

LE LAVAGE DES SABLES DE BEAUCHAMP EXCAVÉS : UNE OPPORTUNITÉ DE VALORISATION DES DÉBLAIS

THE CHALLENGE OF BEAUCHAMP SANDS' RECOVERY: OPPORTUNITY OFFERED BY WASHING STAGE

**Isabelle MOULIN⁽¹⁾, Thomas MILLAN⁽¹⁾, Julian MARLINGE⁽²⁾,
Grégoire PRIOL⁽³⁾, Stéphane GAFFIÉ⁽³⁾**

⁽¹⁾ LERM Groupe SETEC, 42/52 quai de la Rapée – CS 71230, 75583 Paris cedex 12

⁽²⁾ TERRASOL Groupe SETEC, 42/52 quai de la Rapée – CS 71230, 75583 Paris cedex 12

⁽³⁾ Société du Grand Paris, 30 avenue des fruitiers, 93200 Saint-Denis, France

1. INTRODUCTION

Le projet de construction du Grand Paris Express représente environ 200 km de lignes de métro et 68 nouvelles gares, qui généreront près de 43 millions de tonnes de matériaux excavés. Sur toute la durée du projet, la quantité de déblais produite chaque année en Île-de-France augmentera de 10 à 20%. La réutilisation de ces matériaux d'excavation est un formidable enjeu environnemental pour la Société du Grand Paris qui, dans le cadre de la COP 21, a pris l'engagement de développer une économie circulaire de la gestion des déblais et ainsi favoriser la valorisation des matériaux excavés.

Parmi les formations géologiques rencontrées, la formation des Sables de Beauchamp représente une part notable des matériaux excavés avec plusieurs millions de tonnes, provenant principalement d'excavation au tunnelier pour les tronçons de tunnels circulaires comme d'excavations traditionnelles pour la construction de gares et d'ouvrages émergents.

La valorisation des Sables de Beauchamp excavés dans les filières traditionnelles de type remblais ou couche de forme

apparaissant limitée en regard des volumes générés et des caractéristiques attendues des matériaux en sortie de tunnelier, la Société du Grand Paris a engagé une étude des opportunités de valorisation qu'apporterait un lavage desdits sables. En effet, la présence de fines argileuses mais également leur teneur en sulfates apparaissent comme des freins à leur valorisation dans la filière matériaux hydrauliques (mortier, béton, etc.) qui serait susceptible d'offrir des opportunités notamment sur les chantiers du projet eux-mêmes.

Avant de mener une campagne d'essais pilotes nécessitant des quantités de matériaux importantes, une première phase d'essais en laboratoire a été réalisée avec les objectifs :

- d'évaluer les ordres de grandeurs des ratios fraction sableuse/fraction fines ;
- de qualifier les fractions sableuses obtenues vis-à-vis du référentiel granulats pour béton ;
- de qualifier les fractions fines vis-à-vis de filières industrielles.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1. Matériaux d'étude

Les matériaux d'études proviennent notamment de 3 sondages carottés (référéncés A, B et C) spécialement dédiés à la problématique de valorisation des matériaux d'excavation et réalisés sur le tracé de la ligne 16 du Grand Paris Express.

Dans ce secteur, la formation des Sables de Beauchamp, d'en moyenne 10 mètres d'épaisseur, située dans la nappe phréatique, est constituée de sables fins à très fins présentant des passages limono-argileux. Les campagnes de reconnaissance préalable effectuées dans le cadre du projet mettent en évidence des passages latéraux entre les termes sans toutefois identifier de structuration continue en bancs. Les horizons argileux semblent présents de manière diffuse dans l'épaisseur de la couche, s'agglomérant ponctuellement pour former un horizon argileux mieux individualisé mais discontinu à l'échelle du projet. Par ailleurs, cette formation peut contenir des inclusions gypseuses diffuses, plus rarement des bancs, ainsi que des lentilles gréseuses massives mais d'extensions limitées.

Les Sables de Beauchamp sont encadrés par les Marnes et Caillasses (formation sous-jacente, à dominante marneuse présentant des intercalations calcaires d'épaisseur pluri-centimétrique, localement associées à des faciès de substitution du gypse), et par le Marno-Calcaire de Saint Ouen (formation sur jacente à forte dominante marneuse et à bancs de calcaires tendres).

Afin d'augmenter la représentativité des échantillons, les prélèvements dans les carottes ont été réalisés :

- soit sur environ 3 mètres de hauteur permettant de caractériser la partie supérieure (1/3 sup.), la partie intermédiaire (1/3 int.) et la partie inférieure (1/3 inf.) des Sables de Beauchamp ;
- soit sur environ 10 mètres de hauteur correspondant à la hauteur du tunnel (HT). Dans ce cas, les Sables de Beauchamp (SB) peuvent être en mélange, soit avec la formation du Calcaire de Saint Ouen (SO) lorsque le tracé du tunnel est plus proche de la surface, soit avec les Marnes et Caillasses (MC) quand il est plus profond.

Les échantillons pour essais ont été préparés selon les règles de l'art par phases successives d'homogénéisation et quartage. En cas de besoin, un concassage modéré des particules supérieures à 4 mm a été réalisé.

	HT (SO + SB) Sondage A	1/3 sup. Sondage A	HT (SO + SB) Sondage B	1/3 int. Sondage B	HT (SB + MC) Sondage C	1/3 int. Sondage C
Paramètres physiques						
Passant à 1 mm (%)	94	94	88	100	90	92
Passant à 315 µm (%)	91	93	82	99	85	89
Passant à 80 µm (%)	48	64	48	76	64	82
Indice de plasticité Ip		8,7		8,2		18,7
Particules < 2 µm (%)		4,9		7,9		
VBS (g/100g)	0,59	0,77	0,39	1,32	0,90	2,01
Paramètres chimiques						
Sulfates totaux (mg/kg)	2600	3100	4600	4300	6200	5100
Soufre total (mg/kg)	3700	5100	3500	6800	6000	7200
Paramètres sur éluat après lixiviation (NF EN 12457-2)						
Sulfates lixiviés (mg/kg)	1490	1160	554	1590	1590	2080
Fluorures lixiviés (mg/kg)	5,4	5,1	6,1	6,6	8,3	7,6
Molybdène lixivié (mg/kg)	0,48	0,40	0,20	0,30	0,50	0,40
Fraction soluble (mg/kg)	2860	2910	1280	3560	4330	5880

Tableau 1 : Caractéristiques des échantillons utilisés lors des essais de lavage en laboratoire

Les échantillons ainsi constitués ont subi une caractérisation détaillée comprenant :

- une caractérisation chimique :
 - détermination de la teneur en soufre, sulfates et fluorures totaux par chromatographie ionique après attaque acide ménagée à l'acide chlorhydrique ;
 - détermination de la teneur en soufre total ;
 - détermination de la teneur en molybdène par spectrométrie d'émission atomique par plasma induit (ICP) après attaque à l'eau régale ;
- une détermination du potentiel polluant au moyen de l'essai de lixiviation NF EN 12457-2 et analyse de l'éluat selon la norme NF EN 16192 ;
- une caractérisation minéralogique et microscopique :
 - analyse des phases argileuses par diffraction des rayons X ;
 - analyse cristallographique quantitative par diffraction des rayons X ;
 - examen au microscope électronique à balayage (MEB) couplé à l'analyse qualitative élémentaire par spectrométrie X ;
- une caractérisation physique :
 - détermination des limites d'Atterberg selon la norme NF P 94-048 ;
 - analyse granulométrique selon la norme NF P 94-056 ;
 - détermination de la teneur en particules inférieures à 2 μm par sédimentométrie ;
 - détermination de la valeur au bleu de méthylène (VBS) selon la norme NF P 94-068.

- Une sélection d'échantillons a été réalisée permettant d'évaluer :
 - l'impact du caractère plus ou moins argileux des Sables de Beauchamp ;
 - l'impact de teneurs plus ou moins importantes en sulfates et fluorures lixiviés ;
 - l'impact des mélanges avec d'autres formations géologiques.

Le Tableau 1 présente les six échantillons sélectionnés et leurs différentes caractéristiques physiques, chimiques et environnementales.

La détermination de la teneur en soufre total et en sulfates totaux des différents échantillons a permis de montrer que les Sables de Beauchamp ne contiennent au maximum que 50 % de soufre sous forme de sulfates. Des observations par microscopie électronique à balayage (MEB) des échantillons ont permis de mettre en évidence que le soufre peut prendre quatre spéciations :

- Soufre diffus au sein de la matrice en proportion plus ou moins importante, a priori sous forme sulfates ;
- Cristaux de sulfure de fer de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Les faciès de pyrite framboïdale observés témoignent de l'origine bactérienne de la transformation des sulfates en sulfures (Figure 1 a) ;
- Petits cristaux de sulfates de calcium néoformés de quelques micromètres (Figure 1 c) ;
- Gros cristaux automorphes de sulfates de calcium d'une centaine de micromètres, et dans une moindre mesure de strontium (quelques dizaines de micromètres) présents ponctuellement (respectivement Figure 1 b et d).

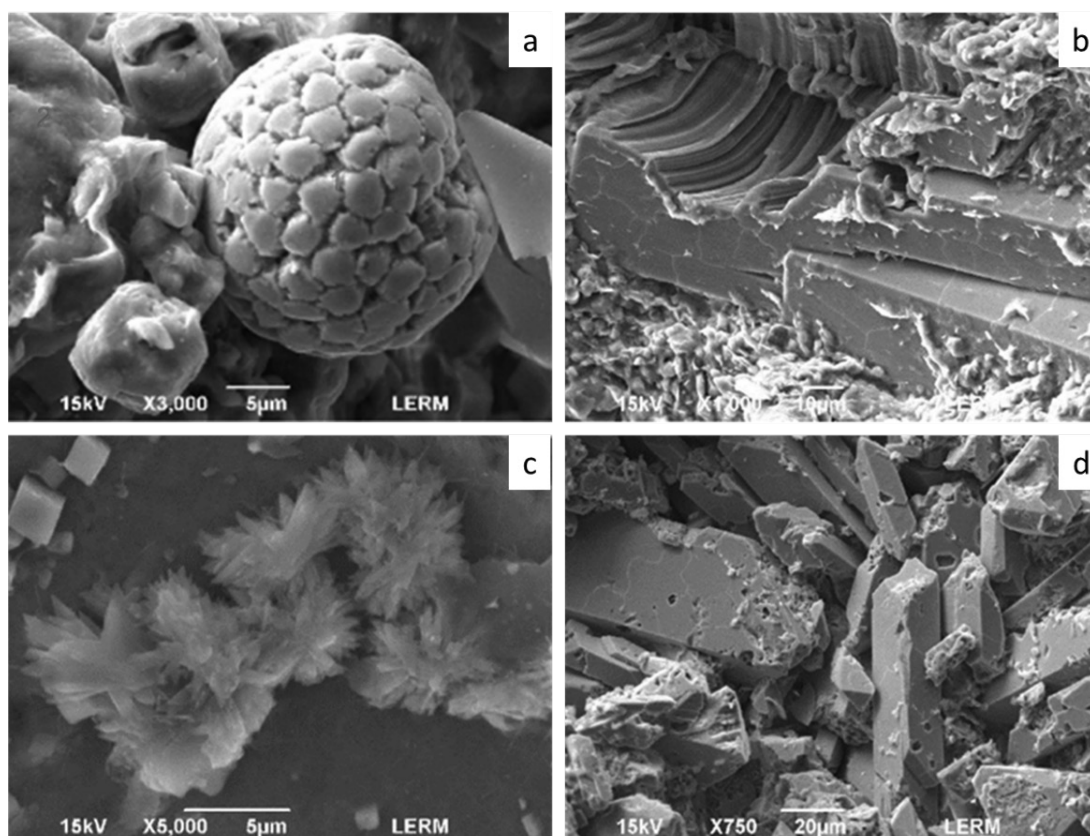


Figure 1 : Observations en microscopie électronique à balayage (MEB) des Sables de Beauchamp - a : sondage A, pyrite framboïdale (1) et matrice silicatée (2) ; b : sondage A, détail des gros cristaux de sulfates de calcium ; c : sondage B, détail des petits grains de sulfates de calcium recrystallisés en surface d'un grain de quartz ; d : sondage A, détail des cristaux de sulfates de strontium

2.2. Méthodes

2.2.1. Protocole d'essais

Un essai de lavage en laboratoire ne peut pas reproduire réellement les conditions d'un lavage industriel. Le protocole d'essai mis en place, bien que très simple, s'appuie néanmoins sur des paramètres inspirés des conditions d'un lavage de sable industriel par hydrocyclone :

- des rapports liquide / solide (L/S) de même ordre de grandeur ;
- des temps de contact de même ordre de grandeur ;
- un seuil de coupure atteignable par ce type d'installation industrielle ;
- la création d'un vortex par une vitesse d'agitation élevée.

Les essais de lavage ont été menés de la manière suivante :

- Reconstitution d'un matériau pâteux par ajout d'eau (teneur en eau de 50%) 24h avant la réalisation de l'essai ;
- Mise en pulpe du matériau par un ajout d'eau au rapport Liquide / Solide (L/S) souhaité ;
- Agitation par un malaxeur à hélice à une vitesse de 1500 tours/minute pendant 3 minutes permettant de créer un vortex ;
- A l'arrêt du malaxage, reprise de la pulpe sur une colonne de tamis de manière à séparer la fraction fine ($< 63 \mu\text{m}$) du sablon ($> 63 \mu\text{m}$) ;
- Filtration du mélange eau + fines à $0,45 \mu\text{m}$ directement après le lavage ;
- Les fractions fines et sableuses sont ensuite homogénéisées et préparées conformément aux référentiels des essais de caractérisation prévus. L'eau de lavage est conservée pour analyses.

La Figure 2 résume le protocole adopté pour les essais de lavage en laboratoire et détaille les essais de caractérisation réalisés sur chaque sous-produit.

2.2.2. Caractérisation des produits de lavage

Comme indiqué sur le schéma de la Figure 2, les produits de lavage ont été caractérisés de manière à évaluer l'impact du lavage sur leur potentiel polluant, d'une part, et sur leur potentiel de valorisation, d'autre part.

Le potentiel polluant a été caractérisé par l'intermédiaire de l'essai de lixiviation NF EN 12457-2 et l'analyse des éluats obtenus (teneurs en sulfates et fluorures lixiviés, fraction soluble) selon la norme NF EN 16192 et conformément aux critères de mise en centre de stockage des déchets inerte (arrêté du 12 décembre 2014).

La caractérisation chimique et minéralogique est identique à celle pratiquée sur les matériaux avant lavage. Les fractions sableuses ont été caractérisées selon les exigences de la norme granulats NF P 18-545.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Répartition fraction sableuse / fraction fine

La Figure 3 présente, pour les essais de lavage réalisés avec un rapport Liquide/Solide de 4, la répartition des fractions sableuses et fines obtenues. La proportion de fraction sableuse varie entre 20 et 75% selon les essais, et entre 55 et 75% pour les échantillons moyennés sur une hauteur de tunnel.

L'essai conduisant à la proportion de fraction sableuse la plus faible (tiers intermédiaire des Sables de Beauchamp du sondage C) correspond à un échantillon relativement argileux (VBS de 2 g/100g).

Le protocole d'essais de lavage ne reproduisant pas réellement une séparation industrielle sur hydrocyclone, ces proportions

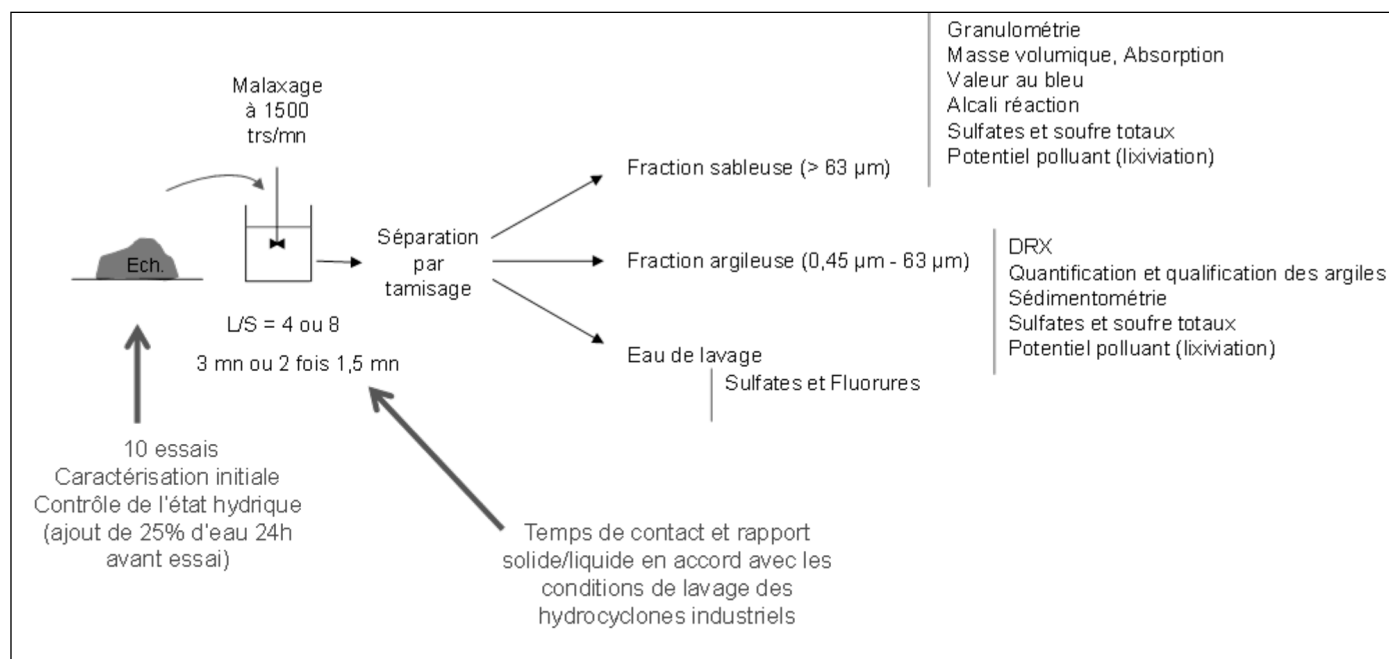


Figure 2 : Description du protocole d'essais de lavage des Sables de Beauchamp en laboratoire

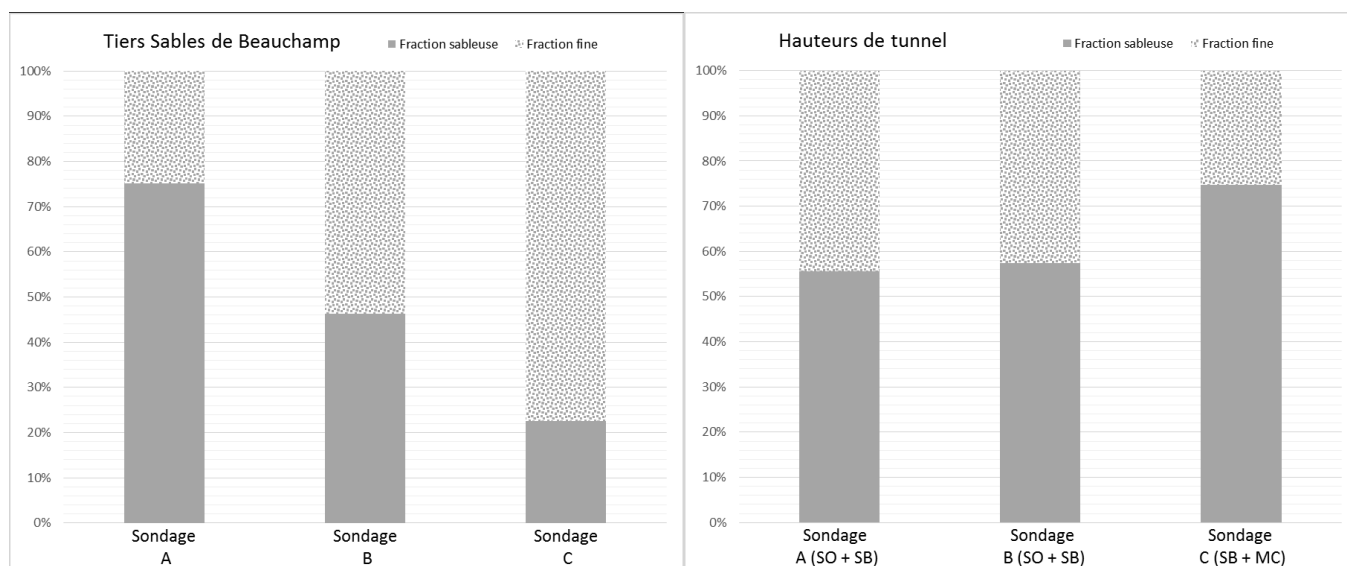


Figure 3 : Répartition entre la fraction sableuse et la fraction fine suite aux essais de lavage réalisés avec un rapport Liquide/Solide de 4.

seront à préciser par des essais sur installation pilote, puis industrielle.

3.2. Impact du lavage sur le potentiel polluant des matériaux

Certains matériaux étudiés montrent des teneurs en sulfates lixiviés et une fraction soluble (après lixiviation NF EN 12437-2) dépassant les critères de mise en centre de stockage pour déchets inertes soit 1 000 mg/kg de masse sèche (MS) pour les sulfates et 4 000 mg/kg MS pour la fraction soluble (Tableau 1). Les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présentent l'évolution de ces paramètres pour les fractions sableuses et les fractions fines issues de l'essai de lavage. On notera que la teneur en sulfates lixiviés est systématiquement plus faible dans les produits de lavage que dans l'échantillon initial. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre que la fraction soluble évolue de la même manière sauf pour l'échantillon moyenné sur la hauteur du tunnel du sondage A (fraction soluble dans la fraction argileuse légèrement plus élevée que dans l'échantillon avant lavage). Ainsi, toutes les fractions sableuses et les fractions fines respectent les seuils d'acceptation en installation de stockage de déchets inertes (ISDI). Par ailleurs, on notera que la concentration en sulfates de l'eau après lavage est comprise entre 150 et 600 mg/l dépassant le seuil de potabilité (250 mg/l) dans 6 cas sur 10 et dépassant 300 mg/l dans 3 cas seulement.

Il est intéressant de noter que la répartition des sulfates entre les fractions fines et sableuses n'est pas toujours identique d'un échantillon à l'autre. Ce phénomène s'explique vraisemblablement par des différences de spéciation du soufre dans les matériaux avant lavage et notamment la taille des cristaux de sulfates de calcium (présence, dans certains échantillons, de cristaux de sulfates de calcium de taille supérieure au seuil de coupure, 63 μ m).

La Figure 6 présente les résultats relatifs aux fluorures lixiviés pour deux matériaux, le tiers supérieur des Sables de Beauchamp du sondage A et le tiers intermédiaire des Sables de

Beauchamp du sondage B et ceci pour des conditions de lavage différentes (évolution du temps de contact et du rapport L/S). L'intensité du lavage aurait un impact sur le comportement des fluorures, un lavage modéré semblant provoquer une augmentation de la solubilisation des fluorures. En revanche, l'intensification du lavage par une augmentation du rapport L/S conduirait à une diminution des teneurs en fluorures lixiviés dans les fractions sableuses et les fractions fines. On soulignera néanmoins que les écarts entre les différentes teneurs sont relativement faibles et que ce phénomène reste à confirmer par de nouveaux essais sur des matériaux plus riches en fluorures. La teneur en fluorures de l'eau issue du lavage des Sables de Beauchamp est comprise entre 0,5 et 1,2 mg/l et ne dépasse jamais le seuil de potabilité (1,5 mg/l).

3.3. Potentiel de valorisation des produits de lavage

3.3.1. Valorisation des fractions sableuses

À l'issue des essais de lavage, les fractions sableuses ont été caractérisées selon les spécifications de la norme NF P 18-545 relatives aux granulats pour matériaux hydrauliques (bétons et mortiers). La répartition granulométrique des fractions sableuses obtenues après lavage est représentée en Figure 7. Le Tableau 2 synthétise l'ensemble des résultats obtenus sur les fractions sableuses issues des échantillons moyennés sur une hauteur de tunnel. La norme associée à chaque essai est indiquée dans le Tableau 2. Il en ressort que :

- la masse volumique réelle des fractions sableuses est comprise entre 2,6 et 2,8 t/m³, ce qui correspond à des granulats courants. Leurs coefficients d'absorption d'eau sont inférieurs à 2,5% classant les fractions sableuses dans la catégorie A de la norme NF P 18-545 ;
- les trois fractions sableuses sont non réactives au sens du fascicule FD P 18-542 ;
- les fractions sableuses respectent le référentiel de la norme concernant les teneurs en soufre total. Leur teneur en soufre

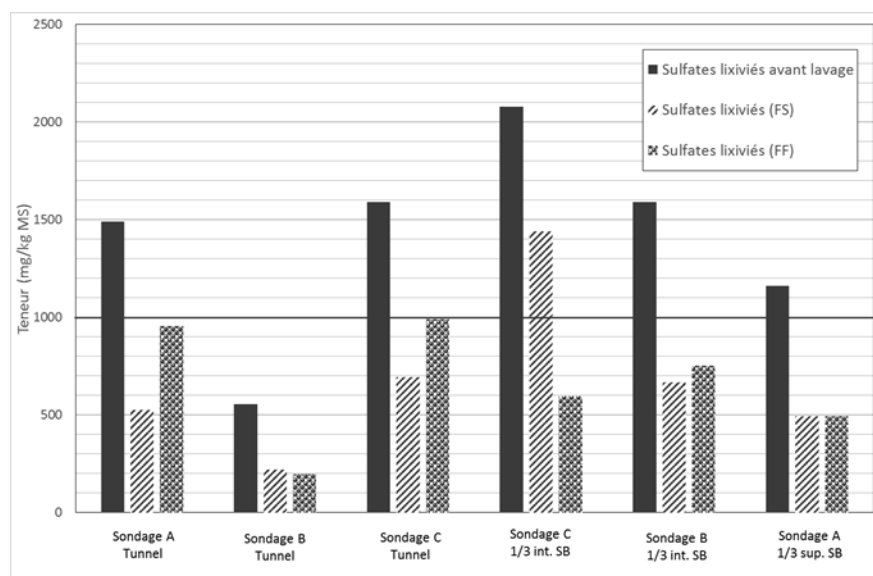


Figure 4 : Impact du lavage des Sables de Beauchamp sur la teneur sulfates lixiviés des produits de lavage (en plein, échantillon avant lavage, FS : fraction sableuse après lavage, FF : faction fine après lavage)

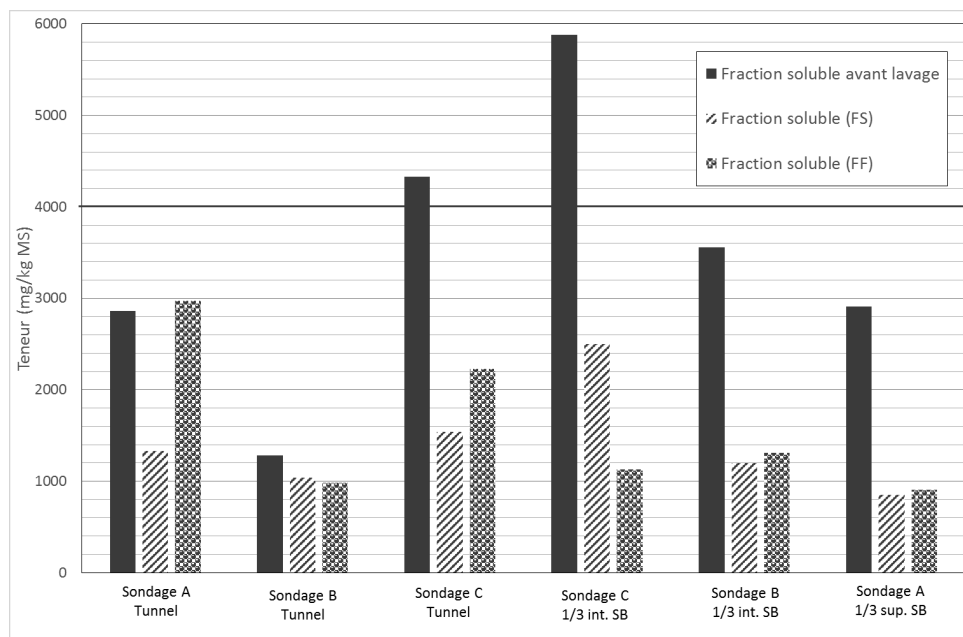


Figure 5 : Impact du lavage des Sables de Beauchamp sur la fraction soluble des produits de lavage (en plein, échantillon avant lavage, FS : fraction sableuse après lavage, FF : faction fine après lavage)

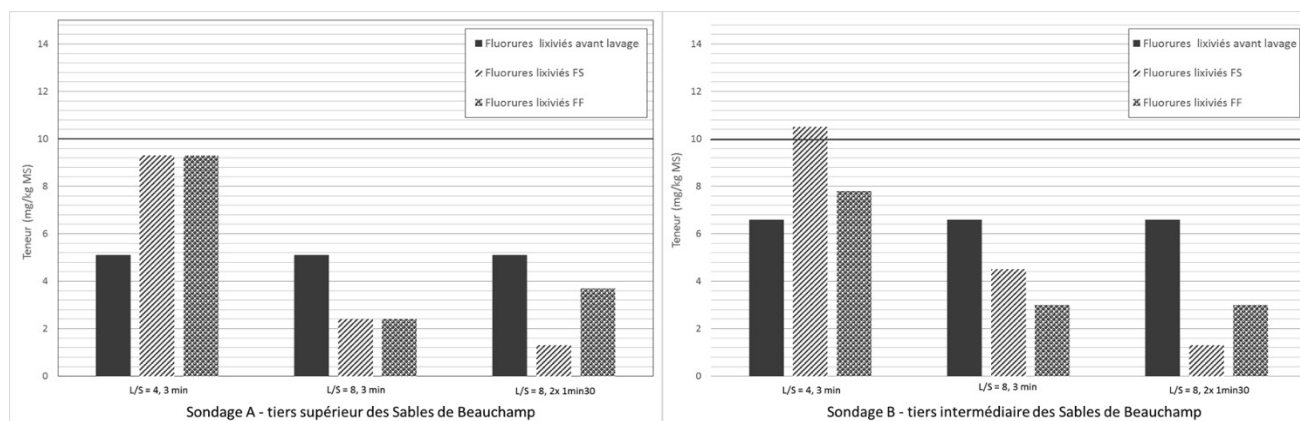


Figure 6 : Impact du rapport Liquide / Solide sur la teneur en fluorures lixiviés des produits de lavage (en plein, échantillon avant lavage, FS : fraction sableuse après lavage, FF : faction fine après lavage)

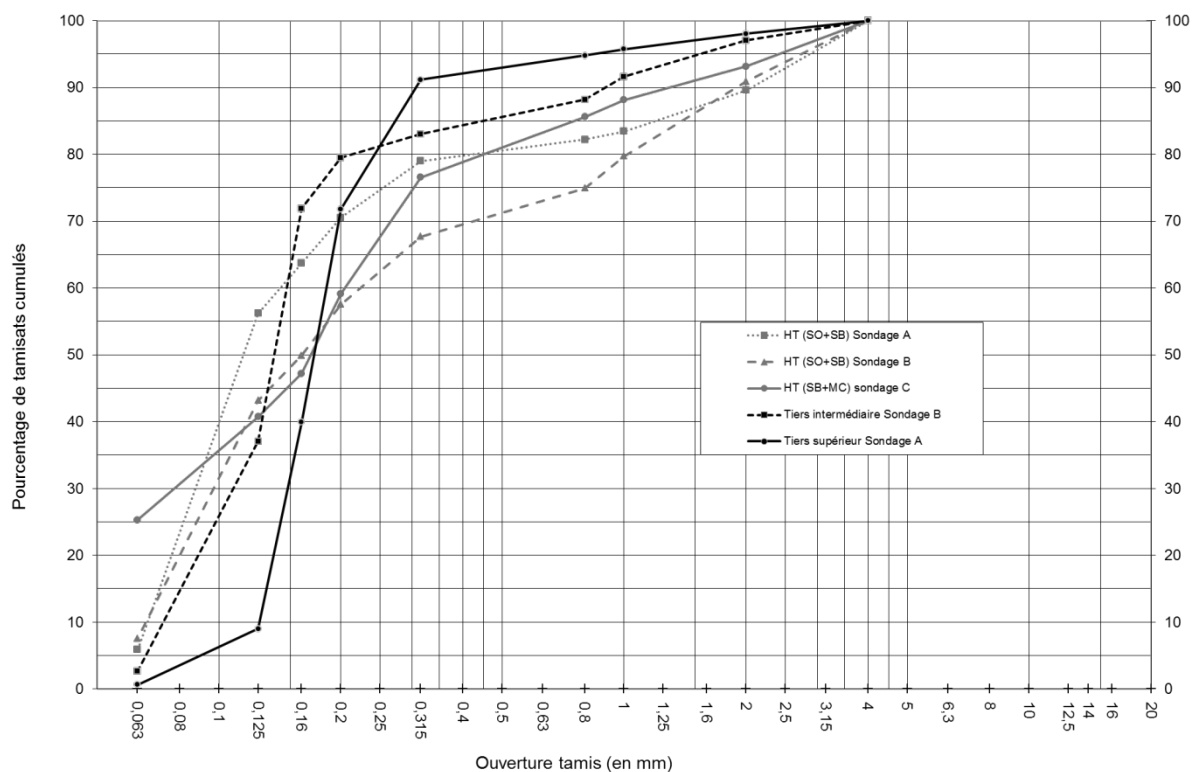


Figure 7 : Répartition granulométrique de fractions sableuses après lavage

Caractéristiques	HT (SO + SB) Sondage A	HT (SO + SB) Sondage B	HT (SB + MC) Sondage C	Spécifications NF P 18-545
				Béton hydraulique et mortiers Article 10
Masse volumique réelle (t/m ³) (NF EN 1097-6)	2,63	2,55	2,66	-
Coefficient d'absorption d'eau (%) (NF EN 1097-6)	0,4	1,6	1,1	< 2,5 % Catégorie A
Soufre total (S en %) (NF EN 1744-1)	0,20	0,20	0,29	< 0,4 % Catégorie A
Sulfates solubles dans l'acide (SO ₃ en %) (NF EN 1744-1)	0,27	0,37	0,42	< 0,2 % (si S > 0,08 %) Catégorie A, B et C
Masse de Bleu (g/kg) (NF EN 933-9)	1,5	1,8	2	si D > 1 mm < 1,5 () si D < ou = 1 mm) < 1 Catégorie A < 2 Catégorie B et C > 2, Catégorie D
Réactivité aux alcalis (essai « microbar ») (XP P 18-594)	NR	NR	NR	Essai négatif (NR)

Tableau 2 : Caractéristiques des fractions sableuses après l'essai de lavage

total est inférieure à 0,4%. Les teneurs en sulfates solubles dans l'acide sont toutes inférieures à 0,8% (catégorie D) ;

- les masses de bleu (MB) selon la norme NF EN 933-9 sont inférieures à 2 g/kg classant les fractions sableuses dans les catégories B ou C de la norme NF P 18-545.

On notera que certains paramètres comme la masse de bleu sont dépendants du mode de séparation mis en œuvre lors du lavage. Les résultats obtenus seront donc à confirmer lors d'essais pilotes avec un hydrocyclone industriel.

3.3.2. Valorisation des fractions argileuses dans les filières industrielles

Les fractions fines ont subi une caractérisation chimique et minéralogique afin de les positionner vis-à-vis d'éventuelles filières de valorisation industrielle. Les Tableau 3, Tableau 4 Tableau 5 détaillent ces résultats :

- teneurs en sulfates totaux et soufre total et pourcentage des particules inférieures à 2 μm par sédimentométrie (Tableau 3) ;
- analyse cristallographique des fractions argileuses préparées selon le principe de la norme NF X31-107 sur

lames orientés (sans traitement, traitement thermique et traitement au glycol) (Tableau 4) ;

- analyse cristallographique quantitative par diffraction des rayons X (Tableau 5).

Les argiles ne représentent que 15 à 25% des fractions fines (particules inférieures à 2 μm quantifiées par sédimentométrie) et sont majoritairement constituées de Sépiolite, Palygorskite et Illite. Les fractions fines se composent en fait principalement de carbonate calcique et magnésien (Calcite et Ankérite) et d'un reliquat de minéraux siliceux (Quartz et Microcline). La présence de Pyrite est également mise en évidence. On notera que la Sépiolite et la Palygorskite sont des argiles fibreuses à capacité d'échange relativement faible mais à très forte surface spécifique, très utilisées dans l'industrie pour leur pouvoir absorbant.

La faible présence d'argiles ainsi que leur nature ne permettent pas d'envisager une valorisation en filière industrielle de type terres cuites, ni un usage comme d'étanchéité. La présence de magnésium sous la forme d'Ankérite en quantité trop importante pourrait être un frein à une valorisation en cimenterie.

	HT (SO + SB) Sondage A	HT (SO + SB) Sondage B	HT (SB + MC) Sondage C	1/3 int. Sondage C	1/3 int. Sondage B	1/3 sup. Sondage A
Sulfates totaux (%)	0,34	0,44	0,55	0,34	0,34	0,27
Soufre total (%)	0,64	0,31	0,41	0,65	0,32	0,70
Particules < 2 μm (%)	16,1	9,4	15,3	19,5	19,8	13,4

Tableau 3 : Teneurs en soufre et sulfates totaux et résultats de sédimentométrie relatifs aux fractions fines obtenues lors des essais de lavage.

Echantillon	Illite	Sépiolite	Palygorskite	Interstratifié Vermiculite-Smectite
HT (SO + SB) Sondage A	30%		50%	20%
HT (SO + SB) Sondage B	5%	80%	15%	
HT (SB + MC) Sondage C	40%		60%	

Tableau 4 : Composition de la phase argileuse des fractions fines obtenues suite au lavage des Sables de Beauchamp en mélange avec les Calcaires de Saint-Ouen ou les Marnes et Caillasses.

Echantillon	Ankérite	Quartz	Calcite	Aragonite	Microcline	Pyrite	Phases amorphes ou mal cristallisées et phyllosilicates
HT (SO + SB) Sondage A	52	8	3		11	1	25
HT (SO + SB) Sondage B	28	4	47	4			17
HT (SB + MC) Sondage C	70	5	1		8	2	14

Tableau 5 : Composition minéralogique des fractions fines issues du lavage des Sables de Beauchamp en mélange avec les Calcaires de Saint-Ouen ou les Marnes et Caillasses.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre des travaux du Grand Paris Express, 43 millions de tonnes de matériaux d'excavation seront à gérer. La formation des Sables de Beauchamp représente à elle seule plusieurs millions de tonnes provenant pour une grande part d'excavation au tunnelier.

Les essais en laboratoire de lavage des Sables de Beauchamp ont permis d'obtenir une fraction sableuse dont les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques apparaissent compatibles avec un usage en matériaux hydrauliques sous la forme d'un sablon 0/1. Certains aspects comme la répartition granulométrique sont à travailler sur une installation pilote permettant de reproduire plus fidèlement un procédé industriel.

En revanche, de par leurs caractéristiques chimiques et minéralogiques, la valorisation des fractions fines apparaît plus difficile mais une élimination en installation de stockage pour déchets inertes semble envisageable pour la grande majorité des cas étudiés.

Des études complémentaires sont à mener sur des mélanges présentant des teneurs naturelles en sulfates, et fluorures plus élevées pour évaluer plus en détail l'efficacité du lavage sur le potentiel de valorisation des matériaux excavés.

L'ensemble de ces résultats est à confirmer et à préciser par la réalisation d'essais pilote qui permettront d'étudier la faisabilité technico-économique d'un tel traitement associé à une valorisation en filière mortier ou béton de la fraction sableuse.