



HAL
open science

Etudes au laboratoire et in-situ de l'effet d'agents moussants sur les Sables de Beauchamp excavés au tunnelier à pression de terre

Nour El Souwaissi, Irini Djeran-Maigre, Laurence Boulangé, Jean-Luc Trottin

► To cite this version:

Nour El Souwaissi, Irini Djeran-Maigre, Laurence Boulangé, Jean-Luc Trottin. Etudes au laboratoire et in-situ de l'effet d'agents moussants sur les Sables de Beauchamp excavés au tunnelier à pression de terre. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03720187

HAL Id: hal-03720187

<https://hal.science/hal-03720187v1>

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDES AU LABORATOIRE ET *IN-SITU* DE L'EFFET D'AGENTS MOUSSANTS SUR LES SABLES DE BEAUCHAMP EXCAVES AU TUNNELIER A PRESSION DE TERRE

LABORATORY AND *IN-SITU* STUDIES OF THE EFFECT OF FOAMING AGENTS ON "SABLE DE BEAUCHAMP" EXCAVATED BY EARTH PRESSURE BALANCE MACHINES EBPM

Nour EL SOUWAISSI^{1,2}, Irini DJERAN-MAIGRE¹, Laurence BOULANGE², Jean-Luc TROTTIN²

¹ Univ Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, EA7495, F-69621 Villeurbanne, France, nour.elsouwaissi@insa-lyon.fr, irini.djeran-maigre@insa-lyon.fr

² EIFFAGE Génie Civil, 78140 Vélizy-Villacoublay, France, nour.elsouwaissi@eiffage.com, laurence.boulang@eiffage.com, jean-luc.trottin@eiffage.com.

RESUME – Cet article présente l'effet de la mousse sur les Sables de Beauchamp excavés lors du creusement de la ligne 16-1 du métro parisien. Cette recherche est menée à l'aide d'essais de laboratoire, qui ont pour but d'identifier l'intervalle optimal des quantités d'agent moussant injecté dans le marin, et à l'aide de l'analyse des paramètres *in-situ*, basée sur l'exploitation statistique de la base des données d'excavation des différents EPBSs.

ABSTRACT - The study of the effect of foam injection into the soil "Sable de Beauchamp" encountered by the Paris Metro Line 16-1 excavation is presented. This work was conducted through laboratory tests, which aim to identify the optimal interval of foaming agent quantities, injected into the soil, and through the analysis of *in-situ* parameters that is based on the statistical exploitation of the excavation database of several EPBSs.

1. Introduction

Une excavation sécurisée, rapide et économique est l'une des préoccupations majeures des équipes de travaux souterrains, et c'est la raison pour laquelle les techniques de creusement sont en constante évolution et adaptations. Les techniques et innovations concernent l'amélioration des méthodes de creusement, l'augmentation de la cadence des tunneliers, la diminution des mouvements induits et la réduction d'énergie de la roue de coupe, etc. Le bon pilotage s'opère avec le bon choix des paramètres d'excavation selon les sols rencontrés. Les choix des techniques d'excavation mécanisée sont présentés dans AFTES-GT4R3F1 (2000). La technique d'excavation par tunnelier à pression de terre EPBS, la plus répandue actuellement, est la plus adaptée pour une grande partie des sous-sols de la région parisienne. Son principe repose sur la capacité du terrain excavé à transmettre les pressions nécessaires pour équilibrer le sol au front de taille. Dans le but d'atteindre ces objectifs, le sol doit avoir certaines caractéristiques : doit être homogène et compressible, doit avoir une perméabilité réduite, un frottement interne réduit et un faible potentiel de colmatage (Milligan, 2000, Vinai, 2008). Des additifs sont injectés sur différentes

parties de la machine, en particulier sur la roue de coupe et dans la chambre d'abattage, pour atteindre les caractéristiques visées. Ainsi les problèmes liés à l'alternance des argiles et aux sols de fortes perméabilités seront résolus et, plus généralement, les variations hydromécaniques et rhéologiques des sols dues à l'hétérogénéité du terrain seront maîtrisées (Ball et al., 2009). Parmi ces additifs, on cite la mousse à base d'un agent moussant comprenant des tensioactifs. Son rôle est d'agir sur la microstructure du terrain et de lui conférer une texture pâteuse. Si l'agent moussant est correctement choisi et les quantités optimales sont injectées, la stabilisation du front de taille, la prolongation de la durée de vie des outils, la réduction du couple de la roue de coupe et la moindre consommation d'énergie sont atteintes. Au fur et à mesure du creusement, toutes les données de l'excavation sont enregistrées et stockées. Malgré des essais au laboratoire au préalable du démarrage du chantier pour statuer sur les quantités d'agent moussant à injecter selon la couche géologique traversée, les enregistrements révèlent que les ajustements d'injections des agents moussants sont nécessaires compte tenu de la longueur excavée et des éventuelles non homogénéité du terrain. Ainsi un suivi à deux niveaux, au laboratoire et *in-situ*, semble indispensable. Les mesures au laboratoire ont pour but d'identifier l'intervalle optimal des quantités d'agent moussant injecté dans le sol. L'analyse des enregistrements *in-situ* suit l'effet de chaque agent moussant sur les paramètres d'excavations du tunnelier. Cette étude est menée à l'aide d'un couplage entre la méthode statistique d'Analyse en Composantes Principales des données enregistrées (ACP, développée ci-après) et l'exploitation statistique plus classique de ces mêmes données, pratiquée en phase opérationnelle du chantier.

2. Présentation du chantier

2.1 Tunneliers à pression de terre

Le réseau de transport parisien doit répondre à l'augmentation de la population et de ses besoins d'installation en périphérie de la ville. En France, le Grand Paris Express, est un projet en cours de construction, visant à résoudre ce problème en créant 4 nouvelles lignes de métro d'un total de 200 km : les lignes 15 – 16 – 17 et 18, en plus du prolongement des lignes 14 et 11. Ce travail de recherche met l'accent sur les pratiques actuelles d'excavation au tunnelier de la ligne 16-1 menées par Eiffage Génie Civil. Ces travaux consistent en la construction de 19,6 kilomètres de tunnel, 21 ouvrages annexes et de 5 stations. Ces lignes sont creusées à l'aide de 6 tunneliers à pression de terre de 3 diamètres différents: 7,75 m – 8,92 m et 9,87 m. Les équipes de la ligne 16-1 sont mobilisées 24h/7j pour garantir une excavation sécurisée dans les meilleurs délais. Un des suivis instantanés des paramètres de l'excavation s'effectue dans la chambre de pilotage. L'objectif étant de piloter l'excavation avec le moindre tassement, une bonne cadence et minimiser la consommation d'énergie tout en préservant les outils de la roue de coupe. Ce pilotage dépend fortement du contexte géologique. Une représentation géologique du tracé comme celle présentée sur la Figure 1 est toujours mise en disposition dans la chambre de pilotage, ainsi que le plan de consigne et de pilotage du tunnelier.

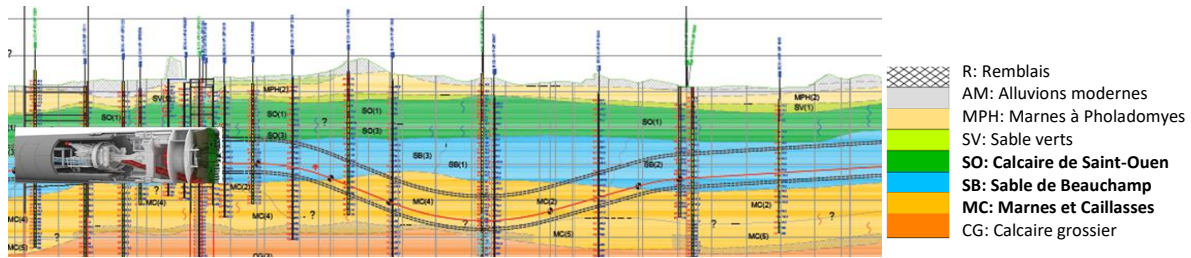


Figure 1 : Coupe géologique EPBM5

2.2 Sols rencontrés par les tunneliers

Pour garantir une gestion des marins idéale par chaque tunnelier, il faut prendre en compte le type de terrain rencontré et injecter la mousse adéquate. On peut identifier trois types de sols le long du tracé de la ligne 16-1 (Figure 1) : le Calcaire Saint-Ouen (SO), le Sable de Beauchamp (SB) et les Marnes et Caillasses (MC). Les analyses géotechniques menées sur les sondages carottés de la ligne montrent la forte hétérogénéité des différents types de terrain. Les résultats révèlent des caractéristiques générales (sableuses - argileuses) qui ont nécessité l'utilisation de la technique d'excavation mécanisée par EPBS. L'intégration dans les marins d'un agent moussant dépend des caractéristiques géotechniques du sol rencontré par le tunnelier. Ainsi une série d'essais d'identification et de caractérisation est menée au laboratoire pour caractériser les terrains à excaver, décider si un traitement est nécessaire et déduire les quantités d'agent moussant à injecter, dans le cas où le traitement est exigé. Parmi ces sols, le Sable de Beauchamp majoritairement rencontré par les tunneliers, est au centre de l'étude. Au début du projet et en phase de terrassement, des échantillons de sol de Sable de Beauchamp sont extraits du chantier puis caractérisés au laboratoire Geomas de l'INSA Lyon. Les caractéristiques du sol sont résumées dans le Tableau 1. La masse volumique du sol est de 2,1 Mg/m³.

Tableau 1 : Caractéristiques du sol

| | d<80 μm | VBS | Wn | WP | WL | Ip | Ic |
|--------------------|---------|-----|------|----|----|-----|-----|
| Sable de Beauchamp | 34% | 0,3 | 17 % | 12 | 19 | 6,7 | 0,3 |

La valeur du bleu de méthylène VBS et l'indice de plasticité Ip indiquent que le sol a un faible pourcentage d'argile, par conséquent une faible tendance à l'adhérence sur les outils d'excavation. Selon la classification française GTR (NF P 11 300), ce sol est classé B5, sable silteux. Le faible indice de consistance de l'échantillon (égal à 0,3) montre qu'il n'est pas recommandé en l'état pour l'excavation par EPBS, le matériau nécessite un traitement adéquat par un agent moussant (Thewes et Budach, 2010).

3. Traitement au laboratoire du sol avec la mousse

La mousse est formée d'un mélange des bulles d'air entourées par un liquide. Ce liquide est généralement composé de l'eau et d'un agent moussant comprenant du tensioactif (Guillermic, 2011). Pour générer la mousse et la mélanger avec le sol, les paramètres suivants sont définis dans la littérature (EFNARC, 2005) :

$$\text{concentration du tensioactif } c_f = 100 * \frac{\text{masse du tensioactif dans la solution moussante}}{\text{masse de la solution moussante}} (\%)$$

$$\text{taux d'expansion de la mousse } FER = \frac{\text{volume de la mousse}}{\text{volume de la solution moussante}}$$

$$\text{taux d'injection de la mousse dans le sol } FIR = 100 * \frac{\text{volume de la mousse}}{\text{volume sol à excaver}} (\%)$$

Dans le cadre de cette étude, 3 types d'agents moussants utilisés sur chantier sont analysés: A, B et C. Les paramètres de génération de mousse sont initialement choisis égaux à 1,5% (c_f) et 10 (FER), il s'agit de la moyenne des valeurs recommandées par les fournisseurs. Par la suite, ces valeurs ont été affinées suite aux études en laboratoire par rapport à chaque type de mousse.

3.1 Caractéristiques physiques mesurées au laboratoire

Des essais de demi-vie et des observations microstructurales sont menés pour les trois agents moussants. La demi-vie d'une mousse indique le temps nécessaire pour récupérer la moitié du volume de la solution moussante, qui a été initialement utilisée pour générer la mousse. La mesure de demi-vie est effectuée à l'aide d'un entonnoir filtrant suivant le protocole décrit dans EFNARC (2005). La mesure des diamètres des bulles au niveau microstructural est effectuée à l'aide d'un microscope Zeiss avec un grossissement de 25x, détaillée dans Djeran-Maigre et al. (2018).

Tableau 2 : Caractéristiques des mousses

| Mousse à base d'agent moussant | A | B | C |
|---|-----|-----|-----|
| Demi-vie (min) | 7 | 18 | 5 |
| Diamètre moyenne des bulles $\in [50 ; 1000]$ (μm) | 195 | 178 | 198 |

Selon les résultats présentés dans le Tableau 2, les agents moussants sont regroupés en deux catégories : (i) la première comprend une mousse plus stable (demi-vie élevée) avec des plus petites bulles, cas de l'agent moussant B, (ii) la deuxième catégorie est caractérisée par des mousses moins stables (demi-vie courte), avec des plus grandes bulles, cas d'agents moussants A et C. D'après EFNARC (2005), la mousse à stabilité moyenne est recommandée pour l'argile sableuse/le sable argileux/le limon sableux. La mousse à haute stabilité est recommandée pour les graviers argileux sableux.

3.2 Etude du comportement d'écoulement de la matière

3.2.1 Essais rhéologiques par affaissement

L'objectif d'essais d'affaissement est de déduire les paramètres optimaux de la mousse. Le test d'affaissement au moyen du cône standard (NF EN 12350-2) est très utilisé lors de la conception et la réalisation de travaux souterrains en raison de ses avantages en tant qu'un essai rapide et facile d'exécution, capable de donner la consistance optimale du sol pour l'excavation par EPBS. L'intervalle optimal d'affaissement pour une maniabilité adéquate du marin pour un EPBS varie entre 100 et 250 mm (Vinai, 2008). Cette forte variabilité de la valeur d'affaissement "s" optimale dépend du type de sol, du taux d'injection de la mousse et de moyen de la mise en place du matériau dans le cône (compactage ou non). Afin de déduire la quantité optimale de mousse, la procédure suivie dans cette recherche est basée sur la réalisation d'essais d'affaissement sur le Sable de Beauchamp traité avec 3 types

d'agents moussants à différents taux d'injection de mousse (*FIR* (%)) (Figure 2). Compte tenu du volume exigé pour mener un essai d'affaissement, un ou deux essais par *FIR* ont été conduits. L'augmentation de la valeur d'affaissement en fonction de *FIR*, est un moyen pour valider chaque mesure. Les paramètres optimaux correspondant à une texture pâteuse sont résumés dans le Tableau 3. Dans les trois cas, l'injection de mousse se limite à un *FIR* égal à 60% où la texture devient proche de celle d'une pâte. L'équivalence de ces paramètres optimaux de traitement de sol avec la mousse par rapport au volume d'agent moussant, exprimé en l par m³ du sol, est également présentée dans le Tableau 3.



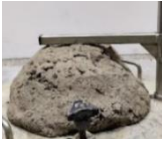



| A - $c_f=1,5\%$ et $FER=10$ | | B - $c_f=2\%$ et $FER=8$ | | C - $c_f=1,5\%$ et $FER=10$ | |
|---|---|---|---|--|---|
| FIR=50% | FIR = 60% | FIR=40% | FIR=60% | FIR=50% | FIR=60% |
|  |  |  |  |  |  |
| s=194 mm 2 essais | s=205 mm 2 essais | s=180 mm 1 essai | s=210 mm 1 essai | s=161 mm 1 essai | s=215 mm 1 essai |

Figure 2 : Essais d'affaissement sol + mousses

La quantité limitée du sol réel ne permet pas de mener un grand nombre d'essai, ainsi nous avons eu recours à un deuxième moyen de mesure de l'écoulement de la matière, décrit ci-dessous.

Tableau 3 : Paramètres optimaux des agents moussants

| agent moussant ↓ | c_f (%) | FER | FIR (%) | volume agent moussant (l/m ³) |
|------------------|-----------|-------|-----------|---|
| A | 1,5 | 10 | 50 - 60 | 0,75 - 0,9 |
| B | 2 | 8 | 40 - 60 | 1 - 1,5 |
| C | 1,5 | 10 | 50 - 60 | 0,75 - 0,9 |

3.2.2 Essais rhéologiques par une mesure directe de viscosité

Les essais d'affaissement par cône standard nécessitent une forte quantité de sol, qui est difficile à fournir dans le cas d'un sol réel. Les essais rhéologiques menés à l'aide d'un rhéomètre font partie d'essais d'écoulement de la matière et ont l'avantage de mesurer les paramètres rhéologiques, tels que la viscosité et la contrainte de cisaillement de l'échantillon, à partir de quelques grammes de sol. La limitation vient de l'exigence du tamisage du sol, fonction de l'entrefer de l'outil de mesure. Dans le cadre de ce travail de recherche, l'objectif des essais rhéologiques est de démontrer leur efficacité à déduire les quantités de mousse pour un traitement optimal du marin. Pour ce faire, une démarche de vérification de la texture pâteuse des échantillons est à effectuer. La première étape concerne le choix du système de mesure : les essais rhéologiques sont réalisés à l'aide du rhéomètre Anton Paar MCR52 avec un système plan-plan ayant une surface rugueuse, qui réduit l'effet de glissement de la paroi. L'entrefer doit être supérieur ou égal au cinquième du diamètre maximal des grains (Galli, 2016). En prenant en compte la recommandation de Mezger (2014) indiquant un choix d'entrefer égal à 1 mm, le sol doit donc être tamisé à 200 µm. Ces essais sont

adaptés pour les sols avec forte présence des particules de diamètre inférieur à 200 μm , ce qui est le cas de Sable de Beauchamp. La deuxième étape consiste à préparer l'échantillon : le sol est tamisé à 200 μm , ce qui correspond à 80% du pourcentage en poids du sol. Le sol est ensuite hydraté pour atteindre une teneur en eau égale à 17%. Les échantillons sont par la suite traités, chacun avec un des trois agents moussants suivant les paramètres déduits dans les essais d'affaissement qui correspondent à la texture d'une pâte : $c_f=1,5\%$, $FER=10$ et $FIR=60\%$, dans le cas d'agents moussants A et C, et $c_f=2\%$, $FER=8$ et $FIR=60\%$, dans le cas d'agent moussant B. La dernière étape, est celle de la mesure de viscosité : chaque échantillon est placé sur l'outil de mesure, et soumis à un gradient de cisaillement égal à $\dot{\gamma} = 1.74 \text{ s}^{-1}$, de l'ordre de la moyenne des 6 tunneliers : 2 tours/min. La viscosité des échantillons en fonction du temps est mesurée. Chaque essai est mené deux fois, la moyenne des viscosités est celle représentée sur la Figure 3. Les résultats montrent une diminution de viscosité en fonction du temps, due à la non-homogénéité initiale de l'échantillon, après un certain temps la viscosité atteint une asymptote. A l'état stable, la viscosité pour les différentes mousses varie entre 100 et 130 Pa.s.

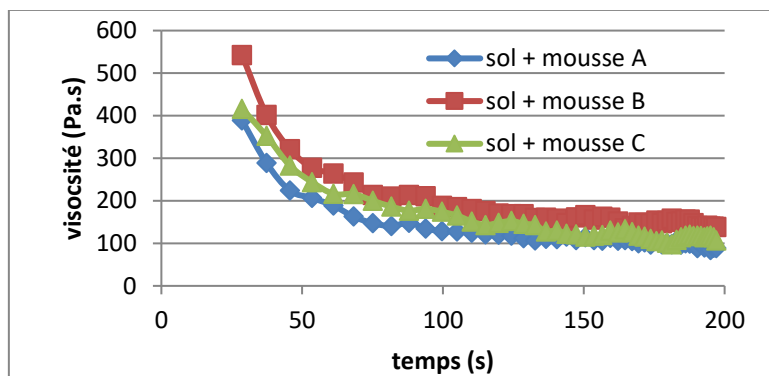


Figure 3 : Viscosité sol/mousses du Sable de Beauchamp tamisé à 200 μm et traité avec 3 différentes mousses

3.2.3 Calcul de la contrainte de cisaillement

Les valeurs de viscosité sont donc proches, comme les valeurs d'affaissement obtenues par les essais au cône standard. Dans le but de comparer l'écoulement avec les deux méthodes de mesure, affaissement et rhéologie, la contrainte de cisaillement τ est calculée. Dans le cas des mesures d'affaissement, cette contrainte est calculée à l'aide de l'équation de Murata (1984). Pour les mesures rhéologiques, τ est déduit par la formule $\tau = \eta * \dot{\gamma}$ (Mezger, 2014). Les contraintes de cisaillement calculées sont du même ordre de grandeur, celles calculées par le cône sont légèrement inférieures puisque les échantillons n'étaient pas soumis à un gradient de cisaillement (Tableau 4). Les essais rhéologiques peuvent alors être utilisés pour déduire les paramètres optimaux pour des sols traités tout en bénéficiant des faibles quantités de sol que de cette expérimentation exige. Les résultats d'essai direct sont plus fiables puisqu'ils représentent les conditions du chantier.

Tableau 4 : Calcul de la contrainte de cisaillement

| contrainte de cisaillement ↓ / mousse → | A | B | C |
|--|----------|----------|----------|
| $\tau_{\text{affaissement}}$ (Pa) (Murata, 1984) | 131 ± 21 | 204 ± 33 | 156 ± 21 |
| $\tau_{\text{viscosité}}$ (Pa) (Mezger, 2014) | 174 ± 11 | 226 ± 11 | 174 ± 11 |

4. Analyse des données enregistrées durant le creusement

L'analyse des paramètres *in-situ* est basée sur l'exploitation des données d'excavation, des différents EPBSs du chantier de la ligne 16-1, relevés en continu, et a comme objectif de corréliser les propriétés de l'agent moussant aux paramètres ainsi relevés, en fonction du terrain rencontré.

4.1 Etude préliminaire

Le choix de la méthode c'est porté sur l'Analyse en Composantes Principales ACP qui permet de visualiser plusieurs variables simultanément. A l'aide de cette méthode, les paramètres d'excavation sont représentés comme des vecteurs sur un cercle de corrélation; le cosinus de l'angle formé entre deux vecteurs est le coefficient de corrélation linéaire de ces deux variables. Après avoir mené plusieurs ACP sur les paramètres d'excavation, 6 variables parmi les 50 enregistrés sont choisies. Pour cette étude, seules 3 paramètres seront analysés. Les données sont subdivisées en fonction de la géologie permettant de poursuivre l'analyse ACP par tranche géologique. Les valeurs de ces paramètres sont ensuite comparées entre elles dans le but de la préconisation de l'agent moussant adéquat pour chaque type de sol à excaver.

4.2 Analyse en Composantes Principales

Trois cas d'ACP sont menés sur 3 variables extraites de l'excavation sur chantier : le volume de l'agent moussant injecté dans le marin par m^3 (0,7 et 0,95 l/m^3), le couple de la roue de coupe, la vitesse d'avancement du tunnelier qui se résument comme suit pour une excavation majoritairement dans du Sable de Beauchamp :

- cas (a) : 980 mètres linéaires, agent moussant A avec 0,73 l/m^3
- cas (b) : 800 mètres linéaires, agent moussant B avec 0,95 l/m^3
- cas (c) : 80 mètres linéaires, agent moussant C avec 0,77 l/m^3 .

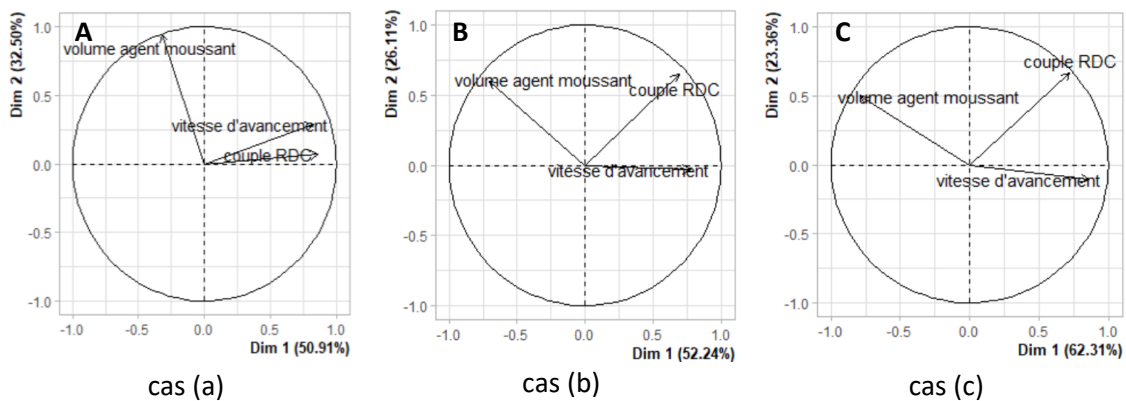


Figure 4 : Analyse en Composantes Principales

Le pourcentage d'information, représenté sur chaque cercle par la somme de pourcentage de chaque axe, est supérieur à 78% pour les 3 cas, ce qui permet d'avoir confiance aux analyses menées.

Effet de la mousse sur le couple de la roue de coupe : L'angle entre les deux vecteurs du volume de l'agent moussant et du couple de la roue de coupe sera analysé pour les 3 graphiques de la Figure 4. Cet angle est obtus pour les cas (a) et (c), ce qui indique que ces deux variables sont corrélées négativement entre elles. En d'autres

termes, si on augmente le volume de l'agent moussant, on réduit le couple de la roue de coupe. Ce résultat signifie que les agents moussants A et C injectés dans le sol au niveau de la roue de coupe avec une quantité de 0,73 et 0,77 l/m³, respectivement, possèdent un fort effet de fluidification du marin et de réduction du couple de la roue de coupe.

L'angle entre l'agent moussant et le couple de la roue de coupe pour l'ACP du cas (b) est légèrement obtus, plutôt proche de 90° ce qui indique que l'agent moussant B, injecté dans le sol avec une quantité égale à 0,95 l/m³, possède un faible effet de modification des propriétés du marin. Ce résultat est confirmé par les essais au laboratoire où le volume optimal de la mousse est plus élevé (Tableau 3).

Effet de la mousse sur la vitesse d'avancement de tunnelier : Dans le graphe (a), l'angle entre le volume d'agent moussant et la vitesse d'avancement est égal à 90°, ce qui indique que ces deux paramètres sont indépendants. Tandis que cet angle est obtus dans le cas des graphes (b) et (c), ce qui désigne que ces deux paramètres sont corrélés négativement entre eux. Ces deux résultats incohérents au premier abord, sont expliqués par le mode d'injection d'agent moussant et sont liés par la formule suivante :

$$\text{débit d'agent moussant (l/min)} = \pi R^2 (\text{m}^2) * \text{volume d'agent moussant (l/m}^3) * \text{vitesse d'avancement (m/min)}$$

Si la vitesse d'avancement est forte, le mode d'injection d'agent moussant adapté est le "mode automatique", qui impose un volume d'agent moussant constant indépendamment de la vitesse d'avancement (cas (a) de la Figure 4).

Pourtant, si la vitesse d'avancement se réduit, le mode d'excavation passe au "mode semi-automatique", qui impose un débit d'agent moussant fixe pour une longueur donnée. Ainsi, plus le tunnelier avance vite, moins d'agent moussant est injecté (cas (b) et (c) de la Figure 4). Donc, dans le cas de Sable de Beauchamp, les deux agents moussants A et C avec une quantité injectée d'environ de 0,75 l/m³, altèrent les caractéristiques rhéologiques du sol, pourtant l'agent moussant A est celui qui entraîne une plus forte vitesse d'avancement du tunnelier. Pour ce qui est de la préconisation de la mousse à retenir pour excaver le SB, le choix va vers le cas (a) agent moussant A utilisé dans le plus grand nombre d'anneaux qui donne la plus forte vitesse d'avancement et la plus faible quantité d'injection.

5. Conclusions

Des essais sont effectués avant le démarrage des travaux et ils se sont poursuivis tout le long de l'excavation afin de suivre, au plus près, les évolutions des différents paramètres. Le retour d'expérience des essais *in-situ* n'est pas toujours suffisant pour recommander un agent moussant, puisque les conditions géologiques sont variables. Ces retours doivent être complétés et renforcés par des essais en conditions contrôlées au laboratoire. Ce travail de recherche intervient ainsi à deux niveaux, au niveau d'essais au laboratoire et au niveau d'une analyse des données *in-situ*, et les principales conclusions se résument comme suit:

- vérification et mesures de l'effet lubrifiant des agents moussants sur le Sable de Beauchamp
- recommandation d'utilisation du rhéomètre, à la place du cône standard, pour déduire les quantités optimales d'injection

- déduction des relations entre les paramètres mécaniques du tunnelier à pression de terre et ceux d'injection de la mousse en fonction du terrain traversé
- préconisation d'une formulation pour le traitement du Sable de Beauchamp.

Ce complément des données permet aujourd'hui d'enrichir la base des données d'excavations, de produire un retour d'expérience aux praticiens pour la dernière phase de creusement du chantier et de l'utiliser pour les excavations à venir. La méthode d'analyse présentée dans cette étude est adaptée pour l'excavation par tunnelier à pression de terre puisque son domaine d'application exige un terrain sableux argileux comme celui de notre étude.

6. Références bibliographiques

- AFTES, 2000. Choix des techniques d'excavation mécanisée, Recommandations. Revue TOS n°157, 30 p.
- Ball R.P., Young D.J., Isaacson J., Champa J., Gause C. (2009). Research in soil conditioning for EPB tunnelling through difficult soils. In: Rapid excavation and tunneling conference (RETC), Las Vegas, United States, pp. 320–333.
- Murata J., 1984. Flow and deformation of fresh concrete. *Matériaux et Constructions*, volume 17, no. 3, pp. 117–129.
- Djeran-Maigre I., Dubujet P., Vogel T.M., 2018. Variation over time of excavated soil properties treated with surfactants, *Environmental Earth Sciences*, vol.77, n° 3.
- EFNARC, 2005. Specifications and guidelines for the use of specialist products for mechanized tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock. EFNARC, UK, 45 p.
- Galli M. (2016). Rheological characterisation of Earth-Pressure-Balance (EPB) support medium composed of non-cohesive soils and foam. Ph.D. thesis, Ruhr-University Bochum, Germany, 383 p.
- Guillermic R.-M. (2011). Propriétés physico-chimiques des mousses: Études approfondies sur des mousses modèles et études exploratoires sur de nouvelles mousses. Ph.D. thesis, Université de Rennes, Rennes, France, 213 p.
- Milligan, G., 2000. Lubrication and soil conditioning in tunneling, pipe jacking and microtunneling, A state-of-the-art review. Geotechnical Consulting Group, 46 p.
- Mezger T., (2014). Rhéologie appliquée. Anton Paar. 192 p.
- Thewes M., Budach C. (2010). Soil conditioning with foam during EPB. *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 3, pp. 256-267.
- Vinai R., Oggeri C., Peila D. (2008). Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 308-317.