plus particulièrement à l'étude de l'apport des produits moussants dans l'amélioration du creusement ; des perspectives sont évoquées pour la suite de cette étude.

- CHAPITRE 1 -

***PRÉSENTATION DES BOUCLERS
À PRESSION DE BOUE ET À PRESSION DE TERRE***

1. INTRODUCTION

Si les hommes ont creusé très tôt des tunnels, ils se sont intéressés en premier lieu aux terrains rocheux, les premières applications importantes concernant en effet l'adduction en eau des sites montagneux vers les vallées. Le développement urbain dans les vallées a apporté bien évidemment des perspectives nouvelles pour les domaines d'application (assainissement, transport, ...), mais aussi des terrains moins favorables au creusement.

La nécessité de construire des ouvrages en terrains meubles et aquifères a donc promu la technique du tunnelier à bouclier (appelé généralement bouclier), afin de limiter les nuisances (comme l'éboulement des terrains, pouvant induire des tassements en surface), mais aussi de travailler avec un matériel plus fiable. Cette machine, dont la finalité est de réaliser une cavité sans nuire au milieu environnant, assure pour cela plusieurs fonctions (voir figure 1-1) :

- l'abattage du terrain en place,
- l'évacuation des matériaux abattus (opération appelée communément marinage),
- le soutènement provisoire du front de taille et des parois latérales,
- la pose du revêtement définitif,
- la propulsion et le guidage de l'ensemble.

Le bouclier est une virole métallique servant de support aux principaux organes de la machine, dont les fonctions sont décrites ci-dessus.

Selon les conditions géotechniques et hydrogéologiques des terrains en place, on peut être amené à assurer la stabilisation du front de taille ou non. Si cette stabilisation n'est pas nécessaire, on parle de bouclier ouvert. Dans le cas contraire, le bouclier est dit fermé.

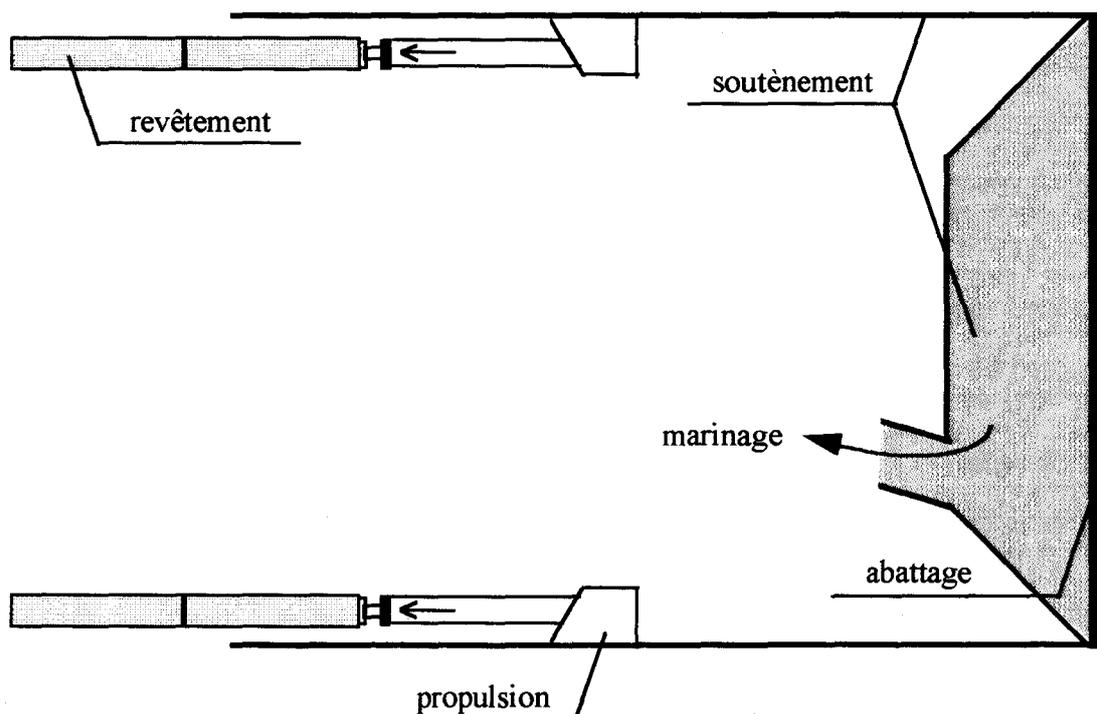


figure 1-1 : principe de fonctionnement d'un bouclier pour terrains meubles

Les boucliers fermés se divisent en deux catégories principales, dépendant du mode de soutènement :

- le bouclier à pression mécanique (ou aveugle). Cette machine peut être comparée à une trousse coupante qui maintient le front de taille au moyen d'une cloison étanche. Cette cloison, munie de fentes, va permettre l'évacuation du sol. Selon l'avancement du bouclier et les caractéristiques géotechniques du sol en place, on peut modifier l'ouverture des fentes et donc le débit d'évacuation des déblais [REDA - 1994].
Ce type de bouclier est adapté au creusement dans des sols cohérents mous : il présente des risques d'instabilité dans le cas de sols à faible cohésion ou de venues d'eau. De plus, cette forme de contrôle de la pression pour éviter la rupture du front n'est pas parfaite. C'est pour ces raisons que ce type de bouclier n'est pratiquement plus employé ;
- les boucliers à front confiné. Ces derniers comprennent une chambre étanche à l'avant dans laquelle sont installés les moyens d'excavation et qui peut être mise sous pression de façon à assurer l'équilibre du terrain le long du front, en limitant ou supprimant les venues d'eau et en stabilisant le terrain. Cette pression est dépendante des conditions géotechniques et hydrogéologiques des terrains traversés.

Les agents de soutènement sont de plusieurs types : gazeux (bouclier à air comprimé), liquide (bouclier à pression de boue) ou pâteux (bouclier à pression de terre).

Le bouclier à air comprimé présentant des inconvénients (voir paragraphe 2.1), ce sont les deux autres boucliers qui sont les plus utilisés à l'heure actuelle. Ces deux types de boucliers, dont la fonction principale reste la même, diffèrent toutefois pour ce qui est du principe de fonctionnement et se démarquent notamment en ce qui concerne le domaine d'utilisation, le contrôle de la pression de confinement, le traitement des marins, l'énergie d'abattage nécessaire. Le coût de la machine varie également d'une technique à l'autre.

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

2.1. Le bouclier à pression de boue

Des applications comme la réalisation de forages pétroliers et la construction de parois moulées de grande hauteur ont permis de développer et de perfectionner les propriétés thixotropiques de la boue bentonitique [GESTA - 1992].

Ces propriétés ont conduit au développement en Angleterre du bouclier à pression de boue, dès 1960, afin de pallier les inconvénients du bouclier à pression d'air. Ce dernier, issu des boucliers à mode ouvert pour ce qui est de l'abattage du terrain et de l'évacuation des déblais, est muni d'une cloison étanche à l'avant, permettant ainsi la mise sous pression du front. Ce type de machine est prévu pour travailler dans des terrains fins et homogènes, avec une perméabilité inférieure à 10^{-5} m/s, dans lesquels la pression hydrostatique est réduite [REDA - 1994]. Les inconvénients de ce bouclier sont nombreux :

- en cas d'hétérogénéité du terrain ou d'une faible couverture, on constate des pertes d'air (il faut rappeler que la perméabilité d'un sol à l'air est environ 100 fois supérieure à celle d'un sol à l'eau) [BRIGLIA et al - 1989] ;
- l'air comprimé pose des problèmes dans certains sols ;
- l'étanchéité des joints de queue à l'air est difficile.

Des améliorations récentes permettent toutefois de travailler dans des terrains plus "ouverts" ou moins stables : le bouclier est muni pour cela d'un dispositif de projection sur tout le front de produits liquides ou pâteux (mortier de ciment, coulis de bentonite ou mousse chimique, système breveté par C.S.M. BESSAC). Ces produits permettent d'améliorer les caractéristiques du sol en place. De telles machines présentent l'avantage d'un investissement peu conséquent, mais les performances restent modestes et limitent la taille des chantiers [GESTA - 1992].

Les conditions de tunnelage en terrains meubles étant mauvaises au Japon, les Japonais se sont alors intéressés à la technique du bouclier à pression de boue et l'ont rapidement développée pour l'appliquer à des projets variés [MCCUSKER - 1991].

Le principe de cette technique consiste à remplir la chambre de boue, maintenue à une pression telle qu'elle puisse à la fois (voir le schéma de principe du bouclier à pression de boue sur la figure 1-2) :

- équilibrer la pression hydrostatique interstitielle du terrain ;
- exercer sur les grains constitutifs de ce terrain une pression suffisante pour les maintenir en place au fur et à mesure de l'avancement du front.

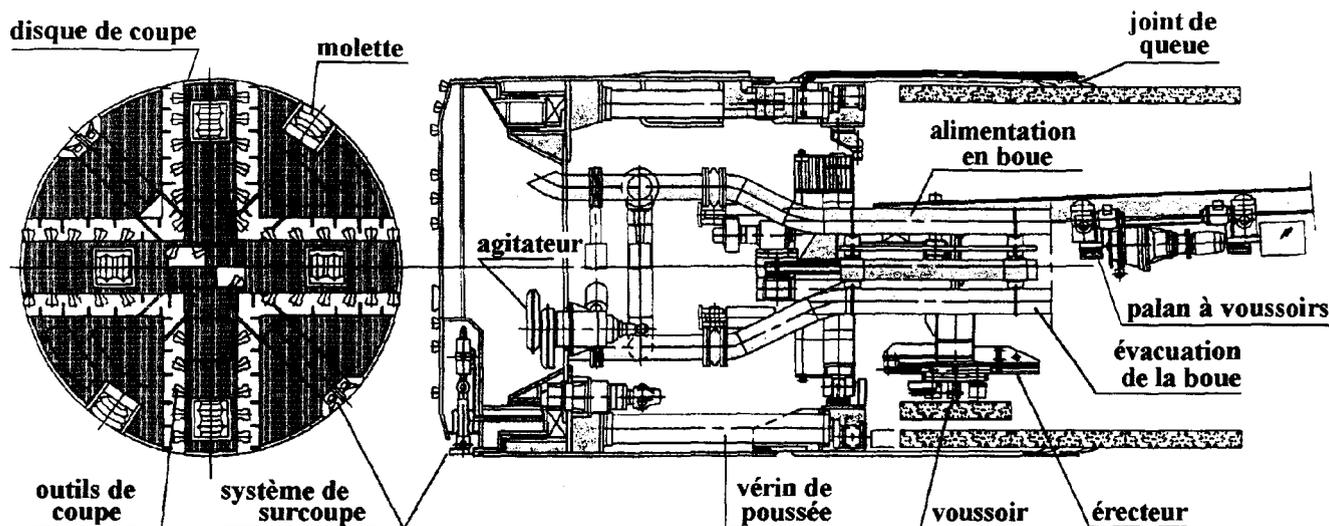
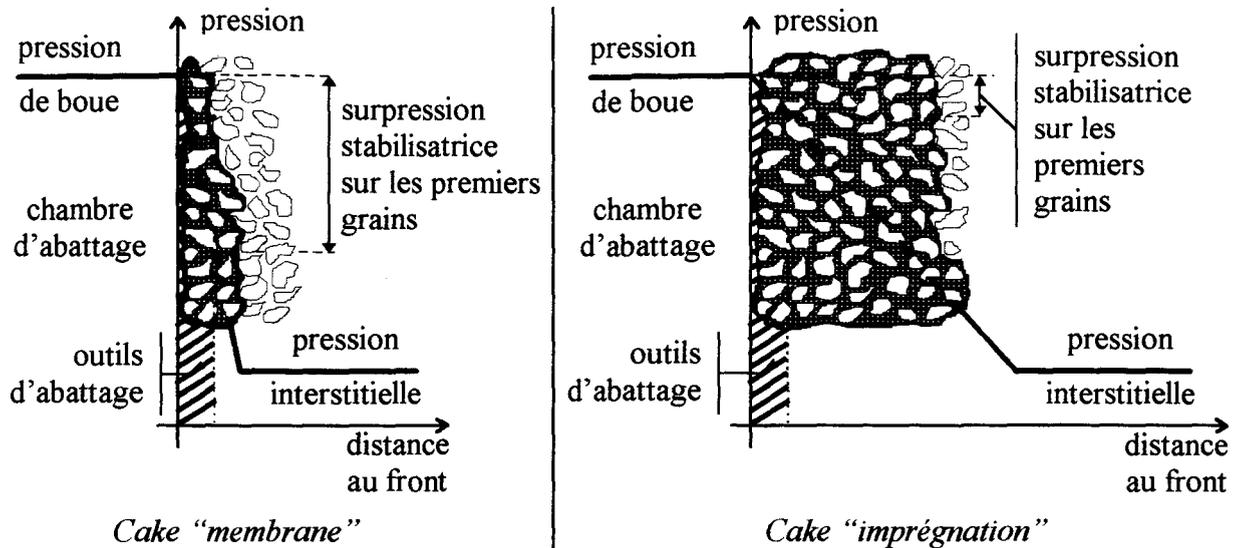


figure 1-2 : schéma de principe du bouclier à pression de boue
[d'après un document FCB]

Le caractère thixotropique de la boue lui permet de ne pas pénétrer profondément dans le terrain, mais de colmater les pores, ce qui a pour effet de former un film imperméable ou cake capable de transmettre la surpression sur les grains qu'elle stabilise, de façon uniforme sur le front : la pression s'approche de l'état initial des contraintes du sol non perturbé [ANHEUSER - 1984]. On observe la formation de deux types de films suivant la qualité de boue et la perméabilité du terrain [BOUYAT - 1991] :

- le cake "membrane", qui peut être considéré comme un film mince et pratiquement imperméable. Après qu'il soit formé, il ne se modifie pas lorsque la pression de soutènement varie ;
- le cake "imprégnation", dont le mécanisme de formation n'est pas du tout le même que pour le précédent. Son épaisseur dépend en effet de la surpression de la boue (la différence de pression entre la pression de boue et la pression des terres au front), cette dernière s'infiltrant dans le terrain jusqu'à atteindre une perte de charge maximale. Si la pression de soutènement augmente, l'écoulement de boue reprend jusqu'à une nouvelle stabilisation.

La figure 1-3 reprend schématiquement les deux types de cake et leur action stabilisatrice sur le parement. On constate que le mode d'action du cake membrane a pour conséquence une surpression stabilisatrice sur les premiers grains du terrain plus élevée que dans le cas d'un cake imprégnation, d'où sa plus grande efficacité. Cependant, dans le cadre de travaux de tunnelage, le front est continuellement modifié par le travail du disque de coupe ; la faible épaisseur d'un cake membrane aura pour effet son élimination à chaque passage des outils d'abattage, ce qui remettra en cause la stabilité du front [REDA - 1994].



**figure 1-3 : mode d'action des deux types de cake
[d'après BOUYAT - 1991]**

La recherche d'un cake mixte, qui réunit les avantages des deux types de cake (surpression stabilisatrice importante, épaisseur supérieure à celle des outils d'abattage), permettra alors d'aboutir à un fonctionnement optimal du bouclier.

Le disque d'excavation en rotation, muni d'ouvertures, abat le sol qui tombe dans la chambre d'abattage et est mélangé alors à la boue (présence d'agitateurs en partie basse de la chambre). La boue contaminée est ensuite pompée et transportée par des canalisations jusqu'à une installation de séparation des boues en surface pendant qu'une égale quantité de boue neuve la remplace dans la chambre.

La boue joue donc deux rôles :

- la stabilisation du front de taille grâce aux forces de filtration exercées par la boue sur le terrain ;
- le transport des déblais depuis le tunnelier jusqu'à la surface.

Elle assure, dans une moindre mesure, la réduction du frottement jupe/terrain par interposition d'un film de boue le long du bouclier.

2.2. Le bouclier à pression de terre

Les sujétions liées à l'emploi de la boue ont favorisé cette technique, dont le développement, qui remonte à 1974, est également dû aux Japonais (voir paragraphe 3.3).

Le principe de fonctionnement du bouclier à pression de terre se rapproche de celui du bouclier à pression de boue puisqu'on y retrouve également une chambre d'abattage fermée par une cloison étanche et un agent de soutènement [REDA - 1994].

La différence fondamentale réside dans le fait que ce dernier est le sol excavé lui-même : en effet, les déblais excavés sont collectés et compactés dans la chambre de confinement, la remplissant entièrement. Ils exercent ainsi une pression de soutènement sur le front à travers les ouvertures de la tête de coupe, équilibrant les contraintes totales du terrain [MCCUSKER - 1991] [NISHITAKE et al - 1993] [PHILIPPOTEAUX et al - 1994].

La conception de la tête de coupe pour un bouclier à pression de terre est différente de celle d'un bouclier à pression de boue (voir figure 1-2 et figure 1-4). On rencontre de plus, pour le bouclier à pression de terre, deux types de disques :

- soit un disque "plein", muni de fentes radiales permettant le passage du matériau (on parle de plateau fermé) ;
- soit un disque constitué de bras munis d'outils (tête en étoile), permettant ainsi aux déblais présents dans la chambre de transmettre la pression de confinement au front de taille. Ce plateau, dit ouvert, convient aux terrains cohérents mais peu résistants [HAGIMOTO - 1984].

Le choix de la géométrie du disque de coupe va dépendre bien évidemment du type de terrain à excaver. Le constructeur LOVAT équipe le disque de coupe de ses boucliers à pression de terre de volets réglables, permettant ainsi d'adapter la géométrie de ce dernier aux terrains traversés [PHILIPPOTEAUX et al - 1994].

Les déblais sont ensuite généralement extraits de la chambre d'abattage par l'intermédiaire d'une vis d'Archimède qui, étant elle-même remplie, va permettre d'établir un gradient de pression (égal à la différence entre la pression de confinement régnant dans la chambre et la pression régnant dans le tunnel) sur la longueur de la vis.

Ces déblais sont enfin transportés jusqu'à la surface par des convoyeurs à bande et des wagonnets.

Le schéma de la figure 1-4 reprend le principe du bouclier à pression de terre.

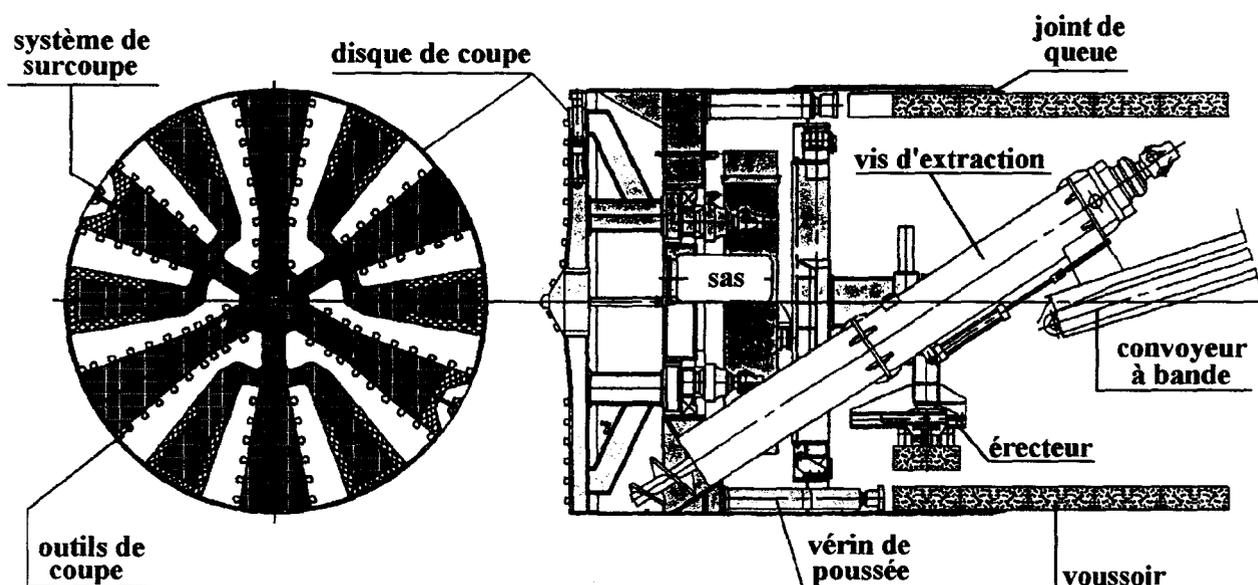


figure 1-4 : schéma de principe du bouclier à pression de terre [d'après un document FCB]

Le convoyeur à vis joue deux rôles essentiels, puisqu'il permet :

- la régulation de la pression de terre régnant dans la chambre d'abattage. Pour cela, le réglage de la vitesse de rotation de la vis (ainsi que la vitesse d'avancement du bouclier) permet de faire varier le débit des matériaux sortant de la vis. L'idéal est que ce dernier corresponde au débit des matériaux entrant par la tête ;
- la formation d'un bouchon étanche avec les déblais, afin de créer un point d'arrêt pour l'eau. Les venues d'eau sont en effet des sources de désordres (on peut citer l'effet de renard ou le tassement par consolidation).

Il faut cependant noter la possibilité pour un bouclier à pression de terre de travailler selon deux modes :

- le mode confiné, décrit ci-dessus ;
- le mode ouvert, où il n'est pas nécessaire que la chambre soit complètement remplie pour avoir un fonctionnement optimal. Les deux conditions pour travailler en mode ouvert sont celles de terrains en place stables et de venues d'eau limitées.

Un bouclier à pression de terre peut passer de l'un à l'autre de ces modes de façon quasiment instantanée, sans modification de l'architecture de la chambre, et peut donc être programmé par le personnel en place sur la machine : ce fut le cas pour les chantiers du Transmanche et du Storebælt (Danemark).

Pour le bouclier à pression de boue, un tel changement nécessite une modification du système de marinage, opération longue et coûteuse qui doit donc être prévue à l'avance et qui n'est rentable que si la longueur à forer dans le mode choisi est suffisamment importante (cas du tunnel du Grauholz, en Suisse) [PHILIPPOTEAUX et al - 1994].

2.2.1. Le convoyeur à vis

En cas de fortes pressions hydrostatiques (supérieures à 0,2-0,3 MPa) ou d'une trop grande perméabilité du matériau, il est nécessaire de contrôler mécaniquement la pression à l'extrémité de la vis [SATO et al - 1990]. Plusieurs solutions ont été mises au point, notamment :

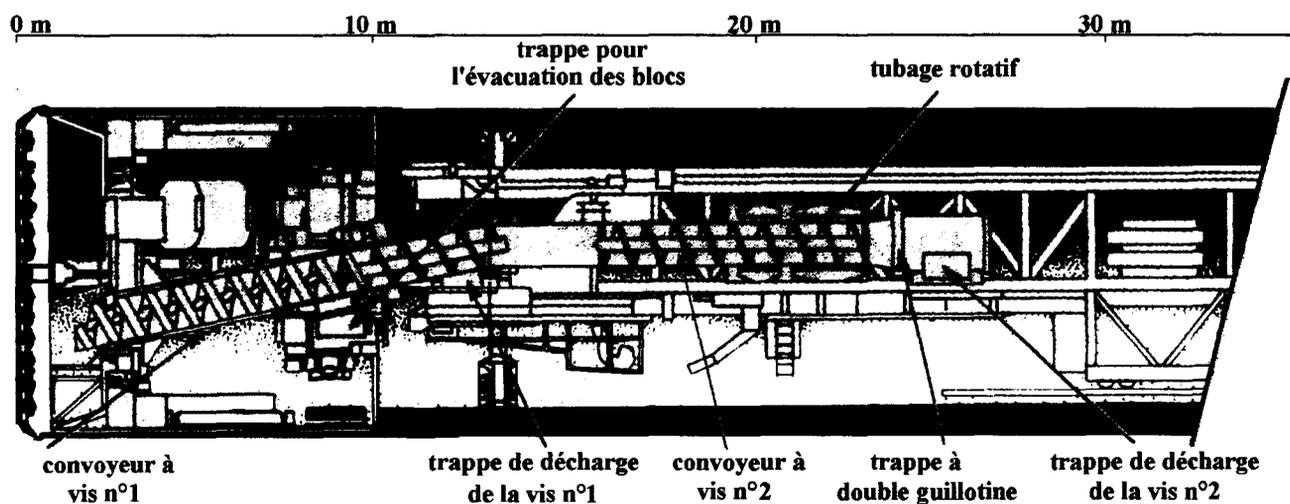
- des dispositifs régulant le volume des matériaux rejetés : trappe, sas rotatif, tubage rotatif, pompe volumétrique à piston ;
- des dispositifs favorisant la formation d'un bouchon plus compact le long du parcours de la vis : systèmes à double vis en série ou à axes décalés.

Deux chantiers récents montrent que le système de la double vis a atteint un niveau de haute technicité et qu'il est à même de permettre le travail du bouclier à pression de terre sous des pressions hydrostatiques élevées :

- le tunnel sous le détroit du Storebælt, qui permet de créer un lien fixe entre l'île de Zealand (sur laquelle est située la ville de Copenhague) et le continent européen [KELLEY - 1991] [GUILLAUME - 1994]. Les terrains en place (moraines et marnes) augurant des perméabilités

variables et le profil en long situant le point le plus bas à 75 m sous le niveau de la mer, les boucliers à pression de terre choisis furent équipés d'un dispositif à double vis en série pouvant résister à une pression hydrostatique de 1,2 MPa [WALLIS - 1990] (voir le détail du dispositif sur la figure 1-5). Pour cela, le dispositif développé par le constructeur JAMES HOWDEN a été muni :

- d'une première vis de 1,2 m de diamètre et d'une longueur de 12,5 m, dont 8 m de type ruban et 4,5 m à axe central (voir paragraphe 3.1),
 - d'une seconde vis à axe central de 7 m qui peut avancer ou reculer sur une longueur de 2 m, permettant ainsi, en association avec un réglage variable de la vitesse de rotation des deux vis, de créer un bouchon d'une longueur comprise entre 0 et 2 m,
 - d'un tubage rotatif à la fin de la deuxième vis. En le faisant tourner dans le même sens que la vis, on peut annuler, à vitesses de rotation égales, l'effet d'entraînement de la vis et créer ainsi une zone de bouchon supplémentaire,
 - d'une trappe à double guillotine à l'extrémité de la deuxième vis, dont l'ouverture peut être réglée afin de contrôler l'extrusion des matériaux. Ce dispositif a d'ailleurs été complété ultérieurement par une pompe à décharge, en raison de problèmes survenus pendant l'exécution du chantier ;
- le tunnel sous la Manche, dont le profil en long laissait prévoir une charge hydraulique de 1,1 MPa [SATO et al - 1990]. Les deux tunneliers T2 et T3 (développés par KAWASAKI, avec la participation de FCB pour le T3) à fonctionnement mixte (mode ouvert/pression de terre), étaient équipés du système MCS à double vis de KAWASAKI, dont le principe de fonctionnement est le même que celui décrit précédemment, mis à part l'absence de tubage rotatif.



*figure 1-5 : dispositif de la double vis du Storebaelt
[d'après WALLIS - 1990]*

Le développement du système MCS est passé par la réalisation d'un modèle réduit, dont le schéma est repris sur la figure 1-6. Ce modèle réduit est constitué par :

- un réservoir que l'on peut remplir de sol et mettre sous pression ;
- deux vis à axe central, d'une longueur de 2050 et 2380 mm, tournant à des vitesses respectives de 20 et 5 tours/mn, et séparées par une zone de longueur variable (de 0 à 600 mm) ;

- deux trappes permettant l'évacuation des déblais, situés au droit de chaque vis ;
- trois capteurs de pression permettant de suivre l'évolution de la pression le long de la double vis.

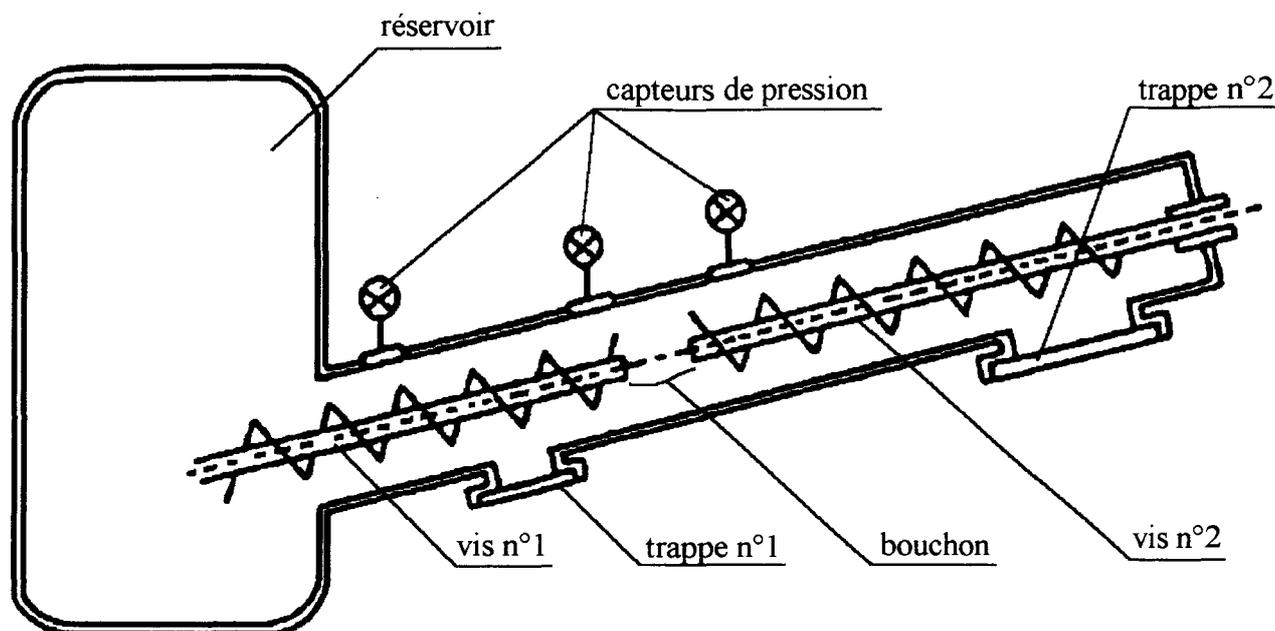


figure 1-6 : dispositif de l'essai développé par KAWASAKI
[d'après SATO et al - 1990]

Plusieurs essais ont été réalisés par SATO et al (1990) en faisant varier la pression de confinement dans le réservoir ; la teneur en eau des échantillons pour les essais était respectivement de 44, 52 et 34 %. La figure 1-7 montre l'évolution de la pression de terre le long de la double vis pour trois pressions de confinement ; l'efficacité de ce système est donc bien mise en évidence, en particulier pour les fortes pressions : le bouchon permet par exemple, pour $p_e=0,90$ MPa, le passage de la pression dans la vis de 0,78 à 0,22 MPa.

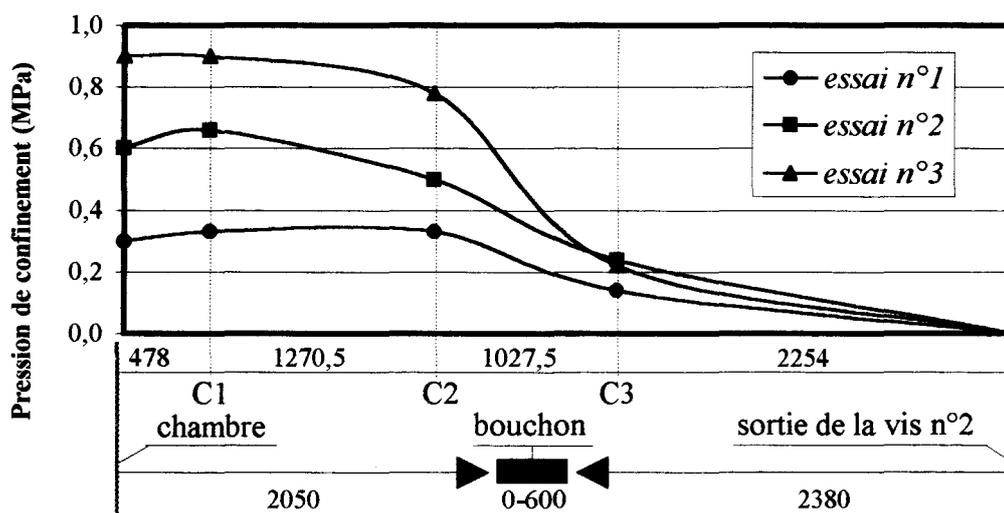


figure 1-7 : résultats des essais réalisés avec le système MCS
[d'après SATO et al - 1990]

3. COMPARAISON ENTRE LES DEUX TECHNIQUES

3.1. Domaine d'utilisation

Si la technique du bouclier à pression de boue et celle du bouclier à pression de terre ont toutes les deux été mises au point afin de creuser des tunnels dans des terrains meubles et aquifères, leur domaine d'utilisation n'est pas tout à fait le même. Lors de l'étude d'un projet, il est donc primordial de considérer les caractéristiques géologiques, géotechniques et hydrogéologiques des terrains en place avant de porter son choix sur l'une ou l'autre de ces techniques.

Le domaine d'utilisation de chacune des techniques a été décrit par plusieurs auteurs [CHAPEAU et al - 1987] [BEJUI et al - 1989] [WHITTAKER et al - 1990] [BECKER - 1993] [REDA - 1994]. Il ressort de l'étude de ces différents domaines que le bouclier à pression de boue était à l'origine prévu pour des sols aquifères, non cohérents, tels que des sols sableux ou graveleux possédant une forte teneur en fines. En revanche, en raison des difficultés rencontrées lors du creusement dans les terrains fins (voir ci-après), la technique du bouclier à pression de terre a été préférée à la précédente pour les sols meubles cohérents.

Dans la plupart des cas, et plus spécialement en Europe, les cas "idéaux", notamment les sols purement cohérents ou sans aucune cohésion n'existant pratiquement pas, des tentatives ont été faites pour étendre le domaine d'application des boucliers à pression de boue et à pression de terre.

Les limites d'utilisation du bouclier à pression de boue dans les sols granulaires se trouvent liées à la formation du cake, qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol en place et des propriétés rhéologiques de la boue. La réalisation de la ligne D du métro de l'agglomération lyonnaise par cette technique entre 1984 et 1987 a démontré son efficacité dans des terrains graveleux très "ouverts" (très forte perméabilité allant jusqu'à 10^{-2} m/s). BRIGLIA et al (1989) avancent même la capacité de certains boucliers allemands à travailler dans des sols avec une perméabilité de 1 m/s.

En ce qui concerne les sols fins, et plus spécialement les sols argileux, la technique à pression de boue rencontre certaines difficultés liées au collage des matériaux, au colmatage des canalisations et au traitement des marins.

Le bouclier à pression de terre présente au contraire un domaine d'utilisation optimal avec les sols meubles cohérents, capables de remplir entièrement la chambre d'abattage, afin de maintenir le front. Ces sols doivent également rendre le convoyeur à vis étanche, ce qui implique qu'ils soient plastiques. Cette condition implique une teneur minimale en fines, dont la valeur varie selon les auteurs, semblant toutefois se situer entre 10 et 30 % [CHAPEAU et al - 1987] [MCCUSKER - 1991] [MOHKAM - 1993] [HERRENKNECHT - 1994].

- Les limons et les argiles molles semblent les plus adaptés, de par leur comportement pseudo-fluide, lié à une teneur en eau suffisante pour leur donner des caractéristiques mécaniques proches de celles d'un liquide [REDA - 1994].
- Les argiles raides sont plus problématiques, en raison d'un écoulement faible (lié à leur cohésion inhérente). Il est donc nécessaire d'ajouter de l'eau pour améliorer leur fluidité. Ce faisant, on

augmente les risques de collage, phénomène amplifié lorsque la teneur en eau du sol varie entre w_p et w_L [BADENDERERDE - 1993].

Les sols non cohérents posent des problèmes :

- leur angle de frottement interne est tel qu'il ne confère pas une fluidité plastique au matériau [HAGIMOTO - 1984] [NISHITAKE - 1987] [NISHITAKE - 1990] [BECKER - 1993]. Ce dernier n'est alors pas capable de remplir complètement la chambre, ce qui peut occasionner des tassements en raison d'un soutien incomplet du front. De plus, ce manque de fluidité va créer un phénomène d'arc-boutant à l'entrée de la vis, ne permettant pas la création du bouchon;
- leur perméabilité peut être telle qu'elle favorise les venues d'eau dans la vis, et donc le risque d'effets de renard. Selon les auteurs, la perméabilité critique pour qu'un bouclier à pression de terre puisse fonctionner correctement varie de 10^{-5} m/s à 10^{-6} m/s [BRIGLIA et al - 1989] [HERRENKNECHT - 1994].

Pour étendre le domaine d'utilisation du bouclier à pression de terre, de nombreuses machines ont été mises au point. Les plus importantes évolutions sont au nombre de trois :

- le bouclier à pression de terre avec contre-pression hydraulique : développé par les Japonais en 1979, il permettait de travailler dans des sols très perméables comme les sables et les graviers. Un dispositif de contre-pression d'eau situé à l'extrémité du convoyeur à vis équilibrait la charge hydraulique du sol en place [ISHIHARA - 1979] ;
- le bouclier à pression de terre avec contre-pression de boue : ce tunnelier est une variante du précédent ;
- le bouclier à pression de terre avec injection de boue lourde ou bouclier à pression de boue lourde (High Density Slurry Shield) : injectée dans la chambre de confinement, cette dernière, composée de bentonite, d'argile et éventuellement de polymères, améliore nettement la distribution granulométrique et la plasticité du terrain excavé stocké dans la chambre. Il permet de plus de réduire le couple de la tête de coupe et donc de permettre de travailler avec des plus grands diamètres [NISHITAKE - 1990] [PÉRA - 1991].

Ces variantes offrent toutefois les mêmes inconvénients que la technique de la pression de boue, à savoir le transport des marins, et leur traitement éventuel. C'est pour cette raison que les études se sont portées sur d'autres types d'additifs, comme des polymères (purs ou en solution), des mélanges à base de sous-produits industriels appelés plastifiants (cendres volantes, cellulose) et les mousses chimiques [NISHITAKE - 1993] [REDA - 1994] [ISHIMOTO - 1995].

Un point est également à considérer avec attention lors du choix de l'une ou l'autre de la technique des boucliers à pression de boue ou à pression de terre : la présence de blocs dans le terrain encaissant, ce qui est fréquent lors de la réalisation de tunnels dans des terrains hétérogènes. Pour pallier cet inconvénient, les constructeurs de machines ont équipé les têtes de molettes, afin de réduire les blocs à une taille acceptable, pour qu'ils puissent passer par les ouvertures du disque (avec toutefois des risques de blocage des molettes, et donc d'usure pour les boucliers à pression de terre) [BECKER - 1993].

Les blocs ou cailloux étant parfois d'une taille trop importante pour être évacués par les canalisations de marinage ou par le convoyeur à vis, des équipements supplémentaires ont été envisagés :

- pour le bouclier à pression de boue, un concasseur situé en bas de la chambre. Les cailloux restants doivent être d'une granulométrie telle qu'elle soit acceptable pour les pompes et les tuyauteries de refoulement [GESTA - 1992] ;
- pour le bouclier à pression de terre, cette solution n'est pas envisageable car le principe de fonctionnement n'est pas le même pour les deux techniques. Pour le bouclier à pression de boue, les marins, évoluant dans un fluide, subissent l'action de la gravité : les blocs arrivent alors tout naturellement au niveau du concasseur. Pour le bouclier à pression de terre, au contraire, les blocs sont emprisonnés dans une matrice suffisamment solide pour qu'ils ne puissent pas descendre en bas de la chambre. Ils doivent donc être évacués par le convoyeur à vis.

La géométrie d'une vis traditionnelle ne permettant pas l'évacuation de blocs de taille importante, la tendance actuelle est d'utiliser une vis à ruban (sans axe central) sur une partie du convoyeur, et une vis à axe central sur l'autre partie, en raison de sa capacité d'entraînement plus efficace [GESTA - 1992] ; une trappe permet d'évacuer ces blocs à l'extrémité de la partie à ruban (voir figure 1-8).

Le constructeur de tunneliers MITSUBISHI donne la taille maximale des blocs pouvant être évacués par l'une ou l'autre de ces vis ; ces dimensions sont reprises dans le tableau 1-1 donné ci-après.

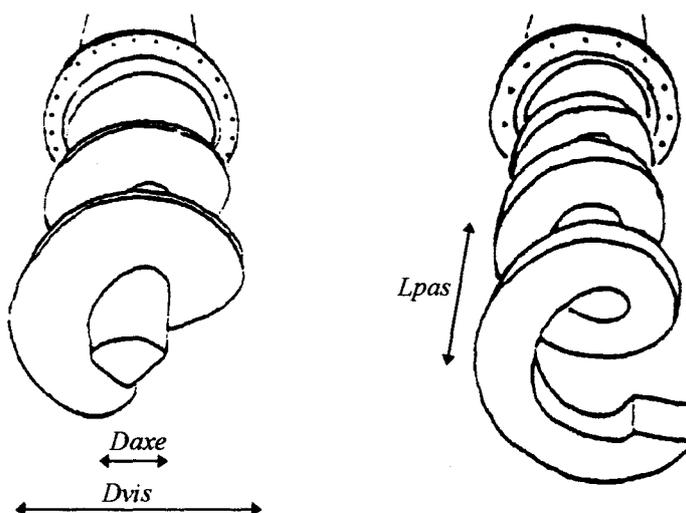


figure 1-8 : géométrie des deux types de vis
[d'après ARNOL et al - 1993]

	Diamètre	Longueur
Vis à axe central	$\frac{0,8(D_{vis} - D_{axe})}{2}$	$0,8 L_{pas}$
Vis à ruban	$0,7 D_{vis}$	$0,8 L_{pas}$

tableau 1-1 : dimensions des blocs pouvant être évacués par les vis [d'après REDA - 1994]

On constate que si la longueur des blocs que l'on peut évacuer est la même pour les deux types de vis, leur diamètre varie en revanche presque du simple au double.

3.2. Contrôle de la stabilité du front

Le principe de base pour un contrôle optimal de la stabilité du front est le même pour tous les boucliers à front pressurisé : maintenir une pression de confinement dans la chambre d'abattage constamment égale à une pression déterminée à l'avance (pression de consigne). Si ce principe n'est pas respecté, il s'ensuivra des désordres au niveau du front de taille. Il est donc nécessaire de contrôler précisément les pressions régnant au niveau de la tête de coupe et dans la chambre de confinement afin d'agir en conséquence sur l'évacuation des déblais.

3.2.1. Contrôle de l'excavation

Dans un bouclier à pression de boue, une mesure de la pression de boue dans la chambre permet de réguler les débits de l'alimentation en boue et de l'évacuation de la boue chargée en déblais. De plus, le volume extrait est contrôlé (mesure des densités et des débits).

Deux techniques ont été mises en œuvre pour procéder à cette régulation [REDA - 1994] :

- la technique japonaise, qui consiste à maintenir une pression constante par un système de pompes et de vannes, le tout assisté par ordinateur. La principale difficulté réside dans le fait que, contrairement à l'alimentation, l'évacuation de la boue chargée en déblais n'est pas continue ;
- la technique allemande, qui consiste à compenser les fluctuations de volume entre l'alimentation en boue et l'évacuation des déblais par l'adjonction d'un réservoir d'air comprimé dans la chambre. Cette technique donne des résultats satisfaisants.

L'obturation des canalisations d'évacuation par les déblais (sols collants) peut poser des problèmes quant à la régulation de la pression ; des systèmes de bipasse sont donc prévus pour permettre de déboucher les conduites en inversant le sens de l'écoulement.

Dans un bouclier à pression de terre, le principal changement réside dans le fait que l'agent de soutènement n'est plus ici une suspension quasiment incompressible, mais un matériau relativement compressible. La nature triphasique de ce dernier (sol, eau, air) implique une transmission imparfaite de la pression dans la chambre : le terrain, confiné, absorbe une partie de la pression par frottement intergranulaire et par changement de volume de la phase gazeuse [REDA - 1994]. Les différences de pression peuvent alors être importantes et sont données par plusieurs auteurs :

- BADENDERERDE annonce une différence de pression dans la chambre pouvant aller jusqu'à 0,1 MPa [BADENDERERDE - 1993] ;
- MIYAZAKI et al (1984) présentent pour leur part les résultats d'une étude faite avec un bouclier à pression de terre expérimental muni d'un deuxième convoyeur à vis en partie haute de la chambre. Ce bouclier est équipé de capteurs de pression sur le disque de coupe et sur la cloison étanche de la chambre d'abattage. Les diagrammes de pression relevées au niveau du front et de la chambre montrent systématiquement une différence entre les deux pressions d'environ 0,1 MPa et ceci quelque soient les variations des paramètres de contrôle (pression de confinement, vitesse des convoyeurs à vis).

La majorité des tunneliers n'est pas équipée de capteurs de pression au niveau de la tête de coupe pour les raisons suivantes :

- des capteurs situés sur le disque de coupe tendent, en raison de la rotation de ce dernier et donc du frottement ininterrompu avec le front de taille, à s'user de façon importante ;
- leur remplacement est difficile du fait de leur position ;
- cette position est telle que le capteur ne mesure pas la pression exercée par les déblais de la chambre sur le front de taille, mais plutôt la pression de la tête de coupe sur le front de taille.

C'est pour ces raisons que la mesure de la pression s'effectue au niveau de la cloison étanche [PHIPPOTEAUX et al - 1994].

La régulation de la pression au niveau du front est rendue délicate, et ceci d'autant plus que cette dernière fluctue lors du creusement. Lorsque le bouclier progresse dans le terrain, le fait d'appliquer une poussée a pour effet de mettre le sol présent au niveau de la cloison en butée : la pression relevée par le capteur de pression de la chambre surestime alors la pression sur le front. Au contraire, lorsque le tunnelier est à l'arrêt, le sol se relâche dans la chambre et la pression relevée dans celle-ci sera inférieure à celle qui existe au niveau du front [REDA - 1994]. Cependant, une variation avec un bouclier à pression de terre aura moins de conséquences qu'avec un bouclier à pression de boue, en raison de la nature des terrains.

Le contrôle de l'excavation est également plus délicat avec un bouclier à pression de terre, puisqu'il n'existe pas de moyen pour comparer de manière simple et sûre le volume excavé des déblais avec le volume théorique des tronçons ; on se contente donc de comptabiliser les bennes sur chantier afin d'éviter un hors-profil [BADENDERERDE - 1993].

3.2.2. Influence de la nature de l'agent de soutènement

La différence de nature de l'agent de soutènement entre les deux types de bouclier constitue cependant un réel avantage pour le bouclier à pression de terre en matière de stabilisation du front.

Dans le cas du bouclier à pression de boue, la densité de la boue dans la chambre d'abattage est inférieure à celle des terres du front. Pour la plupart des sols, la formation du cake permet de s'affranchir de ce problème ; si le front présente toutefois des grains de masse élevée ou de grandes

dimensions, le bouclier à pression de boue ne peut pas toujours assurer une stabilisation sûre du front de taille [GESTA - 1992].

Dans le cas du bouclier à pression de terre, si la chambre d'abattage est correctement remplie, la présence de cette terre comprimée exclut son remplacement par toute autre matière. En revanche, si la chambre n'est pas correctement remplie, la présence d'un vide peut permettre à la terre et à l'eau de pénétrer dans la chambre, ce qui induit les mêmes inconvénients que pour le bouclier à pression de boue et une injection de boue dans la chambre est alors nécessaire.

De même, en présence d'une cavité au niveau du front de taille, la boue présente dans la chambre va remplir cette dernière, étant alors à même d'entraîner une variation brutale de la pression de confinement et donc des risques d'éboulement du front ; la nature plus pâteuse du matériau présent dans la chambre d'un bouclier à pression de terre limitera ces risques [NISHITAKE - 1990].

3.2.3. Effet de la pression hydrostatique

En présence d'une pression hydrostatique importante, le bouclier à pression de boue offre un net avantage par rapport au bouclier à pression de terre. En effet, la pression de boue appliquée dépendant de la charge hydraulique, cette dernière est équilibrée. De plus, la conception de ce bouclier assure une complète étanchéité au système (le marinage s'effectue en circuit fermé).

Par contre, pour un bouclier à pression de terre, il en va autrement : le remplissage de la chambre, mais surtout de la vis d'extraction n'est pas toujours parfait (le rendement d'un ensemble chambre/vis est de 90 % au maximum). Il s'ensuit donc que pour une charge hydraulique élevée, il est impératif de modifier le convoyeur à vis pour éviter les effets de renard.

3.2.4. Intervention dans la chambre

Bien que les boucliers utilisés de nos jours soient fortement mécanisés, l'intervention humaine est parfois indispensable, notamment dans la chambre d'abattage [GESTA - 1992].

Cette intervention dans la chambre est nécessaire en cas :

- de rencontre d'un obstacle ;
- de changement d'outils ;
- de dégagement de blocs, si ces derniers sont pris dans une matrice meuble, et que les molettes n'arrivent pas à les attaquer, ou s'ils présentent des dimensions trop importantes pour être évacués par le convoyeur à vis dans le cas d'un bouclier à pression de terre.

Pour réaliser cette intervention, le principe consiste à vider la chambre d'abattage tout en remplaçant l'agent de soutènement par de l'air comprimé. Un sas situé derrière la cloison permet le passage des hommes du bouclier vers la chambre.

Le bouclier à pression de boue possède, de par la nature de l'agent de soutènement, l'avantage suivant : le film de boue déposé sur les parois joue toujours son rôle, assurant l'étanchéité de ces parois et limitant la pénétration de l'air dans le terrain. Il ne peut toutefois assurer ces fonctions que quelques heures, pour des raisons de dessiccation de la boue. Pour une intervention plus longue, il faudra

envisager une solidification du terrain en place par une injection, généralement à base de ciment, de bentonite et de silicate [GESTA - 1992].

L'opération depuis la machine est en revanche beaucoup plus délicate pour le bouclier à pression de terre : la vidange de la chambre est moins aisée, et une fois la terre évacuée, le front n'est plus maintenu par l'agent de soutènement. Il est donc impératif de renforcer le sol au préalable par injection [BADENDERERDE - 1993].

3.3. Traitement des déblais

Le traitement des déblais est un point important pouvant parfois justifier du choix de l'une ou l'autre des deux techniques.

En ce qui concerne la technique du bouclier à pression de boue, l'agent de soutènement du front sert également de fluide de transport pour l'évacuation des déblais. Des critères économiques mais aussi relatifs aux quantités utilisées imposent son recyclage : elle est donc séparée des déblais et régénérée avant d'être réinjectée dans le circuit de marinage.

Ce recyclage s'effectue grâce à une station de séparation et de traitement des boues située généralement en surface (on peut la rencontrer sur le train suiveur de la machine dans le cas d'un diamètre de foration important) [BECKER - 1993]. Cette méthode a de nombreux inconvénients :

- la station occupe un espace conséquent, ce qui s'avère préjudiciable lorsqu'on travaille en zone urbaine, connue pour son encombrement en surface ;
- le coût d'une telle installation est élevé, et ceci d'autant plus que la quantité d'éléments fins à séparer est importante (cas des sols argileux), car elle nécessite des dispositifs complémentaires ;
- la consommation en boue est telle que les opérations de traitement des déblais peuvent limiter les performances d'avancement, à cause d'un débit de traitement des boues insuffisant.

Le problème majeur de la technique du bouclier à pression de boue, qui a d'ailleurs favorisé l'utilisation du bouclier à pression de terre, est la mise en décharge des déblais. Ces derniers sont en effet contaminés par la bentonite et créent des problèmes face à la somme croissante de restrictions législatives vis-à-vis de la mise en décharge ; de par leurs caractéristiques, il est également peu pensable que ces déblais puissent servir comme matériaux de remblais [DOWDEN et al - 1991].

Les Japonais ont toutefois résolu en partie ce problème : en effet, en suivant le raisonnement que la plupart des matériaux excavés était déjà sous une forme argileuse capable de former une suspension colloïdale, ils ont été conduits à privilégier non pas la bentonite, mais une argile naturelle thixotropique. Cette argile, dont les caractéristiques ont été améliorées avec l'ajout de produits chimiques, présente les avantages suivants :

- elle est plus économique que la bentonite ;
- le problème de mise en décharge est éliminé [MCCUSKER - 1991].

En revanche, le traitement des déblais extraits par un bouclier à pression de terre conventionnel s'affranchit de tout problème de traitement, et par là même de mise en décharge ou d'utilisation

ultérieure des matériaux. De plus, l'absence de l'unité de production et de traitement de boue prend toute son importance en site urbain.

Par contre, l'évacuation et même la mise en décharge peuvent poser des problèmes lorsqu'on utilise des variantes de la technique (adjonction d'eau ou de boue lourde). C'est pour cette raison que des efforts sont faits pour développer d'autres types d'additifs qui sont biodégradables, non-polluants et non-toxiques. Ces additifs ne changent pas les caractéristiques originelles du matériau excavé et aucune contrainte particulière ne se présente au niveau de l'utilisation ultérieure des déblais.

Le mode d'évacuation des déblais du bouclier à pression de terre présente par contre un inconvénient : en effet, l'utilisation de wagonnets implique une évacuation non continue dans la plupart des cas, car la machine est bloquée lorsque le train part vider ses wagonnets au niveau du puits de départ ; le bouclier à pression de boue n'a pas, quant à lui, ce problème [REDA - 1994].

3.4. Coût du tunnelier

Le critère économique est à considérer avec attention lors de l'étude d'un projet, et il est nécessaire de prendre en considération le prix du tunnelier et le coût de l'excavation, en considérant l'énergie d'abattage et les consommations diverses.

REDA (1994) a établi une comparaison du prix des boucliers à pression de boue et à pression de terre en fonction de leur diamètre. Par mesure de simplification, il a émis les hypothèses suivantes :

- l'évolution du prix d'un bouclier est linéairement proportionnelle à son diamètre ;
- le prix du bouclier à pression de boue comprend l'installation de séparation des boues.

Les tendances sont alors les suivantes :

- pour des petits diamètres, la part de l'installation de séparation des boues dans le coût total place le bouclier à pression de boue devant le bouclier à pression de terre ;
- l'évolution du prix d'un bouclier à pression de terre à partir de machines présentant un diamètre de 5 à 6 m est ensuite plus rapide que pour un bouclier à pression de boue, car la puissance nécessaire est plus importante pour le premier que pour le deuxième [MOHKAM - 1993].

En ce qui concerne le transport et le traitement des déblais, le bouclier à pression de terre s'avère nettement plus intéressant que le bouclier à pression de boue :

- le transport par trains et wagonnets est tout à fait classique et peu onéreux ;
- le traitement des déblais n'est pas nécessaire.

L'hypothèse sur l'évolution du prix du bouclier en fonction de son diamètre D (en m) s'avère en fait privilégier la technique de la pression de terre. En effet, une approche moyenne du couple C (en t.m) nécessaire à la tête de coupe peut être obtenue par la formule empirique suivante :

$$[C = \alpha D^3] \quad (1)$$

où α est un coefficient qui dépend de la nature du terrain et du mode de confinement.

KRAUSE (1987) donne les valeurs de α selon le bouclier utilisé, qui sont reprises sur la figure 1-9 ci-dessous.

	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4
Pression de boue allemand	■							
Pression de boue japonais		■						
Pression de terre				■				

figure 1-9 : évolution des valeurs de α selon la technique de bouclier utilisée [d'après REDA - 1994]

On s'aperçoit donc, au vu de l'évolution des valeurs de α , que le couple nécessaire est plus important pour un bouclier à pression de terre que pour un bouclier à pression de boue (allemand ou japonais).

NISHITAKE a une autre approche et compare quant à lui la puissance installée sur un tunnelier ; il donne les valeurs suivantes [NISHITAKE et al - 1993] :

- 9 à 10 kW/m² de section pour les boucliers à pression de boue de la baie de Tokyo ;
- plus de 36 kW/m² de section pour les plus puissants boucliers à pression de terre.

Cette différence importante entre les deux types de boucliers s'explique par le fait que la technique du bouclier à pression de terre fonctionne d'autant mieux que le matériau dans la chambre est homogène. Pour cela, des bras de malaxage sont montés sur la roue et sur la cloison pour malaxer et homogénéiser les déblais excavés, ce qui nécessite un couple forcément plus important.

Le tableau 1-2 donne ci-après les caractéristiques de quelques machines qui confirment généralement ces tendances.

Ouvrage	Type	Fab.	Diamètre (m)	Poussée (kN)	Couple nom. (kN.m)	Puiss. (kW)	α	Puiss. par m ²
métro de Lille (ligne 1b/lot 8)	PdB	FCB	7,65	39.000	3.480	385	0,8	08,4
Ville de Liverpool	PdB	FCB	3,24	10.200	510	165	1,5	20,0
DDE 94	PdB	FCB	3,35	10.000	310	90	0,8	10,2
DDE 94 Saint-Maur	PdB	FCB	3,35	10.000	350	90	0,9	10,2
métro de Shanghai	PdT	FCB	6,34	32.130	3.180	330	1,2	10,5
métro de Lille (ligne 2/lot 1)	PdTm	FCB	7,65	52.000	8.000	1.430	1,8	31,1
DDE 94 Vitry	PdB	FCB	3,35	10.000	510	165	1,4	18,7
collecteur Clichy/Labriche (lot 3)	PdTm	FCB	3,14	10.000	800	180	2,6	23,2
métro de Lisbonne	PdTm	FCB	9,71	80.000	16.500	2.250	1,8	30,4
métro de Lille ligne 2/section F	PdB	FCB	7,73	52.000	4.000	640	0,9	13,6
métro de Lille (ligne 2/lots 2 & 3)	PdTm	FCB	7,68	52.500	9.200	1.280	2,0	27,6
métro de Londres Jubilee Line	PdTbl	FCB	5,03	25.000	2.150	270	1,7	13,6
collecteur Clichy/Labriche (lot 4)	PdTm	FCB	3,14	10.000	1.100	450	3,6	58,1
B.P.N.L.	PdTbl	NFM	11,02	102.000	22.780	3.515	1,7	36,9
baie de Tokyo	PdB	MHI	14,14	240.000	32.600	1.500	1,2	09,6

(PdB : Pression de Boue / PdT : Pression de Terre

PdTm : PdT avec injection de mousse / PdTbl : PdT avec injection de boue lourde)

tableau 1-2 : valeurs de α et de la puissance nécessaire selon le type de bouclier [d'après un document FCB] [d'après NISHITAKE et al - 1993]

On relève dans ce tableau certaines valeurs en contradiction avec ce qui a été dit précédemment. On peut l'expliquer de la façon suivante :

- la présence de grès et de blocs dans la géologie nécessitait un couple important en tête pour la machine utilisée à Liverpool ;
- le creusement à Shanghai a eu lieu dans un sol particulièrement propice à la technique du bouclier à pression de terre, puisqu'il s'agissait d'une argile molle ;
- la première expérience du lot 3 du collecteur de Clichy/Labriche a montré la présence de bancs très durs dans l'horizon des Marnes et Caillasses, ce qui a donné lieu, pour la machine du lot 4, au choix d'une puissance installée plus importante.

Le coût de l'excavation comprend quant à lui :

- l'énergie d'abattage, qui est le rapport entre la puissance consommée et le volume de terrain excavé, qui sera plus importante pour le bouclier à pression de terre ;
- les consommables, et notamment la boue, qui occasionnent un coût élevé, en raison d'une grande consommation. Le bouclier à pression de terre, s'il est amené à travailler avec des additifs, sera moins consommateur.

Un point est à considérer en terme de coûts : la nature de l'agent de soutènement peut induire une durabilité moins importante pour les organes de fonctionnement d'un bouclier à pression de terre (chambre d'abattage, convoyeur à vis) et donc une baisse de l'efficacité à réduire le gradient de pression [HERRENKNECHT - 1994].

4. CONCLUSION

La réalisation d'ouvrages souterrains dans des terrains meubles et aquifères a montré la nécessité d'utiliser des tunneliers à bouclier. Parmi les différents types de machines existantes, ce sont les boucliers à front confiné qui sont à l'heure actuelle les plus fréquemment utilisés ; on peut citer en particulier une prédominance des deux techniques les plus récentes, les boucliers à pression de boue et à pression de terre.

La technique du bouclier à pression de boue est plus connue que celle du bouclier à pression de terre ; elle a en effet fait l'objet de nombreuses recherches, que ce soit au Japon ou en Europe. En France, un projet national de recherche sur les boucliers pressurisés, appelé *Tunnel 85-90*, comprenait notamment un thème sur le soutènement liquide du front de taille.

Ces études ont permis l'élargissement du domaine d'application de cette technique et d'être à même de choisir les paramètres relatifs à l'agent de soutènement en fonction des caractéristiques d'un projet [REDA - 1994].

Depuis la première utilisation d'un bouclier à pression de terre, les Japonais ont développé la technique jusqu'à atteindre un niveau de sophistication élevé et ce type de machine représentait en 1991 les deux-tiers des boucliers pressurisés au Japon (des petits diamètres jusqu'à 8,5 m) [DOWDEN et al - 1991]. Cette technique connaît de même un réel engouement en Europe. Elle est cependant loin d'être maîtrisée, et la nécessité de mieux cerner les problèmes se retrouve dans deux projets nationaux français qui vont dans ce sens :

- *Eupalinos 2000*, qui concerne le creusement mécanisé des tunnels en terrain hétérogène, propose une étude relative au bouclier à pression de terre ;
- *Microtunnels*, dont l'un des objectifs est d'étudier l'apport des additifs dans l'amélioration du percement par microtunneliers, l'effort portant principalement sur la technique de la pression de terre.

Malgré les différences existant entre les deux techniques, on peut dire aujourd'hui que ces boucliers présentent un fonctionnement sensiblement identique, l'agent de soutènement différant uniquement par la densité [BECKER - 1993]. Le choix du bouclier le plus adapté est donc lié aux sujétions environnementales.

- CHAPITRE 2 -

***UTILISATION DES MOUSSES CHIMIQUES
LORS DU PERCEMENT
PAR BOUCLERS À PRESSION DE TERRE***

I. INTRODUCTION

Une des différences les plus importantes entre les boucliers à pression de boue et à pression de terre est, comme souligné précédemment, le domaine d'utilisation de ces deux techniques. Si le bouclier à pression de boue était à l'origine prévu pour des sols aquifères, non cohérents, présentant une forte teneur en fines, le bouclier à pression de terre était quant à lui plus adapté au creusement dans des sols meubles cohérents (limons et argiles molles).

La mise en décharge des déblais étant de plus en plus soumise à réglementation, le bouclier à pression de terre occupe une place de plus en plus importante dans la réalisation des ouvrages souterrains, puisqu'il permet l'évacuation des déblais sans traitement particulier.

Pourtant, la recherche de l'élargissement du domaine d'utilisation des boucliers à pression de terre (sols non cohérents, sols présentant un degré de plasticité important) a conduit dans un premier temps à la mise au point de variantes qui présentaient les mêmes inconvénients que les boucliers à pression de boue en matière de traitement des déblais.

À l'heure actuelle, cette recherche s'est orientée vers le développement d'additifs qui, utilisés avec les boucliers à pression de terre, permettent leur utilisation dans une gamme de terrains variés, et qui présentent de plus un caractère non-toxique et biodégradable qui autorise l'évacuation des déblais sans contraintes particulières. Si l'on dénombre aujourd'hui plusieurs types d'additifs, celui qui rencontre incontestablement le plus grand succès est la mousse chimique, et ceci en raison de ses nombreuses qualités.

Les applications industrielles à l'origine de l'utilisation de la mousse chimique sont présentées ci-après, ainsi que les caractéristiques qui doivent être considérées pour cette dernière. On s'intéresse enfin plus particulièrement à l'application aux travaux souterrains, avec une étude de l'action de la mousse sur le sol excavé d'une part, et avec une présentation du procédé d'injection de mousse d'autre part.

2. UTILISATION DES MOUSSES

Les applications industrielles des mousses sont nombreuses. On peut notamment citer leur utilisation dans les domaines suivants [OKPOBIRI - 1982] [MYERS - 1992] :

- les matériaux de construction (produits d'isolation, caoutchouc-mousse, béton cellulaire, matériaux de remplissage pour les mines et les cavités) ;
- les produits à usage ménager et domestique (détergents, shampooings, ...) ;
- certains processus industriels tels que la flottation de minerais, les opérations de plaquage ou d'argentage ;
- l'industrie pétrolière (récupération assistée du pétrole, fracturation hydraulique) et les travaux publics (opérations de forage) ;
- la lutte contre l'incendie.

L'utilisation de la mousse dans les travaux souterrains est issue de l'expérience acquise dans certains de ces domaines, dont il est question ci-après.

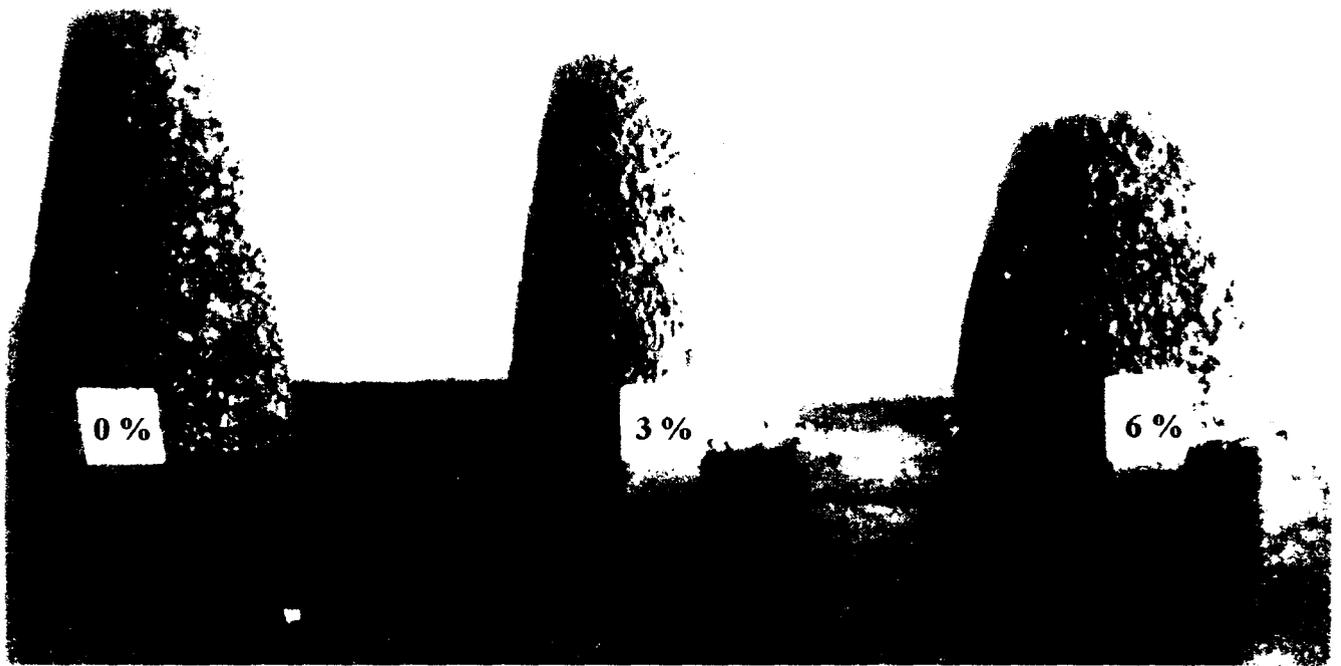
2.1. Le béton cellulaire

Le développement du béton cellulaire (ou béton-mousse) est dû à la découverte de l'effet qu'avaient de petites bulles d'air sur le béton aux États-Unis dès 1930 ; en effet, certains tronçons de route résistant mieux que d'autres au gel, des études au microscope révélèrent que ces bétons contenaient un très grand nombre de petites bulles d'air. L'existence de ces bulles d'air s'expliquait en fait par la présence de produits appelés entraîneurs d'air [VENUAT - 1984].

Ces produits permettent la formation, lors du malaxage, à l'intérieur des mortiers et des bétons, de petites bulles d'air qui modifient le comportement du matériau à l'état frais et à l'état durci. Ces bulles d'air sont de forme arrondie, d'un diamètre compris entre 10 et 1000 μm , la plus grande partie étant comprise entre 100 et 300 μm .

Les bulles d'air ont une grande influence sur le béton frais ; en effet, elles jouent le rôle :

- d'un fluide, en remplaçant une certaine quantité d'eau, ce qui améliore l'ouvrabilité (la maniabilité) du matériau (voir figure 2-1). Par exemple, pour un béton de classe granulométrique 0/20 mm dosé à 300 kg de ciment, a % d'air ont le même effet que $0,5 a$ % d'eau ;
- d'un inerte, les bulles remplaçant par leur granulométrie une partie du sable (inférieur à 1 ou 2 mm). Leur avantage par rapport au sable est qu'elles ont un meilleur coefficient de forme, qu'elles sont déformables et qu'elles peuvent glisser sans frottement ; elles diminuent ainsi la teneur en vides accidentels irréguliers, qui sont néfastes pour le béton (diminution de la résistance).



*figure 2-1 : influence du pourcentage d'air occlus sur l'ouvrabilité d'un béton
[d'après VENUAT - 1984]*

Les caractéristiques du béton frais s'en trouvent ainsi améliorées :

- plus grande homogénéité, baisse de la ségrégation ;
- mise en place facilitée, surtout avec des granulats anguleux, les bulles agissant comme un lubrifiant ;
- plus grande cohésion et diminution du ressuage : les bulles soutiennent les grains inertes et freinent leur descente, elles bouchent les passages par où l'eau pourrait remonter en créant des ponts entre les grains de sable et le ciment.

Les propriétés des entraîneurs d'air ont conduit au développement du béton cellulaire en Allemagne vers 1965. Ce béton peut être fabriqué selon deux procédés :

- le premier nécessite une seule opération, l'ajout d'un entraîneur d'air lors du malaxage. La densité de ce béton est essentiellement fonction du pourcentage du produit et des conditions de malaxage (temps, énergie) ;
- le deuxième nécessite plusieurs étapes qui sont :
 - la préparation d'une pâte ou d'un mortier dense en bétonnière ou en malaxeur,
 - la génération d'une mousse stable à l'aide d'un dispositif spécial (voir paragraphe 3.3),
 - le mélange et le malaxage du mortier et de la mousse.

La densité sera alors fonction de la quantité de mousse introduite.

C'est le deuxième procédé qui est actuellement le plus répandu.

2.2. Les opérations de forage

Bien qu'étant une technique très ancienne, le forage s'est beaucoup développé avec les industries minières et pétrolières, et il a mis à profit de nombreuses innovations techniques déterminantes, notamment l'utilisation des fluides de forage [MAILLARD - 1985].

Ces derniers ont pour rôles :

- de nettoyer le trou en remontant les déblais du forage ;
- d'aider à l'avance de l'outil en nettoyant l'espace qui existe entre les dents de celui-ci, évitant ainsi le bourrage ;
- de refroidir et de lubrifier l'outil et le train de tiges ;
- d'éviter les éboulements en terrain non cohérent ou les resserrements en terrain gonflant ;
- de limiter les venues ou les pertes d'eau ;
- de limiter la corrosion de l'outillage ;
- de ne pas gêner l'interprétation géologique.

Il existe de nombreux types de produits susceptibles de résoudre tout ou partie des problèmes rencontrés, parmi lesquels l'air comprimé (utilisé essentiellement en forage à roto-percussion), l'eau, la boue (la bentonite étant la plus utilisée) ainsi que ses différents adjuvants et les produits chimiques, parmi lesquels on compte la mousse.

La boue a très rapidement supplanté les autres fluides de forage (principalement l'air comprimé et l'eau) en raison de ses qualités comme fluide de forage, puisqu'elle permet d'augmenter l'efficacité et la sécurité des opérations de forage tout en réduisant le temps et les coûts de forage.

La technique du forage à la mousse, plus récente, est également très répandue, en raison de nombreux avantages [OKPOBIRI - 1982] :

- la facilité d'utilisation, puisqu'il suffit de déverser la solution moussante dans le train de tiges, l'énergie fournie par l'outil de forage permettant de générer la mousse (on parle de génération in-situ) ;
- la bonne capacité de transport de la mousse. De cette manière, les déblais sont remontés avec de faibles vitesses annulaires qui réduisent le risque de cavage des parois du trou. L'air seul, nécessitant de grandes vitesses annulaires pour enlever les particules, peut par contre être à l'origine d'instabilités ;
- la capacité de convertir l'eau provenant du sol en une partie de son eau constituante. En cas de forage à l'air, les copeaux mouillés collent souvent au train de tiges et aux parois du trou, menant en fin de compte à des pertes de circulation, voire à un blocage du train ;
- la réduction ou l'élimination des risques de feu lors du forage dans un environnement hydrocarboné, car la mousse prend complètement au piège la phase gazeuse ;
- le caractère lubrifiant ainsi qu'une basse pression de circulation permettent de plus grands taux de pénétration et une vie plus longue des outils ;
- son caractère biodégradable, non-toxique et non-polluant, qui permet à la mousse d'être utilisée pour tous les types de forage.

3. CARACTÉRISATION DE LA MOUSSE

Si l'utilisation de la mousse dans de nombreux domaines semble triviale, cette dernière n'en reste pas moins un système dont le comportement est complexe. Le choix du produit responsable de sa formation ainsi que sa génération s'avèrent essentiels.

Les produits susceptibles de former des solutions moussantes sont de deux types :

- ceux qui, en solution dans le liquide de base, sont adsorbés à l'interface sous forme moléculaire. Les mousses formées par des solutions de ces produits se détruisent rapidement au fur et à mesure de l'écoulement du liquide du film inter-bulles ;
- ceux qui forment avec le liquide de base des systèmes colloïdaux. Les mousses formées par les solutions de ces produits sont relativement stables.

Les produits utilisés dans les travaux souterrains sont du deuxième type et sont appelés plus généralement produits tensioactifs.

3.1. Les produits tensioactifs

3.1.1. Mode d'action

Ces produits tensioactifs, ou agents de surface, se situent parmi les produits les plus fréquemment rencontrés et les plus utiles dans le domaine de la chimie moderne ; ils présentent la propriété de modifier les interactions existant aux interfaces (frontières entre au moins deux phases non-miscibles).

Les atomes ou molécules aux interfaces ont généralement une énergie potentielle plus grande que ceux présents au cœur du matériau : ils n'ont en effet pas l'environnement symétrique dont ils bénéficient au sein de ce dernier et subissent donc un champ de forces en raison de la modification des forces de cohésion dans la région interfaciale. En raison de la plus grande énergie des molécules de surface, appelée tension superficielle, il est nécessaire de fournir du travail pour les amener de la masse vers la surface [MYERS - 1992].

La molécule de certains produits, dits amphiphiles (produits comportant deux parties de polarité différente), est constituée par :

- des composants qui ont une affinité pour l'eau, appelés le groupe hydrophile ;
- des unités qui ont une forte attraction avec les solvants non-aqueux, appelés cette fois le groupe hydrophobe.

L'introduction de ces produits amphiphiles dans une solution aqueuse va avoir pour effets :

- leur rassemblement aux interfaces, pour des raisons de minimisation d'énergie ;
- leur orientation, de manière à ce que la partie hydrophile soit dans l'eau et la partie hydrophobe à l'extérieur.

Lorsque cette interface est la surface libre de la solution, en contact avec l'air, ces produits vont former un film superficiel de molécules orientées, qui diminue la tension superficielle : c'est pour cette raison qu'ils sont appelés agents de surface ou tensioactifs (voir figure 2-2) [MARCOU - 1990].

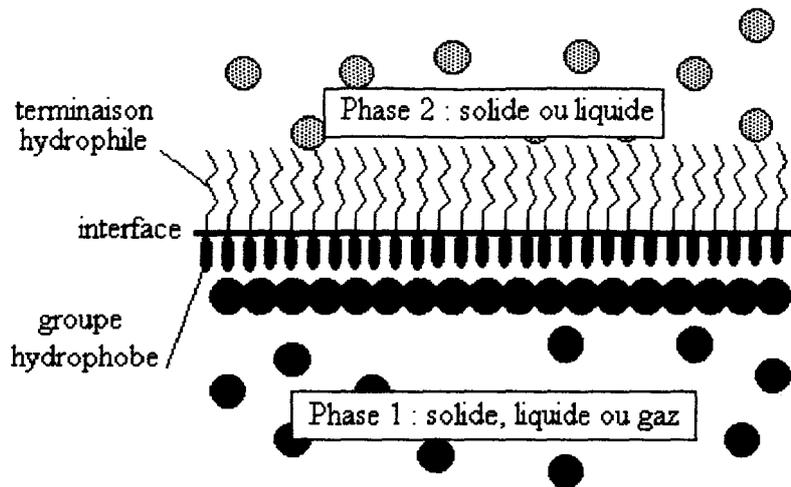


figure 2-2 : orientation préférentielle des molécules tensioactives aux interfaces [d'après MYERS - 1992]

3.1.2. Familles de tensioactifs - Applications

Les tensioactifs sont répartis en quatre grandes classes selon le caractère ionique de leur groupe hydrophile [LARPENT - 1995] :

- les tensioactifs anioniques, qui comportent un groupement ionique, chargé négativement en solution aqueuse : carboxylate, sulfate, sulfonate ou phosphate. Ce sont les agents tensioactifs les plus utilisés industriellement ;
- les tensioactifs cationiques, qui comportent un groupement ionique, chargé positivement en solution aqueuse : ce sont généralement des sels d'ammonium quaternaires ;
- les tensioactifs amphotères ou zwitterioniques, qui comportent deux groupements ioniques, l'un cationique et l'autre anionique, qui se neutralisent au pH isoélectrique. Les composés zwitterioniques les plus répandus sont les bêtaines et les sulfobetaines ;
- les tensioactifs non-ioniques, dont l'hydrophilie est apportée par des groupements fonctionnels non chargés (alcool, éther, ester, amide), ne s'ionisent pas ou peu en solution aqueuse.

Les tensioactifs, du fait de leur constitution et de leur activité, possèdent des propriétés particulières et sont souvent dénommés en fonction de celles-ci, soit :

- détergents lorsqu'ils facilitent l'élimination des souillures et des salissures, ainsi que leur dispersion dans l'eau. Ils sont utilisés pour le lavage et le nettoyage ;
- dispersants lorsqu'ils augmentent la stabilité de la suspension de petites particules solides au sein d'un liquide ;
- émulsionnants lorsqu'ils facilitent la formation d'émulsions, c'est-à-dire la dispersion, sous forme de fines gouttelettes, d'un liquide dans un autre et en augmentent la stabilité ;

- mouillants lorsqu'ils favorisent l'étalement d'un liquide sur une surface solide ou augmentent sa vitesse de pénétration dans des corps poreux ;
- moussants ou anti-moussants lorsqu'ils provoquent ou empêchent la formation de mousses ;
- solubilisants lorsqu'ils augmentent la solubilité apparente dans l'eau des corps peu solubles.

Le choix d'un tensioactif commercial (produit de synthèse, qui est pratiquement toujours un mélange de composés), pour une application donnée, est un compromis entre ses propriétés, qui doivent être en adéquation avec la fonction cherchée, et son coût de fabrication.

3.2. Caractéristiques, formation et stabilité de la mousse

3.2.1. Caractéristiques

La mousse représente un état physique dans lequel une phase gazeuse (gaz ou vapeur) est dispersée sous forme de bulles dans une seconde phase (liquide ou solide). Les deux phases sont appelées respectivement dispersée et dispersante. Le film liquide ou solide qui sépare les bulles est dénommé "squelette" ou "carcasse" de la mousse. Les mousses utilisées dans les travaux souterrains sont des mousses à dispersant liquide.

Pour décrire une mousse, on peut en énoncer les caractéristiques principales qui sont :

- le pouvoir moussant (aptitude ou capacité moussante), qui peut être exprimé par la quantité de mousse (volume ou hauteur de colonne) qui se forme à partir d'une quantité de liquide donnée dans des conditions et en un temps déterminés ;
- la stabilité de la mousse, qui est sa capacité à maintenir son volume constant et à empêcher le liquide constituant le squelette de s'écouler. Pour évaluer cette stabilité, on mesure la durée de demi-vie d'un volume de mousse donné, c'est-à-dire le temps nécessaire pour récupérer la moitié de la solution qui a été utilisée pour générer la mousse considérée : on estime alors à ce moment-là que la mousse n'est plus en mesure de remplir correctement ses fonctions. Dans certains cas, on s'attache plutôt à la durée de vie de la mousse ;
- le degré de dispersion de la mousse, qui peut être caractérisé par :
 - la dimension moyenne des bulles,
 - la fonction de distribution des bulles (par unité de volume),
 - la surface spécifique de séparation des bulles (par unité de volume).

Les notions de texture, d'onctuosité ou encore de consistance sont à rapprocher de celle de degré de dispersion dans la mesure où elles se réfèrent aux mêmes caractéristiques.

Pour certaines applications, d'autres caractéristiques comme la viscosité, la conductivité thermique et électrique peuvent avoir une grande importance.

Un autre facteur est à déterminer pour la structure de la mousse : le rapport entre le volume de la phase gazeuse et le volume de la phase liquide, qui conditionne la forme des bulles. Si le rapport est

limité de 10 à 20, la forme des bulles est sphérique ; pour ce type de mousse, la pellicule liquide entre les bulles est relativement épaisse. Pour des valeurs différentes, les bulles ont une forme polyédrique. La forme de transition est dite en “nids d’abeille”.

Une caractéristique est également importante pour les mousses générées industriellement (voir paragraphe 3.3) : il s’agit du coefficient d’expansion de la mousse (appelé parfois taux de foisonnement), noté K ou β , égal au rapport entre le volume de mousse générée V_m et le volume de liquide initial V_l , soit :

$$\left[K = \frac{V_m}{V_l} = \frac{V_g + V_l}{V_l} \right] \quad (2)$$

où V_g est le volume de gaz présent dans la mousse.

On définit également une mousse par sa qualité Γ , qui est égale au rapport entre le volume de gaz présent dans un volume de mousse donné et ce même volume de mousse [OKPOBIRI - 1982]. On peut donc écrire :

$$\left[\Gamma = \frac{V_g}{V_m} = \frac{V_m - V_l}{V_m} \right] \quad (3)$$

Les relations entre Γ et K sont donc :

$$\left[\Gamma = \frac{K - 1}{K} \right] \quad (4)$$

$$\left[K = \frac{1}{1 - \Gamma} \right] \quad (5)$$

Les mousses de faible qualité (coefficient d’expansion faible) sont dites mouillées alors que les mousses de bonne qualité (coefficient d’expansion élevé) sont appelées mousses sèches.

Remarque : le terme de “coefficient d’expansion” sera préféré par la suite à celui de “qualité”, car ce dernier est source de confusions, pouvant être associé à d’autres notions.

On rencontre également la notion de “densité de mousse” (ou Liquid Volume Fraction) qui correspond à l’inverse du taux d’expansion.

Différents facteurs peuvent influencer sur les caractéristiques d’une mousse :

- la structure moléculaire du tensioactif ;
- la concentration de ce dernier. Le pouvoir moussant augmente jusqu’à la concentration critique micellaire, et après peut, selon le produit, rester constant ou décroître ;
- la température, dont l’influence est certaine, mais complexe car elle est liée à un grand nombre de phénomènes. La tendance est une augmentation du pouvoir moussant et de la stabilité pour des températures comprises entre 20 et 50 °C, et leur diminution pour des températures supérieures ;
- le pH, dont l’influence est très importante, en particulier sur les solutions à base de tensioactifs ioniques ;
- la tension superficielle, qui, lorsqu’elle diminue, tend à augmenter le pouvoir moussant. Ce phénomène est dû en grande partie au fait que l’énergie nécessaire pour obtenir la même surface spécifique de mousse diminue avec la baisse de la tension superficielle ;
- l’utilisation de certains produits, qui vont agir sur le pouvoir moussant et sur la stabilité de la mousse. Ces adjuvants peuvent être moussants ou anti-moussants.

L’étude de la viscosité de la mousse permet notamment de voir à quel point la mousse a un comportement complexe. SIBREE, en 1934, a établi que la viscosité apparente de la mousse était plus grande que celle de chacun de ses constituants ; il a également montré que la mousse présentait une contrainte de cisaillement critique en dessous de laquelle elle avait un comportement newtonien (fluide parfait, pour lequel l’effort de cisaillement est proportionnel à la vitesse de cisaillement), et au-dessus de laquelle son comportement était celui d’un fluide plastique binghamien (fluide pseudo-plastique) [OKPOBIRI - 1982].

3.2.2. Processus de stabilité et de destruction

Une mousse est produite par l’introduction d’air (ou d’un autre gaz) dans une phase liquide ; les bulles sont alors emprisonnées par un film liquide.

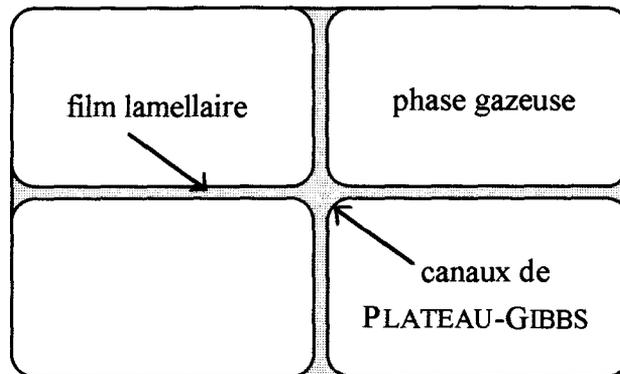
La mousse, comme tout système dispersé est thermodynamiquement instable puisqu’il y a un excès d’énergie proportionnel à la surface de séparation gaz/liquide. Le système tend vers l’équilibre qui est atteint quand l’énergie est minimale, c’est-à-dire quand toute la mousse a été détruite (la surface gaz/liquide est toujours plus grande pour une mousse que pour un liquide).

Dans le cas d’une mousse composée de bulles de petite taille, chaque interface possédera un rayon de courbure élevé. Comme l’indique l’équation de Laplace donnée ci-dessous, il existera une différence de pression ΔP entre les deux interfaces, relative aux rayons de courbure du système, r_1 et r_2 , et à la tension superficielle σ .

$$\left[\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \right] \quad (6)$$

Quand trois bulles ou plus sont en contact, plus spécialement quand la mousse a atteint une structure qui est plus ou moins en nids d'abeille, une région où la courbure de la lamelle est plus grande qu'ailleurs va se développer. Ces régions, appelées canaux de PLATEAU-GIBBS (voir figure 2-3), sont le siège de différences de pression plus grandes que partout ailleurs dans la mousse.

La pression du gaz à l'intérieur d'une bulle étant uniforme, la pression du liquide des canaux de PLATEAU-GIBBS est plus faible que celle des régions plus parallèles des interfaces. Par conséquent, le drainage du fluide a lieu des régions lamellaires vers les canaux de PLATEAU-GIBBS. La lamelle, devenant de plus en plus mince, va atteindre une épaisseur critique pour lequel le système ne peut plus maintenir la pression, et la rupture survient.



*figure 2-3 : représentation schématique des canaux de PLATEAU-GIBBS
[d'après MYERS - 1992]*

Plusieurs critères peuvent jouer en faveur de la stabilité d'une mousse [MYERS - 1992] :

- une viscosité élevée de la phase liquide, retardant ainsi le drainage du liquide des interfaces et procurant de plus une certaine résistance au film, ce qui permet d'avoir un effet dissipateur sur un grand nombre de phénomènes perturbateurs (chocs, vibrations, poussières, ...) ;
- une viscosité de surface élevée, qui retarde également les pertes de liquide par un mécanisme de frottement visqueux ;
- des effets de surface, comme les effets de GIBBS-MARANGONI, qui agissent en remédiant à l'amincissement du film liquide. Cette "restauration" se produit par l'écoulement du liquide des zones de basse tension superficielle vers des zones à haute tension superficielle, où la concentration en tensioactif est plus basse ;
- la présence d'interactions électriques ou stériques à l'interface qui peuvent s'opposer au drainage.

De même, la destruction d'une mousse est due à plusieurs facteurs :

- l'écoulement du liquide du film en raison de la gravité à travers le réseau des canaux de PLATEAU-GIBBS ;
- la diffusion du gaz, due à la différence de pression entre les bulles et à la perméabilité du film liquide au gaz considéré. Les petites bulles vont alors diminuer et finalement disparaître au profit des grosses bulles, qui vont s'accroître davantage. La diffusion augmente par conséquent la dispersion des dimensions des bulles ;

- la rupture du film lamellaire. Hormis la rupture due à une épaisseur critique, on peut observer ce phénomène pour un film relativement épais. Le mécanisme de destruction est alors tout à fait différent : la présence importante de liquide “emprisonné” entre les deux couches interfaciales ; ces dernières ont une interaction assez faible, ce qui amènera la rupture.

La capacité d’un tensioactif à agir en tant qu’agent moussant va finalement dépendre de :

- son efficacité à réduire la tension superficielle de la solution ;
- ses caractéristiques concernant la diffusion ;
- ses propriétés concernant les interactions qui ont lieu entre les films minces, qui font appel à des forces de dispersion, mais aussi des forces électrostatiques et stériques ;
- les propriétés élastiques que cela implique pour les interfaces.

3.2.3. Comportement de la mousse sous pression

Un autre facteur important est celui de la compressibilité de la mousse : son injection s’effectuant en effet dans un milieu confiné (pression des terres), il est nécessaire de connaître son comportement sous pression.

Si on prend les deux hypothèses suivantes [MARSDEN et al - 1966] :

- la loi de BOYLE-MARIOTTE est applicable. Cette loi stipule qu’à température constante, le produit de la pression à laquelle un gaz est soumis par le volume qu’il occupe reste constant :

$$[pV = nRT] \quad (7)$$

- où :
- p est la pression subie par le gaz (Pa),
 - V est le volume molaire du gaz parfait (m^3/mol),
 - n est le nombre d’AVOGADRO (mol^{-1}),
 - R la constante molaire des gaz parfaits ($\text{Nm}/^\circ\text{K}$),
 - T la température absolue ($^\circ\text{K}$).

- la solubilité du gaz dans la solution est négligeable,

il a été montré que le coefficient d’expansion K varie comme l’inverse de la pression P . K_a étant le coefficient d’expansion mesuré à pression atmosphérique P_a , on a :

$$\left[K = \frac{P_a}{P} (K_a - 1) + 1 \right] \quad (8)$$

On voit donc qu’il est nécessaire, lors de l’étude d’un projet, de connaître au mieux la pression de consigne qui sera choisie lors du creusement, ceci afin de pouvoir dimensionner le système de génération de mousse.

Remarque : en première approche, si on prend comme hypothèse supplémentaire le fait que le volume de la solution est négligeable par rapport au volume de gaz, on a l'équation suivante :

$$\left[K = \frac{P_a}{P} K_a \right] \quad (9)$$

Les valeurs trouvées en appliquant cette formule sont assez satisfaisantes.

Des études effectuées sur le drainage de la mousse ont montré l'influence qu'avait le confinement sur ce paramètre. RAND et al (1983) ont en effet généré de la mousse à différentes pressions et ont mesuré les temps de drainage nécessaires pour récupérer 25 et 50 % de la solution initiale ; ils ont également mesuré approximativement le diamètre des bulles à différentes pressions. Les résultats obtenus montrent une augmentation des temps de drainage proportionnelle à celle de la pression de confinement, et ceci pour un volume de solution des différentes mousses sensiblement identique et pour différents tensioactifs moussants (anioniques, cationiques, amphotères et non-ioniques) et différents gaz (air, azote et argon). Les résultats des essais réalisés avec un sulfonate (tensioactif anionique) et de l'argon sont repris dans le tableau 2-1.

Pression (MPa)	Fraction liquide (%)	Temps de drainage (mn)		Diamètre des bulles (µm)
		25 %	50 %	
0,10	4,7	6,6	11,0	120
0,53	4,0	18,0	29,0	—
1,22	4,9	49,0	71,0	—
2,30	4,5	62,0	110,0	56
7,31	4,5	200,0	590,0	41

tableau 2-1 : influence de la pression de confinement sur le temps de drainage de la mousse [d'après RAND et al - 1983]

Ces essais montrent donc que les temps de drainage de la mousse varient grandement avec la pression de confinement ; on peut associer cette évolution à la variation de la taille des bulles, donc à la structure même de la mousse.

3.3. Génération

La mousse peut être formée selon deux mécanismes de base, à savoir :

- la condensation. Un changement des paramètres physiques ou chimiques de la solution dû à sa sursaturation en gaz par un phénomène physique (chauffage de la phase gazeuse dans le liquide saturé ou diminution de la pression partielle du gaz) ou chimique (réaction chimique) peut former une mousse par dégagement gazeux ;
- la dispersion. La mousse est formée par le mélange du liquide avec le gaz sous certaines conditions.

Sa formation peut être également due à une combinaison de ces deux mécanismes.

Les applications décrites précédemment concernent la mousse formée par dispersion. Cette dernière peut être créée soit :

- de façon “naturelle” : la présence des deux phases (liquide et gazeuse) et un environnement favorable vont provoquer la formation de mousse. Le forage à la mousse ou le béton cellulaire en sont deux exemples ;
- en faisant passer les deux phases dans un dispositif appelé générateur. C’est à l’intérieur de ce dernier que la mousse est formée : son rôle est de créer une perte de charge pour produire l’énergie nécessaire à cette formation.

La fabrication de la mousse au moyen d’un générateur permet de contrôler des paramètres essentiels tels que sa qualité et sa texture. Il existe de nombreux types de générateurs, parmi lesquels :

- un tube rempli d’un milieu poreux, qui va favoriser l’apparition de turbulences, permettant la génération de la mousse [MARSDEN et al -1966] [RAND et al -1983] ;
- un tube en spirale dans lequel circule le liquide et qui est muni d’une arrivée d’air [OKPOBIRI - 1982] ;
- un fût ouvert à une extrémité, muni à l’autre :
 - d’un prémélangeur eau/tensioactif associé à un système VENTURI, qui va permettre l’arrivée de la phase liquide sous la forme d’une suspension dans le fût,
 - d’ouïes permettant le passage de l’air libre par aspiration.

Les deux phases se mélangent alors dans le fût et forment une mousse homogène ; ce système est utilisé pour la génération de mousse dans la lutte contre l’incendie.

Même si la réalisation d’un générateur reste relativement simple, son choix n’en reste pas moins complexe. Il est en effet nécessaire de faire de nombreux essais lors de sa mise au point afin de pouvoir le caractériser. Les paramètres suivants sont à considérer avec attention :

- la perte de charge engendrée qui est un facteur prépondérant pour ce qui est de la qualité de la mousse ;
- la taille des bulles, qui va influencer sur la durée de vie de la mousse ;
- la plage optimale de débits, dans le cas où une variation de celui-ci est nécessaire.

Le générateur reste donc un paramètre non négligeable dans la fabrication de la mousse [QUEBAUD et al - 1995 a]. Des études réalisées sur ce dernier sont présentées dans le chapitre 4.

Le schéma de la figure 2-4 reprend finalement ci-dessous l'influence réciproque des principaux paramètres régissant les propriétés, la formation et la durée de vie d'une mousse.

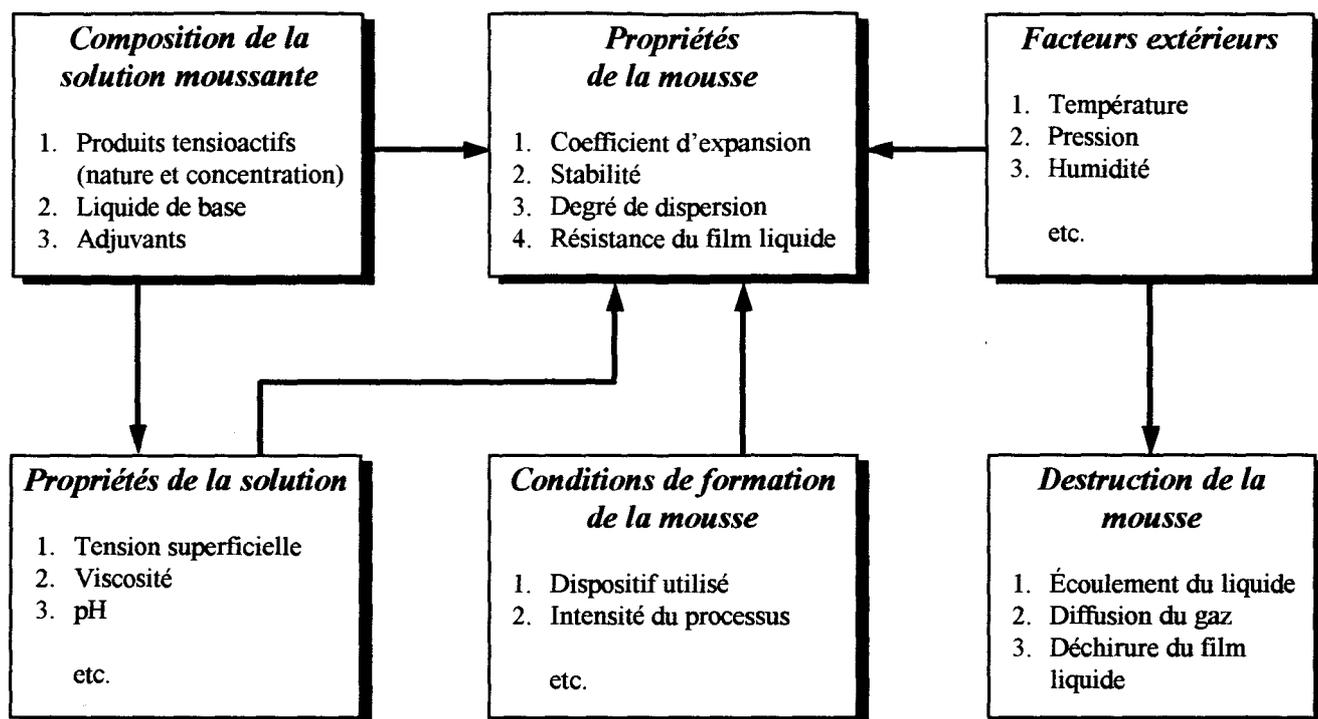


figure 2-4 : principaux paramètres décrivant une mousse

4. APPLICATION AUX TRAVAUX SOUTERRAINS

L'utilisation de la mousse dans le domaine du tunnelage nous vient du Japon, où l'entreprise de construction Obayashi Corporation l'a utilisée pour la première fois au milieu des années 1980. Le nombre de chantiers réalisés depuis au Japon avec la mousse et la création en 1986 d'une association regroupant les fabricants et les utilisateurs de mousse au Japon, la RFSTMA¹, témoigne de la pertinence de ce procédé.

Le procédé d'injection de mousse a été utilisé beaucoup plus tardivement en Europe et les chantiers réalisés à ce jour sont les suivants :

- métro de Lille, ligne 2/lot 1, en 1992,
- collecteur T5 à Vitry-sur-Seine (microtunnelier), en 1992,
- liaison ferroviaire "Passante ferroviario" à Milan, en 1992,
- collecteur de Clichy-La Briche/lot 3, en 1993,
- métro de Valence, en 1995,
- métro de Lisbonne, lignes A & B, en cours de réalisation,
- métro de Lille, ligne 2/lots 2 & 3, en cours de réalisation,
- collecteur de Clichy-La Briche/lot 4, en cours de réalisation,
- collecteur VL 10, en cours de réalisation,
- collecteur LAS, en cours de réalisation.

En France, on s'intéresse de plus en plus à cette technique, que ce soit au niveau des fabricants de produits, des fabricants de tunneliers, des entreprises de travaux souterrains mais aussi des donneurs d'ordre.

4.1. Action de la mousse sur le sol excavé

Le sol excavé par un bouclier à pression de terre doit présenter des caractéristiques telles que le fonctionnement du tunnelier soit optimal. Selon la nature de ce dernier, il peut donc être nécessaire de lui adjoindre de la mousse afin de modifier ses caractéristiques originelles [QUEBAUD et al - 1996]. Comme souligné dans le chapitre 1, le bouclier à pression de terre était à l'origine prévu pour des sols meubles cohérents comme les limons ou les argiles molles, possédant une teneur en eau satisfaisante.

Les autres types de sol présentent, de par leur nature, des problèmes différents :

- risque de collage et de colmatage pour les sols présentant un indice de plasticité élevé,
- manque de fluidité plastique et problème de perméabilité pour les sols granulaires.

Le pâton obtenu par le mélange entre le sol excavé et la mousse doit donc être proche de l'état plastique (état communément appelé pseudo-fluide ou pseudo-plastique), être quasiment imperméable et ne pas coller, ni présenter des risques de colmatage. Atteindre un état plastique signifie pour la mousse amener la teneur en eau du terrain abattu à une valeur optimale.

¹ Rheological Foam Shield Tunnelling Method Association

De plus, la fonction principale d'un bouclier à front fermé étant la stabilisation du front de taille, il est nécessaire de contrôler la pression de confinement et faire en sorte qu'elle soit la plus proche possible de celle exercée par le sol en place. Pour cela, les déblais présents dans la chambre doivent être homogènes, afin que leur évacuation - par l'intermédiaire du convoyeur à vis - soit continue : il faut également limiter les fluctuations de pression, d'où l'intérêt de la présence d'un grand nombre de petites bulles d'air, enrobant les copeaux ou les grains de sol, qui vont réduire ces variations de pression (compressibilité de la mousse).

Dans le cas des sols grenus, il est nécessaire de limiter les venues d'eau au droit du front de taille. Pour cela, la présence de mousse en avant de la tête de coupe va favoriser l'imprégnation du terrain à l'avant du disque de coupe ; cette frange d'imprégnation est une zone où le sol possède une cohésion apparente. Le terme "cake" est parfois employé pour désigner l'imprégnation du terrain en place par la mousse ; le principe de formation n'est cependant pas le même que pour les boucliers à pression de boue, puisqu'il n'y a pas de dépôt de particules solides dans les pores du sol. Comme pour un cake, une frange d'imprégnation devra avoir une épaisseur suffisante pour ne pas être complètement détruite à chaque passage des outils d'abattage, sans que la mousse ne pénètre trop avant dans le terrain, afin d'éviter une consommation trop importante. Le terrain ainsi imprégné facilite de plus l'homogénéisation du terrain dans la chambre.

La mousse possède enfin des propriétés lubrifiantes (ou "graissantes") qui facilitent d'une part la circulation des déblais depuis le front de taille jusqu'en sortie de vis et même au-delà (la présence de mousse dans les wagonnets transportant les marins jusqu'à l'aire de stockage aide à leur vidange) ; elle permet également de diminuer l'usure des différentes parties du tunnelier (tête de coupe, outils d'abattage, chambre de confinement, vis d'extraction), en particulier dans le cas d'un percement dans des sols abrasifs. La photographie de la figure 2-5 présente l'aspect de la mousse utilisée dans le cadre du percement par boucliers à pression de terre.



figure 2-5 : aspect de la mousse chimique

Le tableau 2-2 ci-dessous reprend les principaux paramètres sur lesquels la mousse doit agir pour que le creusement soit optimisé.

<i>Paramètre</i>	<i>Action de la mousse</i>
consistance du sol	<ul style="list-style-type: none"> ➤ conférer au sol un état pseudo-fluide, c'est-à-dire apte à transmettre des pressions ➤ conférer à ce même sol un état pseudo-plastique, propre à générer un gradient de pression le long de la vis
perméabilité du terrain	<ul style="list-style-type: none"> ➤ rendre le terrain abattu quasiment imperméable
homogénéité du mélange	<ul style="list-style-type: none"> ➤ faciliter le mélange du terrain abattu et de l'additif, afin d'obtenir un pàton qui possède les qualités requises
collage/compactage des sols fins	<ul style="list-style-type: none"> ➤ éviter le colmatage dû au collage des argiles ➤ éviter la surconsolidation des éléments fins due à leur sollicitation dans la chambre et dans la vis
frottement	<ul style="list-style-type: none"> ➤ favoriser la circulation des marins depuis leur abattage jusqu'à leur stockage ➤ réduire le caractère abrasif de certains sols
régulation du confinement	<ul style="list-style-type: none"> ➤ encapsuler les marins avec de la mousse afin d'amortir les fluctuations de pression
stabilité du front (sols grenus)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ donner une cohésion apparente au terrain à l'avant de la tête de coupe en imprégnant ce dernier sur une profondeur limitée

tableau 2-2 : action de la mousse sur les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un bouclier à pression de terre [d'après QUEBAUD et al - 1996]

4.2. Procédé d'injection de mousse

L'utilisation de la mousse lors du creusement avec un bouclier à pression de terre nécessite un système assez sophistiqué permettant sa génération et son injection au niveau du tunnelier, le tout piloté par un automate.

Le procédé d'injection de mousse tel qu'il est utilisé au Japon est le suivant :

- préparation de la solution moussante en surface (eau et agent moussant) ;
- stockage de cette dernière dans une cuve située sur le train suiveur ;
- préparation de la mousse sur le train suiveur (dispositifs d'expansion et de régulation) ;
- génération de la mousse sur le train suiveur (générateur unique), cette dernière étant envoyée vers le bouclier pour son injection.

La tendance en Europe étant à un encombrement minimal en surface, les concepteurs ont imaginé un système compact, situé sur une remorque du train suiveur, à savoir :

- les cuves contenant l'additif et les adjuvants éventuels ;
- le dispositif de dosage de la solution moussante et celui de l'expansion de la mousse. Il est à noter que l'alimentation en air comprimé se fait généralement par l'intermédiaire d'un compresseur réservé à cet effet, permettant ainsi une relative autonomie de l'ensemble ;
- le dispositif de régulation de la préparation et de l'injection de mousse.

La génération est différente selon les systèmes ; en effet, soit :

- l'ensemble des générateurs est sur la remorque, ces derniers approvisionnant en mousse un ou plusieurs points d'injection. Le nombre de générateurs à utiliser va dépendre de la plage des débits de mousse nécessaires lors du creusement ;
- chaque point d'injection est équipé d'un générateur qui est situé dans le bouclier même (donc à une distance très faible du point d'injection).

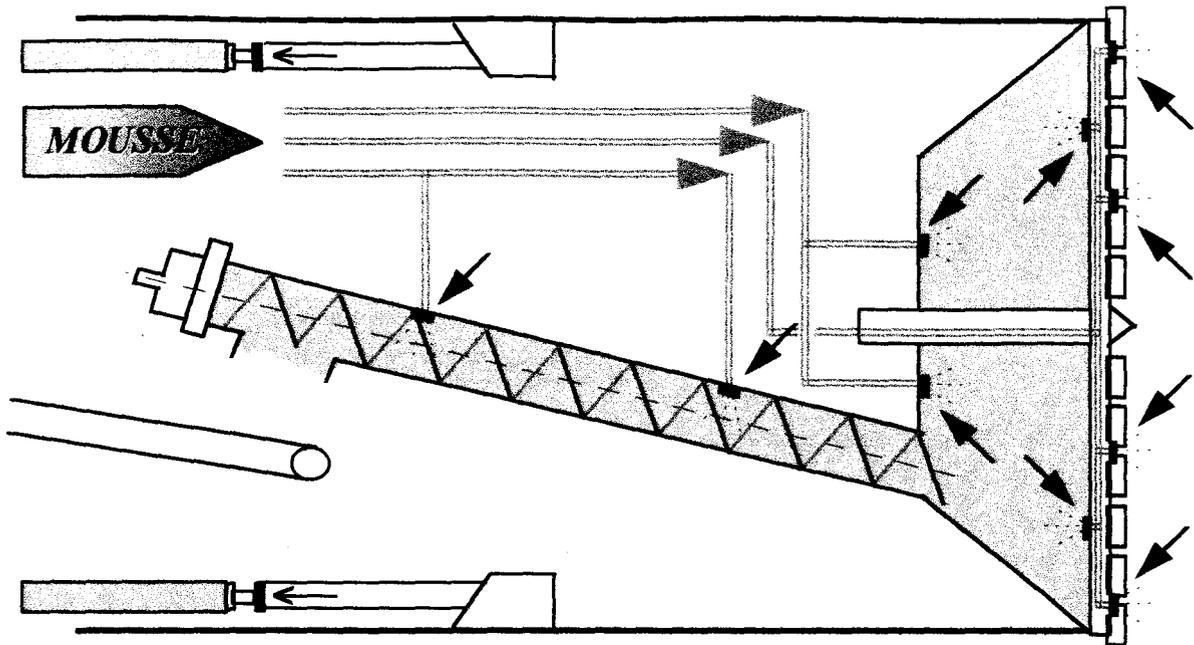
Les Japonais utilisent parfois un dispositif supplémentaire qui permet de détruire la mousse présente dans les marins ; ils utilisent pour cela un agent anti-moussant qui, mis en solution, est pulvérisé sur les matériaux qui transitent par le convoyeur à bande avant d'être déversés dans un wagonnet. En Europe, cette solution n'a pas été utilisée jusqu'à présent (voir chapitre 3, paragraphe 3.1).

En matière de protection de l'environnement, les tensioactifs utilisés doivent répondre aux directives françaises et européennes concernant la biodégradation et la toxicité.

Afin de permettre à la mousse de jouer son rôle, cette dernière doit être présente en différents points du tunnelier :

- le front de taille,
- la chambre de confinement,
- la vis d'extraction.

Il est donc nécessaire de multiplier les points d'injection pour que la distribution soit la plus homogène possible. La figure 2-6 reprend schématiquement les emplacements où sont habituellement installés les points d'injection.



*figure 2-6 : localisation des points d'injection sur un bouclier à pression de terre
[d'après un document SIKA]*

À titre d'exemple, on peut citer le chantier du métro de Lille, ligne 2/lot 1, où le terrain en place, l'argile des Flandres, possède des caractéristiques telles que l'utilisation de la technique à pression de terre rendait nécessaire l'injection de mousse. C'est le procédé d'injection de la société SIKA qui a été retenu [WALTER - 1994]. Le nombre de points d'injection était à l'origine de 16, répartis comme suit :

- 6 points d'injection sur la cloison de la chambre ;
- 6 points d'injection sur la roue vers le front de taille ;
- 2 points d'injection sur la roue vers la chambre ;
- 2 points d'injection sur la vis d'extraction.

Avec cette disposition, le procédé d'injection de mousse s'est révélé tout à fait satisfaisant dans un terrain qui aurait été difficile, voire impossible à excaver sans cela.

4.2.1. Système de régulation de l'injection

Le pilotage des tunneliers est une opération de plus en plus complexe en raison de la sophistication croissante de ces machines [WALLIS - 1990]. Le pilote est par conséquent assisté d'un système automatisé qui lui permet d'une part d'assurer le guidage du tunnelier avec une précision satisfaisante et d'autre part d'optimiser l'avancement de la machine en coordonnant et en régulant les différentes fonctions.

L'injection de mousse jouant un rôle important dans cette optimisation, il est nécessaire de contrôler au mieux cette opération. Dans un souci de simplification, l'injection est exprimée sous la forme d'un taux égal au rapport entre le volume de mousse injecté et le volume de terrain excavé par la machine.

Deux paramètres sont à considérer avec attention lors du creusement : la pression de confinement et le couple en tête. Pour une vitesse de progression donnée (qui dépend principalement de la nature du terrain en place), le fait de modifier la vitesse de la vis d'extraction et le taux d'injection va influencer sur la pression de confinement et le couple. En effet, si la vitesse de la vis diminue, la quantité de terrain abattu présente dans la chambre augmente, entraînant obligatoirement une augmentation de la pression de confinement et du couple en tête ; on observe la même tendance si le taux d'injection de mousse diminue.

Bien que ce ne soit pas le cas pour tous les systèmes à l'heure actuelle, le système d'aide au pilotage peut donc intégrer les relations existant entre ces paramètres et agir à la fois sur la vitesse de la vis et sur le taux d'injection de mousse.

Le banc de génération de mousse va quant à lui :

- fournir la quantité de mousse demandée, quantité calculée à partir de la vitesse de progression de la machine et du taux d'injection, en respectant les paramètres caractéristiques de la mousse (taux d'expansion et concentration du tensioactif) ;
- modifier le débit d'air comprimé afin de maintenir le taux d'expansion constant malgré les fluctuations de la pression de confinement.

Le schéma de la figure 2-7 reprend le principe de régulation d'un banc de génération de mousse.

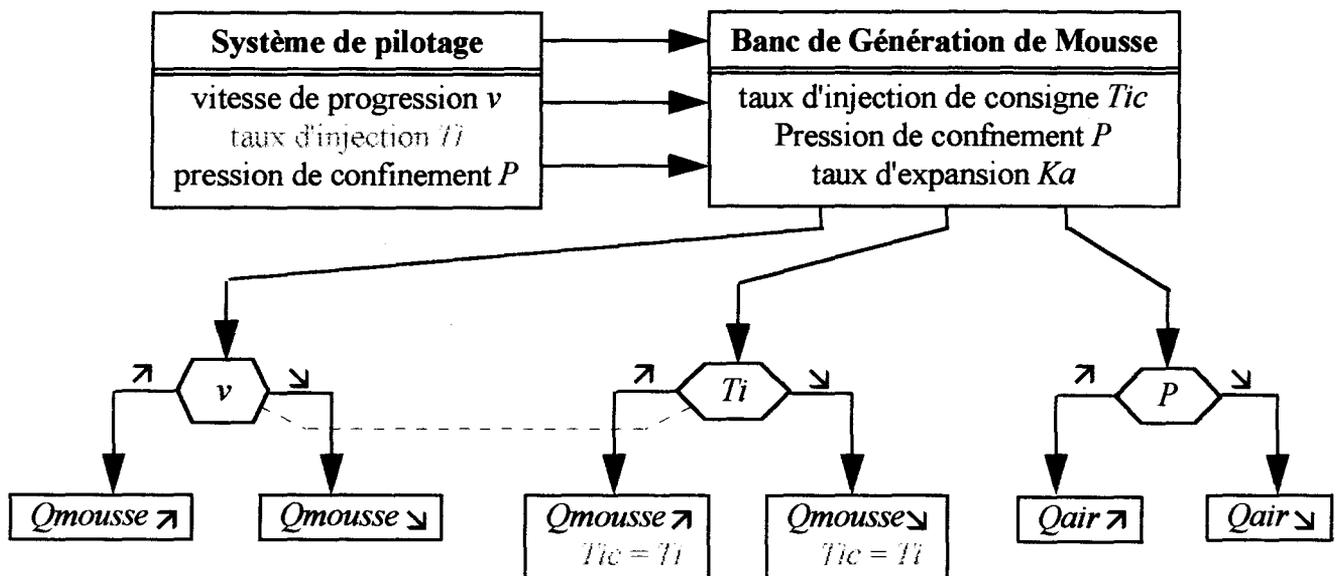


figure 2-7 : principe de régulation d'un banc de génération de mousse

4.2.2. Les adjuvants à la mousse

Selon les caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques du terrain en place, il peut être intéressant d'incorporer des adjuvants à la solution moussante, afin de :

- pallier certains inconvénients que présente la mousse seule ;
- apporter de nouvelles fonctionnalités au produit de base.

Ces adjuvants peuvent être incorporés directement dans la formulation du tensioactif ou être ajoutés lors de la génération de la mousse. Leur rôle peut être :

- d'améliorer la qualité des matériaux en cours d'excavation. En présence de terrains aquifères, la mousse seule a en effet parfois du mal à plastifier les déblais et à rendre le mélange sol/mousse étanche. L'utilisation d'un adjuvant permet de conférer une plus grande "rigidité" et une meilleure stabilité à la mousse (en augmentant la viscosité de la phase liquide). Si les venues d'eau sont par trop importantes, il est préférable d'injecter l'adjuvant seul dans la chambre pour "piéger" l'eau présente.
- de conférer à la mousse des propriétés anti-abrasives ;
- de diminuer les phénomènes de collage rencontrés avec les sols argileux.

Les adjuvants sont soit des polymères, soit des solutions liquides dont les composants comprennent des groupements fonctionnels chargés.

5. CONCLUSION

Si les applications industrielles des mousses chimiques sont nombreuses, deux d'entre elles sont sans nul doute à l'origine de l'utilisation de la mousse dans le cadre du percement par boucliers à pression de terre :

- le béton cellulaire, qui a permis de mettre en évidence l'influence de l'air occlus sur l'ouvrabilité du béton frais, mais aussi sur la cohésion des grains. Il a également montré l'aptitude de ce dernier à bloquer les pores par lesquels circule l'eau ;
- les opérations de forage, qui ont mis en avant la capacité de la mousse à maintenir les parois du trou, à convertir l'eau du sol en une partie de son eau constituante, mais aussi son caractère lubrifiant.

Bien qu'un grand nombre de produits existants soit susceptible de former des solutions moussantes, ceux qui sont les plus utilisés pour notre application sont les produits tensioactifs, qui présentent la propriété de diminuer la tension superficielle à l'interface eau/air. Ils permettent ainsi la formation d'une mousse dont les caractéristiques les plus importantes sont l'aptitude au moussage, la stabilité et un comportement satisfaisant sous pression. Pour certaines applications, il peut s'avérer intéressant d'incorporer des adjuvants à la mousse afin d'améliorer ses caractéristiques.

Pour ce qui est de l'action de la mousse sur le sol excavé, elle doit être telle que le fonctionnement du tunnelier soit optimal. Le mélange obtenu doit donc présenter une consistance qualifiée de pseudo-fluide ou pseudo-plastique, être quasiment imperméable et ne pas coller, ni présenter des risques de colmatage.

De même, la fonction principale d'un bouclier pressurisé étant d'assurer la stabilité du front de taille, le mélange doit être homogène et présenter une certaine compressibilité, afin que la pression de confinement soit la mieux régulée possible.

Dans le cas des sols grenus, la mousse va de plus jouer le même rôle que la boue (utilisée dans le cadre d'un creusement avec un bouclier à pression de boue), puisqu'elle va favoriser l'imprégnation du terrain au droit du disque de coupe, formant ainsi un "cake", zone où le sol possède une cohésion apparente.

En outre, la mousse possède des propriétés lubrifiantes, qui facilitent d'une part la circulation des marins et qui réduisent d'autre part l'usure des différents organes du tunnelier.

Enfin, toute considération sur la mousse doit prendre en compte le procédé d'injection de cette dernière, car son contrôle facilitera d'autant l'optimisation du fonctionnement de la machine.

- CHAPITRE 3 -

***MISE AU POINT D'UN LABORATOIRE D'ESSAIS
DES PRODUITS MOUSSANTS***

I. INTRODUCTION

Le choix de plus en plus fréquent d'un bouclier à pression de terre pour des projets où la géologie est variée conduit les entreprises à envisager l'injection d'un additif lors de la foration. Comme souligné dans le chapitre 2, la mousse chimique est sans conteste l'additif le plus retenu à l'heure actuelle.

Devant le succès des additifs moussants pour les machines de grand diamètre, le groupe de travail de l'opération n°5 du Projet National *Microtunnels*, dont le thème d'étude est *l'apport des additifs dans l'amélioration du creusement par microtunneliers*, a choisi de démarrer son étude par ces derniers.

Très rapidement, il s'est avéré qu'il n'était pas possible, au moins dans un premier temps, de réaliser cette étude sur site, du fait de l'existence d'un grand nombre de paramètres non contrôlables. On peut notamment citer :

- le matériel utilisé (machine, procédé de génération et système d'injection de mousse, pilotage) ;
- le terrain en place (variation des caractéristiques géotechniques et des conditions hydrogéologiques).

Le groupe de travail de l'opération n°5 a donc choisi de réaliser cette dernière en laboratoire. Pour cela, il était nécessaire de reprendre les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un bouclier à pression de terre (voir chapitre 2, tableau 2-2) et de s'attacher à proposer des essais permettant d'étudier l'action de la mousse sur ces derniers.

L'objet du programme proposé étant de donner une méthodologie de recherche du type de produit le mieux adapté à une application et à un terrain donnés, il a été nécessaire de s'attacher à :

- la caractérisation de la mousse, tant du point de vue du produit permettant sa formation, que du point de vue du matériel utilisé pour sa génération ;
- la caractérisation du mélange sol/mousse, en se basant sur les critères à respecter pour que le fonctionnement d'un bouclier à pression de terre soit optimal.

La première étape de ce programme de recherche a abouti à la mise en place d'un laboratoire d'essais présenté ci-après, comprenant des équipements divers, permettant l'étude de la mousse, des sols, mais surtout du mélange de ces derniers. Une réflexion a ensuite été menée sur la réalisation d'une campagne d'essais des produits moussants.

2. PRÉSENTATION DU LABORATOIRE D'ESSAIS DES PRODUITS MOUSSANTS

La première étape a consisté à monter le laboratoire d'essais des produits moussants. Il a été nécessaire de s'équiper de matériel utilisé pour l'étude des sols (matériel classique utilisé dans un laboratoire de mécanique des sols), de la mousse (génération et caractérisation), mais aussi du mélange sol/mousse, car les essais portent non seulement sur l'étude de la mousse, mais aussi sur l'étude de ce mélange.

2.1. Caractérisation de la mousse

Afin de caractériser la mousse utilisée par la technique des boucliers à pression de terre, nous nous sommes intéressés en premier lieu aux produits tensioactifs permettant sa formation, puis en second lieu au matériel permettant sa génération, et enfin à des essais permettant de la caractériser.

2.1.1. Les produits tensioactifs

Une première démarche a permis d'établir une liste de sociétés susceptibles de fournir des produits répondant aux besoins du laboratoire. Disposant ainsi d'une gamme étendue d'échantillons de tensioactifs, il s'est avéré qu'il était indispensable, pour s'assurer que les tensioactifs retenus étaient bien des produits moussants, de réaliser un essai à petite échelle pour connaître le pouvoir moussant de chacun [DESSAUVAGES et al - 1994]. En effet, le matériel utilisé pour la génération de mousse sur un chantier de tunnel est tel qu'il nécessite la mise en œuvre de quantités importantes d'agents moussants, ce qui n'était pas compatible avec le cadre de notre étude.

Comme souligné dans le chapitre 2, les tensioactifs sont utilisés dans des domaines très divers (chimie, textile, métallurgie, travaux publics, domaine pétrolier). De nombreux tests de pouvoir moussant ont par conséquent été établis dans l'optique de répondre à l'attente de chaque utilisation.

DOMINGO et al (1992), du groupe de travail *méthodes de test des tensioactifs* du CESIO¹ ont fait l'inventaire des différents essais permettant de mesurer les caractéristiques moussantes des solutions tensioactives. Il ressort de cette étude que l'on peut différencier les méthodes suivantes :

- méthode par chute (procédure de ROSS and MILES, norme ISO² 696), qui consiste à faire tomber 500 ml d'une solution moussante d'une certaine hauteur sur 50 ml de cette même solution placée dans une éprouvette. On mesure le volume de mousse générée au bout de 30 s, 3 et 5 mn après que la dernière goutte de solution soit tombée ;
- méthode par agitation/rotation. De nombreuses méthodes existent, mais le principe reste le même : on met un certain volume de solution dans une éprouvette bouchée que l'on agite ensuite manuellement ou mécaniquement. On verse ensuite la mousse obtenue dans un autre récipient et on mesure le volume correspondant ;
- méthode par battage (norme DIN³ 53902) : une solution placée dans une éprouvette est battue manuellement ou mécaniquement de bas en haut à l'aide d'un disque percé de trous, et ceci pendant un nombre déterminé de fois. On mesure ensuite la hauteur de mousse obtenue ;

¹ Comité Européen des agents de Surface et Intermédiaires Organiques

² International Organization for Standardization

³ Deutsche Institut für Normung

- méthode par agitation mécanique (ASTM⁴ 35, recommandation CESIO 321.1.1.90) : on agite au moyen d'un mixeur ou d'un agitateur de laboratoire une solution moussante et on mesure le volume ou la hauteur de mousse obtenue au bout d'un temps donné ;
- méthode par injection d'air (norme ANSI⁵/ASTM D 892). Utilisée pour étudier le moussage des huiles, cette méthode consiste à injecter de l'air dans une solution moussante au moyen d'une pierre sphérique poreuse dont les caractéristiques sont connues. On mesure ensuite la mousse ainsi formée ;
- méthode par circulation (norme NF⁶ T 73-412) : elle ressemble à la méthode par chute, mais la solution moussante recueillie est recyclée en continu à débit constant. Cette méthode présente l'avantage d'avoir des conditions qui sont proches de certains cas pratiques (où il y a circulation de fluides).

La plupart de ces méthodes ont été testées au laboratoire et ont été plus ou moins concluantes ; en effet :

- la méthode par chute n'a pas donné de bons résultats avec les produits testés. Cet essai, de par son principe, est plus approprié à des produits comme ceux utilisés en tant que bains moussants, qui moussent donc très facilement ;
- la méthode par agitation/rotation. La principale critique de ce genre d'essais est que la génération de mousse est limitée par le volume du réservoir ;
- la méthode par battage. Bien que cet essai, réalisé manuellement, présente l'inconvénient d'être dépendant de l'opérateur, il a toutefois permis de séparer les produits en deux catégories : les moussants et les non-moussants ; il a également permis de constater la plus ou moins grande stabilité des mousses formées. Par contre, il ne permet pas de faire une sélection des produits moussants car les hauteurs de mousse mesurées sont très proches quel que soit le produit testé. Cet essai est donc un essai facile à mettre en œuvre et rapide, qui permet d'une part d'éliminer les produits inadaptés, et d'autre part de se faire une première idée sur le pouvoir moussant d'un produit et sur la stabilité de la mousse formée [LECOMTE - 1994].

L'essai qui a retenu notre attention a été l'essai d'agitation mécanique, pour les raisons suivantes [QUEBAUD et al - 1995 b] :

- un procédé mécanisé s'avérait indispensable afin d'être en mesure d'étudier un nombre non négligeable de produits avec une reproductibilité satisfaisante ;
- il fallait un appareillage fournissant une grande énergie à la solution, afin de se rapprocher des conditions réelles d'exploitation.

2.1.1.1. L'essai de moussage

Le principe de l'essai d'agitation mécanique, repris schématiquement sur la figure 3-1 ci-après, est de fournir une énergie telle à la solution moussante qu'elle permette à cette dernière de former une mousse dont la consistance rappelle celle de la mousse générée par un banc de génération de mousse.

⁴ American Society for Testing Material

⁵ American National Standards Institute

⁶ Norme Française (de l'Association Française pour la NORmalisation)

L'appareil retenu est un agitateur TURBOTEST 33/300, de marque RAYNERI, équipé d'une hélice "papillon", cette dernière tournant à une vitesse de 3.000 tours/mn.

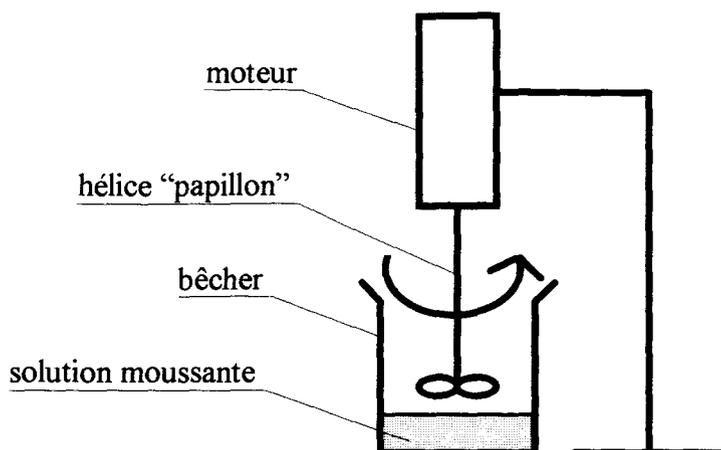


figure 3-1 : schéma de l'essai de moussage

L'essai de moussage est réalisé selon le mode opératoire décrit ci-dessous :

- la solution moussante est préparée à la concentration en tensioactif C_{am} souhaitée et versée dans un bûcher dit à "forme haute" de 2 l. Le volume de solution (250 ml) reste constant quel que soit C_{am} ;
- une fois le bûcher mis en place et l'hélice plongée dans la solution, on agite le liquide pendant 2 mn ;
- l'agitation terminée, on relève l'hélice.

L'utilisation d'un adjuvant à la mousse peut également être envisagée.

On mesure, lors de la réalisation de l'essai, les paramètres suivants :

- T_{ft} , le temps de foisonnement. T_{ft} correspond à la durée d'agitation au bout de laquelle il y a suppression du vortex dans le bûcher. Le niveau de la mousse est alors bien horizontal et la mousse entoure totalement la tige de l'hélice ;
- H_m , la hauteur de mousse mesurée dans le bûcher après 2 mn d'agitation. H_m permet de connaître le pouvoir moussant du produit ;
- T_{dvt} , le temps de demi-vie. T_{dvt} représente le temps au bout duquel la moitié de la solution nécessaire pour former la mousse est récupérée ; cette valeur caractérise la stabilité de la mousse dans le temps.

La connaissance de H_m permet également de donner, à titre indicatif, le foisonnement K_f de la solution moussante (voir chapitre 2, paragraphe 3.2.1) ; K_f est cependant caractéristique de l'essai de moussage décrit ci-dessus et ne peut en aucun cas être transposé à un autre type d'essai.

La température ambiante est notée à titre indicatif, afin de vérifier qu'elle ne présente pas de variations trop importantes (supérieures à 5°C) qui pourraient affecter les résultats obtenus.

2.1.2. Génération de la mousse

Afin de réaliser des essais avec des mousses telles qu'elles sont générées in situ, le laboratoire s'est équipé d'un banc de génération de mousse dont le fonctionnement est identique à celui des dispositifs équipant les boucliers à pression de terre qui utilisent l'injection de mousse.

Ce dispositif est à même :

- d'étudier le comportement de produits moussants variés ;
- de générer des mousses dont les caractéristiques diffèrent ;
- d'être utilisé sur un chantier utilisant un microtunnelier à pression de terre.

Le banc de génération de mousse est installé sur un chariot pratiquement autonome, qui comprend (voir la figure 3-2) :

- le compresseur d'air, couplé à un débitmètre massique ;
- le réservoir contenant l'agent moussant ;
- la pompe à vitesse variable pour l'agent moussant ;
- la pompe à vitesse variable pour l'eau ;
- l'automate qui régule les débits des différents fluides. Un clavier muni d'un écran d'affichage à cristaux liquides est disposé sur la façade du banc de génération et permet la saisie des paramètres caractéristiques de la mousse ; l'écran permet la visualisation d'informations relatives à la génération.

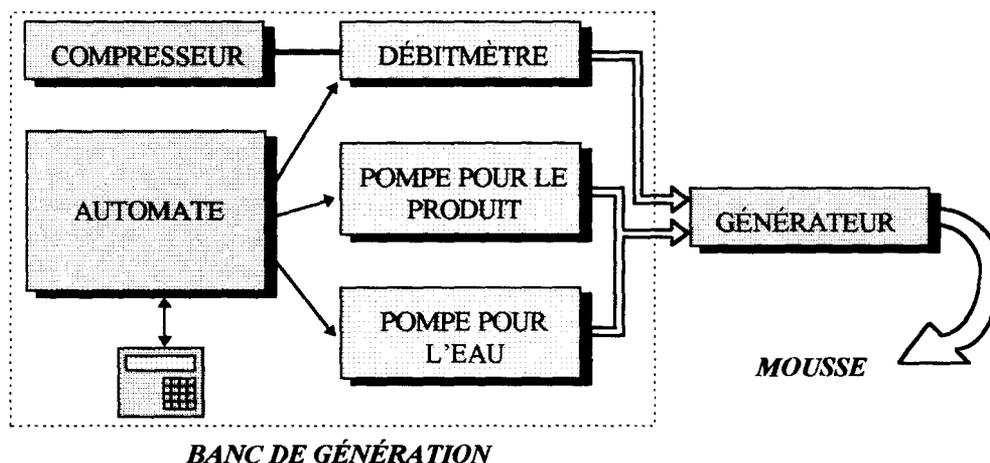


figure 3-2 : schéma du banc de génération de mousse
[d'après QUEBAUD et al - 1996]

Ce banc de génération de mousse peut être utilisé selon deux modes de fonctionnement distincts :

- *fonctionnement autonome* : il est prévu pour les tests en laboratoire et permet le réglage des paramètres C_{am} (valeur comprise entre 1 et 5 %, ce qui correspond à une plage de concentrations englobant les valeurs préconisées par les principaux fournisseurs de produits) et K (pouvant varier de 6 à 30, ce qui permet de générer des mousses d'expansion variable pour

différents types de sols). Le débit est également fixé par l'utilisateur et est compris entre 1 et 15 m³/h ;

- *fonctionnement non-autonome* : il est adapté cette fois à une utilisation sur chantier, et mis à part C_{am} et K , des paramètres propres au microtunnelier sont pris en compte et font l'objet d'une acquisition automatique par l'automate (vitesse d'avance, pression de confinement). Le diamètre de la machine est une donnée de départ (il peut être compris entre 30 et 150 cm), ainsi que le taux d'injection de mousse (il peut être fixé entre 0 et 100 %). Ces deux paramètres vont conditionner le débit de mousse générée par le banc.

En cas d'utilisation d'un adjuvant, ce dernier est incorporé au niveau de l'arrivée d'eau.

Le fait de pouvoir contrôler précisément les paramètres caractéristiques de la mousse permet :

- d'être assuré de la répétabilité des essais ;
- d'étudier différents types de mousse pour un produit et un terrain donnés.

Le choix du générateur s'est porté sur un système à base de milieu poreux (voir chapitre 2), en raison de sa simplicité de conception et de la possibilité de le modifier ultérieurement.

2.1.3. Essais de caractérisation

L'objectif du laboratoire d'essais des produits moussants étant l'étude du mélange sol/mousse, il nous est apparu nécessaire de connaître au mieux un des composants de ce mélange, à savoir la mousse obtenue au moyen du banc de génération. Cette démarche a pour but la maîtrise du plus grand nombre de paramètres pour l'étude ultérieure du mélange. Nous avons donc retenu quelques essais simples de caractérisation.

2.1.3.1. L'essai de génération

Une mousse est, comme souligné précédemment, caractérisée par des paramètres tels que C_{am} et K , mais également par l'énergie qui lui est apportée lors de sa génération. Cet apport d'énergie induisant une perte de charge ΔP_{gm} au niveau du générateur de mousse, il était important de suivre l'évolution de ΔP_{gm} en fonction du débit de mousse, en faisant varier les paramètres cités ci-dessus. Cette information est donnée par le banc lorsqu'il génère de la mousse.

Cet essai, dit de génération, a pour but de vérifier que le générateur retenu est adapté au produit utilisé : il permet de déterminer la plage optimale de débits pour laquelle la mousse produite est de bonne qualité.

2.1.3.2. L'essai de consistance

Bien que le coefficient d'expansion K et la concentration C_{am} soient des paramètres caractéristiques de la mousse, ils ne permettent pas d'évaluer la qualité (la bonne tenue) de cette dernière.

Pour évaluer cette qualité, nous avons essayé dans un premier temps d'exploiter le paramètre ΔP_{gm} , afin d'établir une relation entre son évolution et la qualité de la mousse ; il ne nous a toutefois pas été possible d'aboutir à des résultats probants, l'évolution de ΔP_{gm} dépendant d'une multitude de paramètres et notamment du contenu du générateur [LECOMTE - 1994].

Dans un second temps, nous avons essayé de mesurer la viscosité de la mousse à l'aide d'un viscosimètre à cylindres coaxiaux de marque FANN. Cette solution a toutefois été écartée par la suite pour deux raisons :

- le fait que la viscosité d'un fluide dépende grandement de la température, paramètre que nous n'étions pas à même de maîtriser précisément au laboratoire ;
- ce viscosimètre s'avère inadapté pour la mousse. Utilisé normalement pour la mesure de la viscosité des boues de forage, l'espace entre les deux cylindres est trop faible : il ne permet donc qu'une mesure du frottement acier/mousse, et non pas une mesure du cisaillement de la mousse [MARSDEN et al -1966].

Nous avons ensuite tenté de quantifier la qualité de la mousse par la mesure de différents paramètres : temps que met un certain volume de mousse à tomber d'une hauteur donnée, enfoncement d'un piston dans un volume de mousse donné en fonction du temps ; ces essais ne se sont cependant pas révélés concluants.

Nous avons alors envisagé de caractériser la qualité de la mousse par une mesure de sa consistance. Pour cela, nous avons retenu un essai dont le principe est repris schématiquement sur la figure 3-3 : on mesure la hauteur h_{c_0} d'un cône de mousse et son diamètre \varnothing_{c_0} juste après le démoulage et les mêmes paramètres h_c et \varnothing_c au bout de 2 mn. On utilise pour cet essai un matériel qui se rapproche de celui utilisé pour la mesure du coefficient d'absorption d'un sable (granulats : mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, norme NF P 18-455). Le support sur lequel ont lieu les essais est une plaque de Plexiglas, matériau présentant un état de surface non rugueux et laissant ainsi la mousse glisser librement.

À partir des paramètres définis ci-dessus, on peut déterminer les indices de consistance ζ_{m_0} et ζ_m . Ces derniers sont respectivement égaux aux rapports entre h_{c_0} et \varnothing_{c_0} et entre h_c et \varnothing_c , exprimés en pourcentage (en prenant comme indice de consistance maximal le rapport correspondant à un affaissement nul, donc calculé à partir de 59 et 100 mm, les dimensions du moule). L'évolution de la consistance entre les deux mesures est notée $\Delta\zeta_m$.

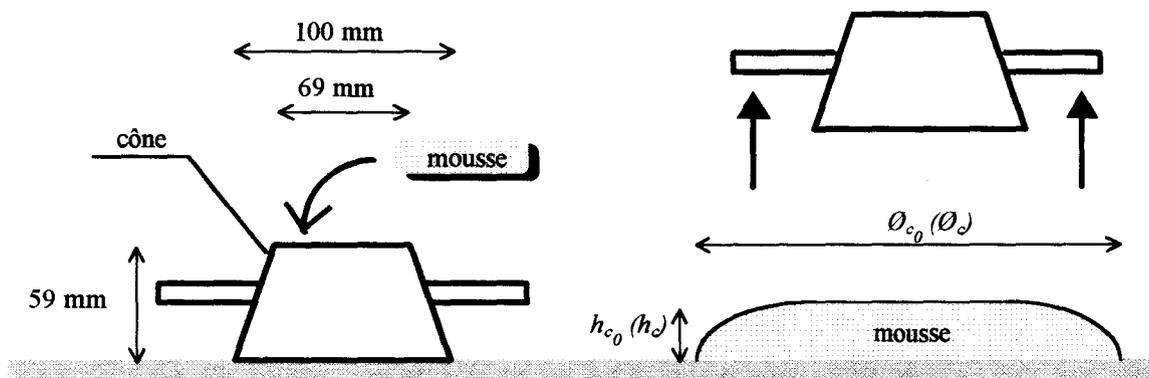


figure 3-3 : principe de l'essai de consistance

2.1.3.3. L'essai de demi-vie

Le principe de cet essai se rapproche de celui de l'essai de moussage puisqu'il consiste à mesurer le temps au bout duquel un volume de mousse égal à 25 l s'est essoré de la moitié de la solution qui a été nécessaire pour le générer ; le choix d'un volume "important" de mousse s'explique par la difficulté que nous avons rencontrée à travailler avec de petits volumes de mousse, en raison du débit important du banc de génération. À la différence de l'essai de moussage, on note également, au cours de l'essai, l'évolution du drainage en fonction du temps, et non pas seulement le temps de demi-vie.

L'avantage est ici la possibilité d'étudier le comportement dans le temps de différentes mousses. Il faut noter que l'essai est réalisé à pression atmosphérique. Le matériel utilisé, un récipient muni à sa base d'un flacon gradué, est présenté sur le schéma de la figure 3-4.

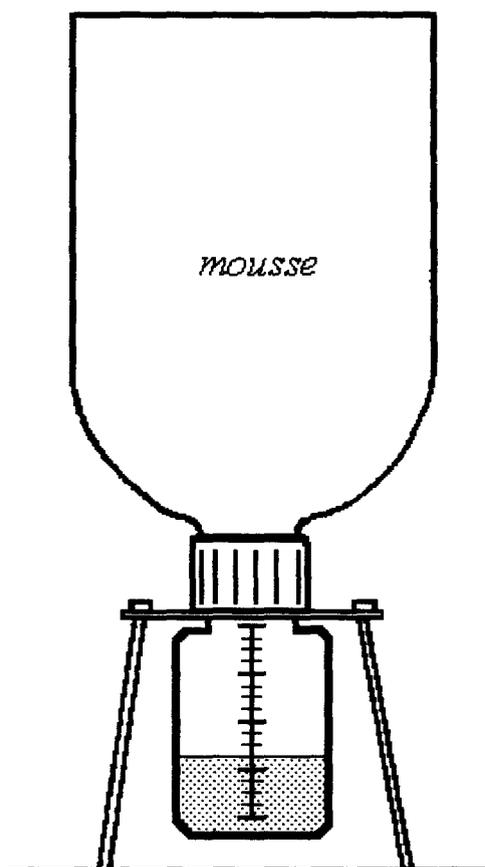


figure 3-4 : schéma du dispositif de demi-vie

2.1.3.4. L'essai de comportement sous pression

La mousse opérant dans la chambre de confinement d'un tunnelier, où règne une certaine pression, il était important d'étudier le comportement de cette dernière en milieu confiné. De plus, en raison de la possible fluctuation de pression dans la chambre, la mousse doit être en mesure de subir des variations de pression.

Nous avons donc réalisé des essais de comportement de la mousse sous pression. Le principe est le suivant : on fait subir à une mousse, placée dans une cellule de confinement translucide (voir figure 3-9), des cycles de mise en pression et de décompression entre 0,1 et 0,4 MPa (la majorité des projets utilisant la technique de la pression de terre présentent une pression de confinement moyenne comprise dans cette plage de valeurs) et on mesure la hauteur de mousse dans la cellule à chaque fois que la pression augmente ou diminue de 0,05 MPa. Le nombre de cycles a été fixé à 5 : au-delà, la mousse s'essore et perd de son "élasticité" ; la valeur minimale de 0,1 MPa a quant à elle été retenue pour des raisons de lisibilité du niveau de mousse dans la cellule.

Les modes opératoires des essais de moussage, de consistance, de demi-vie et de comportement sous pression sont repris séparément en annexe (voir annexes respectives 1 à 4), ainsi que la fiche d'essais correspondante.

L'essai de génération n'a quant à lui pas fait l'objet de la rédaction d'un mode opératoire, car il est par trop dépendant du matériel de génération de mousse utilisé.

2.2. Caractérisation du mélange sol/mousse

L'objectif du laboratoire d'essais des produits moussants étant d'étudier l'apport de la mousse vis-à-vis des paramètres décrits dans le tableau 2-3, différents essais ont été mis au point afin de quantifier cette action. Nous nous sommes attachés, pour chaque essai, au choix du matériel et à l'établissement d'un mode opératoire, afin d'être assurés de sa reproductibilité.

L'ensemble des essais a été réalisé sur un mélange sol/mousse qui représente le mélange rencontré dans un tunnelier au niveau de la chambre d'abattage et de la vis d'extraction. Mis à part le choix du sol et du type de mousse utilisée, le paramètre qui caractérise le mélange est le taux d'injection de mousse T_i . C'est un nombre sans dimension, égal au rapport entre le volume de mousse injecté et le volume de sol en place à tester.

2.2.1. L'essai de comportement

Afin d'étudier le mélange sol/mousse présent dans la chambre d'abattage, il fallait un appareillage muni d'un mouvement de rotation (modélisant ainsi le disque de coupe). À cet effet, nous nous sommes équipés d'un malaxeur à axe vertical, muni de trois pales, tournant à une vitesse constante (32 tours/mn) ; ce dispositif est schématisé ci-après sur la figure 3-5.

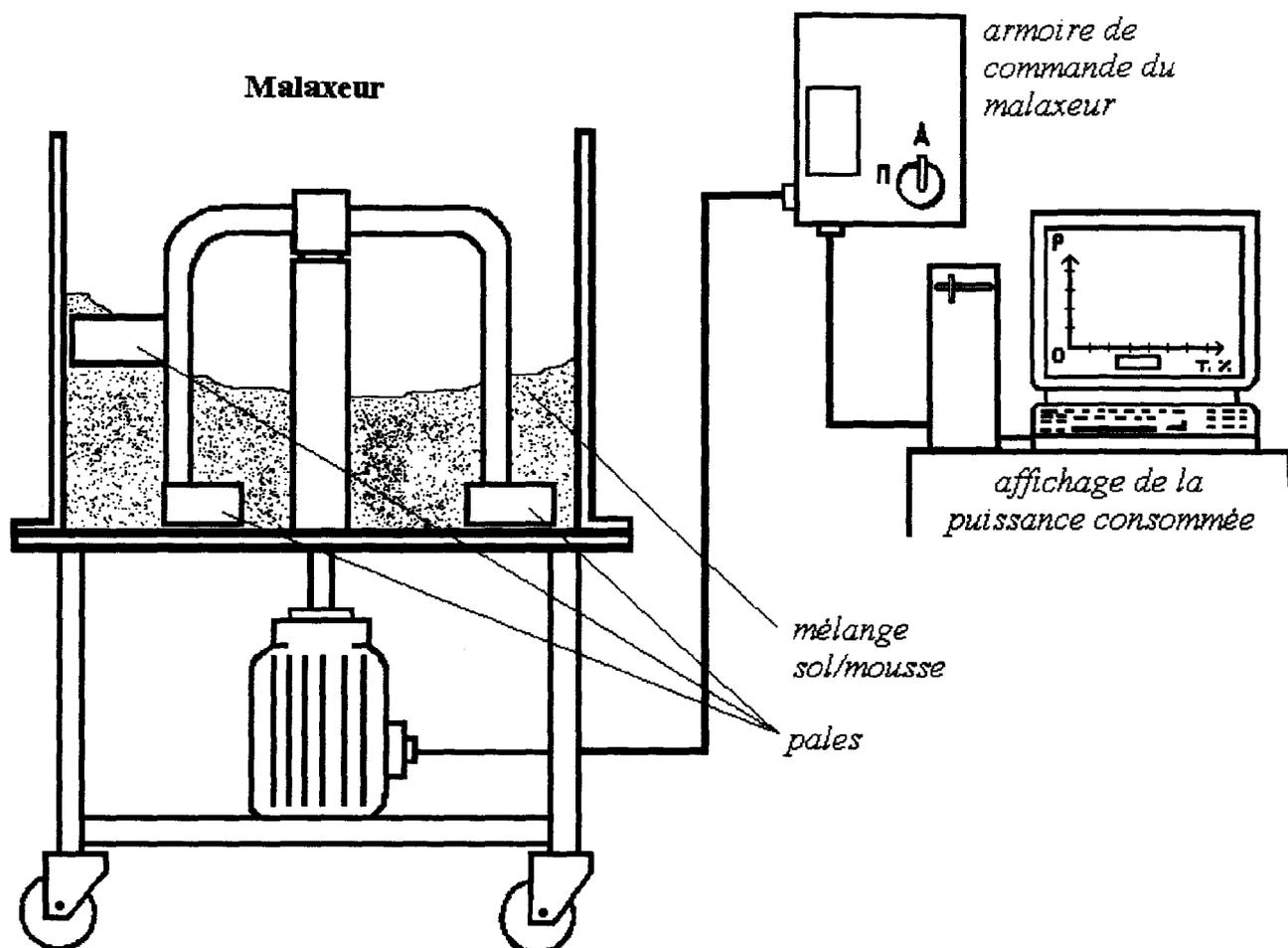


figure 3-5 : schéma du dispositif de malaxage

Au cours de l'évolution du taux d'injection, on peut observer :

- la variation de la puissance électrique consommée par le moteur, grâce à un ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition de données. On peut ainsi apprécier la réduction de sollicitation des organes de fonctionnement d'un tunnelier ;
- le temps de malaxage nécessaire pour obtenir un mélange homogène et une stabilisation de la puissance consommée. Ce paramètre caractérise la rapidité d'action de la mousse sur le sol testé ;
- la qualité et le comportement du mélange dans le malaxeur. Ces différentes observations permettent d'avoir une approche qualitative de l'état de consistance plastique du mélange, ainsi que son caractère collant.

Le mode opératoire retenu est le suivant : après avoir mis en place dans la cuve du malaxeur un volume de sol fixé dont les caractéristiques géotechniques sont connues, on met en route le malaxeur afin d'homogénéiser le sol ; après son arrêt, on peut alors effectuer les mesures (puissance consommée, affaissement au cône et adhérence). On peut alors ajouter dans le malaxeur une quantité de mousse correspondant au taux d'injection voulu et recommencer les actions énumérées ci-dessus, jusqu'à obtenir un taux d'injection correspondant à une valeur de l'affaissement au cône satisfaisante (voir paragraphes 2.2.2 et 2.2.3).

2.2.2. L'essai d'affaissement

Afin d'apprécier la consistance du mélange sol/mousse et de pouvoir quantifier cette notion de "fluidité plastique" rencontrée dans la littérature, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (ou slump test) s'est avéré être le plus adapté. Le principe de cet essai, repris sur le schéma de la figure 3-6, est le suivant : comme pour un béton, il s'agit de constater l'affaissement A d'un cône constitué d'un mélange sol/mousse sous l'effet de son poids propre. Plus cet affaissement est grand, plus le béton est réputé fluide ; le mode opératoire est détaillé dans la norme NF P 18-451 (bétons : essai d'affaissement).

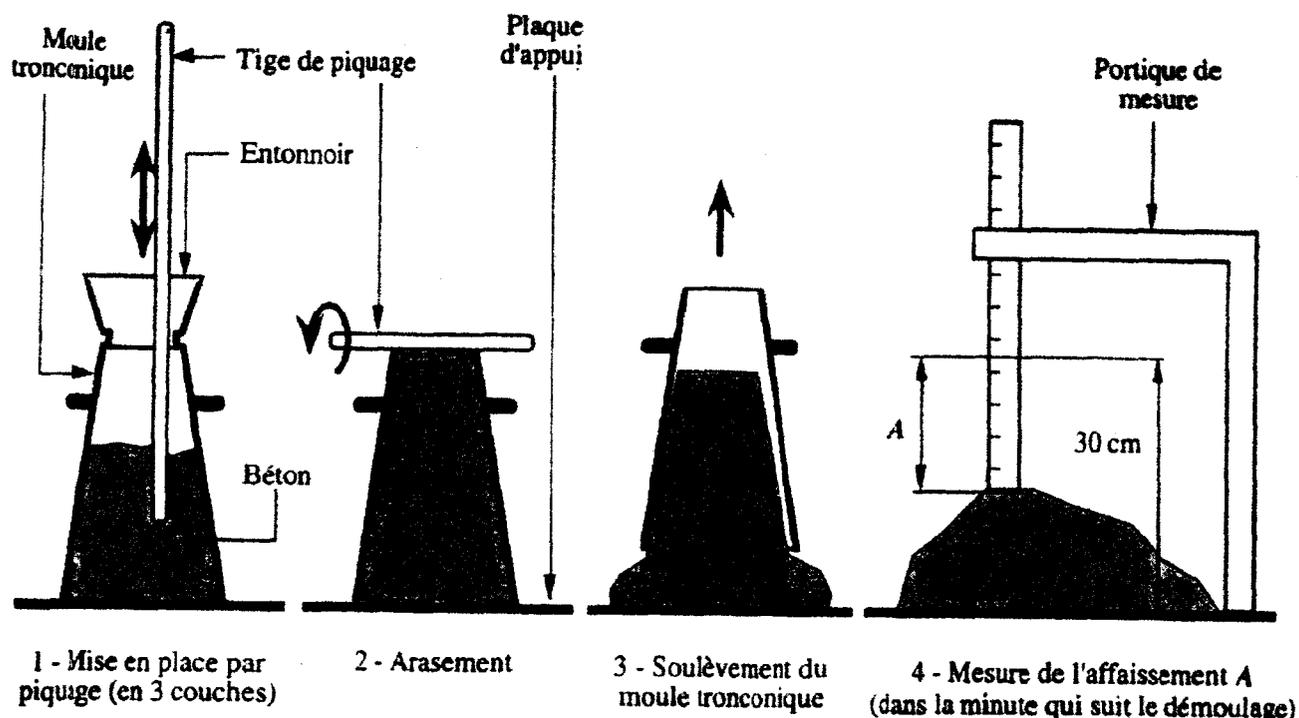


figure 3-6 : principe de l'essai d'affaissement
[d'après DUPAIN et al - 1995]

Cet essai présente plusieurs avantages, qui sont notamment sa simplicité de mise en œuvre et le fait que l'on puisse récupérer le mélange utilisé pour l'essai : l'essai d'affaissement étant en effet réalisé pendant l'essai de comportement, on doit travailler avec la même quantité de sol pendant le déroulement de ce dernier. La quantité de mélange testée est de plus suffisamment conséquente (5,3 l) pour que le caractère hétérogène du sol testé permette malgré tout d'obtenir des résultats répétables.

L'interprétation des résultats obtenus par l'essai d'affaissement est par contre délicate. Il est difficile de fixer une seule valeur pour rendre compte de la fluidité plastique du mélange, et donc d'un taux d'injection de mousse optimal. En effet, si l'on établit un parallèle avec la consistance du béton, la norme sur les bétons prêts à l'emploi (béton : béton prêt à l'emploi, norme NF P 18-305) définit quatre classes d'affaissement : Ferme (1 à 4 cm), Plastique (5 à 9 cm), Très Plastique (10 à 15 cm) et Fluide (≥ 16 cm). Il est donc plus judicieux de retenir une classe pour laquelle le mélange sol/mousse a atteint les caractéristiques souhaitées : la classe Très Plastique semble être celle qui correspond ici le mieux à l'application envisagée.

L'essai d'affaissement permet enfin d'observer le pouvoir de rétention d'eau de la mousse pour le mélange donné, et ceci par l'apparition d'eau en bas du cône lors de la mise en place du mélange par piquage.

2.2.3. L'essai d'adhérence

Afin d'étudier le pouvoir lubrifiant de la mousse, pouvoir qui favorise la réduction du frottement du mélange sol/mousse à l'intérieur de la chambre et de la vis, nous avons retenu un essai permettant d'évaluer l'adhérence d'un mélange par la mesure de l'angle de frottement limite de ce dernier sur une surface plane en inox inclinée.

Le mélange est pour cela placé dans un moule en bois dont les bords en contact avec la plaque sont enduits de mousse, afin de ne pas influencer sur le glissement du mélange ; le dispositif décrit ci-dessus est schématisé sur la figure 3-7.

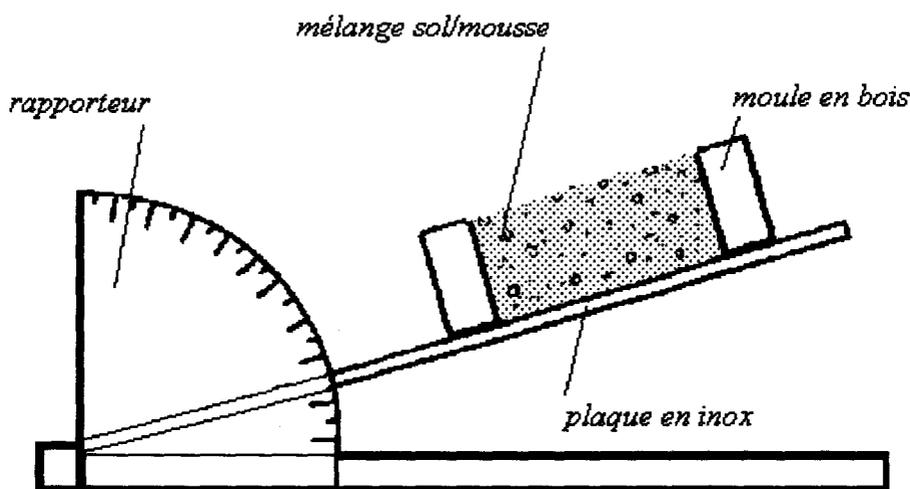


figure 3-7 : schéma du dispositif d'adhérence

Après la mise en place du mélange (mise en place sans compactage), on soulève la plaque en inox bloquée à l'une de ses extrémités ; lorsque le moule commence à glisser, on note l'angle lu sur le rapporteur prévu à cet effet.

Cet essai, dont le principe ne permet pas la modélisation des conditions dans lesquelles se trouve le mélange dans la chambre d'abattage et dans la vis d'extraction, permet cependant d'apprécier qualitativement le frottement par collage de façon simple et rapide.

2.2.4. L'essai de perméabilité

Cet essai est particulièrement important lorsque les sols en place sont aquifères : on peut alors assister à des venues d'eau en sortie de vis, qui peuvent provoquer des instabilités au droit du front de taille. Ces phénomènes ont pour cause un lessivage des éléments fins qui transitent par la vis d'extraction, d'où une difficulté à conserver une consistance plastique propre à créer un gradient de pression dans la vis.

Afin de s'assurer de l'aptitude de la mousse à rendre le terrain abattu quasiment imperméable, c'est-à-dire l'aptitude du mélange sol/mousse présent dans la chambre et dans la vis à stopper les venues d'eau, nous avons choisi d'utiliser un perméamètre à charge constante (dispositif généralement retenu pour les sols présentant une perméabilité importante) afin de mesurer la perméabilité du mélange ; le principe de cet appareillage est repris sur la figure 3-8.

La perméabilité retenue pour que le mélange puisse être "quasiment imperméable" est la plus préjudiciable parmi la plage relevée dans la littérature, soit 10^{-6} m/s (voir chapitre 1, paragraphe 3.1).

Il est à noter que le terme "perméabilité" est un abus de langage et correspond en fait au coefficient de perméabilité, paramètre dépendant en fait des caractéristiques du fluide traversant le sol en question (poids volumique et viscosité), alors que la perméabilité est un paramètre qui dépend uniquement du milieu filtrant ; en mécanique des sols, on emploie très souvent le terme perméabilité à la place de coefficient de perméabilité.

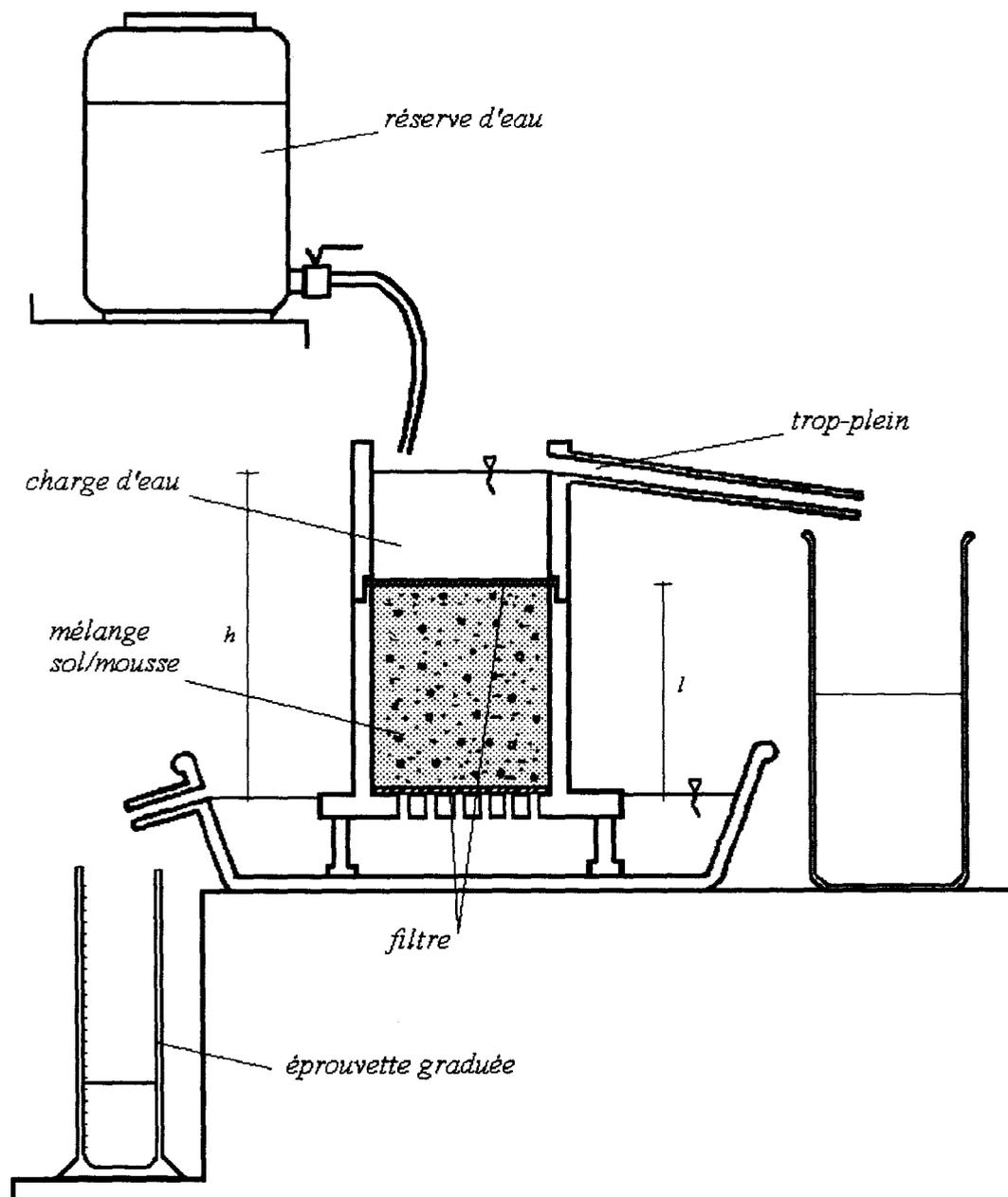


figure 3-8 : schéma du perméamètre à charge constante

Le mode opératoire adopté est le suivant : après avoir préparé le mélange sol/mousse, on met ce dernier en place dans la partie inférieure du perméamètre sans le tasser (des filtres sont prévus de part et d'autre de l'échantillon afin que l'eau n'entraîne pas les grains lors de son écoulement) ; la partie supérieure du perméamètre est alors mise en place et fixée correctement, de manière à éviter les fuites. Après s'être assuré du bon remplissage du bac muni d'un trop-plein, on procède à la mise en charge de l'échantillon ; lorsque la première goutte d'eau apparaît au niveau du bec verseur, on démarre le chronomètre afin de débiter l'essai.

La valeur de la perméabilité k est donnée par l'équation suivante :

$$\left[k = \frac{V.l}{h.S.t} \right] \quad (10)$$

- où :
- V est le volume de l'eau récupérée (m³),
 - l est la hauteur de l'échantillon (m),
 - h est la hauteur de charge (m),
 - S est la section de l'échantillon (m²),
 - t le temps mis pour récupérer V (s).

On réalise plusieurs mesures de t , pour un volume qui est généralement de 100 ml, afin de contrôler l'évolution de k . Les critères d'arrêt de l'essai sont la durée conséquente de ce dernier ou une perméabilité qui augmente pour atteindre progressivement la perméabilité du sol seul.

Pour nos essais, les dimensions h et l sont respectivement égales à 19,5 cm et 13 cm. La charge d'eau appliquée au mélange placé en partie inférieure du perméamètre peut sembler faible : l'essai n'a pas cependant pour vocation de mesurer la résistance d'un mélange sol/mousse sous une charge hydraulique importante (ce qui pourrait s'apparenter à un essai "d'accrochage" de la mousse) ; le gradient hydraulique (ou coefficient de Darcy, égal au rapport entre h et l) est, pour le dispositif représenté sur la figure 3-8, de 1,5.

L'avantage de l'essai de perméabilité est une fois de plus sa simplicité et sa rapidité de mise en œuvre. De plus, s'il est utilisé pour connaître l'apport de la mousse en matière d'imperméabilisation du terrain, apport que l'on caractérise par une valeur moyenne de la perméabilité mesurée pendant le déroulement de l'essai, il peut également permettre d'apprécier la tenue de la mousse dans le temps : une mousse résistante confèrera au mélange une quasi-imperméabilité pendant un intervalle de temps assez conséquent ; une mousse peu résistante tendra au contraire à "lâcher" rapidement, et le mélange retrouvera alors progressivement au cours du temps la perméabilité du sol seul. Cette caractéristique de la mousse est importante, car lors des arrêts de foration, il est important d'apprécier la tenue dans le temps du mélange sol/mousse sous une charge d'eau.

Si cet essai est à rapprocher de l'essai de demi-vie en matière de comportement de la mousse dans le temps, le contexte est quand même différent : la mousse est ici mélangée à un sol (avec lequel elle interagit) et sous une charge hydraulique.

2.2.5. L'essai d'imprégnation

Comme souligné dans le chapitre 1, la caractéristique d'un bouclier fermé à front confiné est de maintenir le front de taille, afin d'éviter les désordres en surface. Dans certains sols aquifères, la stabilité du front peut être remise en question en raison de venues d'eau. L'injection de mousse a, dans ce genre de sols, une fonction supplémentaire : donner une cohésion apparente au terrain au droit du front de taille, permettant ainsi d'assurer sa stabilité.

La notion de "cake", utilisée pour les boucliers à pression de boue (voir chapitre 1, paragraphe 2.1), est à rapprocher du phénomène qui se produit à l'avant du disque de coupe d'un bouclier à pression de terre lorsqu'on injecte de la mousse : l'agent de soutènement pénètre dans les pores du sol en expulsant l'eau qu'ils contiennent, sous l'effet d'une légère surpression. Ce phénomène d'imprégnation du sol par l'agent de soutènement va prendre fin lorsque les pores seront colmatés par les fines de la boue bentonitique pour le bouclier à pression de boue.

Pour le bouclier à pression de terre, si le terme de "cake" est parfois employé, le mécanisme d'action de la mousse est cependant différent : la mousse, contrairement à la boue, est un fluide compressible. Injectée au niveau du disque de coupe à une pression légèrement supérieure à celle qui règne au droit du front de taille, elle va pénétrer dans le sol ; au fur et à mesure de sa pénétration, les bulles d'air présentes dans la mousse vont, comme pour le béton cellulaire, bloquer les pores en créant des liaisons entre les particules du sol, dans la mesure où ce dernier est relativement fin (voir chapitre 2, paragraphe 2.1).

En raison du caractère chargé des tensioactifs, il se produit de plus une interaction physico-chimique entre la mousse et le sol en place.

Comme pour le bouclier à pression de boue, l'imprégnation du sol à l'avant d'un bouclier à pression de terre doit présenter des caractéristiques telles que :

- le gradient de pression existant au niveau des premiers grains soit suffisant pour assurer le maintien du front de taille ;
- la profondeur de pénétration soit telle que la zone imprégnée ne soit pas détruite à chaque passage des outils. Cette imprégnation doit cependant être limitée, afin que l'on n'assiste pas à une fuite de la mousse dans le terrain.

Pour modéliser expérimentalement ce phénomène, nous nous sommes équipés d'une cellule dite de confinement, schématisée sur la figure 3-9. Cette cellule est composée d'un corps en Plexiglas dont le diamètre intérieur est de 280 mm et la hauteur de 800 mm, supportant une pression limite de 0,5 MPa. Ce corps est équipé d'embases inférieure et supérieure en aluminium sur lesquelles sont adaptées un certain nombre de vannes permettant ainsi d'obtenir :

- une mise sous pression, indépendante et contrôlée par des manomètres, des parties haute et basse d'un échantillon ;
- une injection sous pression de la mousse en partie haute.

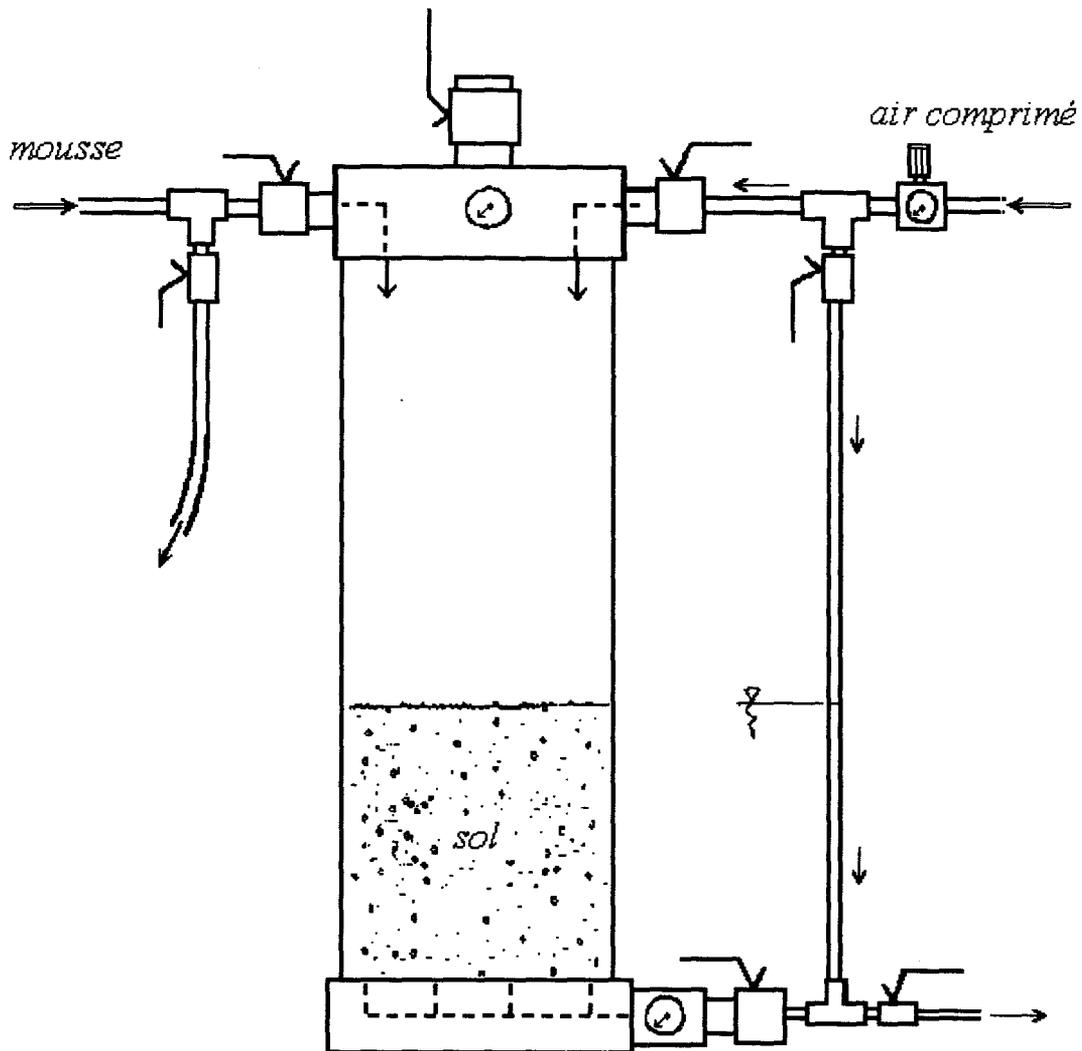


figure 3-9 : schéma de la cellule de confinement

Le principe de l'essai d'imprégnation est le suivant : on fait subir à un échantillon de sol mis en place dans la cellule une pression en partie haute de l'échantillon, et une contre-pression d'eau en partie basse. On procède ensuite à une injection de mousse en partie haute de l'échantillon. On va alors évaluer visuellement en plusieurs points l'imprégnation du sol par la mousse en fonction du temps.

La différence entre la pression appliquée en partie haute et celle appliquée en partie basse a été fixée à 0,05 MPa, valeur qui correspond dans la plupart des cas à la différence maximale entre la pression à laquelle est générée la mousse dans la chambre d'abattage de la machine et la pression de confinement régnant dans cette dernière ; les valeurs de la pression de confinement et de la contre-pression peuvent par contre varier d'un essai à l'autre.

Cet essai est délicat à mettre en œuvre : la mise en place de l'échantillon de sol est particulièrement importante, puisque la densité et la teneur en eau de ce dernier vont influencer grandement sur les résultats de l'essai.

Les modes opératoires des essais de comportement (comprenant les essais de malaxage, d'affaissement et d'adhérence), de perméabilité et d'imprégnation sont repris séparément en annexe (voir annexes respectives 5 à 7).

3. RÉALISATION D'UNE CAMPAGNE D'ESSAIS

Après le montage du laboratoire d'essai des produits moussants, la seconde étape de l'étude a consisté en la réalisation d'une campagne d'essais. Au préalable, il a été nécessaire de faire des choix sur les sols à étudier, ainsi que sur les produits à tester. Une réflexion sur la démarche à suivre dans le cadre d'une étude est également présentée.

3.1. Choix des sols étudiés

Le but de cette campagne d'essais étant de déterminer le domaine d'utilisation possible de la technique à pression de terre avec l'apport de mousse, en fonction des caractéristiques géotechniques d'un sol et des conditions hydrogéologiques dans lesquelles il se trouve, nous avons choisi différents sols permettant d'étudier les problèmes suivants :

- manque de fluidité plastique et perméabilité importante pour les sols grenus ;
- manque de plasticité et risques de collage et de colmatage pour les sols fins.

Les sols retenus, deux sables, un gravier et un limon, appartiennent à des fuseaux granulométriques bien distincts, qui correspondent chacun à des caractéristiques géotechniques différentes, différence que l'on retrouvera avec les mélanges faits à partir de ces sols et de la mousse ; ces sols sont présentés dans le chapitre 4.

Il est à noter que la recherche de ces sols a fait l'objet d'une démarche auprès des fournisseurs de granulats ou des exploitants de carrières afin d'obtenir leurs caractéristiques d'une part, et d'être assurés de la pérennité de l'exploitation de ces matériaux d'autre part. Il est en effet important de travailler sur les mêmes sols pendant toute la durée de l'étude, afin de pouvoir comparer les résultats des différents essais et d'en tirer des conclusions valables. Si cette démarche a porté ses fruits pour les sables et graviers, il n'en a pas été de même pour le limon, car les exploitants du gisement où ce sol a été prélevé ne possédaient pas ses caractéristiques.

Afin de déterminer le domaine d'utilisation défini plus haut, il a été prévu de séparer la campagne d'essais en plusieurs phases : une première phase concernant les sols "types" décrits ci-dessus, puis une seconde phase concernant des sols reconstitués à partir des sols types. L'intérêt d'utiliser les sols types pour reconstituer des sols avec une granulométrie plus étalée est que l'on peut choisir la proportion des différents sols de façon à obtenir une courbe granulométrique adaptée au problème à étudier. C'est en réalisant des essais sur différents dosages et en étudiant le comportement du mélange de ces derniers avec de la mousse que l'on devrait être à même d'établir le domaine d'utilisation possible de la mousse.

Cette démarche a été suivie au Japon et a donné des résultats intéressants : les campagnes d'essais réalisées ont permis de déterminer un fuseau granulométrique pour lequel l'utilisation de mousse n'est pas justifiée, car le sol testé est tout à fait adapté au creusement par la technique de la pression de terre sans additif. En revanche, en-deça de ce fuseau (sols fins), l'utilisation de la mousse est préconisée pour éviter le collage ; au-dessus de ce fuseau (sols grenus), la mousse permettra une imperméabilisation du sol en place. Ce domaine d'utilisation de la mousse est repris en annexe 8.

À l'issue de cette étude, une association japonaise sur l'utilisation des mousses avec des tunneliers à pression de terre, la RFSTMA (voir chapitre 2), a proposé une formule permettant de calculer le taux

d'injection nécessaire pour obtenir un mélange aux caractéristiques optimales [KODAMA et al - 1990]. Cette dernière s'écrit :

$$\left[T_i = \frac{a}{2} \left[(60 - 4X^{0,8}) + (80 - 3,3Y^{0,8}) + (90 - 2,7Z^{0,8}) \right] \right] \quad (11)$$

- où :
- T_i est le taux d'injection de mousse (%),
 - a est un paramètre dépendant du coefficient d'uniformité C_u ,
 - X , Y et Z sont les pourcentages des tamisats correspondant respectivement à des diamètres de 0,075, 0,42 et 2,0 mm.

Le coefficient d'uniformité C_u (ou coefficient de HAZEN) est égal au rapport entre D_{60} et D_{10} , paramètres qui sont respectivement égaux aux diamètres correspondant à 60 et à 10 % du tamisat sur la courbe granulométrique ; a prend les valeurs suivantes :

- 1,6 si $C_u < 4$;
- 1,2 si $4 \leq C_u < 15$;
- 1,0 si $C_u \geq 15$.

De plus, si les calculs des expressions $4X^{0,8}$, $3,3Y^{0,8}$ et $2,7Z^{0,8}$ donnent respectivement des valeurs supérieures à 60, 80 et 90 % , ces dernières sont alors respectivement prises égales à 60, 80 et 90 % .

Deux remarques sont également faites concernant la valeur du taux d'injection :

- si T_i est inférieur à 20 % , on prend alors par défaut 20 % ;
- si la mousse est utilisée dans le but d'éviter le collage dans le cas des sols fins, le taux d'injection devrait être porté à 30 % .

Il est à noter que KODAMA et al (1990) préconisent l'injection de deux types de mousse dans le cadre du creusement par boucliers à pression de terre :

- une mousse préparée à partir de la solution "A", qui comprend uniquement l'eau et l'agent moussant (concentration unique) et qui présente un coefficient d'expansion qui varie entre 6 et 10. Cette mousse est généralement utilisée dans le cas de sols argileux et de sols sableux avec une faible teneur en eau, et permet de réduire le collage et d'améliorer la fluidité plastique du matériau présent dans la chambre ;
- une mousse préparée à partir de la solution "B", qui comprend en outre un adjuvant (concentration fixe, ainsi que pour l'agent moussant) et qui est plutôt utilisée dans le cas de sols graveleux présentant une teneur en eau importante ; elle présente quant à elle un coefficient d'expansion compris entre 4 et 8. La mousse générée avec cette solution est plus stable que dans le cas précédent, et plus résistante face aux venues d'eau. Elle nécessite par contre l'utilisation d'un agent anti-moussant, car elle ne disparaît pas immédiatement.

3.2. Choix des produits testés

Un grand nombre d'essais ont été réalisés au laboratoire sur des produits moussants et ont révélé des disparités importantes entre ces derniers, que ce soit en matière de pouvoir moussant ou de stabilité. Deux produits moussants et un polymère ayant donné, avec l'essai de moussage, des résultats satisfaisants pour ces deux caractéristiques, ont fait l'objet d'une étude plus poussée au sein du laboratoire (voir chapitre 4).

3.3. Démarche à suivre dans le cadre d'une étude

L'ensemble des essais définis dans le paragraphe 2 reprend en quasi-totalité les paramètres caractérisant le bon fonctionnement d'un bouclier à pression de terre. Dans le cas d'une étude pour un projet, c'est principalement la nature du terrain qui va imposer les performances à atteindre pour chacun de ces paramètres. Les essais sont donc un moyen de valider et de confirmer des choix concernant la nature de la mousse utilisée d'une part (composition, concentration et coefficient d'expansion) et la quantité mise en œuvre d'autre part (taux d'injection).

Cependant avant d'arriver à de telles recommandations, la démarche à suivre au laboratoire doit passer par un certain nombre de points et par une approche itérative.

L'organigramme de la figure 3-10, présenté en page suivante, reprend dans les grandes lignes la démarche globale à suivre dans le cadre d'une étude relative à l'apport de produits moussants dans l'amélioration du percement par microtunnelier à pression de terre. Cet organigramme met l'accent sur quatre points essentiels :

- la connaissance des moyens techniques utilisés sur le chantier (machine, diamètre, dispositions constructives, ...)
- la connaissance géotechnique des terrains rencontrés, et l'analyse des échantillons des sols constituant le terrain en place ;
- le choix dans la composition de base de l'agent moussant et les paramètres liés à la génération de mousse ;
- la définition des quantités à mettre en œuvre.

Les deux premiers points sont indépendants du laboratoire. Cependant, il est nécessaire d'avoir à l'esprit le fait qu'ils conditionnent les objectifs de l'étude.

L'étude menée au laboratoire porte sur les deux derniers points. Ils doivent donc être menés par approches successives afin d'une part de sélectionner des produits adéquats et d'autre part d'optimiser leur utilisation.

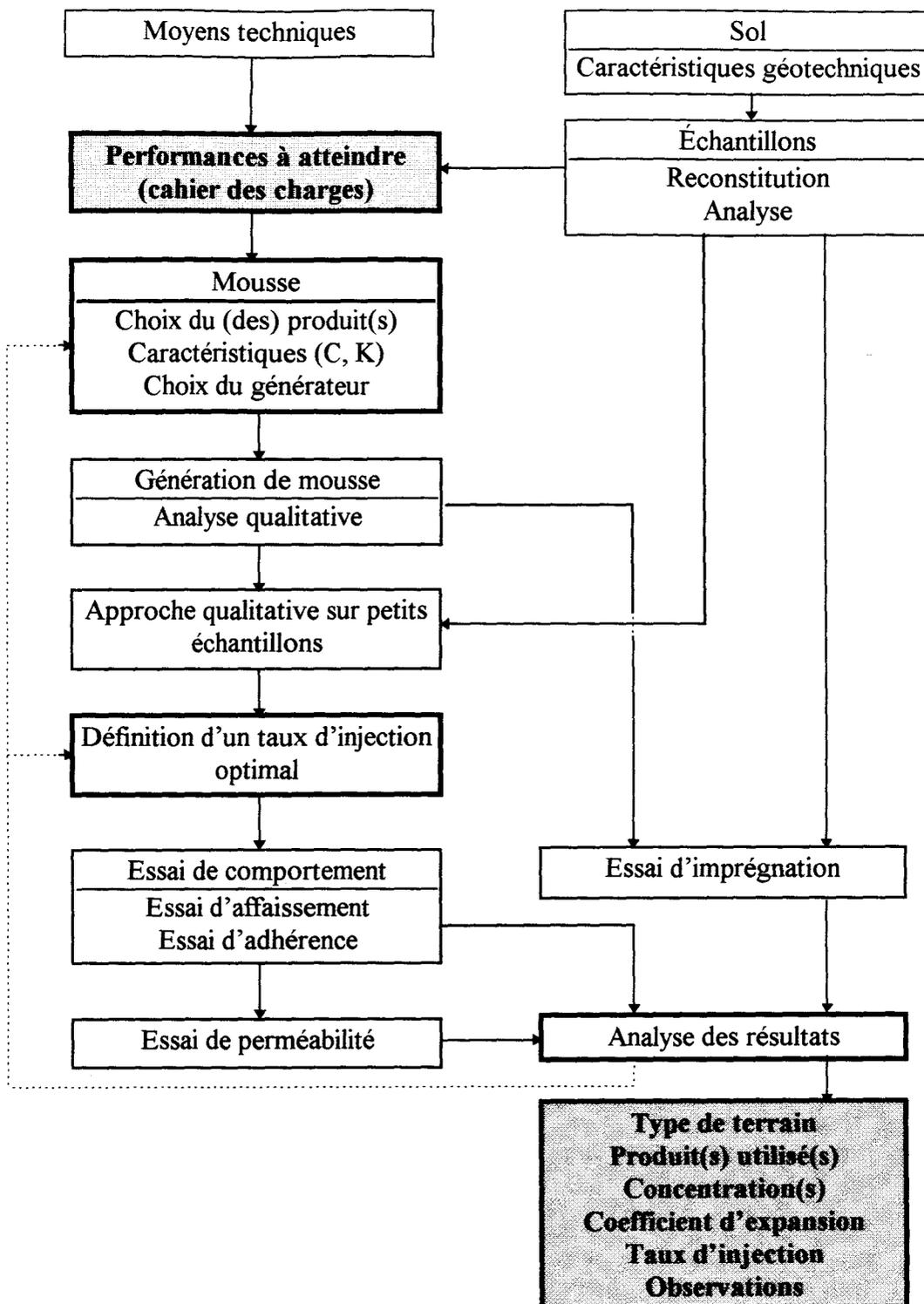


figure 3-10 : démarche à suivre dans le cadre d'une étude

4. CONCLUSION

La première étape de l'opération n°5 du Projet National *Microtunnels* concernant l'*apport des additifs dans l'amélioration du percement par microtunneliers* a consisté à monter un laboratoire d'essais des produits moussants utilisés par la technique dite à pression de terre. Ce laboratoire s'articule autour des trois pôles suivants :

- caractérisation des additifs,
- étude de la mousse et de sa génération,
- analyse du mélange sol/mousse.

Le premier point porte donc sur une caractérisation des produits commercialisés susceptibles de répondre aux besoins de l'étude, et la vérification de leur aptitude au moussage.

Le second point, qui concerne la mousse fabriquée cette fois à partir d'un banc de génération industriel dont le fonctionnement est semblable à ceux utilisés sur les tunneliers, a montré la complexité de son étude. La fabrication de cette dernière dépend en effet de nombreux paramètres (produit de base et adjuvants éventuels, concentration(s), coefficient d'expansion, générateur, ...).

Enfin, l'étude du mélange sol/mousse consiste en la mise en œuvre de plusieurs types d'essais correspondant aux problèmes qui se posent sur chantier lors de la réalisation d'un ouvrage avec un bouclier à pression de terre.

Avant de réaliser la campagne d'essais, il a été nécessaire de choisir les sols utilisés ; ces derniers présentent des caractéristiques bien distinctes, qui engendreront des comportements tout à fait différents d'un mélange sol/mousse à l'autre. Quant aux produits moussants, deux d'entre eux, ainsi qu'un adjuvant (polymère), ont été retenus en raison des résultats satisfaisants obtenus avec l'essai de moussage (voir chapitre 4).

L'étude de différents sols types, puis de sols reconstitués à partir de ces derniers devrait permettre d'établir les fuseaux granulométriques pour lesquels l'utilisation de la mousse est nécessaire. Une étude similaire, menée au Japon, a permis d'obtenir des résultats intéressants.

La démarche à suivre au laboratoire dans le cadre de cette étude a également été établie. Présentée sur la figure 3-10, elle met en œuvre les essais définis précédemment ; ces derniers doivent être menés successivement, du plus au moins contraignant, reprenant ainsi par ordre d'importance les paramètres de fonctionnement d'un bouclier à pression de terre.

- CHAPITRE 4 -

***ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX
RÉFLEXIONS GÉNÉRALES ET LIMITES DES
ESSAIS RETENUS***

1. INTRODUCTION

L'étude de l'apport de la mousse dans l'amélioration du percement par boucliers à pression de terre est passé en premier lieu par les étapes décrites dans le chapitre 3, à savoir :

- le montage du laboratoire d'essais des produits moussants, comprenant le choix de matériels existants, mais aussi la mise en place de nouveaux essais, afin de caractériser les produits moussants, mais aussi la mousse dont ils permettent la génération d'une part, et d'étudier l'apport de la mousse lorsqu'elle est mélangée à un sol d'autre part ;
- la préparation d'une campagne d'essais incluant le choix des sols d'une part, de manière à ce que ces derniers appartiennent à une gamme assez large (correspondant à des comportements et des problèmes différents) et le choix des produits d'autre part. Une réflexion sur la démarche à suivre dans le cadre d'une étude a également été menée.

En second lieu, la phase de réflexion et de mise en place des matériels et des procédés a laissé la place à une phase plus "opérationnelle", puisqu'elle consistait en la réalisation des essais à proprement parler. Ces derniers ont permis l'étude de la mousse seule, mais également l'étude de mélanges à base de sol et de mousse. Les essais ont concerné principalement des sols grenus. Les sols retenus pour cette étude sont décrits ci-après ; de même, les résultats obtenus avec l'essai de moussage pour les deux produits moussants et l'adjuvant sont repris dans la première partie de ce chapitre.

Les résultats obtenus avec les différents essais sont détaillés dans la deuxième partie. Bien que cette seconde phase ne soit pas encore terminée, elle a toutefois permis d'obtenir un grand nombre de résultats et de tirer des enseignements sur l'apport de la mousse lorsqu'elle est mélangée à des sols.

Si l'ensemble des essais a permis d'étudier les problèmes posés, il s'avère par contre que la réalisation des essais a montré les limites du matériel utilisé. Une critique des essais existants, mais également une réflexion sur les modifications à apporter ou sur le développement de nouveaux matériels est donc faite dans la troisième partie de ce chapitre.

2. CHOIX DES SOLS ET DES PRODUITS

La démarche suivant le montage du laboratoire d'essais des produits moussants a été le choix de sols afin de réaliser la campagne d'essais, mais aussi celui de produits permettant la génération de mousse présentant des caractéristiques satisfaisantes dans le cadre de notre application (voir chapitre 3).

2.1. Caractéristiques des sols étudiés

Les sols retenus pour l'étude sont les suivants :

- un sable fin siliceux de l'Oise (la proportion de matériaux siliceux est de 99,4 %) dont la granulométrie est comprise principalement entre 200 et 400 μm et qui ne contient pratiquement pas de fines ($ES \geq 98$ à l'essai d'équivalent de sable) (granulats : équivalent de sable, norme NF P 18-598). Ce sol, d'une perméabilité égale à $4,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, est noté *S1* ;
- un sable siliceux de l'Oise, dont la granulométrie est comprise entre 0 et 4 mm et qui contient un peu plus de fines que le sol *S1* ($ES \geq 80$), présente une faible proportion de matériaux carbonatés (8 %). Ce sol, d'une perméabilité égale à $2 \cdot 10^{-4}$ m/s, est noté *S2* ;
- un gravier siliceux de l'Oise, dont la granulométrie est comprise entre 4 et 20 mm, et qui présente également une faible proportion de matériaux carbonatés (5 %). Ce sol, d'une perméabilité supérieure à 10^{-3} m/s (valeur maximale mesurable avec le perméamètre du laboratoire), est noté *G1* ;
- un limon des plateaux, prélevé localement sur le site d'extraction d'une briqueterie. Ce sol, qui présente un indice de plasticité très faible ($I_P \leq 10$), est noté *L1*.

Il est à noter qu'une grave, *SG1*, a été composée à partir des sols *S2* et *G1* (voir paragraphe 3.2). Des fiches signalétiques reprenant les principales caractéristiques des sols grenus sont reprises en annexe 9.

Si l'on applique la formule (11) (voir chapitre 3) aux sols grenus qui ont fait l'objet de la campagne d'essais, on obtient les taux d'injection repris dans le tableau 4-1 ci-dessous.

<i>Sol</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>SG1</i>
T_i (%)	48*	44*	86*

(* valeurs moyennes obtenues à partir des fuseaux granulométriques des trois sols)

tableau 4-1 : formule RFSTMA - application aux sols *S1*, *S2*, *SG1*

Si l'on remarque des valeurs de T_i sensiblement identiques pour les sols *S1* et *S2*, on constate par contre une différence importante avec *SG1*, puisque la valeur trouvée pour ce dernier est de l'ordre du double.

2.2. Évaluation des produits retenus

Les résultats de cette évaluation sont repris ci-après ; pour des raisons de confidentialité, les dénominations commerciales des produits sont remplacées par les désignations suivantes : *Tensio 1*,

Tensio 2 et *Poly 1*. Le tableau 3-2 reprend les résultats obtenus avec le produit *Tensio 1* seul, avec des concentrations de 1, 2 et 3 % (plage de concentrations préconisée par le fournisseur) ; les essais ont été répétés avec l'ajout de l'adjuvant *Poly 1*, dosé à 1 %.

	C_{am}	C_{av} (%)	T (°C)	T_{ft} (s)	T_{dvt} (mn)	H_m (mm)	K_t
mousse sans polymère	1	0	21,9	10	18'10"	178	7,3
	2	0	22,6	12	25'50"	180	7,4
	3	0	22,8	12	30'	182	7,5
mousse avec polymère	1	1	23,0	41	28'	128	5,2
	2	1	22,9	11	57'10"	146	6,2
	3	1	21,3	10	70'30"	142	5,8

tableau 3-2 : résultats des essais de moussage effectués avec *Tensio 1* et *Poly 1*

Au vu des résultats obtenus, on peut faire les remarques suivantes :

- le temps de foisonnement T_{ft} est faible quelque soit la concentration C_{am} pour les essais réalisés sur le produit seul : ce produit présente donc une bonne aptitude au moussage. En revanche, l'utilisation de l'adjuvant *Poly 1* semble affecter cette aptitude à faible concentration, mais n'a pas d'influence pour des concentrations plus élevées ;
- la hauteur de mousse H_m est relativement constante quelque soit la concentration C_{am} pour les essais réalisés sur le produit seul : ce produit présente donc un bon pouvoir moussant, en comparaison des autres produits testés. On s'aperçoit par contre que l'utilisation de l'adjuvant diminue le pouvoir moussant du produit *Tensio 1* de façon conséquente, en particulier pour une faible concentration. Une plus grande concentration atténue cet effet ;
- la durée de demi-vie T_{dvt} augmente avec la concentration pour les deux séries d'essais. Cette durée de demi-vie, satisfaisante pour les essais réalisés sur le produit seul, augmente considérablement avec l'utilisation de l'adjuvant ; cela confirme bien le pouvoir stabilisant du polymère sur la mousse.

Le tableau 3-3 reprend les résultats obtenus avec le produit *Tensio 2* seul, à des concentrations de 1, 2 et 3 % (plage de concentrations préconisée par le fournisseur). Les températures n'ont pas été notées pour cette série d'essais.

C_{am}	C_{av} (%)	T (°C)	T_{ft} (s)	T_{dvt} (mn)	H_m (mm)	K_t
1	0	—	95	157'	132	5,4
2	0	—	32	220'	166	6,9
3	0	—	18	373'	163	6,7

tableau 3-3 : résultats des essais de moussage effectués avec *Tensio 2*

Les résultats diffèrent de ceux présentés dans le tableau 3-2 ; en effet :

- le temps de foisonnement, même s'il décroît avec l'augmentation de la concentration, présente toutefois des valeurs importantes ; ce produit ne présente donc une aptitude au moussage que pour des concentrations élevées ;
- la hauteur de mousse va en augmentant avec la concentration du produit, sans atteindre toutefois les hauteurs obtenues par la mousse générée à partir du produit *Tensio 1* ; le produit *Tensio 2* permet donc la génération d'une mousse plus compacte ;

- la durée de demi-vie est par contre beaucoup plus importante avec ce produit qu'avec le *Tensio 1* ; la mousse formée est donc très stable dans le temps.

Ces essais n'ont pas été répétés avec l'adjuvant *Poly 1*, en raison du temps de foisonnement déjà important relevé lors des essais effectués avec le produit seul, et qui aurait encore augmenté, empêchant ainsi la formation de la mousse.

Remarque : le produit *Tensio 2* ayant été retenu plus tardivement que *Tensio 1*, l'étude de son action sur les différents sols décrits ci-dessus n'est par conséquent pas aussi complète que pour ce dernier (voir paragraphe 3.2.2.1.2).

3. ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les essais réalisés ont donc été de deux types, comme décrit dans le chapitre 3 : ils portaient d'une part sur la caractérisation de la mousse générée avec le banc de génération et d'autre part sur l'étude du mélange sol/mousse, avec les sols et les produits définis précédemment.

3.1. Essais sur la mousse

Les essais réalisés ont porté sur des mousses générées à partir de produits moussants seuls, mais aussi sur des mousses générées à partir de produits moussants et de l'agent viscosifiant (mousses viscosifiées). Les résultats sont présentés ci-après.

Dans un souci de simplification, nous avons adopté la notation "X/Y" dans les pages suivantes pour une mousse de coefficient d'expansion égal à X et pour une concentration Y en produit moussant (%). Le terme Z dans la notation "X/Y/Z" correspond quant à lui à la concentration en agent viscosifiant (‰).

3.1.1. L'essai de génération

Cet essai a pour but, comme décrit précédemment, l'étude de l'évolution de la perte de charge ΔP_{gm} induite par le passage des fluides dans le générateur en fonction du débit de mousse.

Au cours des différents essais, nous nous sommes attachés à faire varier certains paramètres, afin de vérifier s'ils avaient ou non une influence sur la génération de la mousse. On peut citer la concentration en produit moussant et le coefficient d'expansion ; des essais visant à générer une mousse viscosifiée ont également été effectués.

La figure 4-1 reprend ci-dessous les résultats d'un essai de génération réalisé avec le produit *Tensio 1* pour différentes valeurs du coefficient d'expansion et pour une concentration égale à 1 %.

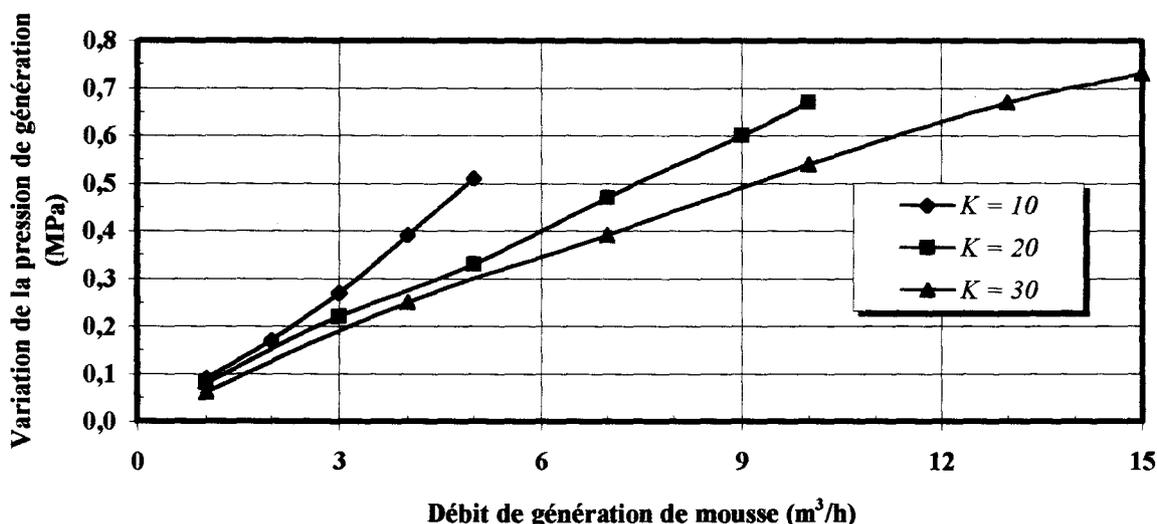


figure 4-1 : produit *Tensio 1* - évolution de ΔP_{gm} en fonction de Q pour K variable

Selon le coefficient d'expansion retenu, l'essai a été réalisé sur une plage de débits différente : de 1 à 5 m³/h pour un coefficient d'expansion égal à 10, alors que cette plage était comprise entre 1 et 10 m³/h, puis entre 1 et 15 m³/h pour des *K* respectivement égaux à 20 et 30. Ceci est dû à la limitation du banc de génération en matière de débit de la phase liquide.

Les résultats obtenus montrent l'influence de la phase liquide sur l'évolution plus ou moins rapide de ΔP_{gm} : pour la mousse 10/1, soit une mousse dont 10 % du contenu correspond à la phase liquide, ΔP_{gm} augmente assez rapidement et atteint une valeur de 0,5 MPa pour un débit de 5 m³/h. L'évolution de ΔP_{gm} est en revanche quasiment linéaire pour la mousse 20/1 (la phase liquide représente 5 %), et atteint 0,68 MPa pour 10 m³/h ; quant à la mousse 30/1 (la fraction liquide est égale à 3,3 %), l'évolution de ΔP_{gm} est linéaire jusqu'à 10 m³/h, puis la pente de la courbe s'adoucit pour atteindre 0,72 MPa à 15 m³/h.

On a pu constater que la mousse, quel que soit *K*, était d'une qualité assez médiocre pour des valeurs de ΔP_{gm} faibles, puisqu'elle était "très molle" et se dégradait très vite (présence de grosses bulles à la surface de la mousse qui éclatent) ; à l'inverse, la mousse était beaucoup plus rigide et plus stable pour des valeurs de ΔP_{gm} importantes.

Des essais ont également été réalisés en faisant varier la concentration du produit *Tensio 1* entre 1 et 3 % ; les résultats des essais réalisés repris dans le tableau 4-4 qui suit indiquent que ce paramètre a peu d'influence sur l'évolution de ΔP_{gm} pour un même coefficient d'expansion.

<i>K</i>	<i>Q</i>	ΔP_{gm} (MPa)		
		<i>C_{am}</i> = 1 %	<i>C_{am}</i> = 2 %	<i>C_{am}</i> = 3 %
10	1	0,09	0,09	0,10
	2	0,17	0,18	0,18
	3	0,27	0,28	0,29
	4	0,39	0,40	0,42
	5	0,51	0,51	0,55
20	1	0,08	0,08	0,08
	3	0,22	0,22	0,22
	5	0,33	0,33	0,33
	7	0,47	0,47	0,48
	9	0,60	0,61	0,62
	10	0,67	0,68	0,69
30	1	0,06	0,06	0,06
	4	0,25	0,26	0,26
	7	0,39	0,40	0,40
	10	0,54	0,54	0,55
	13	0,67	0,66	0,67
	15	0,73	0,72	0,73

tableau 4-4 : produit *Tensio 1* - influence de *C_{am}* sur l'évolution de ΔP_{gm}

Le fait que la concentration en produit n'a visiblement que peu d'influence sur l'évolution de ΔP_{gm} peut être liée au produit utilisé, qui est tel qu'il permet la génération d'une mousse qui présente visiblement des caractéristiques déjà satisfaisantes dès *C_{am}* = 1 % ; il serait intéressant de faire des essais

de génération avec d'autres produits, de caractéristiques différentes, pour voir si la concentration a réellement une influence sur ce paramètre.

Il nous a enfin paru intéressant d'étudier la génération d'une mousse viscosifiée ; les résultats de ces essais pour des concentrations en *Tensio 1* de 2 % et en *Poly 1* de 0,5 ‰ ainsi que les résultats obtenus pour la mousse seule sont repris sur la figure 4-2.

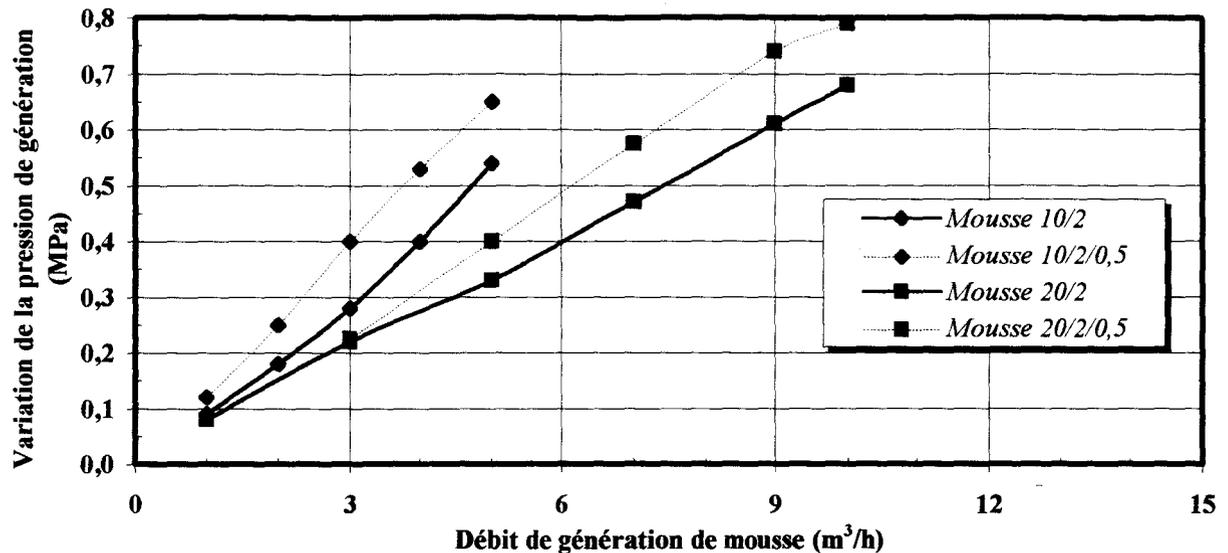


figure 4-2 : produit *Tensio 1* - évolution de ΔP_{gm} en fonction de Q avec et sans polymère

Les courbes représentées sur cette figure indiquent une influence importante du polymère sur l'évolution de ΔP_{gm} : pour des mousses de caractéristiques identiques, l'utilisation de *Poly 1* a pour conséquence une différence de la pression de génération pouvant aller jusqu'à 0,1 MPa. Cela indique que le polymère a une influence sur l'aptitude au moussage du produit *Tensio 1*, ce qui se traduit par une élévation de la perte de charge au niveau du générateur.

Les essais réalisés avec le complexe *Tensio 1/Poly 1* ont permis de plus de mettre en évidence un problème de génération pour des coefficients d'expansion élevés. Le phénomène, déjà existant pour un K de 20, était tel pour un K de 30 qu'il empêchait tout essai sur la mousse : la génération de cette mousse produisait en effet des effets de "pistonage", c'est-à-dire que la mousse s'écoulait, en sortie de générateur, sous une forme biphasique (liquide et air). La mousse produite n'étant pas par conséquent de bonne qualité, il était impossible de faire des essais (voir paragraphe 4.1.1).

3.1.2. L'essai de consistance

Comme pour l'essai de génération, les essais de consistance ont porté sur le produit *Tensio 1*, mais également sur le complexe *Tensio 1/Poly 1*. Les résultats d'une série d'essais, reprenant notamment les indices de consistance ζ_{m0} et ζ_m , ainsi que l'évolution de la consistance $\Delta\zeta_m$, sont donnés dans le tableau 4-5 ci-après.

Mousse	h_{c_0} (mm)	\varnothing_{c_0} (mm)	h_c (mm)	\varnothing_c (mm)	ζ_{m_0} (%)	ζ_m (%)	$\Delta\zeta_m$ (%)
10/1	25	147	23	157	29	25	14
10/2	28	141	23	154	34	25	26
10/3	31	132	25	143	40	30	25
10/1/0,5	26	148	20	155	30	22	27
10/2/0,5	27	141	22	152	32	25	22
10/3/0,5	30	131	26	143	39	31	21
20/1	39	118	35	126	56	47	16
20/2	41	113	38	120	61	54	11
20/3	43	108	39	110	67	60	10
30/1	41	108	38	114	64	56	13
30/2	44	108	43	112	69	65	6
30/3	44	107	43	111	70	66	6

tableau 4-5 : complexe *Tensio 1*/Poly 1 - essai de consistance

On constate, d'après les résultats obtenus, que les mousses étudiées sont d'autant plus consistantes que leur coefficient d'expansion est élevé d'une part, et que leur concentration est importante d'autre part. L'évolution de $\Delta\zeta_m$ montre de plus (mis à part les résultats obtenus pour les mousses d'un K de 10) que la mousse conserve d'autant plus sa consistance au cours du temps que la concentration est élevée, pour un même coefficient d'expansion.

L'ajout de *Poly 1* a par contre visiblement peu d'influence sur la consistance de la mousse générée ; cela laisse à penser que la mousse viscosifiée produite avec le banc de génération n'est pas plus "rigide" qu'une mousse seule qui possède les mêmes caractéristiques.

Bien qu'un grand nombre d'essais reste à faire pour s'assurer de la validité de l'essai de consistance, on peut d'ores et déjà faire les observations suivantes :

- cet essai est simple à mettre en œuvre et rapide à réaliser, ce qui permet d'effectuer un grand nombre d'essais ;
- il permet de caractériser une mousse par un paramètre propre à cette dernière, et donc indépendant de tout système de génération.

De plus, cette notion de consistance est intuitive lorsque l'on travaille avec la mousse et est certainement la première appréciation que l'on fait sur cette dernière.

3.1.3. L'essai de demi-vie

Le produit *Tensio 1* a fait l'objet de nombreux essais de demi-vie, et les résultats obtenus permettent d'en tirer non pas des conclusions, mais tout au moins de faire certaines observations et d'indiquer des tendances.

Les essais réalisés ont porté sur des mousses dont les coefficients d'expansion étaient égaux à 10, 20 ou 30 et dont la concentration en produit moussant variait entre 1 et 3 %. La figure 4-3 reprend ci-après les résultats d'un essai réalisé sur une mousse 30/1 ; la courbe est présentée sous une forme semi-logarithmique en raison de la durée importante de l'essai.

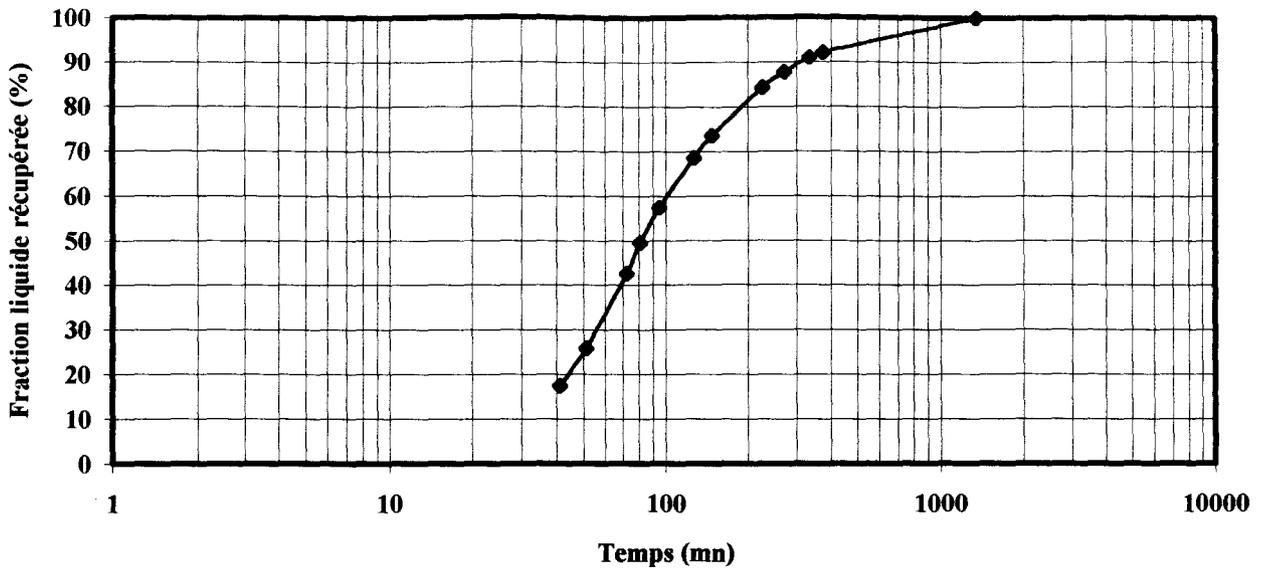


figure 4-3 : produit Tensio 1 - évolution de la vitesse de drainage de la phase liquide en fonction du temps

On constate sur cette courbe qu'une grande partie de la solution moussante est récupérée dans les premières heures que dure l'essai ; la mousse restante est alors essorée, et a totalement disparu au bout de 24 heures. Le temps de demi-vie déterminé d'après cette courbe est d'environ une heure et vingt minutes.

À la suite des essais réalisés, on a pu observer les tendances suivantes : la durée de demi-vie augmente d'une part avec le coefficient d'expansion et d'autre part avec la concentration en tensioactif, puisqu'elle passe d'une heure pour une mousse 10/1 à plus d'une heure et demie pour une mousse 30/3 (voir tableau 4-6). Les résultats obtenus pour une concentration de 2 % sont toutefois incohérents, car ils ne sont pas en accord avec les tendances observées ; on peut expliquer ce problème par un manque de précision du banc pour une certaine plage de concentrations du produit.

C_{am} (%)	Durée de demi-vie (mn)		
	$K = 10$	$K = 20$	$K = 30$
1,0	64	83	81
1,5	60	88	91
2,0	51	76	73
2,5	80	87	92
3,0	70	95	101

tableau 4-6 : produit Tensio 1 - évolution de la durée de demi-vie pour des mousses de différentes caractéristiques

Quelques essais ont également été réalisés avec des mousses viscosifiées (concentration C_{av} égale à 0,3 %) ; cependant, le peu de résultats obtenus étant peu probants (soit 58 mn pour une mousse 10/1/0,3 et 82 mn pour une mousse 10/3/0,3), il n'a pas été possible d'en tirer des conclusions.

Si le produit *Tensio 2* n'a pas fait l'objet de nombreux essais, il apparaît néanmoins que sa durée de demi-vie est beaucoup plus élevée, puisqu'elle est de l'ordre de dix heures pour une mousse 30/1.

3.1.4. L'essai de comportement sous pression

Les essais réalisés ont porté uniquement sur la mousse générée à partir du produit *Tensio 1*. La figure 4-4 donne les résultats d'un essai réalisé avec une mousse 10/2/0,5. Les courbes correspondent d'une part à la variation théorique du volume de la mousse sous l'effet de la pression (d'après les équations (2) et (8) du chapitre 2) et d'autre part aux variations réelles mesurées lors de l'essai pour les différents cycles ; seules les courbes de mise sous pression ont été représentées, afin de ne pas surcharger le graphe.

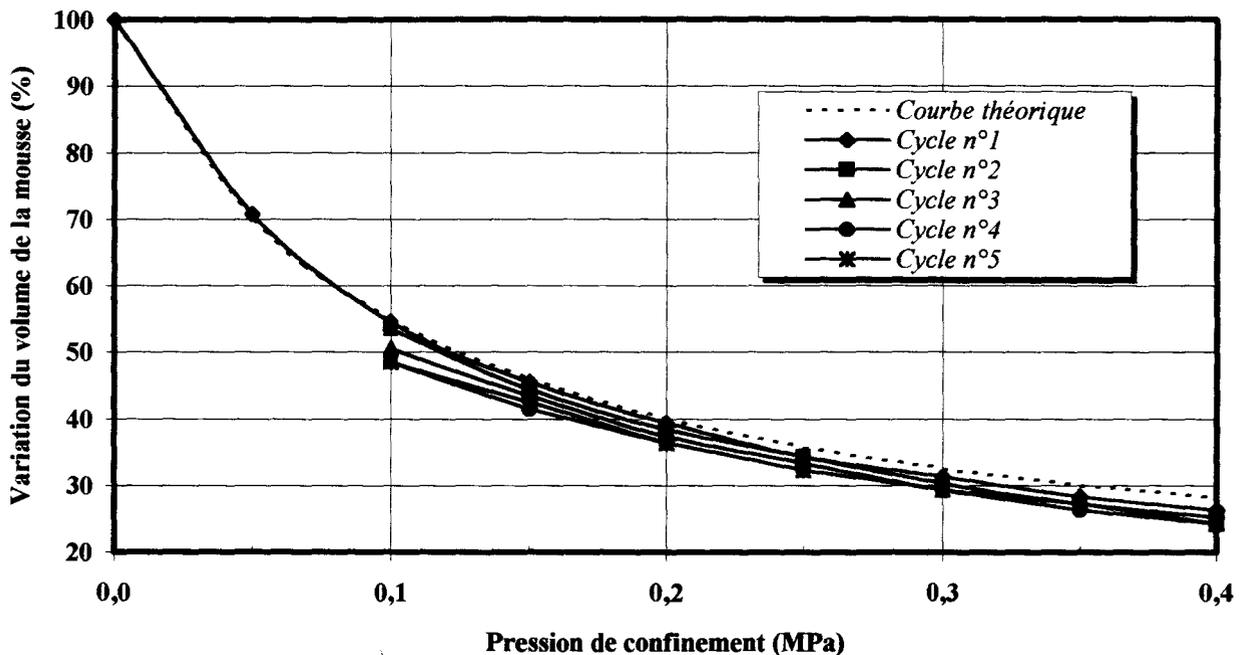


figure 4-4 : complexe Tensio 1/Poly 1 - variation du volume de la mousse en fonction de la pression de confinement

Les courbes représentées sur cette figure montrent que :

- le comportement sous pression de la mousse correspond bien à celui prévu par la théorie (cycle n°1) ;
- si les cycles n°2 à n°5 présentent un écart avec le cycle n°1, ce peut être dû à un drainage rapide de la phase liquide constituant la mousse sous l'effet de la pression, altérant ainsi les caractéristiques de cette dernière.

D'autres essais ont été réalisés sur des mousses sèches (30/1, 30/3 et 10/2) : les courbes obtenues ont la même allure que celles de la figure 4-4, et montrent donc que la mousse générée avec le produit *Tensio 1* présente un comportement satisfaisant sous pression.

3.2. Essais sur le mélange sol/mousse

La première phase de la campagne d'essais a concerné principalement les sols grenus, et en particulier le sable 0/4 mm noté *S2*. Le gravier a bien fait l'objet d'une étude, mais il n'a pas été testé seul (voir paragraphe 3.2.3) : une composition, notée *SGI*, a été réalisée à partir des sols *S2* et *G1* afin de reconstituer une grave 0/20 mm ; les caractéristiques de cette dernière sont reprises en annexe 9.

Pour les sols grenus, il s'est avéré que le premier objectif était d'étudier leur comportement à teneur en eau de saturation w_{sat} . Pour définir cette teneur, nous nous sommes basés dans un premier temps sur les formules utilisées en mécanique des sols. Leur application donnant toujours des sols détremés (en raison de l'état de foisonnement dans lequel se trouvaient les sols secs), les valeurs de w_{sat} pour *S1*, *S2* et *SGI* ont donc été déterminées expérimentalement. De plus, pour les sols *S1* et *S2*, il a été décidé de faire des essais à des teneurs en eau intermédiaires, afin de voir l'influence de cette teneur sur le comportement du mélange sol/mousse.

Quelques essais ont également eu lieu avec le limon *L1*.

Les essais réalisés sur ces sols ont consisté principalement en des essais de comportement et de perméabilité ; les essais d'imprégnation ont concerné uniquement le sol *S2*.

Bien que la mousse utilisée pour réaliser les différents essais ait surtout été générée avec le produit *Tensio 1*, quelques essais ont été réalisés avec le produit *Tensio 2* à titre de comparaison (sol *S2*).

3.2.1. Essais réalisés avec le sol *S1*

Afin de pouvoir étudier des mélanges sol/mousse de caractéristiques différentes, les essais de comportement ont été effectués pour :

- trois teneurs en eau correspondant à un sol humide (9 %), mouillé (16 %) et saturé (23 %) ;
- une concentration en *Tensio 1* égale à 1 % pour des coefficients d'expansion de 10 et 20 ;
- un coefficient d'expansion de 30 pour des concentrations de 1, 2 et 3 % .

La nécessité de limiter le nombre d'essais nous a conduit à n'étudier l'influence de la concentration que pour un K de 30 uniquement ; cette valeur du coefficient d'expansion permet en effet de générer une mousse dont la phase liquide est en faible proportion, ce qui signifie une consommation en tensioactif moins importante. Ce critère est à considérer avec attention en raison du caractère industriel de l'utilisation qui est faite de la mousse.

3.2.1.1. Résultats des essais de comportement de mélanges sol/mousse

Ces essais, réalisés pour étudier le comportement de différents mélanges sol/mousse, sont riches en enseignements : lors de l'évolution de l'apport en mousse (ramenée à un taux d'injection), on peut en effet mesurer la puissance P consommée par le malaxeur, l'affaissement A du mélange au cône d'Abrams, l'angle limite d'adhérence α de ce mélange sur la plaque ainsi que le temps T_h nécessaire à son homogénéisation.

À la fin d'un essai, on peut alors calculer le gain de puissance G_P obtenu (par rapport à la puissance consommée avec le sol seul), ainsi que la consommation Co_{am} en produit moussant (et éventuellement en adjuvant, Co_{av}) en fonction du taux d'injection. Une fiche reprenant les résultats d'un essai est donnée en annexe 10.

➤ Une première étape a consisté en l'étude de l'évolution des paramètres cités ci-dessus en fonction du taux d'injection selon les caractéristiques des mousses, mais également selon la teneur en eau du sol.

La figure 4-5 présente l'évolution de G_P en fonction du taux d'injection de mousse pour des mousses dont les coefficients d'expansion sont respectivement égaux à 10, 20 et 30, la concentration du produit moussant étant de 1 % ; la teneur en eau du sol est quant à elle de 23 %.

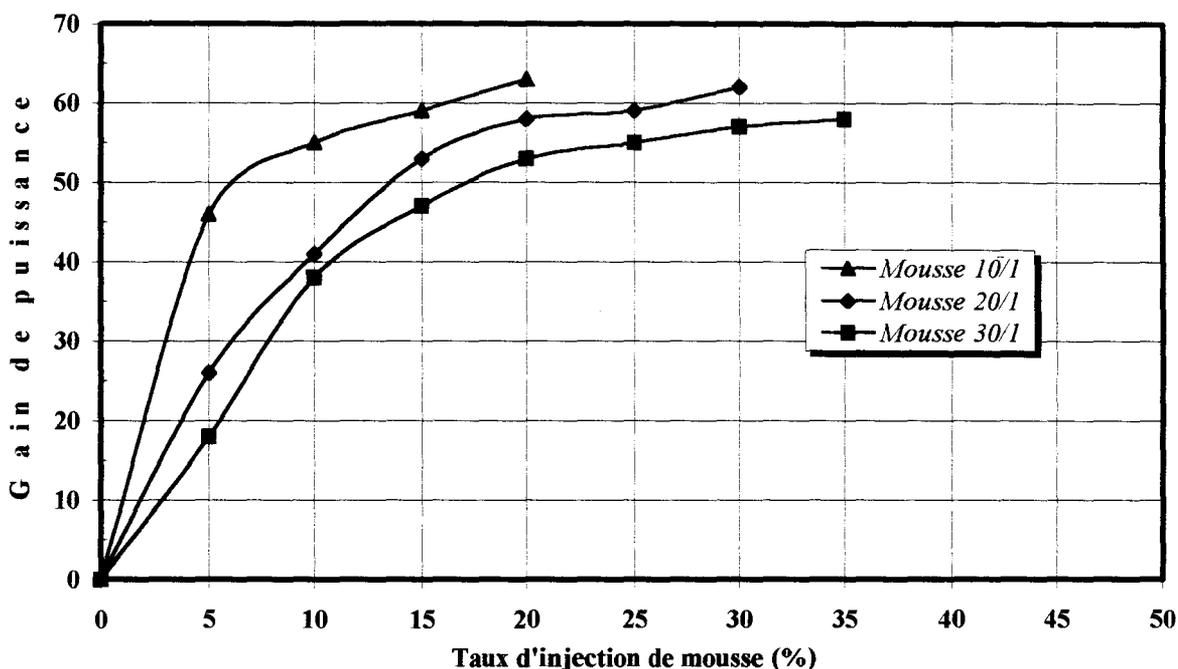


figure 4-5 : mélange S1/Tensio 1 - évolution de G_P pour K variable et w_{sat}

On constate sur ce graphe que le gain de puissance augmente rapidement dès le premier apport de mousse, et qu'il atteint ensuite un palier à partir duquel il n'évoluera plus considérablement. Ce palier présente des valeurs de G_P allant jusqu'à environ 60 %, ce qui confirme l'efficacité de la mousse en matière de fluidification du sol. Ce phénomène est d'autant plus important que la mousse présente un faible coefficient d'expansion : les 3 courbes du graphe présentent en effet une valeur de G_P d'autant plus élevée que K est faible. On peut donc en déduire, d'après les résultats présentés ci-dessus, que l'action de la mousse est d'autant plus efficace que la phase liquide la constituant est plus importante.

Si l'on compare, pour la même teneur en eau de 23 %, trois essais réalisés avec des mousses dont la concentration en produit varie entre 1 et 3 %, et de même coefficient d'expansion (30), on observe globalement les mêmes tendances, bien que les différences soient cette fois moins marquées, en particulier entre les concentrations de 1 et 2 % : une augmentation rapide de G_P pour atteindre ensuite un palier. On constate cette fois une meilleure fluidité du mélange pour des concentrations en produit élevées, comme l'indiquent les courbes de la figure 4-6.

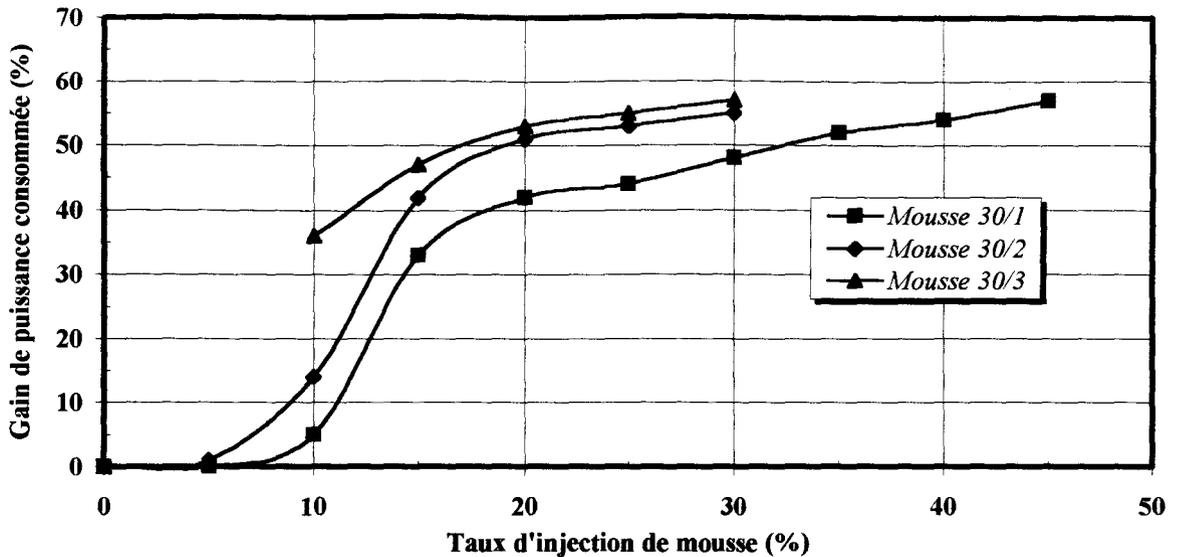


figure 4-6 : mélange S1/Tensio 1 - évolution de G_P pour C_{am} variable

L'influence de la teneur en eau du sol retenue pour les essais est également importante : si le graphe de la figure 4-5 présentait des essais réalisés à $w = 23 \%$, les autres essais permettent de constater que plus le sol est sec initialement, plus il va réagir lentement à l'apport de la mousse. La figure 4-7 présente ci-dessous les résultats des essais réalisés avec une mousse 20/1 pour les trois teneurs en eau.

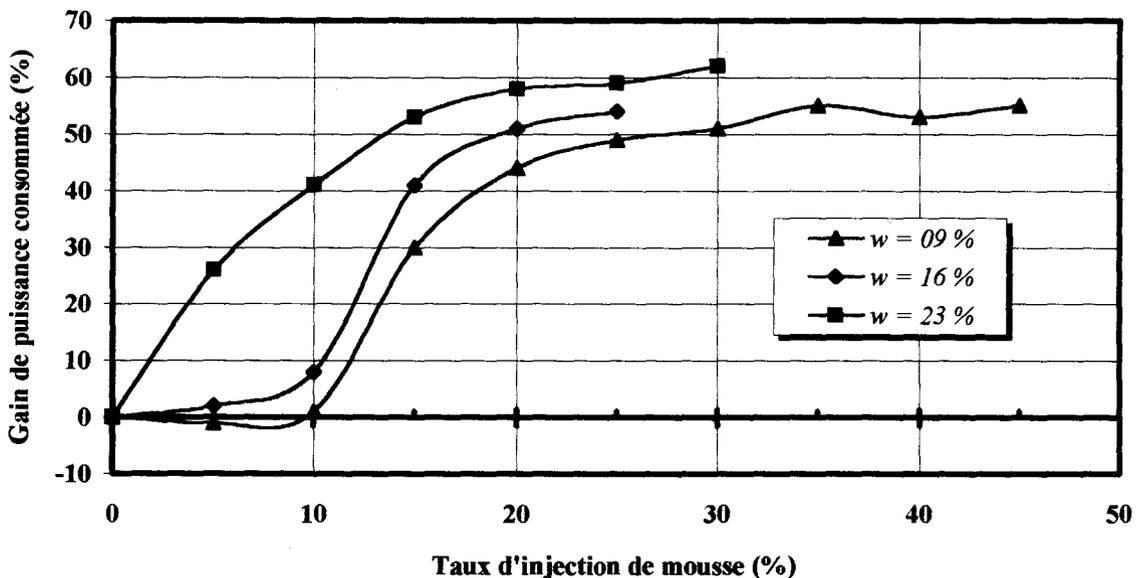


figure 4-7 : mélange S1/Tensio 1 - évolution de G_P pour w variable

Si l'augmentation de G_P est immédiate pour le sol à teneur en eau de saturation, elle est d'abord très lente à nulle pour les deux autres teneurs, pour augmenter ensuite très rapidement et atteindre un palier. On constate même, pour le sol humide, que la puissance consommée non seulement ne diminue pas, mais a tendance au contraire à augmenter au début de l'essai. Ce graphe montre donc que lorsque

le sol est "sec", la mousse va dans un premier temps l'humidifier et lui donner ainsi une cohésion apparente plus importante (ceci explique la légère augmentation de G_P), puis ensuite le fluidifier.

Si l'on observe les résultats obtenus pour l'affaissement, on constate une évolution similaire à celle de G_P , à savoir un affaissement d'autant plus rapide que la mousse présente une phase liquide importante (pour une même concentration) ou que la concentration en produit est élevée (pour un même coefficient d'expansion) ; de même, l'influence de la teneur en eau est évidente en ce sens que l'affaissement est d'autant plus rapide que w est élevée.

La mousse joue bien un rôle de lubrification, comme on peut le voir sur le graphe de la figure 4-8, qui présente l'évolution de l'angle limite d'adhérence du mélange pour des mousses de même coefficient d'expansion (20) et d'une concentration en produit égale à 1 % et une teneur en eau du sol variable.

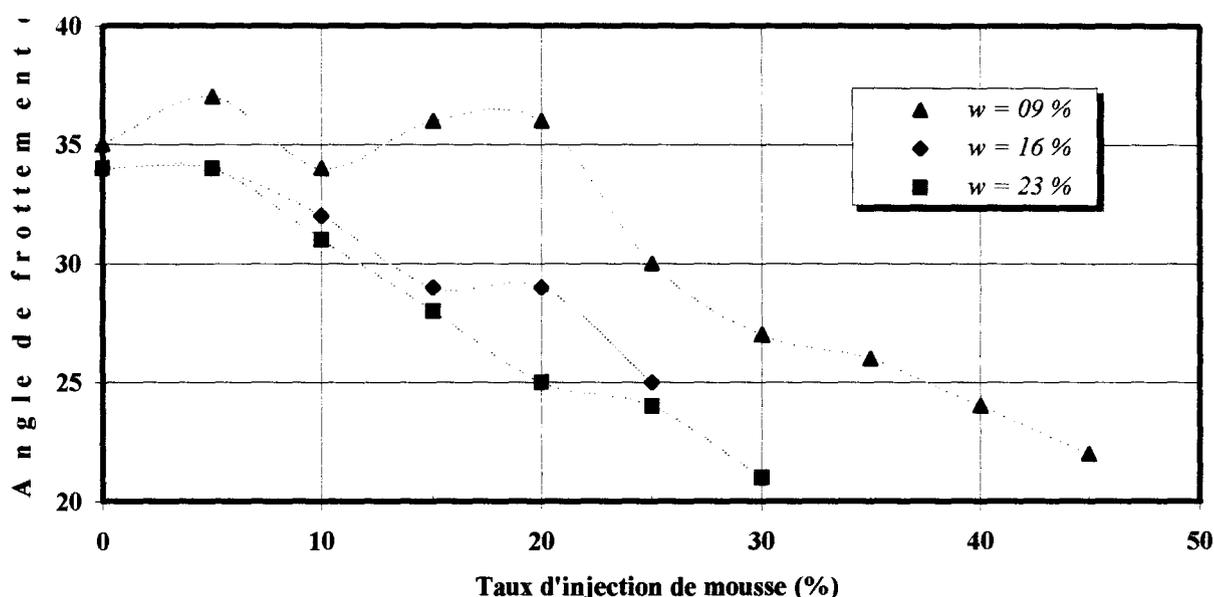


figure 4-8 : mélange S1/Tensio 1 - évolution de l'angle limite d'adhérence α pour w variable

L'angle de frottement, égal à 34 ou 35° pour le sol seul, décroît progressivement pour atteindre des valeurs comprises entre 20 et 25° à la fin de l'essai. Cette lubrification est d'autant plus importante que la teneur en eau initiale du sol est élevée : la présence d'eau en quantité plus importante accroît d'autant l'efficacité de la mousse. On retrouve également les mêmes tendances que pour G_P et A quant à l'évolution de K pour une concentration donnée, ou vice-versa. L'évolution de l'angle limite d'adhérence α est cependant plus difficile à analyser en raison de sa fluctuation parfois importante au cours d'un essai, comme on peut le voir sur la figure 4-8.

Les temps d'homogénéisation du mélange relevés au cours des différents essais n'apportent pas de renseignements particuliers, si ce n'est qu'ils sont toujours inférieurs à 2 mn, et indiquent une action rapide de la mousse.

Une seconde étape a suivi cette analyse et s'est attachée cette fois, pour chaque essai, à déterminer la quantité de mousse nécessaire pour obtenir un mélange optimal, caractérisé par un affaissement fixé à 12 cm, valeur moyenne retenue pour l'intervalle correspondant aux bétons très plastiques, soit entre 10 et 15 cm (voir chapitre 3). Cette seconde analyse s'inscrit dans la méthodologie proposée au chapitre 3 (voir paragraphe 2.2.2).

Cette démarche ne tient toutefois pas compte d'un critère qui s'avère pourtant être primordial dans l'utilisation de la mousse avec un tunnelier à pression de terre : le critère économique. En effet, à une quantité de mousse de caractéristiques données (K , C_{am} et éventuellement C_{av}), correspond une quantité de produit(s) consommé(s), cette dernière étant ramenée, comme le taux d'injection de mousse, à une consommation par m^3 de sol (exprimée en volume ou en masse). Les consommations Co_{am} et Co_{av} sont données par les équations ci-dessous.

$$\left[Co_{am} = 100 \frac{T_i \cdot C_{am}}{K} \right] \quad (12)$$

$$\left[Co_{av} = 100 \frac{T_i \cdot C_{av}}{K} \right] \quad (13)$$

- où :
- Co_{am} est la consommation d'agent moussant (g/m^3 de sol),
 - Co_{av} est la consommation d'agent viscosifiant (g/m^3 de sol),
 - T_i est le taux d'injection (%),
 - C_{am} est la concentration en agent moussant (%),
 - C_{av} est la concentration en agent viscosifiant (%),
 - K est le coefficient d'expansion.

Les essais réalisés ont donc fait l'objet d'une nouvelle étude, en considérant cette fois la consommation en produit et non plus le taux d'injection. La figure 4-9 reprend ci-après les résultats obtenus pour une mousse 10/1, le sol $S1$ étant à une teneur de 16 % ; le graphe reprend à la fois le gain de puissance et l'affaissement.

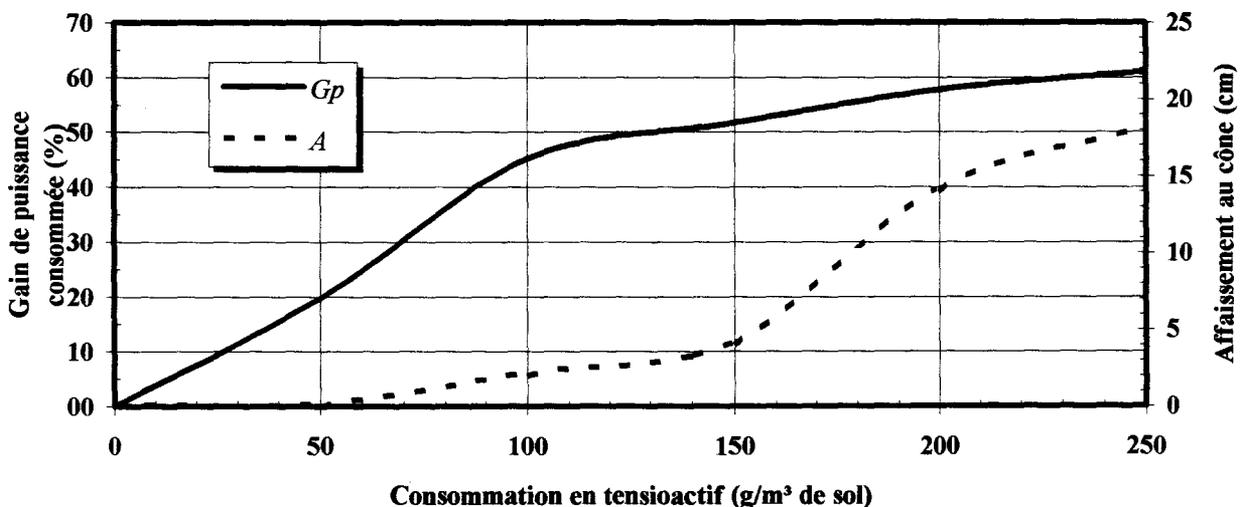


figure 4-9 : mélange $S1/Tensio\ 1$ - évolution de G_p et de A en fonction de Co_{am}

On retrouve sur ce graphe l'influence de l'apport de la mousse sur la puissance consommée par le malaxeur, à savoir une augmentation assez rapide et régulière de G_p , qui va ensuite en se stabilisant pour atteindre une valeur d'environ 60 % ; l'évolution de A est en revanche différente puisque l'apport de mousse n'est pratiquement pas visible au début de l'essai et que A augmente ensuite rapidement. L'affaissement de 12 cm est obtenu pour une consommation Co_{am} d'un peu moins de 190 g/m³.

Le tableau 4-7 reprend ci-dessous les résultats obtenus pour Co_{am} au cours des différents essais en fonction de K , C_{am} et w pour un affaissement optimal. Les valeurs correspondantes du taux d'injection sont reprises à titre indicatif.

w	Mousse	10/1	20/1	30/1	30/2	30/3
9	Co_{am}	138	140	106	129	171
	T_i	10-15	25-30	30-35	15-20	15-20
16	Co_{am}	189	102	62	105	144
	T_i	15-20	20-25	15-20	15-20	10-15
23	Co_{am}	111	95	78	129	130
	T_i	10-15	15-20	20-25	15-20	10-15

tableau 4-7 : mélange S1/Tensio 1 - valeurs de Co_{am} et de T_i pour $A=12$ cm

On remarque, à la lecture de ce tableau, une variation assez importante de Co_{am} d'un essai à l'autre. On peut dégager les tendances suivantes :

- la consommation Co_{am} est d'autant plus importante, pour une mousse donnée, que la teneur en eau du sol est faible. De façon globale, l'écart entre les consommations est cependant plus faible entre 16 et 23 % qu'entre 9 et 16 % ;
- la consommation Co_{am} est d'autant plus faible, pour une concentration et une teneur en eau données, que le coefficient d'expansion est élevé ;
- la consommation Co_{am} est d'autant plus élevée, pour un coefficient d'expansion et une teneur en eau donnés, que la concentration est élevée.

L'affaissement optimal est obtenu pour des taux d'injection variables, dépendant des caractéristiques de la mousse utilisée d'une part et de la teneur en eau du sol d'autre part.

Bien que certains résultats semblent incohérents, on peut toutefois affirmer que la consommation la plus faible correspond à l'utilisation de la mousse 30/1, et quelle que soit la teneur en eau.

Le tableau 4-8 reprend quant à lui les résultats obtenus pour G_p au cours de ces mêmes essais.

	Mousse	10/1	20/1	30/1	20/2	30/3
w	9	50	51	50,5	50	50
	16	57	51	54	54	52
	23	56	58	55	53	57

tableau 4-8 : mélange S1/Tensio 1 - valeurs de G_p pour $A=12$ cm

On constate que les valeurs reprises dans ce tableau, contrairement aux valeurs du tableau 4-7, varient peu et se situent autour d'une valeur moyenne égale à 53 %, même si G_p est sensiblement plus

grand quand la teneur en eau est élevée. Quelle que soit la mousse utilisée, la fluidité maximale du mélange semble être atteinte.

3.2.1.2. Résultats des essais de perméabilité

Ces essais, dont le but est de vérifier l'apport de la mousse sur le sol *S1* en matière d'imperméabilisation, n'ont pas fait l'objet d'une étude complète comme ce fut le cas pour les essais de comportement. On peut toutefois observer que la perméabilité du mélange est d'autant plus faible que l'on augmente le taux d'injection de mousse, pour une mousse et un sol de teneur en eau donnés.

La perméabilité n'est toutefois pas descendue en dessous de 10^{-5} m/s au cours des différents essais (la perméabilité du sol seul est de $4 \cdot 10^{-4}$ m/s).

3.2.1.3. Conclusions sur le sol *S1*

Dans l'ensemble, on peut affirmer que l'apport de mousse est tout à fait bénéfique dans le cas du sol *S1*, car il confère à ce dernier l'état de fluidité plastique désiré. Si certains résultats se révèlent être incohérents, on a pu toutefois dégager certaines tendances à partir des essais de comportement :

- l'action de la mousse est d'autant plus rapide que la teneur en eau du sol est élevée ;
- le taux d'injection de mousse est d'autant plus faible que les mousses utilisées présentent un faible coefficient d'expansion (pour une même concentration) ou une concentration élevée (pour un même coefficient d'expansion) ; il s'avère par contre que la mousse qui entraîne la consommation en produit la plus faible est la mousse 30/1.

L'utilisation d'une mousse qui présente une fraction liquide peu importante semble donc appropriée et on peut penser que la présence d'un grand nombre de bulles d'air joue un rôle important dans la lubrification du sol, en permettant aux grains de glisser les uns contre les autres. La concentration du produit moussant la plus satisfaisante est en fait la plus faible, ce qui semble indiquer que le sable réagit bien avec la mousse.

On peut être surpris par le fait que les taux d'injection relevés lors de la réalisation des différents essais soient extrêmement variables, et semblent dépendre grandement des caractéristiques du mélange sol/mousse (type de mousse utilisée, teneur en eau du sol). Si l'on compare de plus ces valeurs, comprises entre 10 et 35 % (avec toutefois une prédominance entre 10 et 20 %) à celle donnée par la formule de la RFSTMA, égale à 48 %, on constate une différence notable. Il faut rappeler que cette formule ne prend pas en compte les caractéristiques citées ci-dessus pour l'évaluation de T_i : ceci peut donc expliquer la différence observée entre les résultats obtenus avec les essais et celui donné par l'application de la formule (11).

L'action de la mousse est dans tous les cas rapide, puisque les temps d'homogénéisation relevés au cours des différents essais n'ont jamais dépassé 2 mn, et étaient même généralement inférieurs.

Le caractère lubrifiant de la mousse a pu également être constaté par le biais des essais d'adhérence, puisque l'angle limite d'adhérence du mélange sur la plaque diminue fortement avec l'injection de mousse.

On a pu enfin constater que l'apport d'une mousse sèche ne permettait pas d'atteindre, pour le sol *S1*, une perméabilité inférieure à 10^{-6} m/s, valeur-seuil au-delà de laquelle on considère qu'un bouclier à pression de terre ne présentera pas un fonctionnement optimal (voir chapitre 1). Le nombre d'essais réalisés n'est pas suffisant pour que l'on puisse en tirer des conclusions définitives. On pourrait cependant expliquer les résultats obtenus par le fait que le sable *S1* est très propre, comme le montre l'essai d'équivalent de sable ; l'absence de fines ne permettrait donc pas à la mousse seule de limiter les venues d'eau.

3.2.2. Essais réalisés avec le sol *S2*

Afin d'étudier l'apport de la mousse sur des sols présentant des caractéristiques géotechniques différentes, des essais ont également été réalisés sur le sol *S2*.

Ce sol a fait l'objet des mêmes essais que le sol *S1*. La teneur en eau de saturation trouvée expérimentalement étant de 18 %, les deux teneurs en eau intermédiaires ont été respectivement prises égales à 6 et 12 %.

Des essais de comportement et de perméabilité ont également été réalisés avec des mousses viscosifiées d'une part et des mousses générées avec le produit *Tensio 2* d'autre part, ceci à titre de comparaison. Le sol *S2* a en outre fait l'objet d'essais d'imprégnation.

3.2.2.1. Résultats des essais de comportement de mélanges sol/mousse

3.2.2.1.1. Essais réalisés avec *Tensio 1*

L'analyse des résultats s'est faite en deux étapes, comme pour le sol *S1*.

- La première étape, consistant en l'étude des différents paramètres en fonction du taux d'injection de mousse, a permis de vérifier que la campagne d'essais réalisée sur le sol *S1* donnait des résultats tout à fait cohérents.

Les résultats obtenus avec le sol *S2* présentent en effet les mêmes tendances, à savoir :

- une évolution généralement rapide de G_p en fonction de T_i , pour atteindre ensuite un palier dont la valeur maximale est de 60 % ;
- une évolution similaire de A en fonction du taux d'injection, plus ou moins rapide selon les caractéristiques de la mousse utilisée ;
- l'importance de la teneur en eau du sol dans le comportement du mélange.

La photographie de la figure 4-10 permet de visualiser l'homogénéisation du sol *S2* lorsqu'il est mélangé à la mousse.

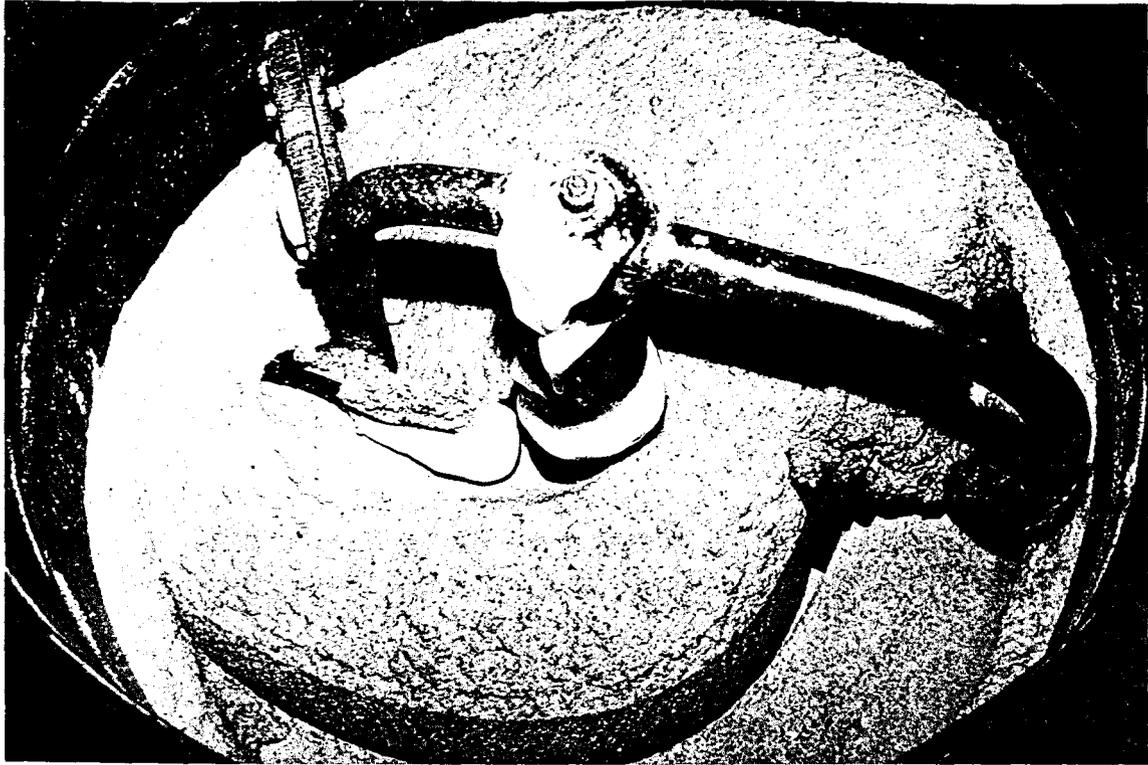


figure 4-10 : mélange S2/Tensio 1 - aspect du mélange lors d'un essai de malaxage

On constate également que la mousse permet la lubrification du sol, puisque les résultats de l'essai d'adhérence indiquent une diminution de l'angle limite d'adhérence du mélange, initialement à 34 ou 35°, et de l'ordre de 20° à la fin de l'essai.

L'action de la mousse est enfin, comme pour le sol *SI*, rapide, puisque les temps d'homogénéisation relevés au cours des différents essais sont inférieurs à 2 mn.

➤ La seconde étape a, comme pour *SI*, consisté à analyser les résultats obtenus en considérant cette fois la consommation en produit et non plus le taux d'injection de mousse, pour des raisons économiques (voir paragraphe 3.2.1.1).

Le tableau 4-9 reprend ci-dessous les consommations Co_{am} relevées lors des différents essais.

w	Mousse	10/1	20/1	30/1	30/2	30/3
6	Co_{am}	108	154	69	151	180
	T_i	10-15	30-35	20-25	20-25	20-25
12	Co_{am}	82	67	44	67	77
	T_i	5-10	10-15	10-15	10-15	5-10
18	Co_{am}	35	17	13	24	31
	T_i	0-5	0-5	5-10	0-5	0-5

tableau 4-9 : mélange S2/Tensio 1 - valeurs de Co_{am} et de T_i pour $A=12$ cm

On peut, à la lecture des valeurs données dans ce tableau, faire les mêmes remarques que pour le tableau 4-7 : la consommation en produit moussant varie grandement selon les caractéristiques de la mousse, mais aussi selon la teneur en eau du sol.

L'observation des valeurs relevées pour le taux d'injection confirme l'influence de la teneur en eau, puisque pour $w = 6 \%$, T_i varie en moyenne entre 20 et 25 % ; cette valeur chute à 10-15 % pour $w = 12 \%$, puis finalement à 0-5 % pour $w = 18 \%$.

La mousse la plus adaptée au sol $S2$, du point de vue de la consommation en produit, est, comme pour le sol $S1$, la mousse 30/1.

Si on retrouve les mêmes tendances, les valeurs obtenues diffèrent par contre entre les deux séries d'essais et amènent les observations suivantes :

- la consommation en produit nécessaire pour obtenir un affaissement optimal est plus importante pour le sol $S1$ que pour le sol $S2$;
- l'évolution de la teneur en eau est plus significative pour les essais réalisés avec le sol $S2$ que pour ceux réalisés avec le sol $S1$. Si les valeurs de Co_{am} sont quasiment identiques lorsque $S1$ et $S2$ sont humides, elles sont en revanche totalement différentes lorsque $S1$ et $S2$ sont saturés.

Le tableau 4-10 ci-dessous reprend quant à lui les gains de puissance relevés pour un affaissement optimal au cours de ces mêmes essais.

	Mousse	10/1	20/1	30/1	20/2	30/3
w	6	40	47	43	46	40
	12	54	53	53	53	53
	18	38	32	34	40	34

tableau 4-10 : mélange $S2/Tensio 1$ - valeurs de G_P pour $A=12$ cm

Les valeurs relevées présentent ici une différence par rapport aux valeurs de G_P relevées au cours des essais réalisés avec le sol $S1$:

- si, pour ce dernier, les valeurs relevées se situaient autour d'une valeur moyenne de 53 %, les valeurs données dans le tableau 4-10 sont beaucoup plus dispersées puisqu'elles varient entre 32 et 54 %. Cette dispersion peut être due au caractère hétérogène du sol $S2$ (le sol $S1$ étant lui très homogène) ;
- le gain de puissance est différent selon la teneur en eau du sol : de 40 à 47 % pour $w = 6 \%$, il est égal à 53 % pour $w = 12 \%$, mais descend à des valeurs comprises entre 32 et 40 % pour $w = 18 \%$.

Les résultats donnés ci-dessus ne permettent pas d'établir un lien entre la valeur de G_P et les caractéristiques de la mousse utilisée lors de la réalisation de l'essai.

Les essais réalisés avec des mousses viscosifiées 10/1/0,3 et 20/1/0,3 sont au nombre de 2 : ils concernaient des échantillons présentant une teneur en eau de 18 %. Ce choix s'explique de la façon suivante : dans le cas de sols soumis à des venues d'eau, une mousse peut présenter des risques de

délavage. Or, l'ajout de polymères à la mousse permet de rigidifier cette dernière : il nous a donc semblé intéressant d'étudier l'influence du polymère sur un sol saturé.

Les résultats obtenus ne permettent pas de constater une réelle influence du polymère : si on les compare à ceux obtenus avec des mousses seules, on retrouve sensiblement les mêmes résultats, que ce soit pour Co_{am} ou G_P .

3.2.2.1.2. Essais réalisés avec Tensio 2

Le nombre d'essais réalisés avec le produit *Tensio 2* et le sol *S2* est moins important que pour les séries d'essais détaillées précédemment mais les résultats obtenus sont particulièrement intéressants.

Si l'on étudie l'évolution des différents paramètres en fonction du taux d'injection de mousse, on peut observer les mêmes tendances que celles observées précédemment, à savoir une influence des caractéristiques de la mousse, mais aussi de la teneur en eau du sol, sur le comportement du mélange sol/mousse.

Le sol semble être toutefois moins sensible à l'apport de la mousse générée avec le produit *Tensio 2* qu'avec le produit *Tensio 1*. La figure 4-11 présente ci-après, à titre de comparaison, les courbes de gains de puissance ainsi que les courbes d'affaissement pour des mousses 20/1 générées à partir de *Tensio 1* et de *Tensio 2*, pour une teneur en eau égale à 12 %.

Si l'évolution de G_P en fonction de T_i est assez rapide pour la première courbe, on constate en revanche pour la deuxième courbe la nécessité d'un apport de mousse plus important pour que la puissance consommée diminue. On peut même observer au début de l'essai avec *Tensio 2* une cohésion apparente plus importante. On peut également observer à la fin des deux essais que G_P est beaucoup moins élevé pour la deuxième courbe que pour la première.

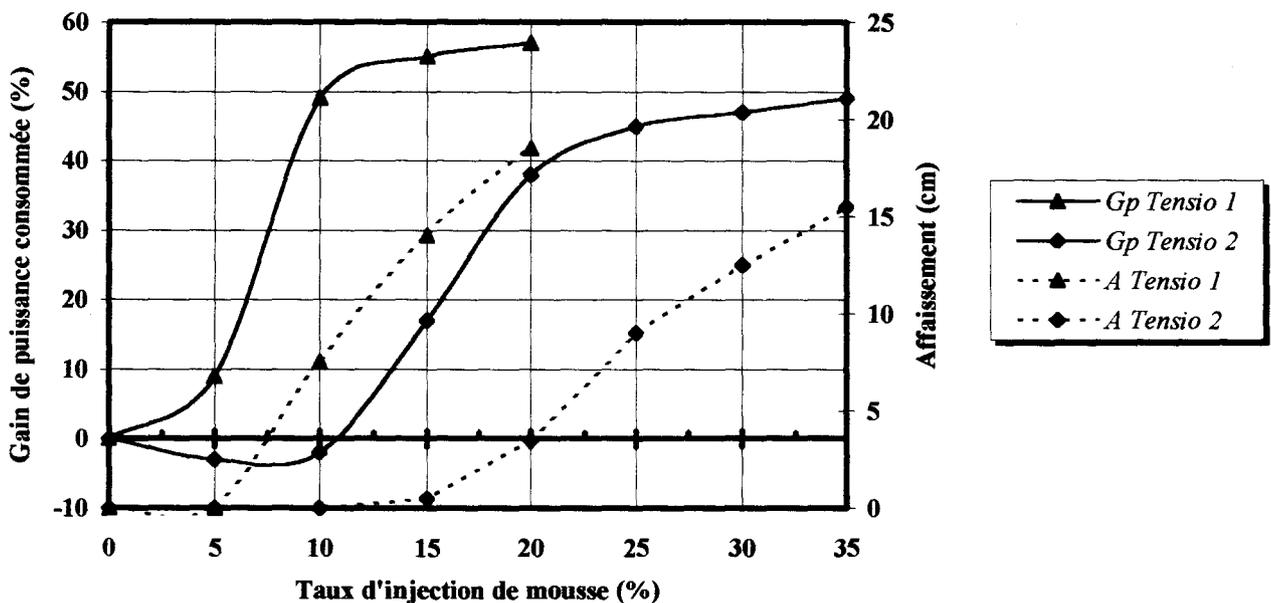


figure 4-11 : mélanges *S2/Tensio 1* et *S2/Tensio 2* - comparaison de l'évolution de G_P et de A

Les valeurs d'affaissement montrent également une réaction beaucoup plus lente avec la mousse générée avec *Tensio 2* par rapport à celle générée avec *Tensio 1*, puisque 10 à 15 % de mousse sont nécessaires pour que le mélange sol/mousse commence à s'affaisser avec *Tensio 2*, contre 5 à 10 % pour *Tensio 1* (voir figure 4-11).

Les temps d'homogénéisation relevés pendant la réalisation des essais indiquent, comme pour les essais décrits précédemment, une certaine rapidité d'action de la mousse à former un mélange homogène. On a toutefois pu relever, pour la plupart des essais réalisés, des valeurs de T_h sensiblement plus importantes.

Quant à l'évolution de l'angle d'adhérence, la mousse générée avec *Tensio 2* a sans nul doute un rôle lubrifiant, puisque α passe de 34 ou 35° (pour le sol seul) à des valeurs comprises entre 19 et 23°. On peut observer l'influence des caractéristiques de la mousse ou de la teneur en eau du sol dans le phénomène de lubrification ; il est encore une fois difficile de tirer des conclusions définitives sur les résultats, en raison des fluctuations du paramètre α .

Si l'on reprend les essais réalisés en considérant cette fois la consommation en produit nécessaire pour atteindre un affaissement optimal, on obtient les résultats repris dans le tableau 4-11 ci-dessous.

w	Mousse	10/1	20/1	30/1	30/2	30/3
12	Co_{am}	172	145	91	133	183
	T_i	15-20	25-30	25-30	15-20	15-20
18	Co_{am}	—	—	42	—	—
	T_i	—	—	10-15	—	—

tableau 4-11 : mélange S2/Tensio 2 - valeurs de Co_{am} et de T_i pour $A = 12\text{ cm}$

La lecture des différentes valeurs de ce tableau indique, comme pour les autres séries d'essais, une variation assez importante de la consommation en produit moussant d'un essai à l'autre. On observe de la même façon l'influence des paramètres caractéristiques de la mousse et de la teneur en eau du sol sur l'évolution de Co_{am} .

Si l'on compare les résultats obtenus avec ceux de la série d'essais S2/Tensio 1, on constate en revanche des différences énormes de consommation en produit moussant pour aboutir au résultat souhaité, c'est-à-dire atteindre un affaissement optimal : les mêmes essais indiquent en effet des consommations en *Tensio 2* qui sont de l'ordre du double par rapport aux consommations en *Tensio 1*. Les taux d'injection relevés présentent une différence d'environ 10 % entre les deux séries d'essais.

Le tableau 4-12 ci-dessous reprend quant à lui les gains de puissance relevés pour un affaissement optimal au cours de ces mêmes essais.

	Mousse	10/1	20/1	30/1	20/2	30/3
w	12	49	47	47	45	46
	18	—	—	46	—	—

tableau 4-12 : mélange S2/Tensio 2 - valeurs de G_p pour $A = 12\text{ cm}$

On peut de même constater, à la lecture de ce tableau, des différences notables entre les gains de puissance relevés pendant les essais réalisés avec le produit *Tensio 1* et ceux réalisés avec *Tensio 2*, puisqu'elles sont de l'ordre de 4 à 9 %.

3.2.2.2. Résultats des essais de perméabilité

Le nombre d'essais de perméabilité réalisés avec le sol *S2* est beaucoup plus important que pour le sol *S1* et a permis d'observer le comportement de mélanges sol/mousse sous une charge hydraulique, en faisant varier la teneur en eau du sol, mais également les caractéristiques de la mousse (K , C_{am} , C_{av}) ; quelques essais ont de plus été réalisés avec *Tensio 2*.

Il s'ensuit de l'analyse de cette série d'essais que la mousse permet de conférer au mélange sol/mousse une perméabilité inférieure à 10^{-6} m/s, ce qui correspond à la valeur de perméabilité critique définie précédemment (voir chapitre 1).

La figure 4-12 reprend ci-après les valeurs de la perméabilité du mélange sol/mousse pour différentes mousses et pour une teneur en eau de 12 % en fonction de T_i .

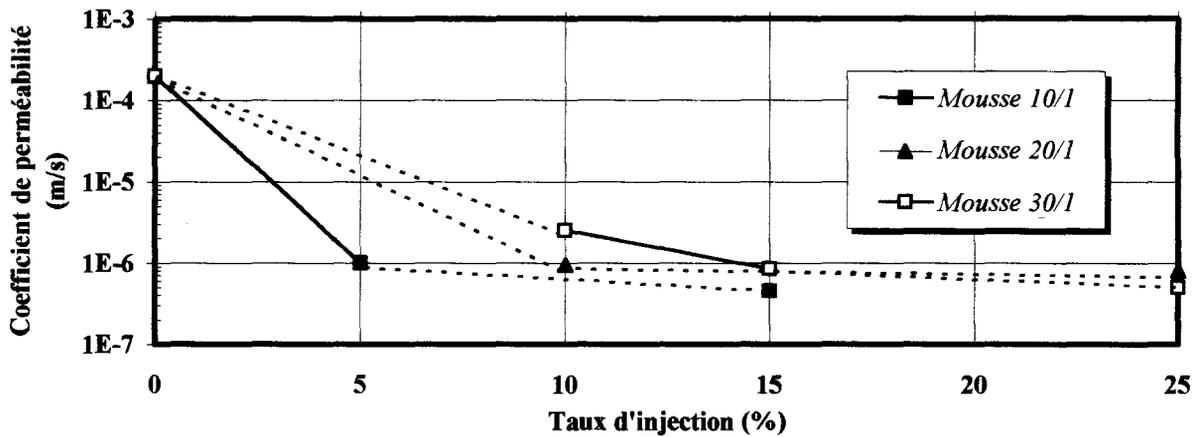


figure 4-12 : mélange *S2/Tensio 1* - évolution de k en fonction de T_i

On peut constater l'effet de la mousse sur la perméabilité des différents mélanges sur cette figure : la mousse 10/1 agit plus rapidement que les autres mousses, puisqu'il faut seulement 5 % de mousse pour atteindre une perméabilité de 10^{-6} m/s ; la différence est également marquée entre les mousses 20/1 et 30/1, puisque le taux d'injection nécessaire obtenir une perméabilité satisfaisante est respectivement de 10 et 15 %. L'importance de la phase liquide constituant la mousse semble donc jouer un rôle dans l'imperméabilisation du mélange.

Des essais ont également été effectués pour une teneur en eau de 6 % et ont également donné des résultats satisfaisants. Le tableau 4-13 reprend ci-dessous les valeurs de T_i pour lesquels la perméabilité critique est respectée et il permet de comparer les quantités de mousse nécessaires pour atteindre cette perméabilité avec $w = 6$ et $w = 12$ %.

w (%)	mousse 10/1	mousse 20/1	mousse 30/1	mousse 30/3
6	10	20	20	20
12	5	10	15	—

tableau 4-13 : mélange *S2/Tensio 1* - évolution de T_i pour $k \leq 10^{-6}$ m/s

On peut faire, à la lecture de ce tableau, les observations suivantes :

- la quantité de mousse nécessaire pour atteindre la perméabilité critique est moins importante pour une teneur en eau de 12 % que pour une teneur en eau de 6 % ;
- la quantité de mousse nécessaire est d'autant plus importante pour $w = 12\%$ que le coefficient d'expansion est élevé.

Si l'on compare de plus les valeurs reprises dans ce tableau avec celles du tableau 4-9 (comparaison des essais réalisés dans les mêmes conditions), on constate que le taux d'injection nécessaire pour atteindre la perméabilité critique est généralement inférieur ou égal au taux d'injection nécessaire pour obtenir un affaissement optimal du mélange ; or, la perméabilité diminue avec l'augmentation du taux d'injection. On peut donc penser qu'un mélange sol/mousse possédant la fluidité plastique voulue présentera également une perméabilité satisfaisante.

Les essais réalisés avec *Tensio 2*, s'ils sont peu nombreux, permettent cependant de constater encore une fois l'apport de la mousse en matière d'imperméabilisation du sol, puisque pour $w = 12\%$, on atteint une perméabilité satisfaisante pour des taux d'injection de 15 % (mousse 10/1) ou de 25 % (mousses 20/1 et 30/1). Il est à noter que ces valeurs correspondent aux taux d'injection nécessaires pour que l'affaissement du mélange soit égal à 12 cm (d'après le tableau 4-11). La mousse générée avec *Tensio 2* est donc également moins performante que celle générée avec *Tensio 1* en terme d'imperméabilisation du terrain.

Les essais réalisés avec le sol *S2* à teneur en eau de saturation et avec *Tensio 1* ne se sont par contre pas avérés satisfaisants puisque la perméabilité critique n'a jamais été atteinte, même pour des taux d'injection supérieurs à ceux qui permettraient d'atteindre un affaissement optimal du mélange sol/mousse. La quantité d'eau présente dans l'échantillon semble être trop importante pour que la mousse puisse jouer son rôle et imperméabiliser le mélange.

Afin d'étudier l'influence de l'adjuvant *Poly 1* sur la perméabilité du mélange, deux essais ont été réalisés avec des mousses viscosifiées ; les résultats sont repris dans le tableau 4-14 ci-dessous.

T_i		mousse 10/1	mousse 20/1	mousse 30/1
5	$C_{av} = 0\%$	10^{-5}	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
	$C_{av} = 0,3\%$	10^{-5}	$1,5 \cdot 10^{-7}$	—
10	$C_{av} = 0\%$	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
	$C_{av} = 0,3\%$	$< 10^{-6}$	—	—
20		10^{-5}	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-6}$

tableau 4-14 : mélange *S2/Tensio 1* - influence du polymère sur la perméabilité du mélange

On constate, à la lecture de ce tableau, que les mousses viscosifiées permettent finalement d'atteindre une perméabilité du mélange inférieure à 10^{-6} m/s. Cependant, les résultats obtenus étant peu nombreux, il est difficile d'être affirmatif quant aux conclusions à tirer.

3.2.2.3. Résultats des essais d'imprégnation

Bien que le nombre d'essais d'imprégnation réalisés soit peu important, les résultats obtenus permettent d'observer le phénomène de pénétration de la mousse dans le sol.

Le graphe de la figure 4-13 présente les résultats d'un essai réalisé sur le sol *S2*, préalablement saturé, et mis en place avec une densité de $18,5 \text{ kN/m}^3$; la mousse 30/1 utilisée a été générée avec *Tensio 1*. Le gradient de pression entre les parties haute et basse de l'échantillon était égal à $0,05 \text{ MPa}$, avec une contre-pression nulle (voir paragraphe 4.2.5).

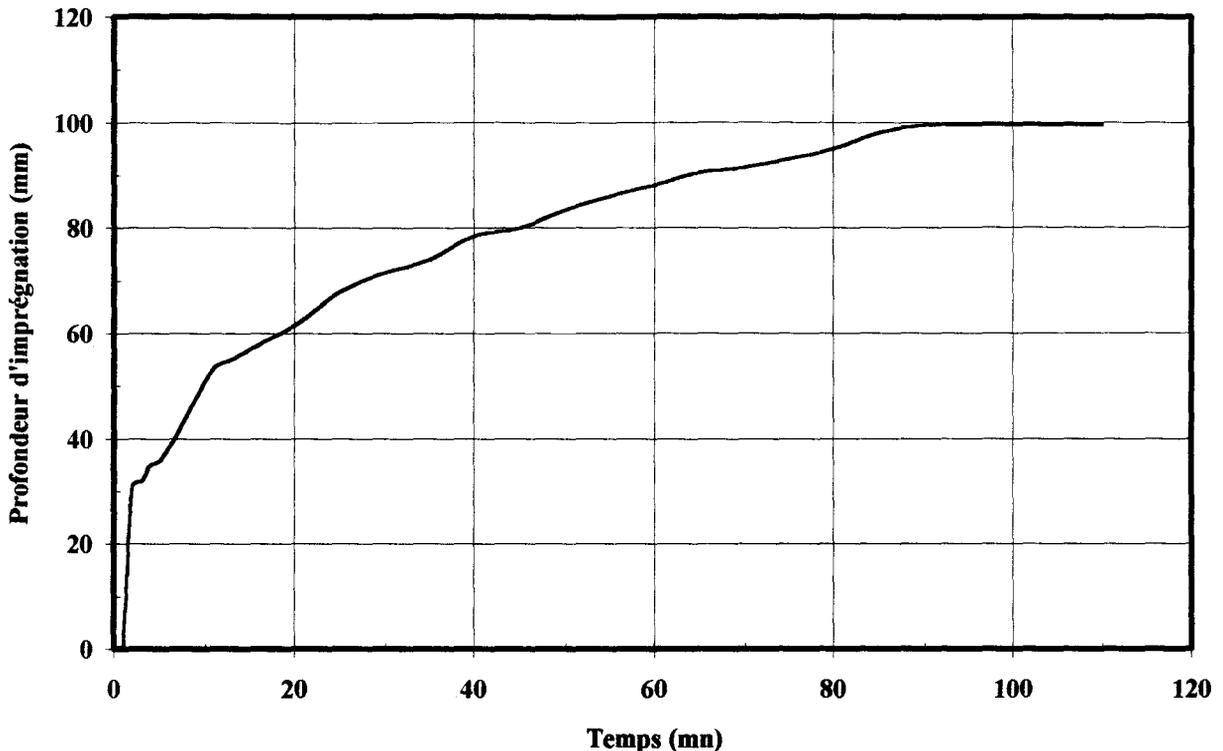


figure 4-13 : mélange S2/Tensio 1 - évolution de la profondeur d'imprégnation en fonction du temps

L'observation de la courbe donnée ci-dessus permet de discerner deux phases :

- une première phase, où l'imprégnation du sol par la mousse est très rapide, puisque la vitesse de pénétration initiale est de 10 à 20 mm/mn. Cette première phase, qui ne dure que quelques minutes, est suivie d'une phase où la vitesse de pénétration est moins élevée ;
- une deuxième phase où l'imprégnation est limitée (2 à 3 mm/mn) et étalée dans le temps. Au bout d'une heure et demie, l'imprégnation semble avoir atteint un palier de 100 mm.

Des essais d'imprégnation réalisés par HERRENKNECHT et al (1995) indiquent sensiblement les mêmes résultats.

3.2.2.4. Conclusions sur le sol S2

L'ensemble des essais réalisés avec le sol *S2* a permis de confirmer les tendances qui s'étaient dégagées lors de la réalisation des essais avec le sol *S1*. L'illustration de la figure 4-14 permet de visualiser la consistance d'un mélange présentant un affaissement optimal.

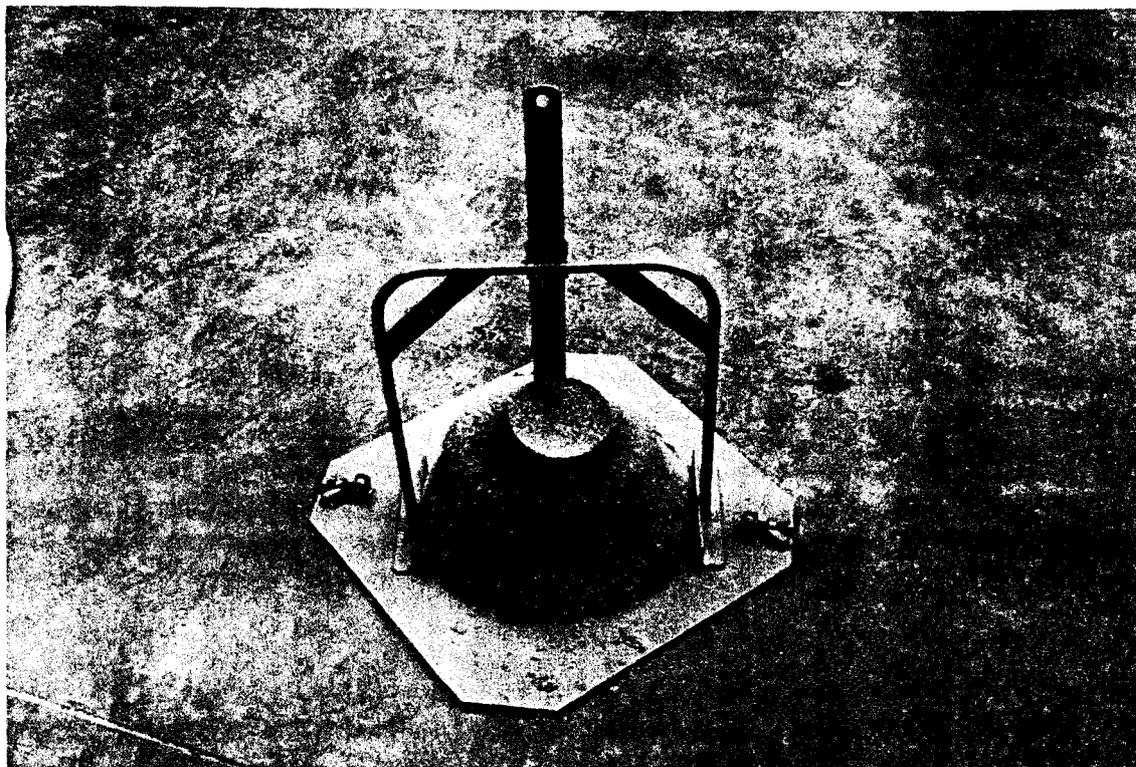


figure 4-14 : mélange S2/Tensio 1 - état de fluidité plastique

➤ On a ainsi pu vérifier les points suivants pour la mousse générée avec *Tensio 1* :

- l'influence de la teneur en eau dans le comportement du mélange sol/mousse : plus le sol est mouillé, moins le mélange correspondant nécessite de mousse pour arriver à une fluidité plastique satisfaisante. Cette influence est d'ailleurs beaucoup plus prononcée pour le sol *S2* que pour le sol *S1* : la consommation est divisée par un minimum de 5 entre $w = 6\%$ et $w = 12\%$ (moins de 2 pour le sol *S1* entre $w = 9\%$ et $w = 16\%$) ;
- les caractéristiques de la mousse telles que K et C_{am} influent bien sur le comportement du mélange sol/mousse. La mousse 30/1 est, comme pour *S1*, la plus intéressante économiquement parlant ;
- le gain de puissance observé est par contre globalement moins élevé avec le sol *S2* qu'avec le sol *S1* et dépend grandement de la teneur en eau du sol.

On observe, comme pour le sol *S1*, une variation importante entre les taux d'injection relevés au cours des différents essais de malaxage : ils varient entre 0 et 35 %, avec une prédominance des valeurs entre 0 et 15 %. La différence est de plus notable si l'on les compare à la valeur du taux d'injection trouvée avec la formule de la RFSTMA, puisque cette dernière est égale à 44 %.

La mousse a une action rapide et le mélange s'homogénéise rapidement : les valeurs relevées pour T_h sont toujours inférieures à 2 mn. Elle a également un rôle lubrifiant sur le mélange sol/mousse, comme le montrent les résultats des essais d'adhérence.

L'utilisation d'une mousse viscosifiée n'a pas permis de constater des améliorations, que ce soit pour la réduction de la puissance consommée ou de la consommation en produit ou encore pour

l'adhérence : le polymère ne jouerait donc pas un rôle de lubrifiant, comme on pourrait a priori le penser. Le nombre d'essais réalisés n'est cependant pas assez conséquent pour affirmer que l'adjuvant n'a aucune influence dans le comportement du mélange.

La série d'essais de perméabilité a quant à elle permis, contrairement au sol *S1*, de vérifier que la mousse contribue à rendre un sol quasiment imperméable, c'est-à-dire, pour notre application, une perméabilité inférieure à 10^{-6} m/s. La présence de fines dans le sol *S2* en proportion plus importante que dans le sol *S1* (équivalent de sable ES supérieur ou égal à 80) peut expliquer le fait que le mélange sol/mousse présente une perméabilité plus faible que ce qui avait été mesuré avec le sol *S1*.

Les taux d'injection de mousse correspondant à ce seuil de perméabilité sont de plus sensiblement égaux à ceux qui avaient été relevés lors des essais de comportement (affaissement optimal) : l'utilisation de la mousse atteint dans ce cas l'objectif fixé au départ, c'est-à-dire l'obtention d'un mélange pseudo-fluide et quasiment imperméable.

Lorsque le sol est à sa teneur en eau de saturation, l'apport de mousse ne suffit pas à conférer au mélange une perméabilité satisfaisante, même si cette dernière est réduite par rapport à la perméabilité du sol seul. L'ajout de l'adjuvant *Poly 1* à la mousse semble par contre conférer au mélange sol/mousse une perméabilité plus faible : l'adjuvant *Poly 1* jouerait donc bien son rôle au sein du mélange, en ralentissant la progression de l'eau dans les pores du matériau et ceci en la viscosifiant. Le nombre d'essais réalisés est cependant trop peu important pour que l'on puisse en tirer des conclusions définitives.

Le peu d'essais d'imprégnation réalisés a enfin permis d'observer la pénétration de la mousse dans le sol, phénomène important, puisqu'il contribue à assurer le maintien du front de taille. Les résultats obtenus permettent d'affirmer que la mousse, à l'instar de la boue pour les boucliers à pression de boue, joue parfaitement son rôle, en créant une zone présentant une cohésion apparente, ce qui entraîne une certaine étanchéité, mais aussi en ne fuyant pas dans le terrain.

Il aurait été intéressant de faire d'autres essais d'imprégnation, afin de confirmer les résultats obtenus, mais également d'observer l'influence :

- d'autres types de mousses (de différentes caractéristiques, mais aussi des mousses générées avec d'autres produits) ;
- du compactage du sol, qui va influencer sur la vitesse et la profondeur d'imprégnation ;
- de l'évolution de la pression de confinement et de la contre-pression.

➤ Une deuxième série d'essais nous a conduit à étudier le comportement de mélanges réalisés avec des mousses générées avec *Tensio 2*. Cela nous a ainsi permis de comparer l'action des deux produits, et par là même leur efficacité.

Si le comportement des mélanges sol/mousse réalisés suit les mêmes tendances que pour les essais réalisés avec *Tensio 1* (voir ci-dessus), on observe en revanche une différence importante entre les deux séries d'essais : la quantité de produit nécessaire pour obtenir un mélange sol/mousse répondant aux différents critères avec *Tensio 2* est double de celle qui est nécessaire avec *Tensio 1*.

On peut donc affirmer que la mousse générée avec *Tensio 2* est moins efficace que celle générée avec *Tensio 1* quant elle est mélangée au sol *S2*. Il aurait été intéressant de faire d'autres essais avec

Tensio 2, que ce soit avec le sol *S2* d'une part (différentes teneurs en eau), et avec le sol *S1* d'autre part.

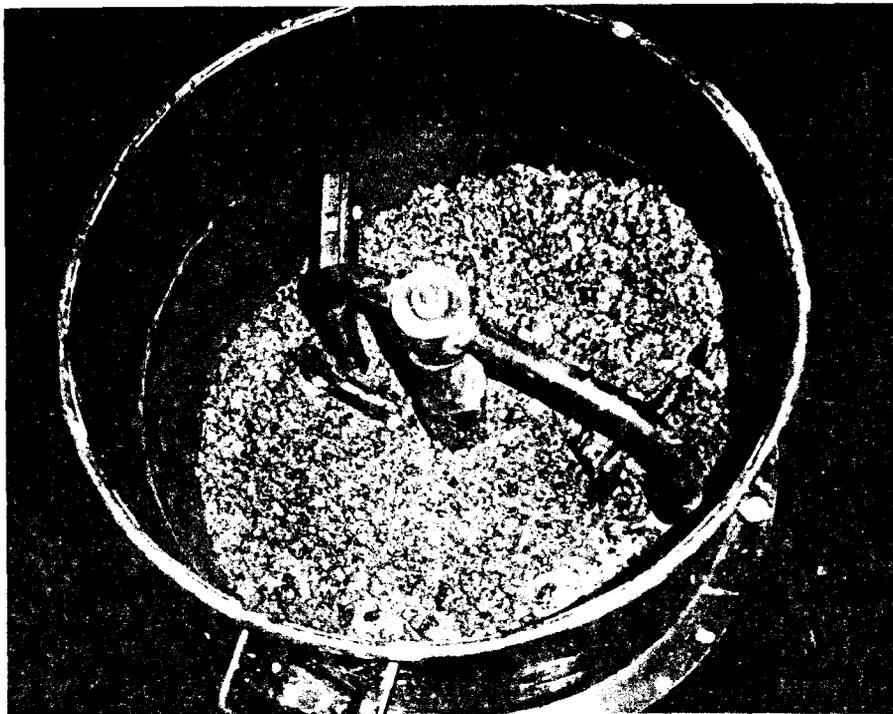
3.2.3. Essais réalisés avec le sol *SG1*

Les terrains graveleux se situant à la limite du domaine d'utilisation des boucliers à pression de terre et à pression de boue (voir chapitre 3), il nous a semblé intéressant d'étudier l'influence de la mousse sur une grave.

Dans ce but, des premiers essais avaient été réalisés en 1994 sur un gravier 5/12 mm. Les résultats obtenus n'avaient alors pas été concluants : il était en effet impossible d'aboutir à l'obtention d'un mélange pâteux homogène dans le malaxeur ; de plus, lors de l'essai de malaxage, le brassage du matériau provoquait la formation d'écume (mousse à bulles grossières), rendant délicate la manipulation du matériau [LECOMTE - 1994].

À la suite de cette expérience, nous avons donc décidé de réaliser des essais non plus sur un gravier, mais sur une grave. Une composition, notée *SG1*, a donc été réalisée à partir des sols *S2* et *G1* afin de reconstituer une grave 0/20 mm. Plusieurs dosages ont été effectués au laboratoire, avec comme critères de choix une perméabilité élevée (supérieure à 10^{-3} m/s) et une granulométrie étalée. Le dosage retenu a été de 25 % de *S2* et de 75 % de *G1* (dosage pondéral) [AÏT-MATOUK - 1995]. L'illustration de la figure 4-15 présente ci-après l'aspect du sol *SG1*.

La teneur en eau retenue pour *SG1* est égale à 4 % ; elle correspond à une teneur en eau pour laquelle la surface présentée par les grains est imbibée, sans que l'on observe pour cela un phénomène de ressuage.



*figure 4-15 : aspect du sol *SG1**

3.2.3.1. Résultats des essais de comportement de mélanges sol/mousse

Le peu d'essais réalisés avec le sol *SG1* a cependant permis de constater que la mousse jouait effectivement un rôle lorsqu'elle était mélangée à celui-ci. Le tableau 4-15 reprend ci-dessous les résultats obtenus lors des différents essais.

	mousse 10/1	mousse 20/1	mousse 30/1	mousse 30/2	mousse 30/3
T_i (%)	5-10	10-15	15-20	10-15	5-10
Co_{am} (g/m ³)	84	55	64	88	70
G_P (%)	37	38	35	36	36

tableau 4-15 : mélange *SG1/Tensio 1* - évolution de T_i , Co_{am} et G_P pour $A = 12$ cm

La lecture de ce tableau nous amène à faire les observations suivantes :

- la quantité de mousse nécessaire pour fluidifier le mélange et lui procurer une ouvrabilité correspondant à l'affaissement voulu est relativement faible, puisqu'elle ne dépasse pas 15 à 20 % ;
- la consommation en produit ne varie pas de façon importante d'un essai à l'autre. Il est par contre difficile de dégager une tendance quant à l'évolution des différentes valeurs ;
- le gain de puissance correspondant à l'affaissement optimal diffère peu d'un essai à l'autre ; il semble se situer à une valeur moyenne de 36 %.

La différence observée en ce qui concerne l'évolution de T_i et Co_{am} par rapport aux résultats obtenus avec les sols *S1* et *S2* (voir tableaux 4-7, 4-9 et 4-11) peut s'expliquer par les problèmes rencontrés lors de la réalisation des essais, problèmes liés à la granulométrie du sol :

- lors des essais d'affaissement, le démoulage provoquait parfois l'éboulement du mélange, rendant ainsi impossible la lecture de l'affaissement. À l'inverse, on observait parfois une tendance du mélange à coller sur les parois du cône, faussant ainsi la valeur de l'affaissement ;
- une quantité non négligeable de fines était perdue lors des essais d'affaissement et d'adhérence.

Deux essais ont été réalisés avec l'adjuvant *Poly 1*, afin de voir si ce dernier avait une influence sur le comportement du mélange ; les résultats de ces essais, ainsi que ceux des essais correspondants réalisés avec les mousses seules, sont repris dans le tableau 4-16 ci-dessous.

	mousse 10/1	mousse 10/1/0,3	mousse 20/1	mousse 20/1/0,3
T_i (%)	5-10	5-10	10-15	5-10
Co_{am} (g/m ³)	84	66	55	49
G_P (%)	37	34	38	34

tableau 4-16 : mélange *SG1/Tensio 1* - utilisation de l'adjuvant *Poly 1*

On peut constater que les valeurs de Co_{am} et de G_P sont plus faibles lorsque la mousse viscosifiée a été utilisée.

En ce qui concerne la rapidité d'action de la mousse, les temps d'homogénéisation relevés au cours des différents essais sont généralement inférieurs à 2 mn. Son caractère lubrifiant est également mis en évidence, puisque l'angle limite d'adhérence chute au cours de chaque essai, de façon cependant tout à fait irrégulière.

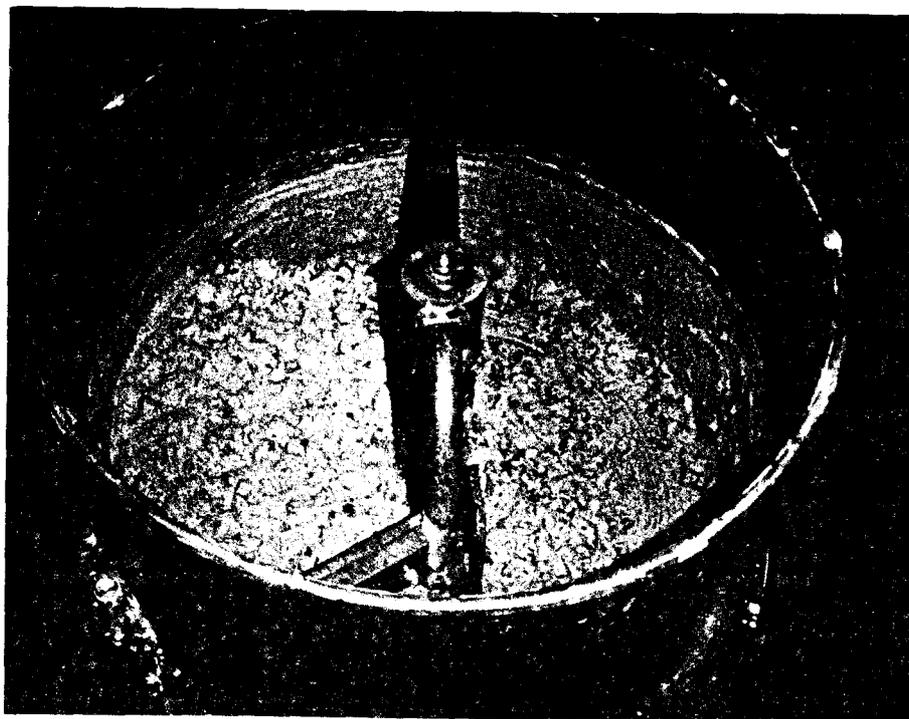
3.2.3.2. Résultats des essais de perméabilité

Quelques essais de perméabilité ont été effectués sur des mélanges sol/mousse. Lors de leur réalisation, nous nous sommes heurtés à des problèmes liés encore une fois à la granulométrie de *SG1* : quelles que soient les caractéristiques de la mousse utilisée, cette dernière est en effet essorée dès que la charge hydraulique est appliquée à l'échantillon ; le mélange présente par conséquent une perméabilité supérieure à 10^{-3} m/s.

Des essais effectués avec des mousses viscosifiées ont permis une certaine amélioration : le mélange résistait pendant un certain laps de temps à la charge hydraulique (jusqu'à 30 mn). La mousse finissait cependant par être drainée comme pour les essais réalisés avec des mousses seules.

3.2.3.3. Conclusions sur le sol *SG1*

L'utilisation de la mousse avec un sol graveleux semble avoir une influence favorable sur ce dernier. Le mélange sol/mousse obtenu est en effet fluide et continu, comme on peut le constater sur la photographie de la figure 4-16 (utilisation d'une mousse 10/1 avec un taux d'injection de 5 %) ; on peut penser que les phénomènes comme le bourrage et l'abrasion, rencontrés lors du creusement au tunnelier dans ce genre de sols, seront réduits.



*figure 4-16 : mélange *SG1/Tensio 1* - essai de malaxage*

Les problèmes survenus lors des essais d'affaissement montrent cependant les limites d'utilisation de la mousse avec un sol comme *SG1* : si la mousse permettait l'obtention d'un mélange parfaitement fluide et homogène avec *S1* et *S2*, il n'en est pas de même avec la grave. Ceci est vraisemblablement dû à la masse des grains composant ces trois sols : si la mousse peut avoir une action "porteuse" avec des grains de faible masse, il n'en est pas de même avec des graviers. La photographie de la figure 4-17 montre le résultat d'un essai d'affaissement pour lequel un éboulement s'est produit.

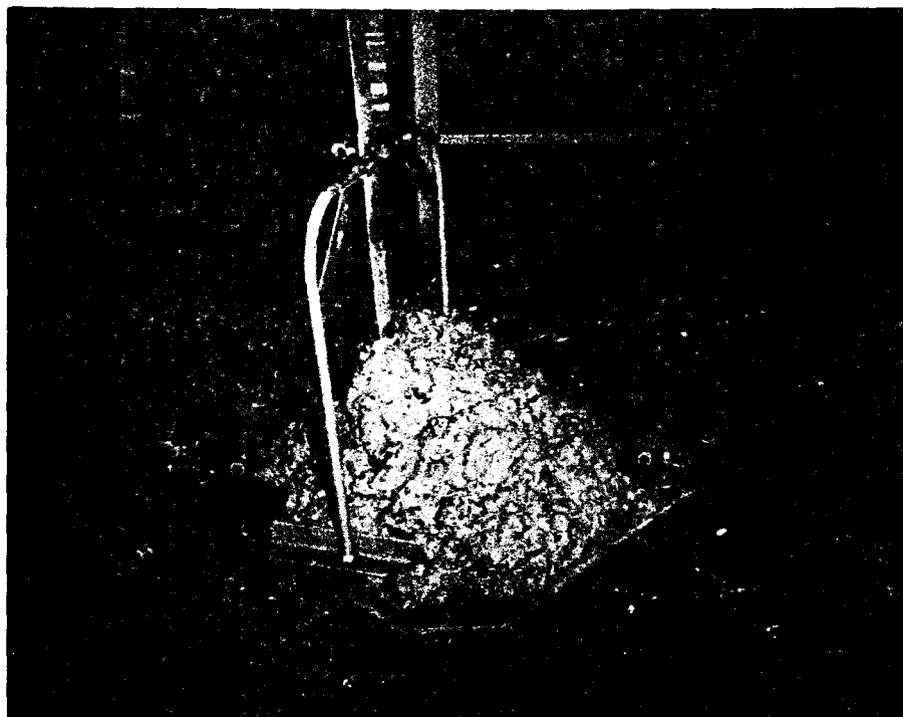


figure 4-17 : mélange SG1/Tensio 1 - essai d'affaissement

De même, les résultats des essais de perméabilité montrent un problème d'accrochage de la mousse : cette dernière, sous l'action de la charge hydraulique, est rapidement drainée, et ne joue par conséquent aucun rôle en matière d'imperméabilisation du sol. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que la proportion de fines soit peu importante, mais surtout que les pores du sol soient d'une dimension telle que la mousse ne puisse plus jouer le rôle de "liant", mais qu'elle se comporte comme un fluide, s'écoulant donc sous l'application d'une charge. Les essais réalisés avec des mousses viscosifiées montrant cependant une certaine tenue de la mousse sous l'action de la charge hydraulique, il serait intéressant de faire des essais de perméabilité complémentaires.

On peut enfin une fois de plus être surpris par les résultats obtenus en matière de taux d'injection, compris entre 5 et 20 %, et la valeur obtenue par la formule de la RFSTMA, égale à 86 % : la différence est telle que toute comparaison est inutile.

3.2.4. Essais réalisés avec le sol L1

Afin d'étudier le comportement d'un mélange à base de mousse et d'un sol cohérent, nous avons choisi dans un premier temps d'utiliser à cet effet un limon peu plastique, plus facile à manipuler qu'une argile plastique. Les quelques essais de comportement réalisés s'avèrent finalement peu concluants, en raison des nombreuses difficultés rencontrées.

La première difficulté est la différence essentielle avec les essais décrits auparavant pour ce qui est de la maîtrise de la teneur en eau du sol à tester. La teneur en eau des sols grenus était connue instantanément, car elle était mesurée au début de chaque essai par la méthode de la "poêle à frire" et éventuellement corrigée si nécessaire ; cette méthode, bien qu'elle soit grossière, permettait cependant, avec les sols grenus, d'obtenir une précision satisfaisante, puisqu'elle était d'environ 1 %. Il n'en était par contre pas de même pour le limon : en effet, la méthode de la poêle à frire n'est alors pas envisageable, la température à laquelle est soumis l'échantillon étant telle que l'eau adsorbée est également éliminée, en plus de l'eau libre qui entoure les grains. Il fallait donc mettre un échantillon à l'étuve à 105 °C pendant 24 h (sols : reconnaissance et essais - mesure de la teneur en eau d'un sol, norme NF P 94-050) ; pour effectuer un prélèvement dont la teneur en eau était représentative du volume de sol à tester, il fallait mélanger ce volume de sol au moyen du malaxeur et l'y laisser pendant 24 h, ce qui posait des problèmes pour la réalisation des essais (occupation du malaxeur, évolution de la teneur en eau du sol).

Nous avons alors essayé de déterminer cette teneur en eau plus rapidement en utilisant les essais permettant de déterminer les limites d'Atterberg, à savoir la coupelle de Casagrande (sols : reconnaissances et essais - détermination des limites d'Atterberg, norme NF P 94-051) et le Fall Cone du S.G.I.¹. Des essais ont donc été réalisés afin de tenter d'établir une corrélation entre les résultats obtenus et la teneur en eau ; ils ne se sont pas révélés concluants, pour les raisons suivantes :

- l'essai à la coupelle n'est valable que pour des teneurs en eau proches de la limite de liquidité. Or, au début de l'essai, le sol à tester était plus souvent proche de la limite de plasticité ;
- l'essai du Fall Cone n'a pas permis d'obtenir des résultats cohérents.

La seconde difficulté réside dans la réalisation des essais de comportement :

- si les sols grenus ne posent pas de problèmes quant à la mise en place des matériaux dans le malaxeur, il en va autrement pour les sols fins : le limon se présentait par exemple sous forme de mottes. Or, la taille des mottes a une influence sur la réalisation de l'essai : plus celles-ci sont grosses, plus le temps nécessaire pour que le mélange soit homogène est long. La répétabilité des essais est par conséquent difficile en raison de la préparation du matériau à tester. La photographie de la figure 4-18 montre ci-après l'aspect du sol *LI* lors d'un essai de malaxage ;
- lors de la réalisation des essais de malaxage, le mélange limon/mousse était difficile à réaliser car le limon était entraîné en bloc par les pales du malaxeur. Le fait d'incliner le malaxeur pendant l'essai a permis une meilleure homogénéisation mais provoquait par contre une fluctuation importante de la puissance consommée, rendant ainsi difficile l'appréciation d'une valeur moyenne ;
- lors de la réalisation des essais d'affaissement, il s'est avéré que la mise en place du matériau par piquage dans le cône d'Abrams était très difficile, le matériau collant à la tige d'une part, et cette dernière ne permettant pas le compactage correct du mélange d'autre part (le piquage laissait des trous dans le matériau) ;

¹ S.G.I. : Swedish Geotechnical Institute

- la réalisation de l'essai d'adhérence a rencontré les mêmes difficultés de mise en place du mélange dans le moule.



figure 4-18 : mélange L1/Tensio 1 - essai de malaxage

3.2.4.1. Conclusions sur le sol L1

Les quelques essais réalisés ont été intéressants, puisqu'ils ont permis de mettre en évidence les problèmes suivants :

- la maîtrise de la teneur en eau est délicate pour le limon. Il serait pourtant indispensable de la connaître pour répéter les essais dans les mêmes conditions ;
- les sols fins naturels se présentent sous forme de mottes ou de blocs, et il est évident que l'état du matériau a une influence sur les résultats de l'essai de malaxage ;
- la réalisation des essais d'affaissement et d'adhérence a permis de constater que ces derniers n'étaient pas adaptés dans le cas des limons car la mise en place du matériau est très difficile.

Si les essais décrits ci-dessus ont été réalisés avec du limon, sol peu plastique et peu collant, on peut affirmer que les difficultés rencontrées seraient d'autant plus grandes avec un sol argileux présentant un degré de plasticité plus important et donc des risques de collage accrus.

Il s'avère donc essentiel de mener une réflexion sur les problèmes soulevés ci-dessus, afin d'être en mesure de réaliser une campagne d'essais significative avec des sols cohérents.

4. RÉFLEXIONS GÉNÉRALES ET LIMITES DES ESSAIS RETENUS

Si les essais réalisés ont permis de tirer des enseignements en matière de comportement de la mousse et du mélange sol/mousse, il s'est avéré qu'ils ont également permis de montrer les limites du matériel retenu. Une critique de ces essais, mais également les modifications qu'il serait nécessaire d'apporter au matériel ou le développement de nouveaux dispositifs sont évoqués ci-après.

4.1. Essais sur la mousse

4.1.1. La génération de mousse

Le banc de génération de mousse, "organe" central du laboratoire d'essais des produits moussants, a le mérite de permettre la fabrication de mousses diverses, et d'étudier ainsi leur influence sur le comportement du mélange sol/mousse.

Au cours de cette campagne d'essais, nous avons été amenés à utiliser ce banc de génération dans des conditions particulières, soulevant ainsi des difficultés, voire des impossibilités de mise en œuvre. On peut alors faire les observations suivantes.

- *La précision du banc de génération.* Pour chaque essai, le volume théorique de solution à récupérer était comparé au volume réellement obtenu (qui était utilisé pour déterminer la durée de demi-vie). Si les erreurs relevées lors des essais de demi-vie, puis confirmées avec les essais de pesage de la mousse, sont acceptables pour les mousses avec un coefficient d'expansion de 30 (moins de 10 %), l'imprécision du système pour des faibles valeurs de K est en revanche importante, puisqu'elle est d'environ 10 à 20 % pour un K de 20 et d'environ 30 % pour un K de 10. Bien qu'ils ne remettent pas en cause dans leur ensemble les résultats obtenus, puisque nous avons travaillé avec des mousses d'un K bien distinct, les résultats des différents essais ne peuvent être considérés que d'un point de vue qualitatif.
- *La génération de mousses viscosifiées.* Si le banc de génération n'a pas posé de problèmes particuliers avec des mousses fabriquées à partir de produits moussants seuls (quels que soient les caractéristiques des mousses), il n'en a pas été de même lorsque nous sommes passés à des mousses viscosifiées. En effet, comme souligné dans le paragraphe 3.1.1, l'incorporation de polymères dans la solution moussante, même à faible concentration, conduisait à un écoulement biphasique de la mousse, avec un phénomène de pistonage, pour les mousses présentant un coefficient élevé. Pourtant, une étude plus approfondie des mélanges sol/mousse viscosifiée aurait été intéressante, en particulier si ces sols s'avèrent être des sols grenus saturés.

Nous avons alors tenté de supprimer ce pistonage, en supposant que le problème en question pouvait être dû à plusieurs raisons, détaillées ci-dessous :

- une incompatibilité entre le produit moussant et le viscosifiant. La réalisation des essais de moussage (voir paragraphe 2.2) a effectivement mis en évidence le fait que le polymère affecte le pouvoir moussant du tensioactif d'une part, et qu'il faut apporter à la solution moussante polymérisée une plus grande énergie (soit un temps de foisonnement plus important) pour qu'elle forme une mousse d'autre part. Mais la mousse formée présentait par contre une stabilité beaucoup plus importante que la même mousse seule. On ne peut donc pas dire que les deux produits soient incompatibles ;

- le contenu du générateur. Si le contenu original convenait bien pour la génération d'une mousse seule, il s'avère en revanche peu indiqué pour une mousse viscosifiée. Nous avons donc modifié le contenu du générateur, afin d'étudier son influence sur la pression de génération et sur la qualité de la mousse.

Les résultats obtenus ont permis de constater que la génération de mousse était étroitement liée au contenu du générateur, mais qu'il était difficile d'en tirer des conclusions, l'évolution de ΔP_{gm} étant parfois différente d'un générateur à l'autre. Nous avons donc retenu un contenu qui donnait des résultats corrects pour des mousses seules, et qui permettait de générer des mousses viscosifiées avec un coefficient d'expansion allant jusqu'à 20 ;

- de la géométrie du générateur. Si la géométrie à proprement parler du générateur - soit son diamètre et sa longueur - n'a pas été étudiée, nous nous sommes par contre intéressés à l'arrivée des fluides, la solution moussante et l'air, dans le générateur.

Ces derniers arrivaient dans le générateur initial par un seul orifice, le mélange se faisant en amont par un branchement en T. Les deux fluides arrivaient à l'intérieur du générateur sans être mélangés ; or, il semble évident que si la solution moussante est sous forme de gouttelettes en suspension dans l'air, le mélange des deux fluides en sera facilité (en raison d'une plus grande interface entre l'air et la solution), et par là même, la génération de mousse.

Nous avons donc modifié le générateur de façon à ce que les deux fluides arrivent séparément, la solution moussante étant pulvérisée au milieu d'une chambre dans laquelle arrivait l'air. La modification apportée au générateur est reprise schématiquement sur la figure 4-19 ci-dessous.

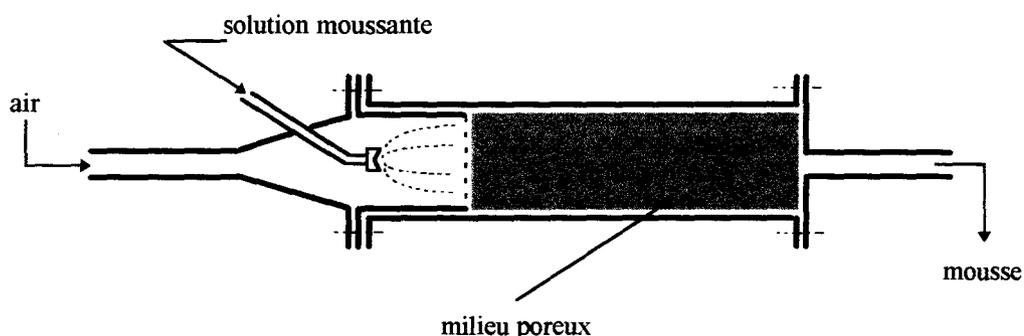


figure 4-19 : générateur modifié

Cette modification a permis des améliorations sensibles quant à la qualité de la mousse sèche générée. Les problèmes rencontrés préalablement avec les mousses viscosifiées n'ont toutefois pas été résolus.

Il faut enfin être conscient du fait que certains paramètres n'ont pas pu être contrôlés, comme la température des différents fluides et la dureté de l'eau, qui est pourtant un facteur influant grandement sur l'aptitude au moussage d'un tensioactif. C'est un choix qui peut s'expliquer pour plusieurs raisons :

- l'analyse des résultats aurait été rendue plus difficile encore avec ces paramètres supplémentaires;
- cette étude, si elle est effectuée en laboratoire, concerne toutefois l'utilisation de la mousse sur chantier, où les conditions de génération sont totalement différentes et les paramètres cités ci-dessus non contrôlables.

4.1.2. L'essai de demi-vie

Si cet essai est simple à mettre en place et permet de connaître approximativement la durée de demi-vie d'une mousse générée avec un produit moussant, les résultats obtenus montrent qu'il est difficile de déterminer précisément le temps de demi-vie pour des mousses de caractéristiques différentes. On peut attribuer cette limitation à plusieurs facteurs :

- la précision du banc de génération, qui a pour conséquence que l'on ne connaît pas le coefficient d'expansion de la mousse générée. On contrôle cependant a posteriori la valeur de K par la mesure du volume de solution récupérée ;
- la mise en place de la mousse n'est pas parfaite lors du remplissage du récipient. Ce n'est cependant pas pénalisant, car même si de petits vides existent, ils représentent une quantité négligeable de liquide ;
- la température à laquelle se déroule l'essai n'est pas constante, et peut donc agir sur la vitesse de drainage de la mousse.

De plus, il ne nous a pas été possible d'évaluer la durée de demi-vie d'une mousse sous pression. Cela aurait pourtant été intéressant car la mousse, lorsqu'elle est utilisée dans le cadre de travaux par boucliers à pression de terre, est injectée dans un milieu sous pression (chambre d'abattage, vis d'extraction).

Afin de pouvoir comparer le comportement dans le temps de deux mousses, l'une à pression atmosphérique et l'autre sous pression, il était primordial de pouvoir générer une mousse dans un récipient clos ; des essais ont bien été réalisés avec la cellule de confinement mais ils n'ont pas été concluants, du fait de la difficulté à :

- générer de la mousse sous pression. Il faut en effet utiliser pour cela le capteur de pression du banc de génération prévu pour le mode fonctionnement non-autonome (voir chapitre 3) afin que le débit d'air nécessaire soit corrigé ;
- réguler la pression dans la cellule de confinement lors de la génération de la mousse dans un premier temps et lors du déroulement de l'essai dans un deuxième temps ;
- mesurer le volume de solution récupéré durant le déroulement de l'essai. La cellule n'est en effet pas prévue pour cet usage et rend impossible la lecture d'un niveau en partie basse. Nous avons alors essayé de faire l'essai en utilisant le récipient de 25 l et en le mettant en place dans la cellule. Nous avons alors rencontré des problèmes de remplissage du récipient : contrairement à l'essai à pression atmosphérique où l'on pouvait introduire le tuyau par lequel sort la mousse au fond du récipient et le remonter ensuite au fur et à mesure du remplissage, la mousse sortait par un des orifices de l'embase supérieure de la cellule et tombait dans le récipient, laissant de ce fait des vides importants au sein de ce dernier.

Cependant, les travaux menés par RAND et al (1983) permettent d'affirmer que la pression de confinement a une influence favorable sur la durée de demi-vie d'une mousse (voir chapitre 2, paragraphe 3.2.3) ; les résultats des différents essais réalisés à pression atmosphérique seraient donc les plus défavorables.

4.2. Essais sur le mélange sol/mousse

4.2.1. L'essai de malaxage

Bien que le fonctionnement du dispositif de malaxage soit dans l'ensemble satisfaisant, il a été nécessaire d'apporter quelques modifications afin de résoudre les problèmes suivants :

- la géométrie de la cuve et la disposition des pales étaient telles que, lors des essais, le sol avait tendance à s'accumuler le long des parois de la cuve : une quantité de sol non négligeable n'était alors plus brassée par les pales, faussant ainsi les résultats. Nous avons donc modifié ces pales en leur adjoignant des plaques de caoutchouc dont la position était réglable ; on pouvait ainsi les ajuster de façon à ce qu'elles entraînent le plus de matériau possible. Leur position variait selon le sol testé ;
- si la variation de la puissance consommée était relativement faible pour les essais réalisés sur les sables, il s'est avéré que cette dernière fluctuait énormément lors des essais réalisés avec la grave, en raison de graviers qui se coinçaient entre les pales et les parois de la cuve du malaxeur ; il était alors impossible de relever une valeur représentative de la puissance. Nous avons alors décidé d'apporter une modification au logiciel d'acquisition, de façon à ce qu'il affiche une valeur moyenne de la puissance consommée, calculée sur les 20 dernières valeurs (le temps d'acquisition est égal à 0,5 s pour une valeur). L'affichage de l'écart-type permet en outre d'estimer le temps nécessaire pour l'homogénéisation du mélange.

De plus, même si les résultats obtenus par l'essai de malaxage s'avèrent concluants et permettent d'affirmer que l'effet de la mousse est indéniable, il convient de garder à l'esprit que cet essai se déroule dans des conditions qui sont relativement différentes de ce qui peut se passer dans la chambre d'abattage d'un bouclier à pression de terre ; en effet :

- l'axe du malaxeur est vertical, contrairement à l'axe du disque de coupe. Le sol n'est par conséquent absolument pas mélangé de la même façon que dans la chambre d'abattage, où il est brassé ;
- la vitesse de rotation du malaxeur est totalement différente de celle du disque de coupe d'une machine puisqu'elle est de 32 tours/mn contre quelques tours/mn au plus pour un bouclier ;
- la quantité de matériau testée (15 l) est totalement différente de celle occupant la chambre d'abattage d'un bouclier. L'effet d'échelle peut donc avoir une influence non négligeable sur les résultats obtenus ;
- l'essai est réalisé à pression atmosphérique alors que le mélange sol/mousse est en réalité confiné dans la chambre : l'état de compacité du sol n'est donc pas le même ;
- le déroulement de l'essai est tel que le mélange sol/mousse réalisé est différent de celui que l'on peut rencontrer dans la chambre d'un bouclier. En effet, en laboratoire, on ajoute de la mousse au sol par petites quantités, pour observer l'évolution du comportement du mélange, alors que dans un bouclier, on injecte directement la quantité de mousse nécessaire (elle est malgré tout répartie entre plusieurs points d'injection, voire même injectée à différents endroits) (voir chapitre 2).

De plus, l'essai mené en laboratoire est constitué d'un ensemble de cycles comprenant l'injection de la mousse, le malaxage du mélange jusqu'à ce qu'il soit homogène, l'arrêt de l'essai pour mesurer l'affaissement et l'adhérence du mélange : un cycle complet dure environ 5 mn. La mousse peut par conséquent se détériorer en raison de la durée importante de l'essai et des manipulations subies par le mélange. Au contraire, le mélange sol/mousse présent dans

la chambre est généralement en mouvement depuis le moment où le sol est excavé et mélangé à la mousse jusqu'à sa sortie par la vis d'extraction.

4.2.2. L'essai d'affaissement

Si cet essai possède plusieurs avantages, qui sont sa simplicité de mise en œuvre, mais également un mode opératoire défini par une norme, donc une assurance de répétabilité, il s'avère qu'il présente quelques inconvénients relatifs à notre application :

- contrairement à l'essai d'affaissement pour un béton, qui consiste à mesurer l'ouvrabilité d'un béton en prélevant un volume représentatif qui ne sera pas réutilisé, nous récupérons le volume du mélange sol/mousse après l'essai et le remettons dans le malaxeur, afin de pouvoir travailler avec la même quantité de matériau durant l'essai. Or, pendant l'essai d'affaissement, le mélange avait tendance, lors du piquage, à libérer l'eau et les fines éventuelles qu'il contenait, ces derniers s'écoulant par les interstices existant entre le cône en métal et la plaque sur laquelle était démoulé l'échantillon, et ceci d'autant plus que le sol avait une teneur en eau importante.
Le mélange remis en place dans le malaxeur n'avait donc plus la même teneur en eau que lors de son prélèvement ;
- l'essai d'affaissement a été mis au point pour quantifier l'ouvrabilité d'un matériau assez homogène. S'il donnait de bons résultats avec le mélange sable/mousse, en raison de son caractère homogène, il n'en était pas de même pour le mélange grave/mousse, que la mousse n'avait pas réussi à rendre continu. Il est cependant indéniable que la mousse apporte une amélioration au comportement de la grave ; on peut alors se demander si l'essai d'affaissement est utile dans ce cas, et s'il ne faut pas se baser sur les seuls résultats obtenus avec l'essai de malaxage pour juger de l'effet de la mousse ;
- les essais réalisés avec le sol *LI* nous ont montré que l'essai d'affaissement était complètement inadapté aux sols cohérents. La consistance que ces derniers doivent présenter pour que l'excavation par un bouclier à pression de terre soit optimale est en effet proche de celle d'une pâte dentifrice : elle est donc différente de celle d'un mélange sable/mousse qui présente un affaissement au cône d'Abrams de 10 à 15 cm.

4.2.3. L'essai d'adhérence

La vocation de cet essai étant d'évaluer l'adhérence d'un mélange sol/mousse par la mesure de l'angle limite d'adhérence de ce dernier sur une surface plane en inox inclinée, on peut affirmer qu'il remplit tout à fait cet objectif. Il a en effet permis de constater que la mousse avait des propriétés lubrifiantes lorsqu'elle était mélangée à des sols grenus, puisqu'elle faisait chuter l'angle de frottement de ce sol de façon assez importante.

Cet essai présente cependant quelques inconvénients décrits ci-dessous :

- pour que le moule en bois contenant l'échantillon ne présente pas de frottement qui pourrait influencer sur l'angle limite d'adhérence du mélange, on enduit de mousse les bords en contact avec la plaque. On peut émettre des doutes sur l'efficacité de ce procédé ;
- l'essai d'adhérence était réalisé à chaque ajout de mousse dans le malaxeur. Or, le mélange contenant de plus en plus de mousse, sa densité en devenait d'autant plus faible. L'échantillon mis en place dans le moule n'avait donc pas le même poids à chaque fois. On peut alors se demander dans quelle mesure cela n'influe pas sur le résultat de l'essai ;

- comme l'essai d'affaissement, l'essai d'adhérence s'est révélé inadapté à l'étude des sols fins.

Cet essai doit donc rester ce pourquoi il a été mis en œuvre : l'étude qualitative de l'apport de la mousse en matière de lubrification des sols grenus.

4.2.4. L'essai de perméabilité

Le dispositif de mesure de la perméabilité a permis, de par sa simplicité de mise en œuvre, la réalisation de nombreux essais, et on a ainsi pu mettre en évidence le caractère imperméabilisant de la mousse. Certains points sont cependant à souligner :

- les conditions dans lesquelles sont réalisées l'essai sont relativement différentes de la réalité, puisque le mélange présent dans la chambre et dans la vis est brassé, alors que l'échantillon présent dans le perméamètre est immobile ;
- la mise en place de l'échantillon dans le moule est délicate, puisqu'il faut que le mélange ne soit pas trop tassé, mais qu'il ne soit également pas trop lâche : nous nous sommes aperçus à la fin d'un essai que l'échantillon, pas assez "compacté" lors de sa mise en place, s'était tassé sous l'action de la charge hydraulique, modifiant ainsi le gradient hydraulique, et faussant par là même les résultats obtenus.

De plus, certains essais, réalisés dans les mêmes conditions (caractéristiques du sol et de la mousse utilisés identiques) ont donné des résultats différents. Il est donc primordial de définir précisément la mise en place de l'échantillon, si l'on ne veut pas s'en tenir à une seule appréciation qualitative de l'apport de la mousse en matière d'imperméabilisation du mélange ;

- la conception du perméamètre est telle qu'il n'est pas possible de réaliser des essais en faisant varier la charge hydraulique.

Ce dernier point nous a amené à penser qu'il serait intéressant d'effectuer des essais où l'on ne mesurerait pas la perméabilité d'un mélange sol/mousse, mais sa résistance sous une charge hydraulique, permettant ainsi d'estimer la capacité "d'accrochage" de la mousse. ISHIMOTO et al (1995) ont réalisé des essais de ce type sur un mélange sable/plastifiant (composé de cendres volantes, de bentonite, de sels alcalins, de microfibres de papier et d'eau).

Le dispositif retenu est repris sur la figure 4-20 ci-après.

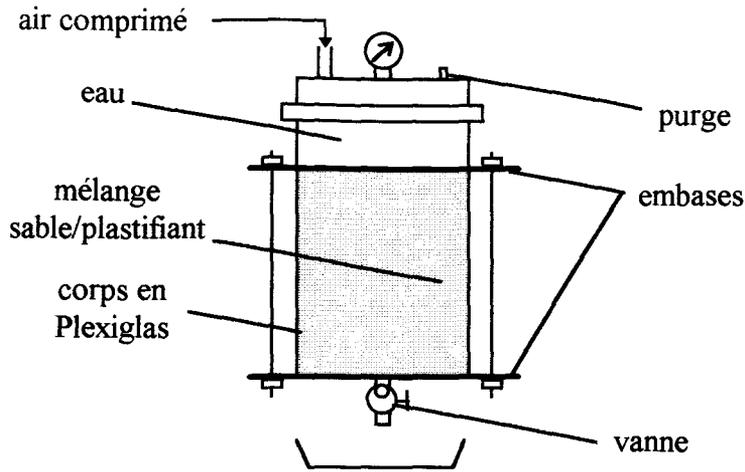


figure 4-20 : principe de l'essai d'accrochage
[d'après ISHIMOTO et al - 1995]

Le mode opératoire donné par les auteurs est le suivant : une pression d'eau est appliquée en partie supérieure de l'échantillon, la vanne située au niveau de l'embase inférieure étant ouverte. On note la valeur de la pression lorsqu'une fuite d'eau se produit au niveau de cette vanne. En réalisant cet essai avec plusieurs mélanges, il serait alors possible de comparer qualitativement l'accrochage de différents produits.

4.2.5. L'essai d'imprégnation

Cet essai, qui ne permet pas d'étudier à proprement parler le comportement d'un mélange sol/mousse, mais plutôt l'imprégnation du sol par la mousse, est important car le mécanisme d'imprégnation est directement lié à la stabilité du front de taille d'un bouclier à pression de terre.

La principale critique que l'on peut faire à propos du dispositif retenu, après avoir réalisé différents essais, est la difficulté à maîtriser pendant un essai la pression de confinement et la contre-pression appliquées à l'échantillon de sol. En effet, ces pressions étaient appliquées à partir d'une alimentation en air comprimé unique, rendant ainsi difficile leur régulation. De plus, le réglage étant effectué avec un détendeur manuel, ce dernier ne permettait pas une réponse assez rapide lorsque les pressions fluctuaient, ce qui était le cas lorsqu'on injectait de la mousse. En outre, le contrôle de la saturation de l'échantillon par la visualisation du niveau d'eau dans le tube en plastique translucide utilisé pour appliquer la contre-pression d'eau n'était pas satisfaisant, en raison du faible diamètre de ce tube (voir figure 3-9). Enfin, l'orifice situé au niveau de l'embase supérieure qui permet l'injection de mousse dans la cellule n'a pas un diamètre suffisamment important pour que la mousse puisse recouvrir l'échantillon rapidement ; il est à craindre que l'imprégnation du sol par la mousse ne soit dans ce cas pas uniforme.

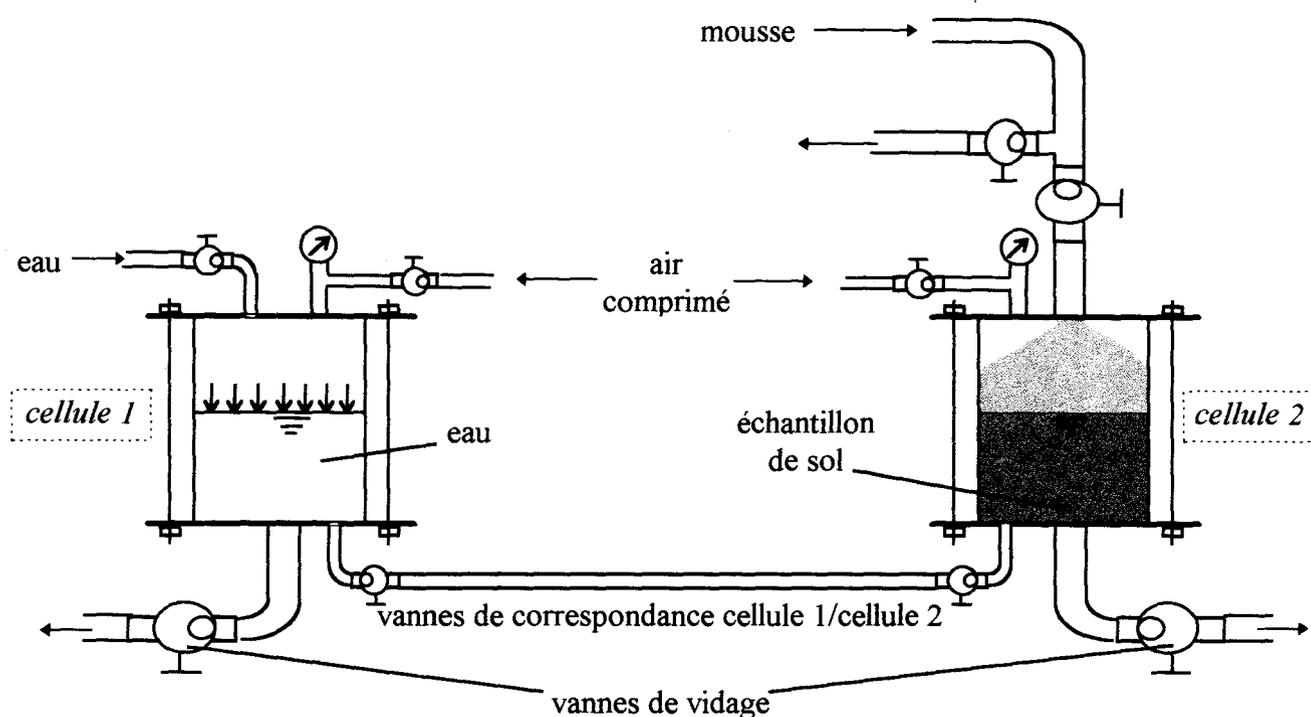
Les seuls essais qui ont donné des résultats intéressants ont donc été réalisés avec :

- une contre-pression nulle, le sol étant toutefois saturé ;
- une mousse mise en place à pression atmosphérique, puis ensuite mise sous pression.

La réussite de l'essai passe par la modification du dispositif, avec notamment :

- des alimentations en air séparées pour les parties basse et haute de l'échantillon ;
- une régulation des pressions beaucoup plus précise (utilisation d'électrovannes) ;
- un dispositif d'application de la contre-pression plus adapté, permettant de s'assurer de la parfaite saturation de l'échantillon ;
- un système d'injection de mousse en partie haute de l'échantillon plus conséquent, afin que la mousse puisse recouvrir l'échantillon le plus rapidement possible.

Un dispositif vérifiant ces spécifications a été développé par HERRENKNECHT et al (1995) dans le cadre de la réalisation d'un tunnel à Valence (Espagne), le bouclier à pression de terre choisi utilisant l'injection de mousse. Ce dispositif est repris sur la figure 4-21 ci-après.



**figure 4-21 : dispositif d'imprégnation
[d'après HERRENKNECHT et al - 1995]**

On peut également faire les remarques suivantes sur l'essai d'imprégnation :

- la mise en place de l'échantillon est délicate et doit être soignée car elle conditionne les résultats de l'essai ;
- la lecture de la profondeur d'imprégnation est difficile. En effet, on se base sur une différence de couleur entre la partie de l'échantillon qui est imprégnée et celle qui ne l'est pas ; or, cette différence n'est pas toujours nette. Il faudrait utiliser une mousse contenant un colorant pour que le niveau de pénétration de la mousse soit plus facile à lire ;
- les effets de bord. On s'est aperçu, à la fin d'un essai, que la mousse n'imprégnait pas l'échantillon de façon uniforme, mais avait au contraire tendance à pénétrer plus profondément le long des parois de la cellule. Le profil d'imprégnation est repris sur la figure 4-22 ci-après.

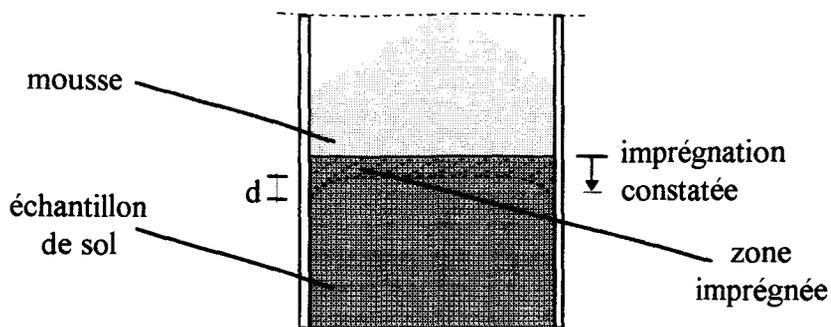


figure 4-22 : profil d'imprégnation

La différence d observée était assez importante, puisqu'elle était de l'ordre de quelques cm. Si l'on peut penser que ce phénomène a une influence limitée sur la vitesse d'imprégnation, la profondeur d'imprégnation est par contre faussée. Il serait donc nécessaire de mener une étude sur ces effets de bord, afin de pouvoir apporter des corrections sur les résultats obtenus pendant l'essai.

Enfin, il serait intéressant de faire les essais d'imprégnation d'une façon un peu différente de celle qui a été décrite précédemment : au lieu de lire une profondeur de pénétration en fonction du temps, on pourrait mesurer l'évolution du gradient de pression existant entre les parties haute et basse de l'échantillon (sans correction des fluctuations de pression pendant le déroulement de l'essai), ce qui résoudrait le problème de lecture du niveau d'imprégnation.

Un essai a été réalisé de cette façon et a permis de constater que la variation du gradient de pression présentait la même évolution que la profondeur d'imprégnation, à savoir une première phase où la diminution du gradient est très rapide, puis une seconde où elle est beaucoup plus faible. Il serait bien sûr nécessaire de faire les deux essais en parallèle pour comparer les résultats et pouvoir ainsi évaluer leur correspondance.

5. CONCLUSION

Après le montage du laboratoire d'essais des produits moussants, la deuxième étape de l'opération n°5 a consisté en la réalisation d'une campagne d'essais portant sur des mousses, mais aussi sur des mélanges sol/mousse. Les essais ont porté principalement sur des sols grenus : un sable fin (sol *S1*), un sable plus grossier (sol *S2*) et une grave 0/20 mm (sol *SG1*). Quelques essais ont toutefois été réalisés sur un limon (sol *L1*), afin d'étudier également l'influence de la mousse sur un sol cohérent.

Les essais portant sur des mousses de caractéristiques variées (expansion, concentration du produit moussant, présence d'un adjuvant) ont permis de montrer que ces dernières étaient tout à fait adaptées dans le cadre de notre étude ; elles présentent en effet un comportement satisfaisant dans le temps et sous pression. La mise au point d'un essai de consistance permet de plus de décrire la mousse avec une caractéristique supplémentaire, qui présente l'avantage d'être significative ; des tests complémentaires restent à faire pour s'assurer de la validité de cet essai.

En ce qui concerne les essais réalisés sur les mélanges sol/mousse, les résultats obtenus sont probants et permettent d'affirmer que la mousse a bien un effet sur les sols grenus en matière de fluidification du mélange, de lubrification, d'imprégnation du terrain et de réduction de la puissance consommée.

Les essais réalisés avec des mousses de différentes caractéristiques (variation du coefficient d'expansion et de la concentration en produit moussant) montrent que l'utilisation d'une mousse qui présente une fraction liquide peu importante semble appropriée : on peut penser que la présence d'un grand nombre de bulles d'air joue un rôle important dans la lubrification du sol, en permettant aux grains de glisser les uns contre les autres. La concentration du produit moussant la plus satisfaisante est en fait la plus faible, ce qui semble indiquer que le sable réagit bien avec la mousse.

En outre, l'utilisation de deux produits moussants a permis de comparer leur action et par là même leur efficacité. L'analyse des résultats obtenus permet d'affirmer que le produit *Tensio 1* est plus adapté que *Tensio 2* au sol testé (sol *S2*).

On a également pu constater que si la mousse imperméabilisait le mélange sol/mousse dans certains cas, elle était inefficace lorsque le sable était saturé ou que sa teneur en fines était trop faible. Il semble par contre que l'incorporation d'un agent viscosifiant à la mousse permette d'obtenir la perméabilité souhaitée.

Enfin, les essais effectués sur la grave ont montré les limites d'utilisation de la mousse : si cette dernière permettait l'obtention d'un mélange parfaitement fluide et homogène pour les sables, il n'en est pas de même pour la grave, même si elle a une influence favorable sur le comportement de cette dernière en matière de fluidité. De même, les résultats des essais de perméabilité montrent un problème d'accrochage de la mousse ; l'utilisation de mousses viscosifiées a cependant montré une amélioration quant à la tenue de la mousse. Des essais complémentaires restent cependant à mener pour tirer des conclusions définitives, notamment avec des mousses viscosifiées, ces dernières améliorant notablement les caractéristiques de la mousse.

Des différences ont été observées entre les taux d'injection relevés au cours des essais réalisés avec les sols *S1*, *S2* et *SG1* et ceux déterminés à partir de la formule de la RFSTMA. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que la formule (11) ne prend pas en compte les caractéristiques du mélange testé (teneur en eau du sol, type de mousse utilisée). Les mélanges sol/mousse obtenus en appliquant cette formule étant donc beaucoup plus fluides, on peut toutefois se demander si le critère d'ouvrabilité retenu par la RFSTMA est le même que pour notre étude.

Les essais réalisés avec des sols fins ont en outre permis de constater une plus grande difficulté à travailler avec ces derniers, du fait de la différence de comportement existant avec les sols grenus.

Bien que les résultats obtenus soient très satisfaisants, car riches en enseignements, ils ne peuvent être analysés que de manière qualitative : ils ne permettent en effet pas de modéliser le comportement réel d'un mélange lors de son évacuation dans un bouclier à pression de terre. La réalisation des différents essais a en effet mis en évidence des problèmes, que ce soit au niveau de l'étude de la mousse elle-même que des différents mélanges sol/mousse.

Des modifications doivent être apportées au matériel existant pour pallier ces inconvénients ; on peut d'un autre côté envisager la mise au point de nouveaux essais pour étudier certains aspects du comportement d'un mélange sol/mousse non encore abordés.

CONCLUSION GÉNÉRALE
PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats d'une expérimentation menée en 1992 sur un chantier de microtunnel utilisant l'injection de mousse ont montré la nécessité d'étudier de manière approfondie l'action de la mousse lorsqu'elle est utilisée avec un bouclier à pression de terre.

Pour cela, une réflexion a été menée afin de connaître les paramètres à prendre en compte pour juger de l'apport de la mousse sur le sol excavé. Cette première étape a abouti à la mise en place d'un laboratoire d'essais des produits moussants, permettant d'une part de caractériser les produits susceptibles de répondre aux besoins du laboratoire et d'autre part d'étudier la mousse fabriquée à partir d'un banc de génération industriel, cette dernière dépendant en effet de nombreux paramètres. La mise en place de ce laboratoire avait cependant pour but principal l'étude du comportement de différents mélanges sol/mousse, afin de cerner au mieux les problèmes qui se posent sur chantier lors de la réalisation d'un ouvrage.

La première partie des essais, portant sur la mousse à proprement parler, a permis d'étudier les caractéristiques de cette dernière, en matière de persistance, de capacité moussante et de compressibilité. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'un produit adapté permet de répondre aux exigences imposées par l'application.

En outre, si ces essais ont permis d'étudier la mousse elle-même, ils ont également mis en avant l'importance du procédé de génération, car ce dernier conditionne l'obtention d'une mousse de plus ou moins bonne qualité. L'utilisation d'adjuvants à la mousse, et particulièrement les agents viscosifiants, dont le but est de rigidifier la mousse, a notamment permis de montrer les limites du dispositif utilisé ; nous avons en effet rencontré des difficultés pour générer des mousses viscosifiées, ces dernières ne présentant pas toujours des caractéristiques satisfaisantes pour réaliser des essais significatifs.

La deuxième partie des essais, qui a été l'objet principal de cette étude, a permis d'étudier le comportement de différents mélanges sol/mousse, ces derniers étant réalisés principalement à partir de sols grenus.

Au vu des résultats obtenus avec les différents essais, on peut affirmer que la mousse a bien un effet sur les sables, puisqu'elle permet de leur conférer des caractéristiques telles que le fonctionnement d'un bouclier à pression de terre soit optimisé dans le cadre d'un creusement : les mélanges obtenus présentent en effet une consistance que l'on peut qualifier de "fluidité plastique" et atteignent également une perméabilité inférieure à 10^{-6} m/s, même si une teneur en eau trop importante nécessite l'utilisation de mousses polymérisées. La mousse possède de plus des propriétés lubrifiantes, facilitant d'une part l'évacuation des marins et réduisant d'autre part l'usure des organes de fonctionnement d'un bouclier. Enfin, la mousse permet d'assurer la stabilité du front de taille par la formation d'une zone d'imprégnation au droit de ce dernier, en conférant au terrain en place une cohésion apparente et par là même une perméabilité réduite.

En ce qui concerne les graves, la réalisation des essais a permis de montrer les limites d'utilisation de la mousse. Si cette dernière permet de conférer aux sables les propriétés requises, elle s'avère quasiment inefficace lorsqu'elle est mélangée à des graves, si ce n'est qu'elle permet malgré tout

de conférer une certaine fluidité au mélange. L'utilisation de mousses viscosifiées a en revanche permis d'apporter une certaine amélioration en matière de perméabilité du mélange.

Enfin, des essais ont été réalisés avec un limon, et ont permis de constater, au vu des problèmes rencontrés, que le matériel du laboratoire d'essais des produits moussants ne permettait pas l'étude du comportement de mélanges à base de sols fins. Ces derniers ont en effet soulevé des problèmes qui ne s'étaient pas posés avec les sols grenus, comme la difficulté à maîtriser la teneur en eau du matériau testé, ainsi que l'influence de son état initial (taille des mottes). L'utilisation de mousse avec des sols fins permettant d'apporter une amélioration lors du creusement d'ouvrages souterrains (voir chapitre 2, paragraphe 4.2), une réflexion doit être menée afin d'aboutir à la réalisation d'une campagne d'essais avec ces derniers.

La réalisation de cette première campagne d'essais, si elle a permis dans son ensemble de vérifier que les essais réalisés permettaient d'évaluer l'apport de la mousse sur le comportement d'un sol grenu, a cependant montré les limites du matériel utilisé et a mis en avant les modifications qui doivent être apportées au matériel existant afin de pallier certains inconvénients. Ces modifications concernent le matériel permettant l'étude de la mousse, mais surtout celle des mélanges sol/mousse (essais de malaxage et d'imprégnation).

De plus, il serait intéressant de mettre au point de nouveaux essais, qui seraient à même de permettre l'étude des caractéristiques du mélange sol/mousse non encore abordées : on peut citer l'essai d'accrochage.

PERSPECTIVES

La suite de ce travail passe par plusieurs étapes, détaillées ci-dessous.

En premier lieu, il est nécessaire de poursuivre la campagne d'essais, que ce soit au niveau des sols grenus, en particulier avec des mélanges à base de mousses polymérisées, mais également au niveau des sols fins, leur étude passant par la mise au point de nouveaux essais. L'étude de différents mélanges réalisés à partir de sols appartenant à des fuseaux granulométriques bien distincts dans un premier temps, puis de sols reconstitués dans un deuxième temps devrait permettre à long terme d'établir les fuseaux granulométriques pour lesquels l'utilisation de mousse est nécessaire. Si cette démarche rejoint celle présentée par la RFSTMA (voir chapitre 3, paragraphe 3.1), elle offre par contre l'avantage de prendre en compte des paramètres supplémentaires qui semblent grandement influencer sur le comportement d'un mélange sol/mousse, à savoir la teneur en eau du sol et les caractéristiques de la mousse utilisée.

L'utilisation de deux produits tensioactifs ayant permis de constater des différences importantes tant au niveau des mousses générées que des mélanges sol/mousse eux-mêmes, il est nécessaire de poursuivre la série d'essais avec d'autres produits (moussants et adjuvants). Cette remarque soulève un point important qui n'a pas été abordé tout au long de ce travail : l'étude de l'interaction sol/mousse sur le plan physico-chimique, qui devrait permettre de mieux comprendre le comportement des mélanges en question.

En second lieu, il est indispensable de poursuivre les expérimentations sur chantier, afin de pouvoir valider les résultats obtenus en laboratoire : l'analyse de ces résultats ne peut en effet pour l'instant être faite que de manière qualitative. Il ne faut pas perdre de vue le fait que le microtunnelier est directement issu de l'expérience acquise par les Japonais en matière de tunneliers ; ces deux types de machines présentent donc des similitudes quant à leur fonctionnement. On peut alors se rendre compte de l'intérêt que présente l'utilisation de microtunneliers pour étudier l'apport des produits moussants dans l'amélioration du percement par boucliers à pression de terre : ces derniers offrent en effet l'avantage de permettre des expérimentations pour des coûts de loin inférieurs à ceux qu'engendreraient des expériences en vraie grandeur.

Si l'utilisation des produits moussants dans le cadre du percement par boucliers à pression de terre rencontre un certain succès, ce choix devrait de plus en plus se confirmer pour les projets d'ouvrages souterrains à venir, en grande partie grâce à la meilleure connaissance de l'apport de la mousse dans l'amélioration du creusement, à laquelle cette thèse aura quelque peu contribué.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AÏT-MATOUK - 1995] AÏT-MATOUK S. : *Campagne d'essais relative à l'apport des produits moussants sur des sols types - Validation des essais de laboratoire*. Rapport de Fin d'Études de l'EUDIL. Juin 1995. 33 pages hors annexes.
- [ANHEUSER - 1984] ANHEUSER L. : *Technologie et applications récentes des boucliers à boue allemands*. Comptes-rendus des journées d'études internationales de l'AFTES sur *Le creusement des tunnels en terrains meubles et aquifères*. Lyon, France, du 27 au 29 novembre 1984. Édité par : LEGRAND M., Éd. Balkema : Rotterdam, 1985. Pages 15 à 20.
- [ARNOL et al - 1993] ARNOL J.-C., RAULT P. sur *l'étude des additifs utilisés pour le percement par tunneliers à pression de terre*. Rapport de Fin d'Études de l'EUDIL. Juin 1993. 34 pages hors annexes.
- [BADENDERERDE - 1993] BADENDERERDE S. : *Conceptional requirements for soft ground tunnel boring machines*. Proceedings of *Options for tunnelling 1993*. Édité par : BURGER H., Éd. Elsevier Science Publishers B.V. : Amsterdam, 1993. Pages 377 à 390.
- [BECKER - 1993] BECKER C. : *The choice between EPB- and Slurry Shields ; selection criteria by practical examples*. Proceedings of *Options for tunnelling 1993*. Édité par : BURGER H., Éd. Elsevier Science Publishers B.V. : Amsterdam, 1993. Pages 781 à 794.
- [BEJUI et al - 1989] BEJUI H., GUILLOUX A. : *Techniques récentes de construction de tunnels en terrain meuble*. Comptes-rendus du colloque sur les *Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble : du chantier à la théorie*. Paris, France, du 7 au 10 février 1989. Édité par : Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 1989. Pages 475 à 502.
- [BOUYAT - 1991] BOUYAT C. : *Soutènement à pression de boue*. Rapport de synthèse du projet national *Tunnel 85-90* sur le thème du *Creusement des tunnels en terrain meuble et aquifère*. Édité par : AFTES, Lyon. 24 avril 1991. 20 pages.
- [BRIGLIA et al - 1989] BRIGLIA P., PANTET A., KASTNER R. : *Évolution de l'emploi et domaine d'utilisation des tunneliers à boucliers en terrains meubles et aquifères*. Comptes-rendus du colloque sur les *Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble : du chantier à la théorie*. Paris, France, du 7 au 10 février 1989. Édité par : Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 1989. Pages 41 à 51.

- [CHAPEAU et al - 1987] CHAPEAU C., SCHWENZFEIER A. : *Reconnaissance du sous-sol et creusement au bouclier - Spécificité des terrains meubles en site urbain*. Comptes-rendus des journées d'études internationales de l'AFTES sur les *Collectivités territoriales et utilisation du sous-sol*, Bordeaux, France, du 21 au 23 octobre 1987. Édité par : LEGRAND M., Éd. Balkema : Rotterdam, 1988. Pages 191 à 200.
- [DESSAUVAGES et al - 1994] DESSAUVAGES P., LEMÉE M. : *Apport des additifs dans l'amélioration du percement par microtunneliers*. Rapport de Fin d'Études de l'EUDIL. Juin 1994. 19 pages hors annexes.
- [DOMINGO et al - 1992] DOMINGO X., FIQUET L., MEIJER H. : *Foam Ability/Stability of Surfactants - CESIO Working Group "Test Methods for Surfactants"*. Tenside Surf. Det., n°29, 1992. Pages 16 à 22.
- [DOWDEN et al - 1991] DOWDEN P. B., CASS D. T. : *Chapter 45 - Shielded TBM's - Matching the machine to the job*. Proceedings of the *Rapid Excavation and Tunneling Conference*. Seattle, Washington, du 16 au 20 juin 1991. Édité par : WIGHTMAN N. D., MCCARRY D. C., Society of Mining, Metallurgy and Exploration : Littleton, Colorado, 1991. Pages 787 à 805.
- [DUPAIN et al - 1995] DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.-C. : *Granulats, sols, ciments et bétons - Caractérisation des matériaux de Génie Civil par les essais de laboratoire*. Édité par : Éditions CASTEILLA, Paris. 1995. 236 pages.
- [FSTT - 1993] FSTT : *Recherche et développement en Génie Civil - Le projet national Microtunnels*. Document de présentation. Édité par : FSTT. Janvier 1993. 47 pages.
- [GESTA - 1992] GESTA P. : *Tunneliers*. Techniques De l'Ingénieur. Traité Construction, volume C5, article n°5570. Mai 1992. 20 pages.
- [GUILLAUME - 1994] GUILLAUME J. : *Cas particuliers de fonctionnement des tunneliers en terrains meubles*. Séminaire COMETT (Communauté Européenne) sur les *Retours de chantiers de grandes excavations*. Bruxelles, Belgique, du 9 au 10 juin 1994. Édité par : NUYENS J., BIAREZ J., Université Libre de Bruxelles. 12 pages.
- [HAGIMOTO et al - 1984] HAGIMOTO H., KASHIMA Y. : *D.K. Shield method*. Comptes-rendus des journées d'études internationales de l'AFTES sur *Le creusement des tunnels en terrains meubles et aquifères*. Lyon, France, du 27 au 29 novembre 1984. Édité par : LEGRAND M., Éd. Balkema : Rotterdam, 1985. Pages 53 à 60.

- [HERRENKNECHT - 1994] HERRENKNECHT M. : *EPB or slurry machine : the choice*. Tunnels and tunnelling, June 1994. Pages 35 à 36.
- [HERRENKNECHT et al - 1995] HERRENKNECHT M., MAIDL U. : *Applying foam for an EPB Shield drive in Valencia*. Tunnel. Mai 1995. Pages 10 à 19.
- [ISHIHARA - 1979] ISHIHARA K. : *Earth Pressure Balanced Shield Tunneling Method : Water pressure Type*. Underground Space, Volume 4, N°2, 1979. Pages 95 à 101.
- [ISHIMOTO et al - 1995] ISHIMOTO H., TUDA T. : *New earth pressure-balanced shield tunneling method using paper sludge as a slurry plasticizer*. Proceedings of the South East Asian Symposium on Tunneling and Underground Space Development (SEASTUD), Bangkok, Thaïlande, du 18 au 19 janvier 1995. Édité par : Japan Tunneling Association. Pages 309 à 318.
- [KELLEY - 1991] KELLEY M. N. : *Chapter 51 - Denmark's Great Belt fixed link bored tunnel project*. Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference. Seattle, Washington, du 16 au 20 juin 1991. Édité par : WIGHTMAN N. D., MCCARRY D. C., Society of Mining, Metallurgy and Exploration : Littleton, Colorado, 1991. Pages 881 à 892.
- [KODAMA et al - 1990] KODAMA D., YAMAGUCHI Y. : *Chemical foam Injection Shield Method and Example of Execution*. Proceedings of the Tenth Southeast Asian Geotechnical Conference. Taipei, Taïwan, du 16 au 20 avril 1990. Pages 533 à 538.
- [LARPENT - 1995] LARPENT C. : *Tensioactifs*. Techniques De l'Ingénieur, traité Constantes physico-chimiques, volume K2, article n°342. Juin 1995. 14 pages hors annexes.
- [LECOMTE - 1994] LECOMTE F. : *Apport de la mousse dans l'amélioration du percement par microtunneliers à pression de terre*. Rapport de Fin d'Études de l'EUDIL. Novembre 1994. 28 pages hors annexes.
- [MAILLARD - 1985] MAILLARD J.-F. : *Forages et sondages*. Techniques De l'Ingénieur. Traité Construction, volume C2 I, article n°228. Février 1985. 16 pages.
- [MARCOU - 1990] MARCOU L. : *Agents de surface*. Techniques De l'Ingénieur. Traité Généralités, volume A7, article n°7610. Novembre 1990. 10 pages.

- [MARSDEN et al - 1966] MARSDEN S. S., KHAN S. A. : *The flow of foam through short porous media and apparent viscosity measurements*. Society of Petroleum Engineers Journal, March 1966. Pages 17 à 25.
- [MCCUSKER - 1991] MCCUSKER T. G. : *Underground Structures : design and construction*. Édité par : SINHA R. S., Éd. Elsevier Science Publishers BV. 1991. 529 pages.
- [MIYAZAKI et al - 1984] MIYAZAKI H., HATAKEYAMA T., KANEMATSU T. : *Subway tunnel by earth pressure balance shield - Excavation control and pipe transportation muck*. Comptes-rendus des journées d'études internationales de l'AFTES sur *Le creusement des tunnels en terrains meubles et aquifères*. Lyon, France, du 27 au 29 novembre 1984. Édité par : LEGRAND M., Éd. Balkema : Rotterdam, 1985. Pages 189 à 195.
- [MOHKAM - 1993] MOHKAM M. : *Boucliers à pression à pression de terre : avantages, inconvénients, recherche et développement*. Conférence présentée aux Journées d'études du CEIFICI sur les *Tunneliers et boucliers - Évolutions techniques récentes et perspectives*, du 30 mars au 1^{er} avril 1993, Paris, France. Édité par : CEIFICI. Tunnels et Ouvrages Souterrains, N°119, septembre/octobre 1993. Pages 279 à 281.
- [MYERS - 1992] MYERS D. : *Surfactant science and technology*. Édité par : V.C.H. Publishers Inc. , New York. 1992. 333 pages.
- [NISHITAKE - 1987] NISHITAKE S. : *Chapter 35 - Earth Pressure Balanced Shield machine to cope with boulders*. Proceedings of the *Rapid Excavation and Tunneling Conference*. New Orleans, Louisiane, du 14 au 18 juin 1987. Édité par : JACOBS, HENDRICKS, Society of Mining, Metallurgy and Exploration : Littleton, Colorado, 1987. Volume 1. Pages 552 à 572.
- [NISHITAKE - 1990] NISHITAKE S. : *Advanced technology realize high-performance earth pressure balanced shield*. Comptes-rendus des journées d'études internationales de l'AFTES sur les *Franchissements souterrains pour l'Europe*. Lille, France, du 16 au 18 octobre 1990. Édité par : LEGRAND M., Éd. Balkema : Rotterdam, 1990. Pages 291 à 302.
- [NISHITAKE et al - 1993] NISHITAKE S., BEUNECHE D., PERON J.-Y. : *Évolution vers les grands diamètres - Robotisation - Multi-faces*. Journées d'études du CEIFICI sur les *Tunneliers et boucliers - Évolutions techniques récentes et perspectives*, du 30 mars au 1^{er} avril 1993, Paris, France. Édité par : CEIFICI. 16 pages hors annexes.

- [OKPOBIRI - 1982] OKPOBIRI G. A. : *Experimental determination of solids friction factors and minimum volumetric requirements in foam and mist drilling and well cleanout*. PhD thesis in the discipline of Petroleum Engineering. University of Tulsa. 1982. 376 pages.
- [ONDEL et al - 1987] ONDEL C., PERILLAT Y. : *Technologie et utilisation des micro-tunneliers*. Comptes-rendus des journées d'études internationales de l'AFTES *Collectivités territoriales et utilisation du sous-sol*, Bordeaux, France, du 21 au 23 octobre 1987. Édité par : LEGRAND M., Éd. Balkema : Rotterdam, 1988. Pages 277 à 278.
- [PÉRA - 1991] PÉRA J. : *Voyage au Japon - 14-23 septembre 1990*. Tunnels et ouvrages souterrains, n°105, mai/juin 1991. Pages 144 à 149.
- [PHILIPPOTEAUX et al - 1994] PHILIPPOTEAUX L., ROBERT F. : *Utilisation d'adjuvants pour l'amélioration du contrôle de la pression dans un bouclier à pression de terre*. Rapport de Fin d'Études de l'ENTPE. Juin 1994. 109 pages hors annexes.
- [QUEBAUD - 1992] QUEBAUD S. : *Chantier expérimental de Vitry-sur-Seine - Étude de l'influence de la mousse sur le marinage d'un minitunnelier à pression de terre*. Rapport technique RT 92/06 du département Mécanique des Matériaux Fragiles du Laboratoire de Mécanique de Lille. Juin 1992. 20 pages hors annexes.
- [QUEBAUD et al - 1995 a] QUEBAUD S., MOREL E. : *Apport des produits moussants dans l'amélioration du percement par microtunneliers à pression de terre - Première approche d'un laboratoire d'essais*. Rapport technique n°4 du projet national *Microtunnels*, dans le cadre de l'opération 5 sur *l'Apport des additifs dans l'amélioration du percement par microtunneliers*. Édité par : FSTT. Février 1995. 16 pages hors annexes.
- [QUEBAUD et al - 1995 b] QUEBAUD S., MOREL E. : *Use of foams in microtunnelling*. Proceedings of the 12th International Conference on Trenchless Technology for Pipeline and Cable Construction *No-Dig'95*. Dresde, Allemagne, du 19 au 21 septembre 1995. Édité par : ? . 12 pages.
- [QUEBAUD et al - 1996] QUEBAUD S., HENRY J.-P. : *Apport des mousses dans l'amélioration du percement par boucliers à pression de terre - Application aux sols grenus*. Comptes-rendus des journées d'études internationales de l'AFTES sur *les travaux souterrains : des techniques et des hommes*. Chambéry, France, du 21 au 24 octobre 1996. À paraître. 8 pages.

- [RAND et al - 1983] **RAND P. B., KRAYNIK A. M.** : *Drainage of Aqueous Foams. Generation-Pressure and Cell-Size Effects*. Society of Petroleum Engineers Journal, Volume 23, N°1, February 1983. Pages 152 à 154.
- [REDA - 1994] **REDA A.** : *Contribution à l'étude des problèmes de creusement avec bouclier à pression de terre : confinement, marinage et remplissage du vide annulaire*. Thèse de doctorat en Génie Civil. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Novembre 1994. 292 pages.
- [SATO et al - 1990] **SATO L., UGA Y., LIZOT P., URBANIACK J., VALIN F.** : *Les innovations technologiques mises en œuvre pour les tunneliers ferroviaires de Transmanche*. Comptes-rendus des journées d'études internationales de l'AFTES sur les *Franchissements souterrains pour l'Europe*. Lille, France, du 16 au 18 octobre 1990. Édité par : LEGRAND M., Éd. Balkema : Rotterdam, 1990. Pages 135 à 138.
- [VENUAT - 1984] **VENUAT M.** : *Adjuvants et traitements - Techniques modernes d'amélioration des ouvrages en béton - Applications aux Bâtiments et aux Travaux Publics*. Édité par : l'auteur, Paris. 1984. 830 pages.
- [WALLIS - 1990] **WALLIS S.** : *Screw conveyors will take the pressure*. Tunnels and tunnelling, April 1990. Pages 31 à 34.
- [WALTER - 1994] **WALTER M.** : *De la mousse à la crème : le confinement à la française*. Matériels et chantiers. Septembre 1994. Pages 38 à 39.
- [WHITTAKER et al - 1990] **WHITTAKER B. N., FRITH R.C.** : *Tunnelling : design, stability and construction*. Édité par : the Institution of Mining and Metallurgy, Londres. 1990. 460 pages.

ANNEXES

ESSAI DE MOUSSAGE

1 - Objet

Cet essai permet de déterminer le pouvoir moussant des tensioactifs, ainsi que la stabilité de la mousse générée à l'aide de ces derniers.

2 - Matériel et produit(s)

2.1 - Matériel

Le matériel permettant la réalisation de l'essai comprend :

- un moteur de laboratoire (TURBOTEST 33/300 de marque RAYNERI),
- une hélice creuse à 3 branches de diamètre 80 mm (de type "papillon"),
- des bêchers de 2 litres en verre de forme haute (25 cm environ) et de diamètre 11,5 cm,
- une règle de 20 cm minimum,
- un thermomètre,
- un chronomètre,
- une balance de précision,
- des pipettes et des bêchers.

Remarque : on s'assurera avant chaque essai du bon réglage de la hauteur de l'hélice par rapport au fond du bêcher de forme haute, et on contrôlera de même le centrage de cette hélice.

Le schéma de la figure 1 reprend le dispositif de l'essai de moussage.

2.2 - Produit(s)

Le produit utilisé est un tensioactif, fourni avec :

- sa notice technique d'utilisation,
- sa fiche de sécurité.

Ses caractéristiques sont résumées sur une fiche signalétique (voir la feuille ci-jointe).

Dans le cas de l'utilisation d'un adjuvant, on reportera également ses caractéristiques sur une fiche signalétique.

Avant d'utiliser tout produit, on s'assurera de sa validité d'une part, et de son homogénéité d'autre part.

On utilisera une eau à température ambiante. Si on utilise de l'eau de ville, il sera nécessaire de connaître ses caractéristiques (principalement sa dureté) et de s'assurer que celles-ci ne varient pas de façon importante au cours du temps. Dans le cas contraire, il est conseillé d'utiliser une eau préparée industriellement (eau distillée).

3 - Mode opératoire

Le mode opératoire à adopter pour l'essai de moussage est le suivant :

- préparer la solution moussante à la concentration en tensioactif C_{am} souhaitée et verser celle-ci dans un bêcher de forme haute. Le volume de solution (250 ml) reste constant quel que soit C_{am} . Dans le cas où l'on utilise un adjuvant, il est préférable de doser celui-ci à l'aide de la balance (sa densité étant connue), en raison des faibles quantités généralement employées ;
- régler le variateur du moteur pour que la vitesse d'agitation à vide soit égale à 3000 tours/min., puis arrêter le moteur ;
- placer le bêcher de forme haute contenant la solution sous l'hélice et fixer celui-ci à l'aide de la sangle ;
- abaisser l'hélice dans le bêcher ;
- mettre le moteur sous tension et agiter le liquide pendant 2 minutes à la vitesse précédemment établie ;
- relever l'hélice une fois l'agitation terminée et dégager le bêcher pour procéder aux mesures ;
- déclencher le chronomètre.

4 - Mesure des paramètres

Les paramètres mesurés lors de l'essai sont les suivants :

- T_{ft} (s), le temps de foisonnement. Il correspond à la durée d'agitation au bout de laquelle il y a suppression du vortex dans le bêcher ;
- H_m (mm), la hauteur de mousse mesurée dans le bêcher après 2 minutes d'agitation ;
- T_{dvt} (mn), le temps de demi-vie. Il représente le temps au bout duquel la moitié de la solution nécessaire pour former la mousse est récupérée ; cette valeur caractérise la stabilité de la mousse dans le temps ;
- T (°C), la température à laquelle a été effectué l'essai. Bien qu'elle soit notée à titre indicatif, elle ne doit pas présenter de variations trop importantes d'un essai à l'autre (supérieures à 5°C) qui pourraient affecter les résultats obtenus.

La connaissance de H_m permet également de donner à titre indicatif, le foisonnement K_t de la solution moussante ; K_t est cependant caractéristique de l'essai de moussage et ne peut en aucun cas être transposé à un autre type d'essai.

5 - Présentation des résultats

Les résultats obtenus sont repris dans le tableau de la fiche signalétique donnée ci-après.

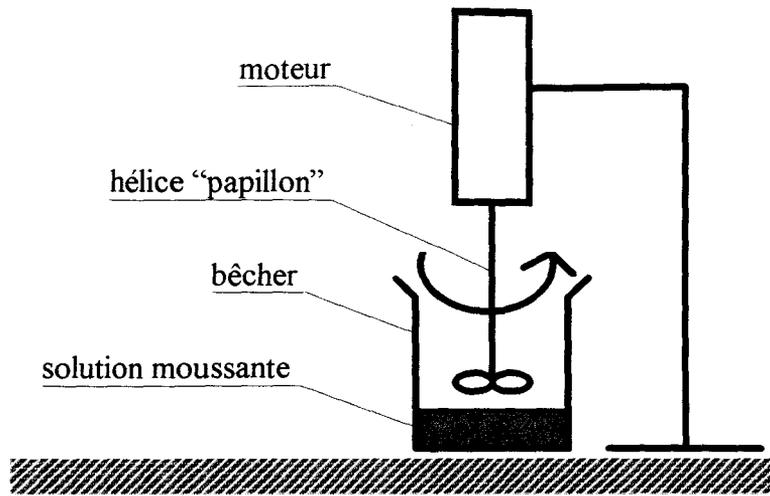


figure 1 : dispositif de l'essai de moussage

FICHE SIGNALÉTIQUE DU PRODUIT																																																
Fonction :																																																
Fabricant :																																																
Revendeur :																																																
Désignation commerciale :																																																
Conditionnement :																																																
Prix :																																																
Constituants principaux :																																																
N° C.A.S. :																																																
Notice technique d'utilisation : <input type="checkbox"/>	Fiche de sécurité : <input type="checkbox"/>																																															
<i>DESCRIPTION</i>																																																
Aspect :																																																
Couleur :	Odeur :																																															
<i>CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES</i>																																																
Viscosité : mPa.s	Densité : g/cm ³																																															
pH:	Solubilité :																																															
Biodégradabilité :																																																
Ecotoxicité :																																																
Toxicologie :																																																
<input type="checkbox"/> agent tensioactif	<input type="checkbox"/> anionique	<input type="checkbox"/> cationique																																														
	<input type="checkbox"/> non ionique	<input type="checkbox"/> amphotérique																																														
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Concentration(s) préconisée(s)</i></td> <td style="width: 150px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="width: 150px; height: 20px;"></td> <td style="width: 150px; height: 20px;"></td> </tr> </table>		<i>Concentration(s) préconisée(s)</i>																																														
<i>Concentration(s) préconisée(s)</i>																																																
<i>Essai de moussage</i>																																																
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>C_{am}</th> <th>C_{av}</th> <th>T</th> <th>T_{ft}</th> <th>T_{dvt}</th> <th>H_m</th> <th>K_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>							C_{am}	C_{av}	T	T_{ft}	T_{dvt}	H_m	K_t																																			
C_{am}	C_{av}	T	T_{ft}	T_{dvt}	H_m	K_t																																										
<small>(C_{am} et C_{av} en %, T en °C, T_{ft} en s, T_{dvt} en mn, H_m en mm)</small>																																																
<input type="checkbox"/> adjuvant	<input type="checkbox"/> rétenteur d'eau	<input type="checkbox"/> flocculant																																														
	<input type="checkbox"/> fluidifiant	<input type="checkbox"/> dispersant																																														
	<input type="checkbox"/> viscosifiant																																															
	<input type="checkbox"/> autre :																																															
<i>Test de caractérisation :</i>																																																
Remarques :																																																
Date de caractérisation :				Opérateur(s) :																																												

ESSAI DE CONSISTANCE

1 - Objet

Cet essai a pour but de déterminer la consistance d'une mousse issue d'un banc de génération à pression atmosphérique.

2 - Matériel et produit(s)

2.1 - Matériel

Le matériel permettant la réalisation de l'essai comprend :

- un moule tronconique de dimensions définies (voir figure 1 ci-après),
- une plaque métallique,
- une plaque de Plexiglas (matière qui permet de limiter les frottements),
- une règle à araser,
- un réglet gradué de 20 cm,
- un chronomètre,
- une cuillère,
- des bacs qui serviront de récipients pour la mousse.

Le schéma de la figure 1 reprend le dispositif de l'essai de consistance.

2.2 - Produit(s)

Le produit utilisé est une mousse, issue d'un banc de génération et caractérisée par :

- la nature du tensioactif et sa concentration,
- l'adjuvant éventuel utilisé et sa concentration,
- le coefficient d'expansion.

3 - Mode opératoire

Le mode opératoire à adopter pour l'essai de consistance est le suivant :

- placer le moule sur la plaque métallique, la plus grande embase du moule vers le haut ;
- procéder à la génération de la mousse, s'assurer de son homogénéité ;
- sans interrompre la génération, procéder au remplissage d'un récipient ;
- remplir le moule de mousse à l'aide de la cuillère en prenant soin de ne pas laisser de vides ;
- araser la surface du moule avec la règle ;
- poser la plaque de Plexiglas sur le moule et retourner l'ensemble, de manière à ce que la plaque métallique se trouve au-dessus du moule ;

- enlever la plaque métallique en la faisant glisser horizontalement à la surface du moule (afin qu'une partie de la mousse ne reste pas collée à la plaque) ;
- soulever lentement le moule à l'aide des 2 "poignées" afin de démouler le cône de mousse ;
- déclencher le chronomètre.

4 - Mesure des paramètres

Les paramètres mesurés lors de l'essai sont les suivants :

- le chronomètre venant juste d'être déclenché, relever respectivement h_{co} et ϕ_{co} , les valeurs de la hauteur et de la largeur du cône de mousse à l'aide de la règle graduée, en introduisant cette dernière au sein même du cône (verticalement pour h_{co} , puis horizontalement pour ϕ_{co}). On s'efforcera de noter la hauteur minimale pour h_{co} et la largeur maximale pour ϕ_{co} ;
- refaire les mêmes mesures au bout de deux minutes pour h_c et ϕ_c .

Remarque : pour chaque type de mousse, on procédera à un minimum de trois essais afin de vérifier l'exactitude des résultats obtenus. On prendra la valeur moyenne de ces derniers.

5 - Présentation des résultats

Le principe de l'exploitation des mesures est de ramener les dimensions relevées à celles du moule, et de les exprimer sous la forme de pourcentages. On calcule donc les paramètres suivants :

- ξ_{mo} , la consistance de la mousse étudiée juste après le démoulage, soit :

$$\xi_{mo} = \frac{h_{co}}{\phi_{co}} \times \frac{59}{100}$$

- ξ_m , la consistance de la mousse étudiée au bout de deux minutes, soit :

$$\xi_m = \frac{h_c}{\phi_c} \times \frac{59}{100}$$

- $\Delta\xi$, la variation de la consistance de la mousse étudiée, soit :

$$\Delta\xi = \frac{\xi_{mo} - \xi_m}{\xi_{mo}}$$

Les résultats obtenus seront consignés dans le tableau de la fiche d'essais donnée ci-après.

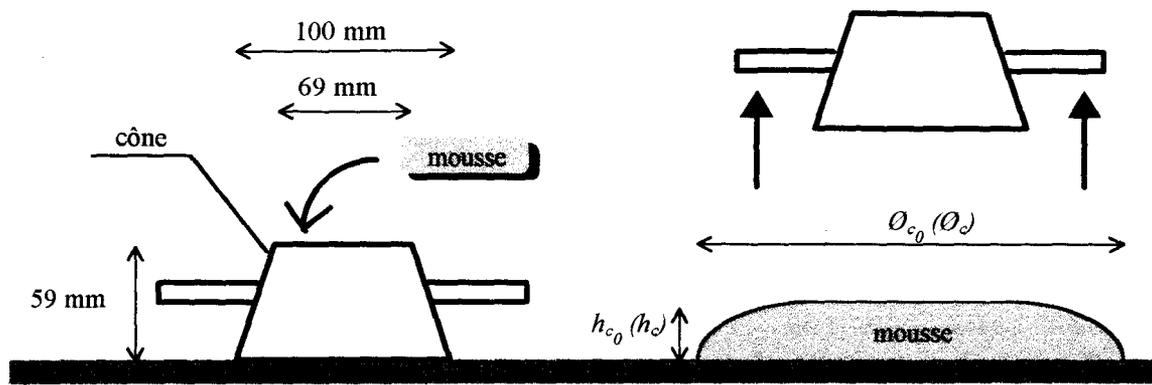


figure 1 : dispositif de l'essai de consistance

ESSAI DE DEMI-VIE

1 - Objet

Cet essai permet d'évaluer la tenue dans le temps d'une mousse à pression atmosphérique, et en particulier la durée de demi-vie.

2 - Matériel et produit(s)

2.1 - Matériel

Le matériel permettant la réalisation de l'essai comprend :

- un récipient d'une contenance de 25 litres comprenant dans sa partie supérieure une bonbonne en plastique retournée et sans fond (23 litres) et dans sa partie inférieure un flacon gradué de 2 litres (voir figure 1 ci-après) ;
- un trépied supportant l'ensemble décrit précédemment ;
- une règle à araser ;
- un chronomètre ;
- un thermomètre.

Le schéma de la figure 1 reprend le dispositif de l'essai de demi-vie.

2.2 - Produit(s)

Le produit utilisé est une mousse, issue d'un banc de génération et caractérisée par :

- la nature du tensioactif et sa concentration,
- l'additif éventuel utilisé et sa concentration,
- le coefficient d'expansion,
- les conditions de génération.

On notera le volume théorique de liquide à récupérer, afin de le comparer à la valeur qui sera obtenue à la fin de l'essai.

3 - Mode opératoire

Le mode opératoire à adopter pour l'essai de tenue dans le temps est le suivant :

- monter l'ensemble (bonbonne et flacon) sur le trépied ;
- procéder à la génération de la mousse, s'assurer de son homogénéité ;

- introduire le tuyau d'où sort la mousse générée dans le flacon sans pour autant interrompre la génération ;
- procéder au remplissage du récipient, le plus rigoureusement possible. Pour cela, remonter le tuyau avec un mouvement hélicoïdal, en prenant soin de ne pas laisser de vides ;
- araser la mousse surabondante ;
- déclencher le chronomètre ;
- relever la quantité de liquide récupéré dans le flacon aux temps définis (voir la fiche d'essais ci-jointe) ;
- arrêter l'essai lorsque la quantité de liquide récupérée n'évolue plus de façon significative.

4 - Mesure des paramètres

Les paramètres mesurés lors de l'essai sont les suivants :

- la quantité V de solution récupérée aux temps définis,
- la température T à laquelle a été effectué l'essai.

Une fois que l'essai est terminé, on connaît précisément le volume réel de solution récupéré. On peut alors déterminer les paramètres suivants :

- la durée de demi-vie (soit 50 % du volume réel de solution récupéré), qui correspond à un état où l'on considère que la mousse a perdu ses caractéristiques,
- l'erreur obtenue entre le volume théorique de solution à récupérer, et le volume réel récupéré.

5 - Présentation des résultats

Les résultats obtenus ainsi que les paramètres décrivant la mousse à tester sont repris sur une fiche d'essais donnée ci-après.

La courbe de la fiche d'essai permet de visualiser les résultats obtenus ; elle comprend l'évolution de la quantité de solution récupérée en fonction du temps (courbe semi-logarithmique).

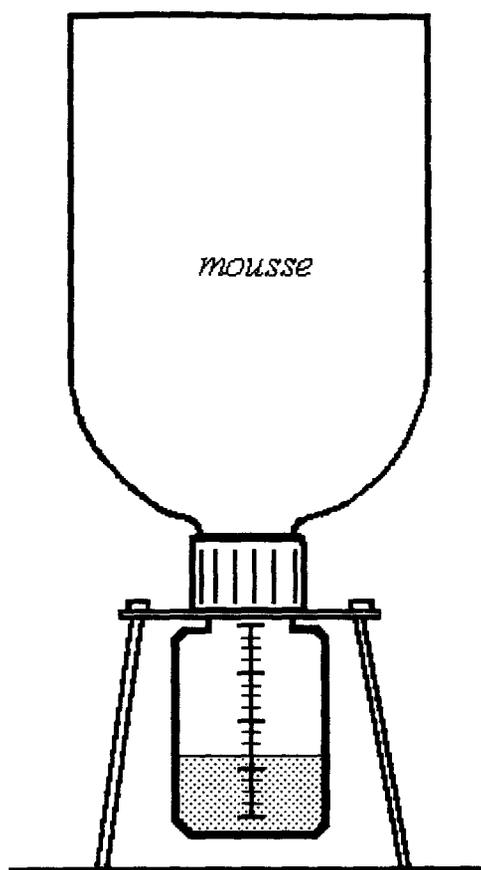


figure 1 : dispositif de l'essai de demi-vie

ESSAI DE COMPORTEMENT SOUS PRESSION

1 - Objet

Cet essai permet d'étudier le comportement d'une mousse en milieu confiné, soit sa tenue lorsqu'elle est soumise à des variations de pression.

2 - Matériel et produit(s)

2.1 - Matériel

Le matériel permettant la réalisation de l'essai comprend :

- une cellule de confinement, qui est reprise sur le schéma de la figure 1 ci-après ;
- un cache circulaire en plastique (de la taille du diamètre intérieur de la cellule) ;
- des grands réglés ;
- un chronomètre.

Le schéma de la figure 1 reprend le dispositif de l'essai de comportement sous pression.

2.2 - Produit(s)

Le produit utilisé est une mousse, issue d'un banc de génération et caractérisée par :

- la nature du tensioactif et sa concentration,
- l'additif éventuel utilisé et sa concentration,
- le coefficient d'expansion,
- les conditions de génération.

3 - Mode opératoire

3.1 - Mise en place de la mousse dans la cellule

Le mode opératoire à adopter pour la mise en place de la mousse dans la cellule est le suivant :

- mettre un cache en place dans le fond de la cellule;
- procéder à la génération de la mousse, s'assurer de son homogénéité ;
- remplir la cellule avec la mousse de la façon la plus rigoureuse possible, en prenant soin de ne pas laisser de vides. La mousse devra présenter en partie haute une surface qui soit la plus plane possible (si nécessaire, l'asurer avec un outil adapté) ;
- mettre en place l'embase supérieure de la cellule ainsi que le dispositif de mise sous pression ;
- mettre en place les réglés permettant la mesure de la hauteur de mousse dans la cellule le long de cette dernière.

3.2 - Réalisation de l'essai

Le mode opératoire à adopter pour réaliser l'essai de comportement sous pression est le suivant :

- noter la hauteur de mousse dans la cellule à pression atmosphérique. Il est conseillé de faire une lecture en deux endroits opposés et de prendre la valeur moyenne ;
- appliquer une pression à l'échantillon de mousse par l'intermédiaire du dispositif approprié. Les paliers successifs sont les suivants :

- passage de 0,00 à 0,10 MPa,
- passage de 0,10 à 0,15 MPa,
- passage de 0,15 à 0,20 MPa,
- passage de 0,20 à 0,25 MPa,
- passage de 0,25 à 0,30 MPa,
- passage de 0,30 à 0,35 MPa,
- passage de 0,35 à 0,40 MPa,

Il est nécessaire que la mise en pression soit la plus régulière possible. À chaque palier, procéder à la lecture de la hauteur moyenne de mousse ;

- procéder ensuite à la décompression de l'échantillon de mousse, en suivant les paliers indiqués plus haut, sans revenir toutefois à une pression nulle. À chaque palier, procéder à la lecture de la hauteur moyenne de mousse ;
- répéter 5 fois ce cycle de mise en pression / décompression.

4 - Mesure des paramètres

Le paramètre mesuré lors de l'essai est la variation de la hauteur moyenne de l'échantillon de mousse en fonction de la pression appliquée.

5 - Présentation des résultats

Les résultats obtenus ainsi que les paramètres décrivant la mousse à tester sont repris sur une fiche d'essai donnée ci-après. Les hauteurs seront exprimées par rapport à la hauteur à pression nulle (en %).

Le graphe de la fiche d'essai permet de visualiser les résultats obtenus. Pour plus de lisibilité, il est préférable de ne représenter que les cycles de mise en pression de l'échantillon.

À titre de comparaison, on peut également représenter la variation théorique de la hauteur de l'échantillon (en %), déterminée à partir des caractéristiques de la mousse testée. Pour cela, on se base sur la formule qui permet de connaître la variation du coefficient d'expansion K_P de la mousse utilisée en fonction de la pression absolue P , soit :

$$K_P = \frac{P_a}{P} (K_a - 1) + 1$$

avec : K_a , le coefficient d'expansion de la mousse utilisée à pression atmosphérique,
 P_a , la pression atmosphérique absolue (en MPa).

La variation de volume ΔV en fonction de la pression appliquée s'exprime alors de la façon suivante :

$$\Delta V = 100 \times \frac{K_p}{K_a}$$

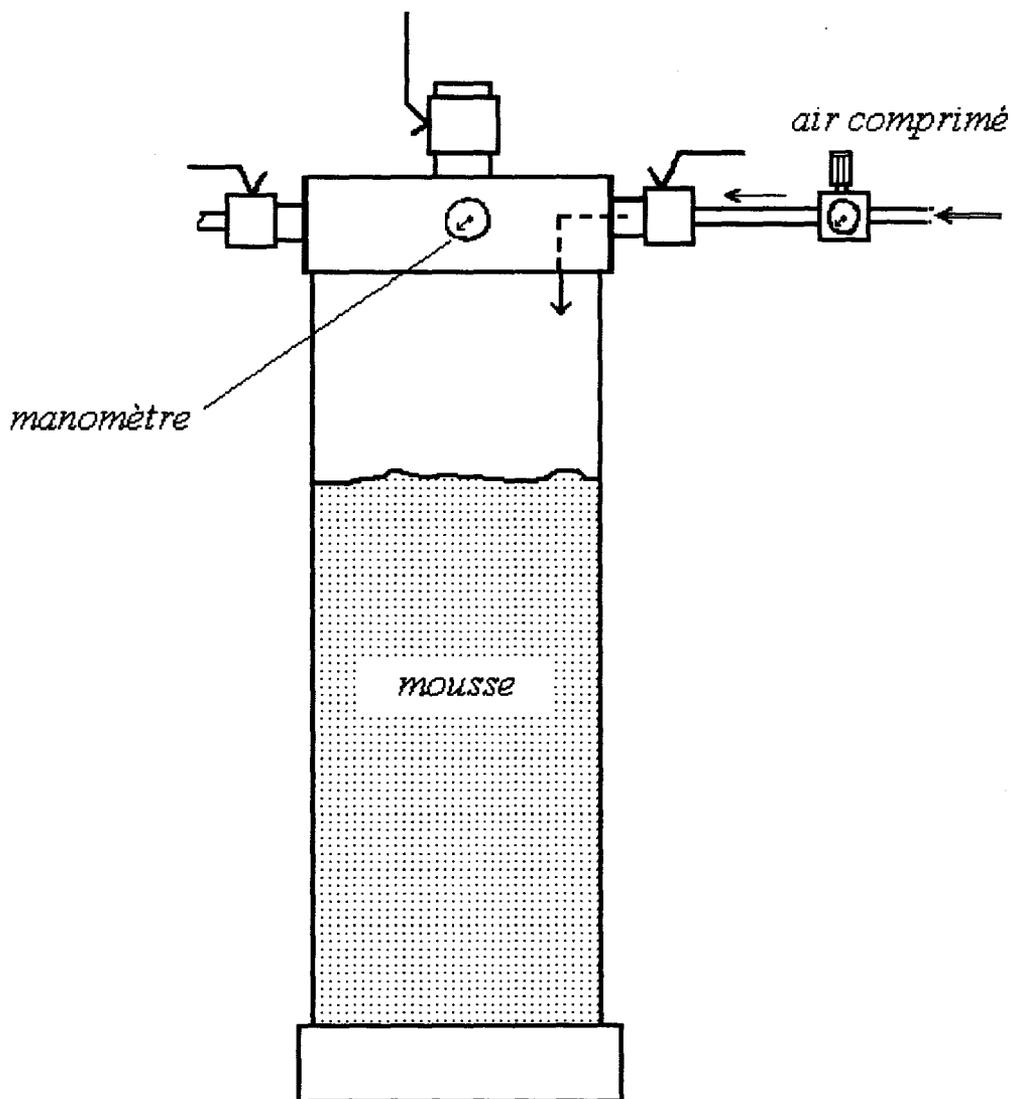


figure 1 : dispositif de l'essai de comportement sous pression

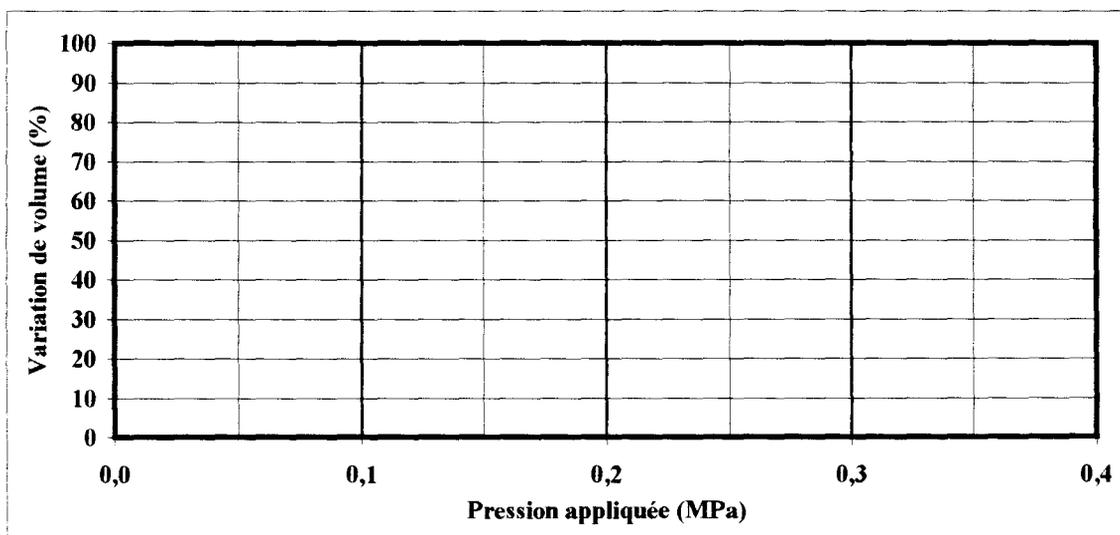
ESSAI DE COMPORTEMENT SOUS PRESSION

Identification du produit utilisé et conditions de génération

Produit :	Concentration C_{am} (%) :
Adjuvant :	Concentration C_{av} (%) :
Expansion :	Débit (m ³ /h) :
Générateur utilisé :	Pression Générateur (MPa) :

P	Δv_{th}	Cycle n°1			Cycle n°2			Cycle n°3			Cycle n°4			Cycle n°5		
		h1	h2	ΔV_1	h1	h2	ΔV_2	h1	h2	ΔV_3	h1	h2	ΔV_4	h1	h2	ΔV_5
0,00					---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
0,10																
0,15																
0,20																
0,25																
0,30																
0,35																
0,40																
0,35																
0,30																
0,25																
0,20																
0,15																
0,10																

(P en MPa, Δv_{th} en %, h1 et h2 en mm, ΔV_i en %)



Remarques :

Date de l'essai :

Opérateur(s) :

ESSAI DE COMPORTEMENT SUR LE MÉLANGE SOL / MOUSSE **(essais de malaxage, d'affaissement et d'adhérence)**

1 - Objet

L'essai de malaxage permet d'apprécier le soulagement des organes vitaux d'un microtunnelier (roue de coupe et vis d'extraction) grâce à l'apport de mousse. Couplé à des essais d'affaissement et d'adhérence, il caractérise également le mélange obtenu sur les points suivants : homogénéité, plasticité et adhérence.

2 - Matériel, sol et produit(s)

2.1 - Matériel

Le matériel permettant la réalisation de l'essai comprend :

- un malaxeur à axe vertical, muni de trois pales tournant à une vitesse constante (32 tours/min), d'une capacité de 100 litres et d'une puissance de 750 W ;
- un coffret de commande du malaxeur, comprenant notamment l'affichage de la puissance consommée et une liaison série pour l'acquisition par ordinateur compatible P.C. ;
- un logiciel d'acquisition des données ;
- un ordinateur compatible P.C. connecté au coffret de commande du malaxeur ;
- un récipient de volume connu pour l'injection de mousse ;
- un cône d'Abrams et ses accessoires (voir paragraphe 3.2) ;
- le dispositif permettant d'effectuer l'essai d'adhérence , à savoir :
 - un moule en bois de dimensions intérieures 200×85 mm, d'une épaisseur de 30 mm et d'une hauteur égale à 100 mm,
 - une plaque en inox plane et rigide ;
 - un rapporteur gradué en degrés ;
- des accessoires permettant de manipuler le sol à tester, ainsi que la mousse utilisée.

Les figures 1 et 2 reprennent respectivement les dispositifs de malaxage et d'adhérence.

2.2 - Sol

Les caractéristiques géotechniques du sol utilisé durant l'essai seront connues. La quantité de sol testée sera égale à 15 litres de matériau considéré dans les conditions en place, soit un poids égal à :

$$P = V \times \gamma_h$$

(en kN)

avec : γ_h , la masse volumique du sol à tester (en kN/m³),
 V , le volume du sol à tester (en m³).

Remarque : on prendra un soin tout particulier au contrôle de la teneur en eau du sol à tester. Pour les sols grenus, il est conseillé d'utiliser la méthode de la "poêle à frire", rapide et d'une précision satisfaisante.

2.3 - Produit(s)

Le produit utilisé est une mousse, issue d'un banc de génération et caractérisée par :

- la nature du tensioactif et sa concentration,
- l'adjuvant éventuel utilisé et sa concentration,
- le coefficient d'expansion,
- les conditions de génération.

3 - Modes opératoires

3.1 - Essai de malaxage

Le mode opératoire à adopter pour l'essai de malaxage est le suivant :

- effectuer un essai d'affaissement au cône d'Abrams et un essai d'adhérence avec le sol vierge (voir les modes opératoires ci-après) ;
- mettre en place dans le malaxeur la quantité de sol définie, et ceci sans le tasser ;
- mettre en route le malaxeur et le logiciel d'acquisition des données ;
- attendre que les paramètres à mesurer se soient stabilisés et effectuer une première mesure ;
- procéder à la génération de la mousse et s'assurer de son homogénéité ;
- remplir le récipient prévu à cet effet en prenant soin de ne pas laisser de vides, et araser ;
- verser la mousse dans le malaxeur, au taux d'injection souhaité ;
- attendre que le mélange devienne homogène et noter ce temps ;
- noter la puissance consommée par le moteur du malaxeur ;
- arrêter le malaxeur et prélever un échantillon pour effectuer un essai d'affaissement au cône d'Abrams ;
- effectuer également un essai d'adhérence ;
- récupérer l'échantillon et verser celui-ci dans le malaxeur ;
- remettre le malaxeur en fonctionnement ;

Si c'est nécessaire, répéter les actions énumérées ci-dessus depuis la génération de la mousse jusqu'à obtenir un taux d'injection optimal.

Remarque : on relèvera avant chaque essai la valeur de la puissance à vide du malaxeur afin de s'assurer du bon fonctionnement de ce dernier.

3.2 - Essai d'affaissement

Le mode opératoire à adopter pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est décrit de façon détaillée dans la norme AFNOR NF P 18-451. La figure 3 reprend ci-après le principe de l'essai d'affaissement.

3.3 - Essai d'adhérence

Le mode opératoire à adopter pour l'essai d'adhérence est le suivant :

- lubrifier les chanfreins du moule avec la mousse utilisée pour l'essai de comportement ;
- poser le moule sur la plaque en inox ;
- mettre en place un échantillon de sol dans le moule, sans le tasser. On procédera pour cela au remplissage du moule par couches successives, en piquetant le sol de façon à ne pas laisser de vides. On arasera ensuite le sol en excès ;
- lever la plaque à une extrémité, l'autre étant en butée ;
- lire l'angle que fait la plaque avec le socle lorsque le moule commence à glisser sur cette dernière.

Il sera nécessaire de faire deux autres mesures de l'angle, avec des échantillons de sol différents, afin de s'assurer :

- de l'homogénéité du mélange sol / mousse,
- de la lubrification correcte des chanfreins du moule.

On prendra la valeur moyenne des trois mesures.

4 - Mesure des paramètres

Les paramètres mesurés lors de l'essai sont les suivants :

- P , la puissance électrique consommée en Watts par le moteur du malaxeur, correspondant à l'énergie nécessaire pour mettre en rotation l'axe vertical muni des pales de malaxage ;
- A , l'affaissement en cm de l'échantillon de matériau moulé au cône d'Abrams, permettant ainsi de caractériser la plasticité du mélange ;
- α , l'angle de frottement limite exprimé en degrés.

5 - Présentation des résultats

Les résultats obtenus ainsi que les paramètres décrivant le sol et la mousse à tester seront reportés sur une fiche d'essais donnée ci-après.

Un tableau permettra de visualiser les résultats en fonction du taux d'injection de mousse. Il comprendra également la valeur de la perméabilité du mélange (voir le mode opératoire concernant

l'essai de perméabilité), ainsi que la consommation en produit(s) (tensioactif et adjuvant éventuel), ramenée en g/m^3 de sol en place.

Une fiche récapitulative des essais de comportement du mélange sol / mousse permettra enfin de reporter les résultats d'essais effectués sur un même sol, mais avec des compositions de mousse différentes. Elle est donnée ci-après.

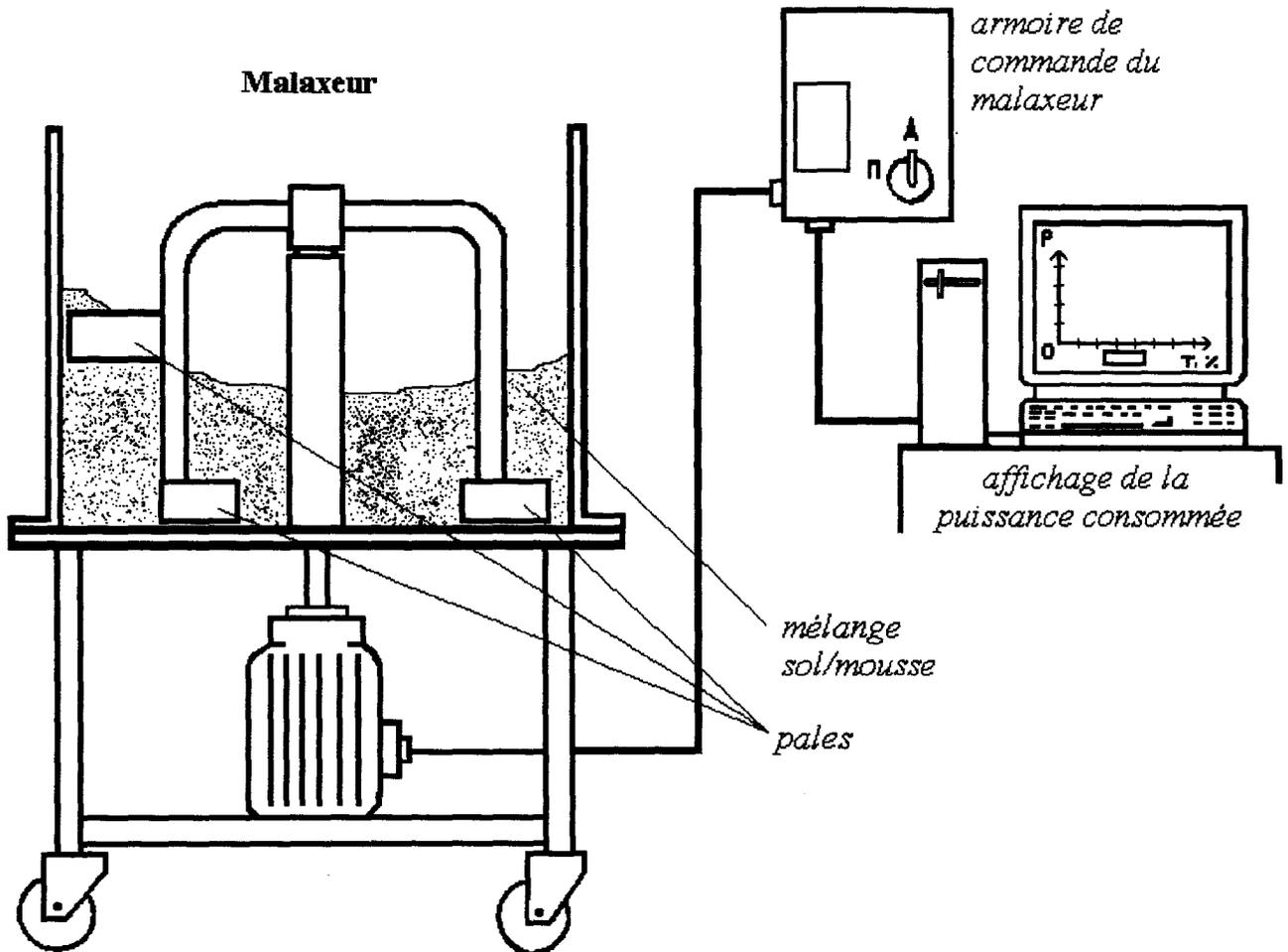


figure 1 : dispositif de l'essai de malaxage

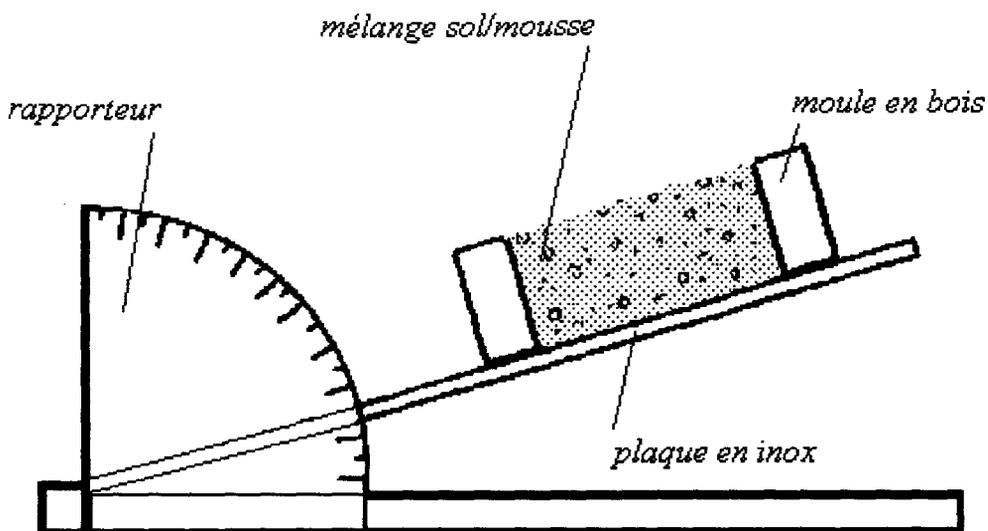


figure 2 : dispositif de l'essai d'adhérence

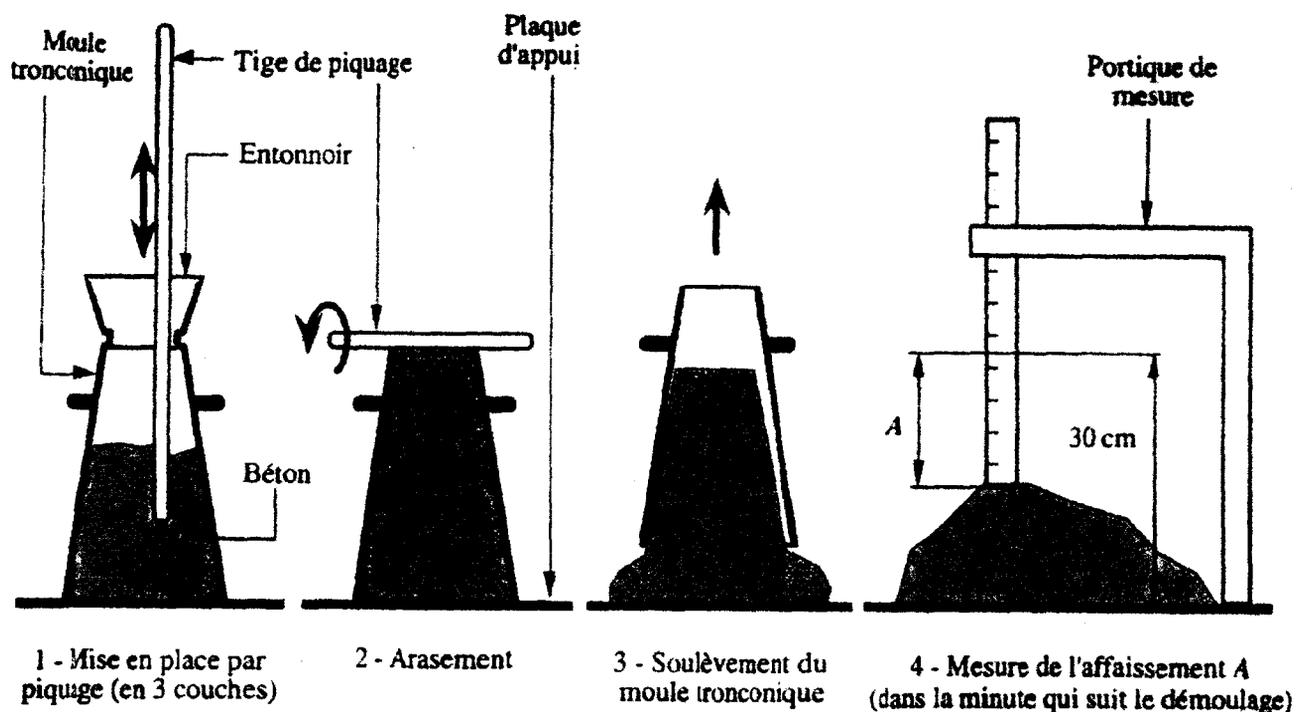


figure 3 : principe de l'essai d'affaissement
[d'après DUPAIN et al - 1995]

FICHE RÉCAPITULATIVE DES ESSAIS DE COMPORTEMENT DU MÉLANGE SOL / MOUSSE

Sol Nature : _____
 teneur en eau : _____ (fiche de sol n° _____)

Identification du produit utilisé et conditions de génération

	Produit	Concentration	Adjuvant	Concentration	Expansion	Débit	Générateur
M1							
M2							
M3							
M4							
M5							

(concentrations en %, débit en m³/h)

	T_i	P	A	α	k	C_t	C_a
M1							
M2							
M3							
M4							
M5							
Sol vierge							

Remarques - Conclusions :

Date de l'essai :

Opérateur(s) :

ESSAI DE PERMÉABILITÉ

1 Objet

Cet essai permet d'évaluer l'apport de la mousse en matière d'imperméabilisation du terrain, en mesurant la perméabilité du mélange pour différents taux d'injection de mousse.

2 - Matériel, sol et produit(s)

2.1 - Matériel

Le matériel permettant la préparation du mélange est le suivant :

- une augette et son couvercle,
- un ensemble de six récipients sans fond de diamètre interne 950 mm, hauteur 282 mm (2 litres soit 100%), 141 mm (50%), 113 mm (40%), 85 mm (30%), 56 mm (20%), 28 mm (10%),
- une spatule,
- une règle à araser,
- des accessoires permettant de manipuler le sol à tester.

Le matériel de mesure de la perméabilité est décrit ci-dessous :

- un perméamètre à charge constante, dont le corps est en deux parties. La partie supérieure est munie d'un trop-plein permettant d'établir le régime permanent ;
- des filtres à disposer en partie haute et en partie basse de l'échantillon,
- une auge munie d'un "bec verseur",
- un bidon contenant l'eau pour l'application de la charge hydraulique,
- une éprouvette graduée de 1000 ml,
- un récipient permettant de récupérer l'eau provenant du trop-plein (bêcher),
- un chronomètre,
- un thermomètre.

Le schéma de la figure 1 montre ci-après le dispositif de mesure de la perméabilité.

Remarque : on s'assurera avant chaque du parfait état de la cellule de perméabilité (joints, horizontalité).

2.2 - Sol

Les caractéristiques géotechniques du sol utilisé durant l'essai seront connues. La quantité de sol testée sera égale à 2 litres de matériau *considéré dans les conditions en place*, soit un poids égal à :

$$P = V \times \gamma_h$$

(en kN)

avec : γ_h , la masse volumique du sol à tester (en kN/m³),
 V , le volume du sol à tester (en m³).

Remarque : on prendra un soin tout particulier au contrôle de la teneur en eau du sol à tester. Pour les sols grenus, il est conseillé d'utiliser la méthode de la "poêle à frire", rapide et d'une précision satisfaisante.

2.3 - Produit(s)

On utilisera, pour réaliser l'essai, une mousse issue d'un banc de génération et caractérisée par :

- la nature du tensioactif et sa concentration,
- l'adjuvant éventuel utilisé et sa concentration,
- le coefficient d'expansion,
- les conditions de génération.

3 - Mode opératoire

Le mode opératoire à adopter pour l'essai de perméabilité est décrit par étapes.

3.1 - Préparation du mélange

- prélever 2 litres de matériau, (définition du poids, § paragraphe 2.2) ;
- vider celui-ci dans l'augette ;
- remplir de mousse le récipient sans fond correspondant au taux d'injection souhaité. Pour cela, poser fermement ce récipient sur le couvercle de l'augette, s'assurer d'un parfait remplissage (pas de vides) ;
- araser et démouler le contenu dans l'augette ;
- mélanger de façon homogène le sol et la mousse à l'aide de la spatule.

3.2 - Préparation de l'essai

- disposer un filtre à la base du perméamètre,
- remplir parfaitement la cellule avec le mélange jusqu'au niveau haut du premier élément,
- araser et disposer un filtre en partie haute de l'échantillon,
- monter et fixer correctement l'élément supérieur du perméamètre en s'assurant qu'il n'y a pas de risques de fuites.

3.3 - Application de la charge hydraulique

- remplir l'auge de réception d'eau jusqu'au niveau du bec verseur ; le remplissage est assuré lorsque l'eau en excès s'écoule par ce dernier. Attendre l'arrêt de l'écoulement ;
- ouvrir la vanne du bidon d'eau afin de saturer l'échantillon,
- dès que la partie supérieure du perméamètre est remplie (écoulement d'eau par le trop-plein du perméamètre), adapter le débit d'arrivée d'eau afin d'obtenir une charge constante (écoulement minimal par le trop-plein dans le bêcher),

3.4 - Mesure de la perméabilité

- placer l'éprouvette de 1000 ml sous le bec verseur ;
- après que l'ensemble des écoulements (arrivée d'eau, trop-plein, bec verseur) ait atteint un régime permanent, la mesure proprement dite peut débuter. Dès l'apparition d'une goutte d'eau au niveau du bec verseur, déclencher le chronomètre.

4 - Mesure des paramètres

Le paramètre mesuré au cours de l'essai correspondra au temps t nécessaire pour récupérer un volume V donné. On réalisera plusieurs mesures de t , notées t_i , pour un volume V_i (généralement égal à 100 ml), afin de contrôler l'évolution de k .

La valeur de la perméabilité k pour un essai à charge constante est donnée par la formule suivante :

$$k = \frac{V \times L}{H \times S \times t} \quad (\text{en m/s})$$

avec : V , le volume d'eau récupérée (m³),
 L , la hauteur de l'échantillon (m),
 H , la hauteur de charge (m),
 S , la section de l'échantillon (m²),
 t , le temps mis pour récupérer V (s).

Dans notre cas, le dispositif de mesure de la perméabilité présente les caractéristiques suivantes :

$$\begin{aligned} L &= 13 \text{ cm,} \\ H &= 19,5 \text{ cm,} \\ S &= 109,36 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

Soit, pour une mesure donnée :

$$k_i = \frac{60,96 \times V_i}{t_i}$$

La valeur de la perméabilité sera donc la moyenne arithmétique des k_i . Cette valeur sera exprimée en puissance de 10 avec un chiffre significatif pour la partie décimale ($3,1 \cdot 10^{-6}$ m/s par exemple).

Les critères d'arrêt de l'essai sont la durée conséquente de ce dernier ou une perméabilité qui augmente pour atteindre progressivement la perméabilité du sol seul. Cette dernière remarque met en avant la possibilité d'apprécier la tenue de la mousse dans le temps.

5 - Présentation des résultats

Les résultats obtenus ainsi que les paramètres décrivant le matériau à tester sont repris sur une fiche de résultats d'essais donnée ci-après.

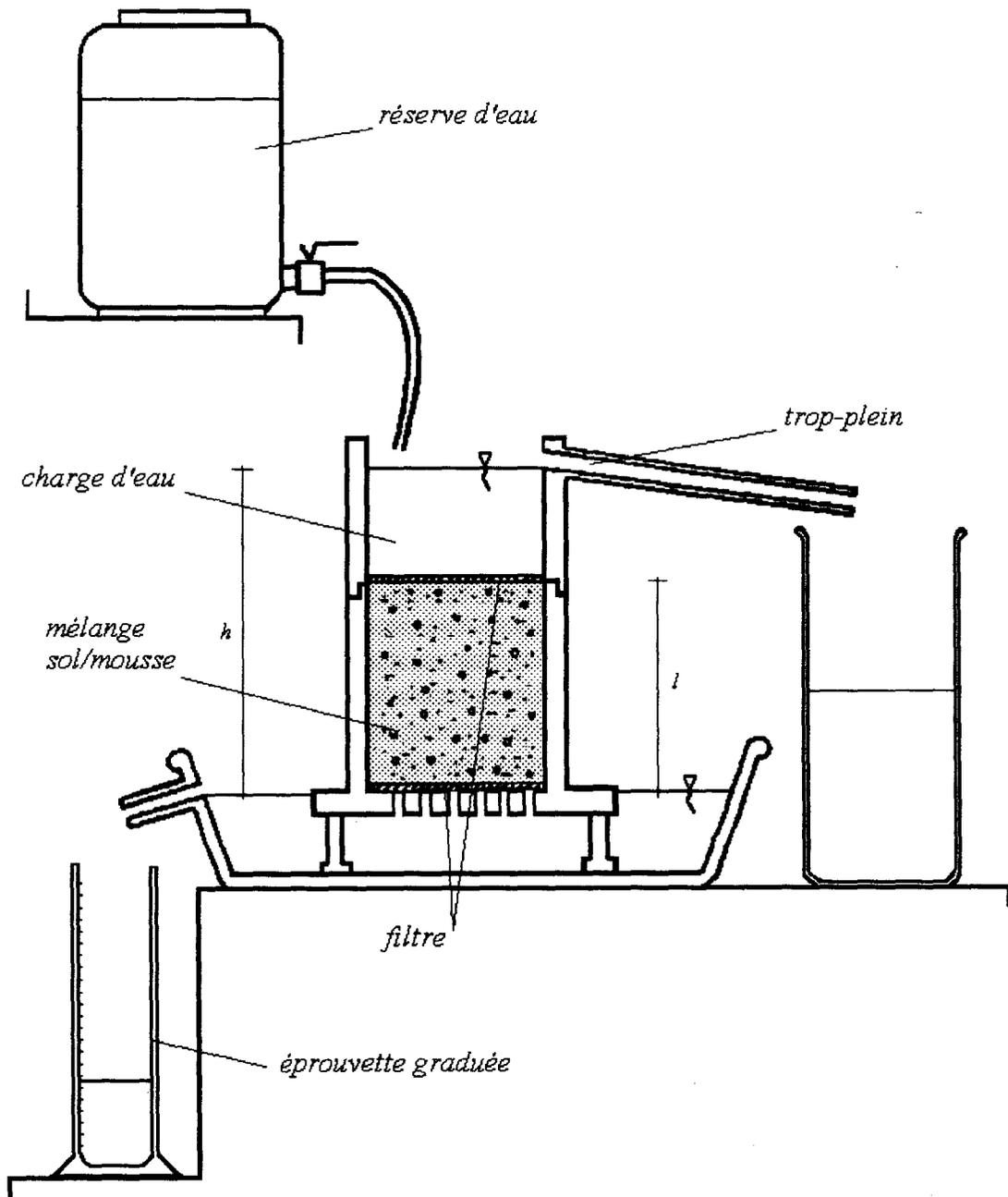


figure 1 : schéma du dispositif de mesure de la perméabilité

ESSAI D'IMPRÉGNATION

1 - Objet

Cet essai permet de modéliser le comportement d'un agent moussant au niveau du front de taille. La modélisation portera donc sur la capacité de l'additif à imprégner le terrain au droit de la tête de coupe, sans toutefois fuir dans ce dernier.

2 - Préambule

Afin de réaliser cet essai dans les meilleures conditions, il est important de mettre l'accent sur les points suivants de la modélisation :

- mise en place de l'échantillon de sol,
- définition des conditions de mise sous pression,
- injection de mousse en milieu confiné.

C'est pourquoi le mode opératoire reste relativement précis dans les grandes lignes, mais les paramètres doivent s'adapter aux valeurs susceptibles d'être rencontrées lors d'une étude.

3 - Matériel, sol et produit(s)

3.1 - Matériel

Ce matériel est composé par :

- une cellule de confinement, qui est reprise sur le schéma de la figure 1 ci-après. Le tableau 1 reprend quant à lui la nomenclature des équipements de la cellule ;
- un filtre circulaire en papier (de la taille du diamètre intérieur de la cellule) ;
- des grands réglés ;
- un chronomètre ;
- des accessoires pour manipuler le sol.

3.2 - Sol

Les caractéristiques géotechniques du sol utilisé durant l'essai seront connues. La quantité de sol testée variera selon le caractère plus ou moins perméable du terrain, soit un poids égal à :

$$P = V \times \gamma_h \quad (\text{en kN})$$

avec : γ_h , la masse volumique du sol à tester (en kN/m³),
 V , le volume du sol à tester (en m³).

Remarque : si l'on souhaite travailler à la teneur en eau de saturation, il est conseillé de choisir la valeur déterminée à partir de l'essai Proctor.

3.3 - Produit(s)

Le produit utilisé est une mousse, issue d'un banc de génération et caractérisée par :

- la nature du tensioactif et sa concentration,
- l'adjuvant éventuel utilisé et sa concentration,
- le coefficient d'expansion,
- les conditions de génération.

Pour obtenir le coefficient d'expansion $K_{confinement}$ désiré, sous une pression de confinement $P_{confinement}$, il convient de générer une mousse au coefficient d'expansion K_{atm} suivant :

$$K_{atm} = \frac{P_{confinement}}{P_{atm}} \times K_{confinement}$$

4 - Mode opératoire

Le mode opératoire à adopter pour l'essai d'imprégnation est décrit par étapes.

4.1 - Mise en place de l'échantillon de sol

- mettre le filtre en place dans le fond de la cellule ;
- introduire dans le réservoir inférieur l'eau jusqu'au niveau de la plaque ajourée et du filtre ;
- mettre en place l'échantillon de sol. Ce sol devra être compacté afin de lui donner un poids spécifique propre au poids spécifique désiré. Remplir la cellule en couches successives de 5 cm compactées de façon uniforme depuis le centre jusqu'au bord de l'échantillon ;
- mettre en place l'embase supérieure de la cellule ainsi que le dispositif de mise sous pression ;
- mettre en place les réglets permettant la mesure de la profondeur d'imprégnation dans la cellule le long de cette dernière.

4.2 - Confinement de l'échantillon

- ouvrir les deux vannes du bipasse d'arrivée d'air comprimé et mettre l'échantillon sous une pression P_e égale à la contre-pression d'eau souhaitée ;
- fermer la vanne alimentant en air comprimé le bas de l'échantillon ;
- procéder à la génération de mousse, sans l'injecter dans la cellule ;
- lorsque la mousse est homogène, diriger la mousse vers la cellule grâce au bipasse prévu à cet effet ;
- l'injection de la mousse permet également de passer, en partie haute de l'échantillon, d'une pression P_e à la pression de confinement P_c souhaitée ;

- une fois cette pression P_c obtenue, interrompre la génération de mousse et déclencher le chronomètre.

4.3 - Maintien des pressions

Si les pressions évoluent pendant la réalisation de l'essai, il est nécessaire de les maintenir à leur valeur initiale. Pour cela, il faut agir sur :

- P_c , par un apport d'air comprimé ou une réduction de cet apport,
- P_e , par un apport d'air comprimé ou un débit de fuite d'eau.

5 - Mesure des paramètres

Le paramètre relevé au cours de l'essai d'imprégnation sera la profondeur d'imprégnation de la mousse dans le sol à tester aux temps choisis ; deux profondeurs $h1$ et $h2$ seront au minimum relevées sur le pourtour de la cellule et on considérera la valeur moyenne. Les critères d'arrêt de l'essai sont la durée conséquente de ce dernier ou la stabilisation de la profondeur d'imprégnation.

6 - Présentation des résultats

Les résultats obtenus ainsi que les paramètres décrivant le matériau à tester sont repris sur une fiche de résultats donnée ci-après.

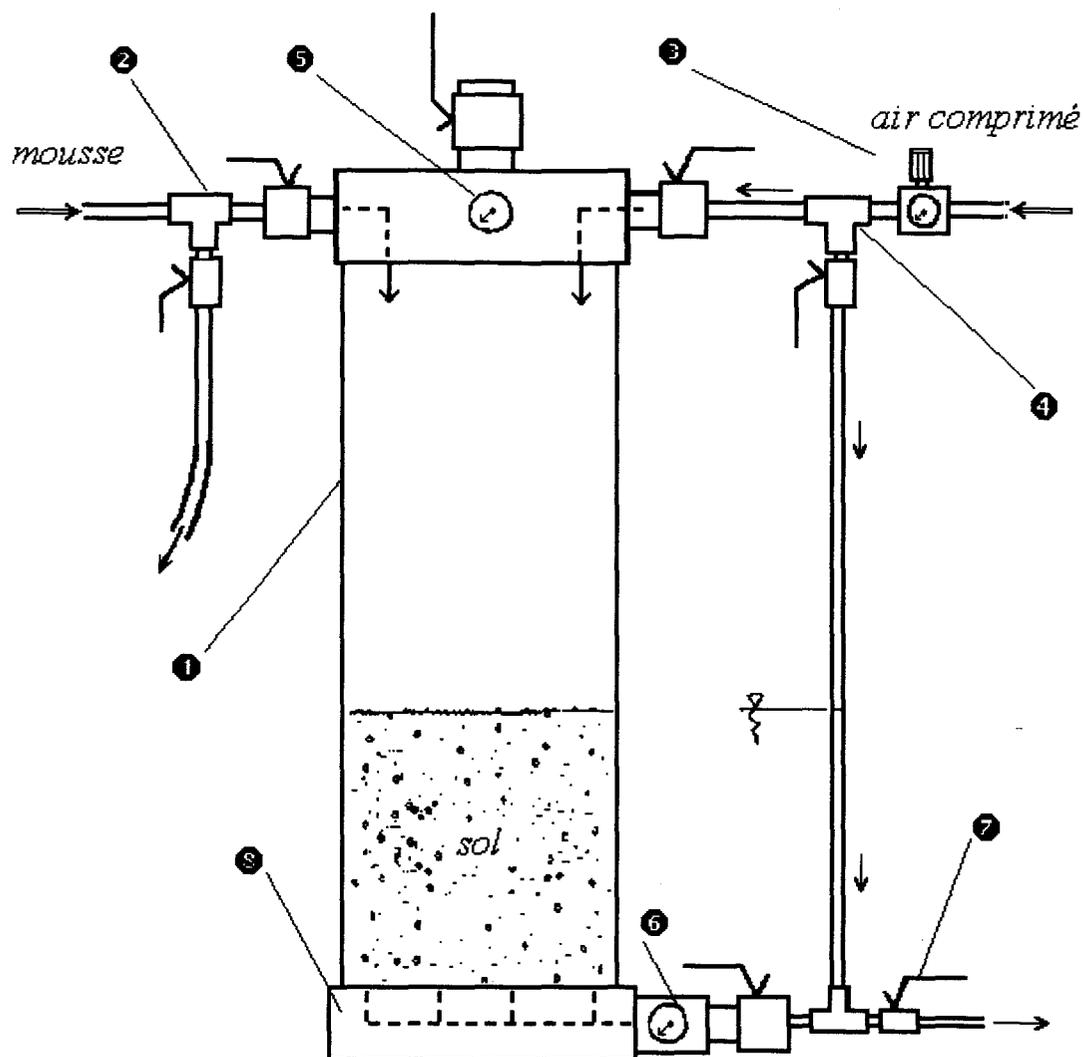
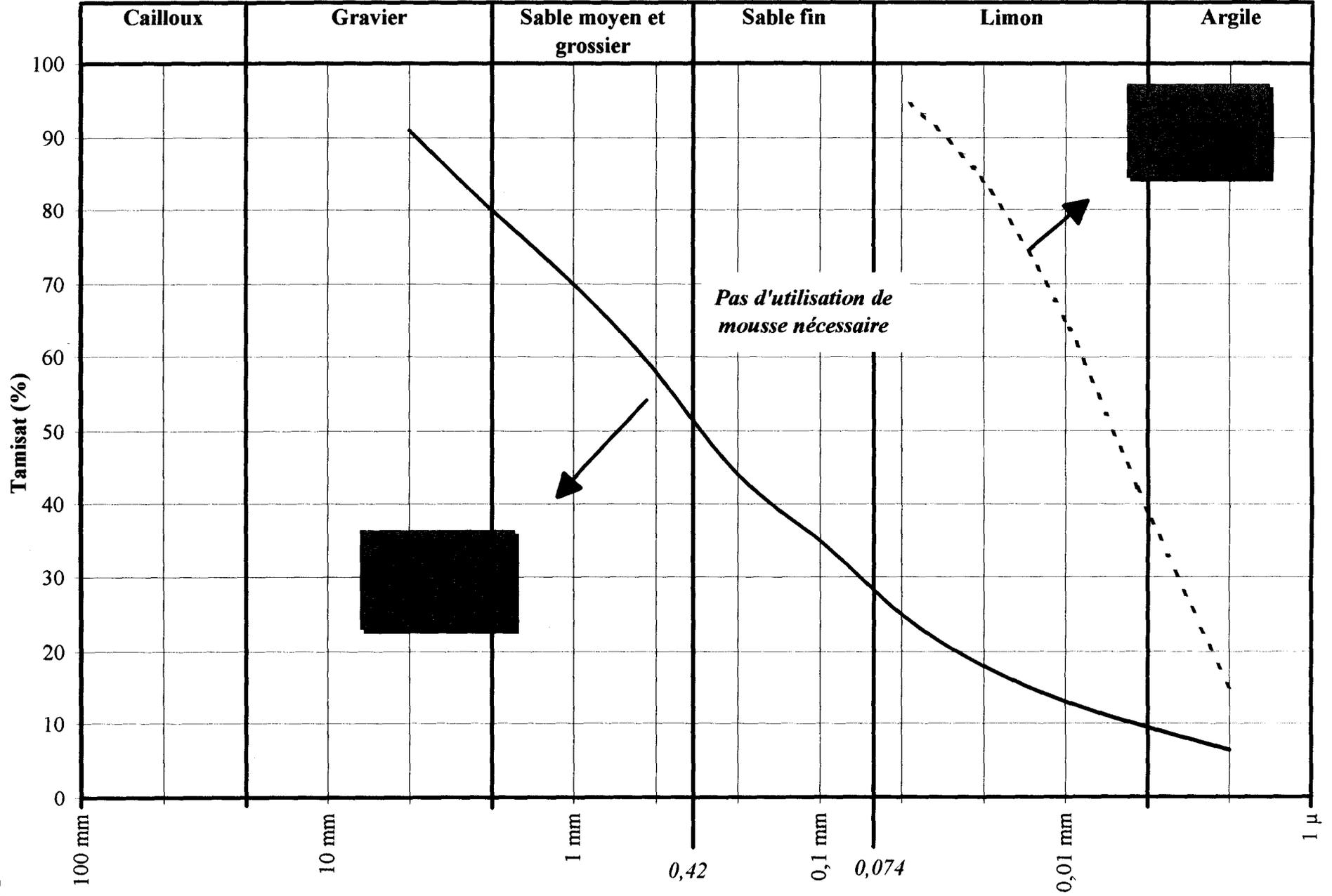


figure 1 : cellule de confinement

N°	Désignation	Fonction
①	Corps Plexiglas diamètre : 280 mm hauteur : 800 mm	Mise en place de l'échantillon de sol
②	Bipasse d'arrivée de la mousse	Injection de la mousse dans la cellule sous pression de confinement
③	Détendeur d'air comprimé	Arrivée d'air comprimé (avant le bipasse)
④	Bipasse d'air comprimé	Mise sous pression des parties haute/basse de l'échantillon
⑤	Manomètre	Contrôle de la pression de confinement
⑥	Manomètre	Contrôle de la contre-pression d'eau
⑦	Vanne	Assure un débit de fuite d'eau pour maintenir la contre-pression d'eau
⑧	Réservoir d'eau	Assure la contre-pression d'eau par l'intermédiaire de la pression d'air

tableau 1 : nomenclature des équipements de la cellule



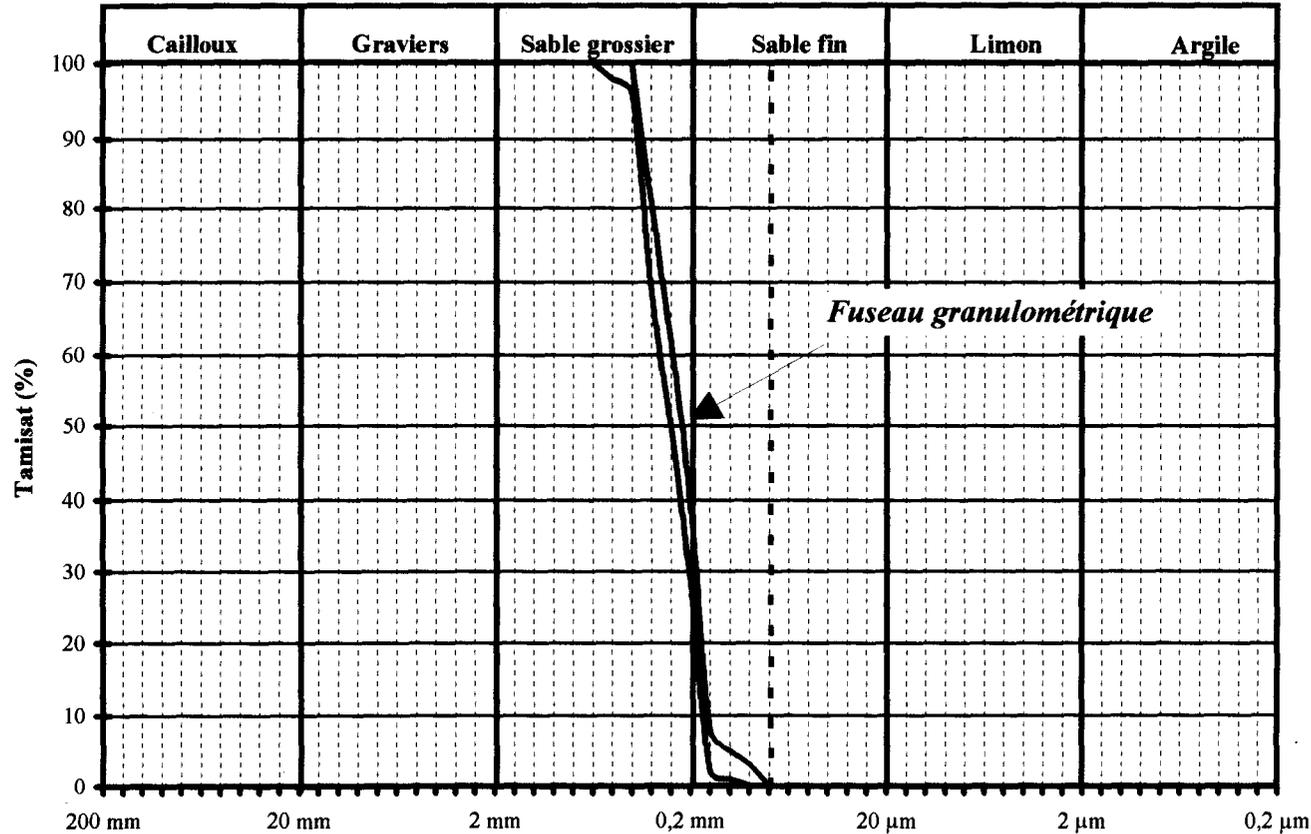
Annexe 8 : domaine d'utilisation du boucier à pression de terre avec injection de mousse

FICHE SIGNALÉTIQUE DU SOL S1

Matériau : sable fin siliceux
type 55

Provenance : Crépy-en-Valois (60)
Ets Biervalle

Dossier : P. N. Microtunnels
Opération n°5



e (%)	61
n (%)	38
k (m/s)	4.10E-4

γ_s	26,5
γ_d	16,5
γ_h	17
γ_{sat}	20,3

(en kN/m³)

Cu	1,5
Cc	1,0
A	----
Forme	----
S. sp. (cm ² /g)	125

Mat. siliceux	99,4
Mat. carb.	----

(en %)

Teneur en eau (%)			Limites d'Atterberg					Equivalent de sable (%)		VBta
<i>W_{nat}</i>	<i>W_{livré}</i>	<i>W_{sat}</i>	<i>W_p</i> (%)	<i>W_l</i> (%)	<i>I_p</i>	<i>I_c</i>	<i>I_l</i>	<i>ES piston</i>	<i>ES visuel</i>	
----	----	23	----	----	----	----	----	----	> 98	----

Date de caractérisation : 22 mars 1995

Opérateur(s) :

S. A. - M. / S. Q.

FICHE SIGNALÉTIQUE DU SOL S2

Matériau : sable siliceux
de l'Oise 0 / 4 mm

Provenance : La Fère (02)
Groupe Morillon-Corvol

Dossier : P. N. Microtunnels
Opération n°5

