

Hauptsponsoren • Main Sponsors



AFRY Schweiz AG, Zürich



Emch+Berger Gruppe, Bern



Amberg Engineering AG
Amberg Technologies AG
VersuchsStollen Hagerbach AG



Frutiger AG, Thun



Avesco AG, Langenthal



Gähler und Partner AG,
Ennetbaden



B+S AG, Bern



Gasser Felstechnik AG,
Lungern



Basler & Hofmann AG, Zürich



Heitkamp Construction
Swiss GmbH, Dierikon



Bellini Personal AG, Zürich



Herrenknecht AG,
Schwanau (DE)



Belloli SA, Grono
Rowa Tunnelling Logistics AG,
Wangen SZ



Holcim (Schweiz) AG, Zürich



csc costruzioni sa, Lugano



Implenia Schweiz AG, Opfikon

Sponsoren • Sponsors



Infra Tunnel SA, Marin



Pini Gruppe AG, Grono



IM Maggia Engineering SA,
Locarno
IUB Engineering AG, Bern



Renzo Tarchini
Cantieri & Contratti SA
Lugano



Lombardi AG
Bellinzona-Giubiasco, Rotkreuz,
Fribourg



Robert Aebi AG, Regensdorf



Marti Technik AG, Moosseedorf



SABAG Biel/Bienne Stahlcenter



Marti Tunnel AG, Moosseedorf



Sika Schweiz AG, Zürich



Master Builders Solutions
Schweiz AG, Holderbank



WSP | BG
Ingénieurs Conseils SA,
Lausanne

Co-Sponsoren • Co-Sponsors

A. Aegerter & Dr. O. Bosshardt AG, Basel

ACO AG, Netstal

Adolf Würth GmbH & Co. KG, Künzelsau (DE)

Bekaert (Schweiz) AG, Baden

CSD INGÉNIEURS SA, Fribourg

Dolenco Tunnel Systems, Roskilde (DK)

EBP Schweiz AG, Zürich

FAMA Srl, Zoppola (IT)

GIPO AG, Seedorf

Gruner SA, Renens

ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich

JAUSLIN STEBLER AG, MuttENZ

Liebherr-Baumaschinen AG, Reiden

Locher Ingenieure AG, Zürich

MAPEI SUISSE SA, Sorens

PORR SUISSE AG, Altdorf

Promat AG, Münchwilen

Rothpletz, Lienhard + Cie AG, Aarau

Société Suisse des Explosifs (SSE), Brig

Jérémy VOIRON, Dipl. Ing. Mines d'Alès, Chef de Groupe, WSP BG Ingénieurs Conseils SA, Genève/CH
Étienne GARIN, Dipl. Ing. civil EPFL, Expert, WSP BG Ingénieurs Conseils SA, Lausanne/CH
Benoît CHAMPEAU, Dipl. Ing. Institut Géologique A. de Lapparent, Responsable Laboratoire / Études, MS, Veyre-Monton/FR
Laury BARNES DAVIN, Dipl. PhD Materials, Directrice Scientifique et R&D, Vicat, L'Isle-d'Abeau/FR
Éric BUREAU, Responsable Marché Valorisation Matière, Circulère, L'Isle-d'Abeau/FR
Matthias BÜRKI, Dipl. ZHAW School Management and Law, Directeur usine adjoint / Responsable QEP, Ciment Vigier SA, Péry/CH
Julie PHAN, Dipl. Ing. HEI, Directrice, Vigier Béton Romandie, Lausanne/CH
Bertrand FAYOT, Dipl. Ing. civil EPFL, Directeur Général Adjoint, Induni et Cie SA, Lancy/CH

FCC, La molasse, une ressource sous-exploitée

Le CERN, dans le cadre du projet FCC (Future Circular Collider), prévoit de construire un tube circulaire d'une circonférence d'environ 91 km à l'horizon 2033–2040 excavé principalement dans la molasse dans un contexte binational France Suisse.

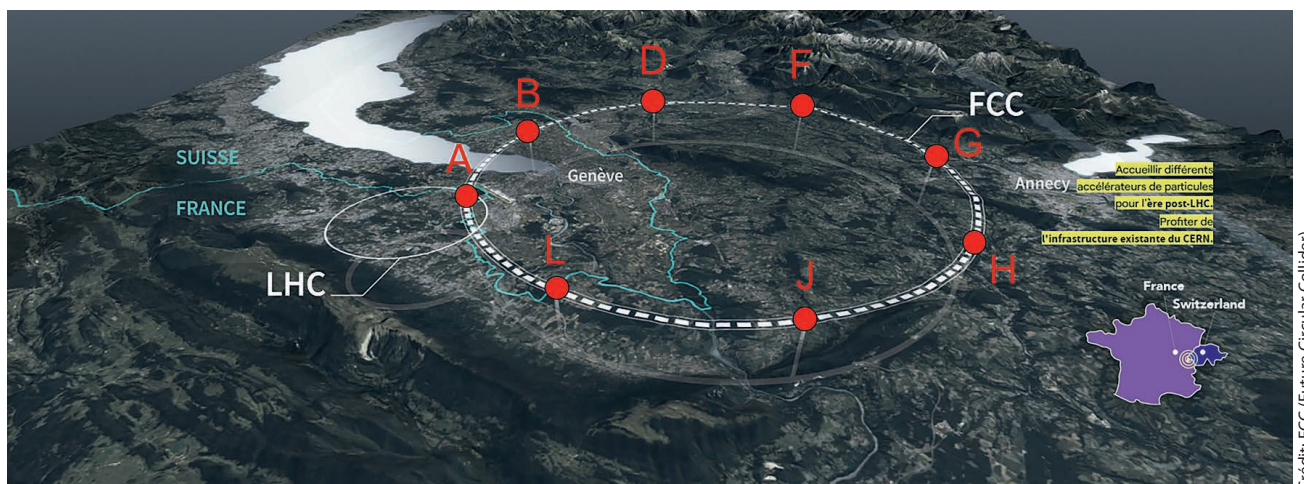
1 Introduction

Le projet FCC (« Future Circular Collider », fig. 1) prévoit la construction d'un tube circulaire d'une circonférence d'environ 91 km à l'horizon 2033–2040 dans un contexte binational France–Suisse.

Le volume de matériaux à excaver est estimé à environ 6.5 millions de m³ en place. Les formations géologiques concernées sont essentiellement de trois types : la molasse rouge du Chattien inférieur, les formations morainiques sus-jacentes et les formations calcaires. La répartition de ces volumes sera affinée en fonction des résultats de la campagne de reconnaissance des sols et des études prévues dans les prochaines années.

La valorisation des matériaux molassiques issus des excavations est difficile, car ces matériaux ne possèdent pas de propriétés intrinsèques permettant leur réutilisation directe en tant que matière première ou secondaire dans un processus industriel. Par ailleurs, les méthodes d'excavation, la sédimentation en bancs et les lentilles d'épaisseurs variables impliquent la prise en charge d'un matériau brut constitué de marnes et de grès mélangés, plus ou moins « pâteux » suivant la quantité d'eau ajoutée lors du processus d'extraction.

Le groupement binational et pluridisciplinaire composé de Vicat (France), Circulère (France), Sigma Béton (France), Granulats Vicat (France), Ciments Vigier SA (Suisse), Vigier Béton Romandie SA (Suisse), MS (France), Induni & Cie SA (Suisse), PRA Ingénieurs Conseils SA (Suisse) et piloté par WSP BG Ingénieurs Conseils SA (Suisse) a donc proposé un processus de traitement permettant de séparer la molasse en fractions granulométriques ou pétrographiques (sables fins, limons et argiles) valorisables indépendamment.



1 Tracé actuellement envisagé pour le FCC

FCC: Die Molasse, eine unzureichend genutzte Ressource

Lösungsvorschläge für das Recycling von Molasse als Antwort auf die Herausforderung, die das CERN im Rahmen seines Wettbewerbs „Mining the Future“ gestellt hat: Das Ziel dieses Artikels ist es, die vorgeschlagenen Behandlungsmethoden und Prozesse für das Recycling dieser Molasse unter Berücksichtigung der Bedingungen, unter denen das Projekt durchgeführt werden soll, vorzustellen. Es werden auch mögliche Verwendungszwecke für Molasse-Materialien, wie Betonsand, Korrektursand, kohlenstoffarmer Zement, Lehmton usw., beschrieben.

FCC: La molassa, una risorsa sottosfruttata

Proposte di soluzioni per il riciclo della molassa come risposta alla sfida lanciata dal CERN nell'ambito del suo concorso "Mining the future". Il proposito di quest'articolo è quello di presentare i metodi di trattamento ed i processi proposti per il riciclo della molassa in considerazione delle condizioni in base alle quali il progetto deve essere attuato. Verranno anche descritti possibili scopi di impiego dei materiali molassici come sabbia di calcestruzzo, sabbia di correzione, cemento a basso tenore di carbonio, calcestruzzo in terra cruda etc.

2 Tri et séparation des matériaux

2.1 Analyse en ligne

Les matériaux molassiques provenant des fronts d'excavation seront réceptionnés sur une plateforme intermédiaire de tri et de stockage équipée d'installations spécifiques. Des développements innovants doivent être envisagés, notamment dans la caractérisation en continu des matériaux d'excavation, pour effectuer un pré-tri efficace sur le site : l'enjeu est de mettre en place une chaîne logistique qui puisse suivre le flux de production des chantiers d'excavation sans nécessiter de grandes surfaces de stockage temporaire des matériaux d'excavation. Les matériaux passeront donc par une série d'analyseurs en ligne installés sur le convoyeur d'alimentation de la station de traitement pour permettre une identification immédiate de leurs composants pétrographiques utiles à leur affectation à une filière de valorisation spécifique.

Notre consortium expérimente notamment deux technologies différentes d'analyse en ligne basées sur l'intelligence artificielle associée à l'analyse proche infrarouge (NIR) et hyper-spectrale, qui pourraient rendre l'analyse en ligne plus facile d'accès qu'avec la PGNA (« Prompt Gamma Neutron Activation Analysis ») puisqu'aucune source de neutrons ne serait nécessaire. Optimisées par l'intelligence artificielle, ces solutions éviteraient les phases de calibration longues et coûteuses, et réduiraient ainsi drastiquement les besoins de stockage avant traitement.

2.2 Séparation des matériaux

La séparation des matériaux molassiques sera effectuée dans une installation de séparation des matériaux du même type que celle présentée en [figure 2](#).

Le procédé de séparation des matériaux molassiques commencera par un tri granulométrique des matériaux incluant un système de lavage à l'eau en circuit fermé.

La première étape consistera à mélanger et concasser les agrégats d'argile pour diluer la totalité des amas argileux. Plusieurs types d'installations pourront être testés afin d'optimiser ce procédé, comme le « débourbeur trommel », le « logwasher », le « turbowasher », etc.

Les fractions de 20 mm, 4 mm et 2 mm seront obtenues par criblage sous eau et la séparation à la fraction de 500 µm via un tamiseur cyclonique (équipement breveté).

L'alimentation tangentielle du tamiseur cyclonique ainsi que la maille des grilles de criblage permettent de réaliser une séparation granulométrique des particules sableuses entre 500 µm et 1 mm (adaptable selon les réglages).

La fraction des extra-fines < 63 µm sera séparée de la fraction sableuse via des hydro-cyclones : l'alimentation tangentielle de la pulpe dans le cône de l'hydrocyclone permet la création d'un vortex dans le corps du cyclone. Les éléments grossiers sont propulsés en périphérie par la force centrifuge et sont concentrés au niveau de la buse « underflow ». Tandis que les extra-fines et la majeure partie de l'eau sont entraînées à travers le vortex au centre du cyclone vers la buse « overflow » du cyclone.

Les fractions sableuses de 2 à 4 mm, de 500 µm à 2 mm et de 63 à 500 µm seront recomposées en ligne et à la demande pour respecter des fuseaux granulométriques objectifs grâce à un système de pesage sur convoyeur piloté par l'automate.



Crédit: Entreprise MS

2 Vue isométrique 3D de l'usine de séparation des matériaux envisagée

La fraction inférieure à 15 μm (argiles) sera séparée de la fraction de 15 à 63 μm (silts, limons) via des micro-hydrocyclones. La fraction de 15 à 63 μm sera essorée via un ou des essoreurs dédiés.

Une station de traitement des eaux (décanteur) recevra les eaux chargées en fines (particules de 0 à 15 μm) du processus de lavage avec un double objectif : clarifier l'eau pour pouvoir la recycler et concentrer les boues.

Une phase de floculation permettra de mélanger les eaux chargées en fines avec un polymère organique (floculant) afin de former des amas de particules (flocs). Ce polymère, caractérisé par sa tension électrique superficielle, agira sur la tension superficielle des fines pour les rassembler et former des « flocs » qui pourront alors avoir une vitesse de décantation acceptable de l'ordre de 20 à 40 m/h. Enfin, l'eau clarifiée et recyclée débordera par le haut du décanteur et la boue concentrée sera évacuée par le fond.

Les hydrocarbures potentiellement présents dans les matériaux d'excavation molassiques, comme les C5-C10 ou les C10-C40 [1] seront principalement concentrés dans l'eau recyclée. Ces derniers pourraient être éliminés par l'installation de déshuileurs ou l'utilisation d'autres traitements complémentaires.



3 Illustration d'un filtre presse

Les boues provenant du décanteur seront transférées vers un silo tampon de stockage, puis envoyées vers des filtres presses pour les déshydrater. Ces derniers seront constitués d'un ensemble de plateaux (chambres ou membranés) entre un bloc fixe et un bloc mobile contrôlé par un vérin hydraulique. Les chambres étanches ainsi créées seront recouvertes de toiles de filtration. Des pompes à boue permettront de remplir les filtres de presse de boue, de monter en pression (jusqu'à 8 bars) et de déshydrater les boues. Les plateaux membranés seront, dans un deuxième temps, remplis d'eau (jusqu'à 16 bars) pour compléter la déshydratation des boues.

Ce procédé de filtration illustré en figure 3 permettra d'obtenir une déshydratation optimale des extra-fines (0-15 μm). L'eau claire (filtrats) sera drainée vers un réservoir de collecte et mélangée aux eaux clarifiées par le décanteur. Ainsi, comme présenté également en figure 4, le procédé proposé consistera à séparer les matériaux d'excavation molassiques en 7 fractions granulométriques afin de classer les matériaux et de multiplier les possibilités d'utilisation des produits :

Crédit: Entreprise MS

- 20 mm : blocs de grès ;
- 4 à 20 mm : graviers et gravillons ;
- 2 à 4 mm : sables grossiers ;
- 500 µm à 2 mm : sables moyens ;
- 63 à 500 µm : sables fins ;
- 15 à 63 µm : particules de limon ou silt ;
- < 15 µm : particules d'argiles en majeure partie.

Les tests effectués sur les échantillons de molasse collectés sur le chantier du CERN HL-LHC Point 1 [2] permettent d'envisager les fractions granulaires suivantes :

- 15 à 20 % de granulats de plus de 4 mm qui pourraient être broyés pour produire un sable grossier ;
- 10 à 15 % de particules sableuses de 63 µm à 4 mm qui pourraient être séparées et mélangées pour produire des sables spécifiques comme du sable à béton, du sable de pose, du sable de filtration, etc. ;
- 10 à 15 % de particules limoneuses qui pourraient être utilisées en tant que correcteurs de granulométrie pour les sables grossiers ;
- 36 à 48 % de particules d'argile qui pourraient être utilisées pour produire du ciment bas carbone.

3 Valorisation et réutilisation de la molasse

3.1 Valorisation de la fraction argileuse

3.1.1 Valorisation en ciment bas carbone

La séparation des particules d'argile et des particules limoneuses permettra d'effectuer un traitement thermique des argiles pour les activer. En effet, certains minéraux argileux peuvent, à une température comprise entre 700 et 850°C, acquérir des propriétés pouzzolaniques.

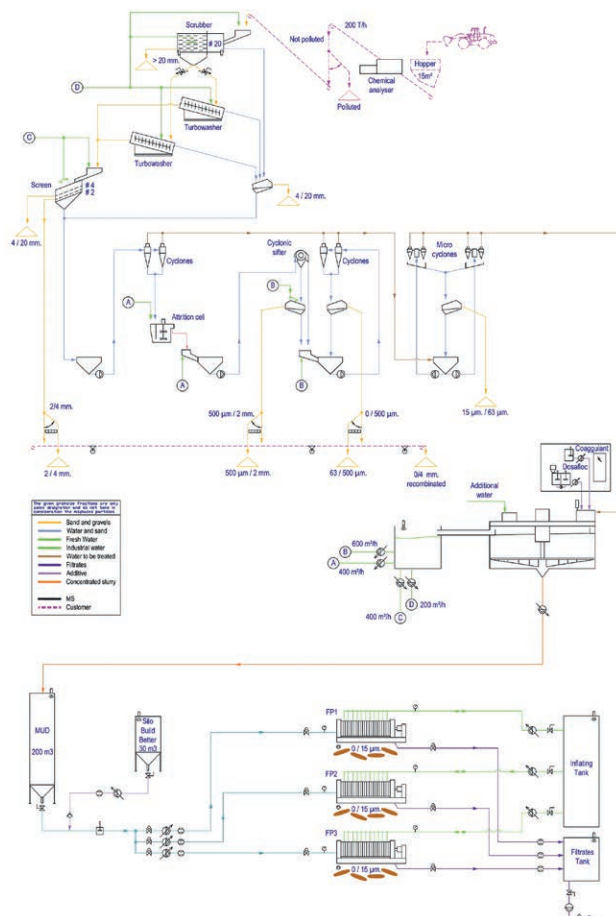
Les ciments d'argile calcinée sont dits « bas carbone » car la calcination de l'argile activée a lieu à une température inférieure à celle de la clinkérisation et ne conduit donc pas à une réaction de décarbonatation (produisant du CO₂), mais à un déshydroxylation (produisant de l'eau). L'impact environnemental d'un tel produit est donc particulièrement intéressant.

La technologie d'activation des argiles existe, et cette industrialisation est le résultat de 10 ans de R&D avec des brevets déposés dans le domaine des argiles activées. Les tests réalisés sur les échantillons de molasse excavée lors du projet du CERN HL-LHC Point 1 [2] démontrent leur potentiel d'activation en laboratoire. L'hydro-cyclonage a montré un enrichissement efficace de la fraction argileuse, avec une plus grande quantité d'argile dans la fraction des 0 à 15 µm.

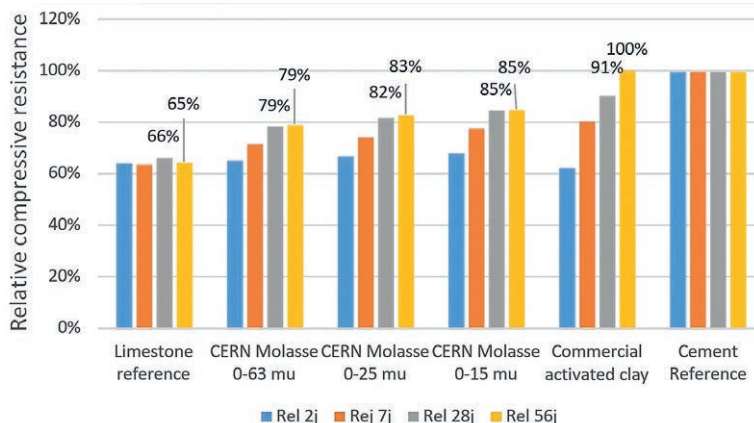
À 28 jours, l'activation thermique optimisée démontre une réactivité modérée de la molasse. Il est notamment mis en évidence dans la **figure 5**, que plus la fraction est fine, meilleure est la résistance obtenue.

Du fait d'une réactivité plus faible et d'émissions géogènes de CO₂ plus élevées en raison de la teneur en CaO ou MgO, l'intérêt pour ce matériau par rapport à d'autres produits commerciaux similaires est modeste.

Toutefois, il pourrait représenter une ressource aisément disponible pendant des décennies et qui permettrait l'approvisionnement en ciment



4 Diagramme définissant le process de séparation envisagé



5 Diagramme de résistance relative à la compression des argiles activées

bas carbone d'une grande région transfrontalière. Ce nouveau ciment permettra d'économiser environ 75 tonnes de CO₂ par tonne par rapport à un ciment classique, évitant ainsi l'émission d'au moins 235 000 tonnes sur 10 ans dans les volumes considérés.

L'unité d'activation thermique comprendra un traitement de pointe des émissions de gaz et sera alimentée par des déchets de combustibles solides alternatifs, évitant ainsi la mise en décharge ou l'incinération. Le procédé de calcination devra être validé à grande échelle dans une installation de calcination des argiles, comme présenté en [figure 6](#).



Crédit: FLSmidth

6 Vue isométrique 3D d'une usine de calcination flash dédiée aux argiles

3.1.2 Valorisation en béton de terre crue

Les argiles non activables et les limons présents dans la molasse pourront être utilisés pour fabriquer des bétons de terre crue par l'ajout de liants hydrauliques et/ou non hydrauliques et éventuellement de fibres végétales. Ces bétons, dont la résistance peut atteindre plus de 25 MPa, ont un faible impact carbone et présentent une inertie favorable au confort thermique d'été (maintien d'une température intérieure adaptée même en période de fortes chaleurs).

Ces bétons, traditionnellement appelés « pisé », « adobe » ou « torchis », peuvent être coulés en place ou transformés en blocs de terre crue dans une usine de préfabrication. Ils peuvent également être projetés ou injectés dans des systèmes de construction isolés.

La région Auvergne-Rhône-Alpes réalisée est une région dans laquelle une partie de l'habitat traditionnel a été réalisé en pisé et les savoir-faire ont été conservés et associés aux techniques modernes, en particulier dans le cadre des Grands Ateliers de L'Isle-d'Abeau (38, France) ou des travaux de recherche de l'ENTPE de Lyon (69, France).

Ce nouveau marché compte également plusieurs promoteurs dans la région lémanique, allant des start-up produisant des blocs de terre crue, aux architectes ou entreprises de construction érigeant de véritables bâtiments ou murs de soutènement avec ce matériau.

Bien que la construction en terre ait été pratiquée dans des zones restreintes pendant des siècles, les nouvelles technologies de stabilisation et de traitement de l'argile permettent de l'appliquer à une gamme plus large et notamment pour la production de bétons de terre crue. Ces nouvelles méthodes de production assurent également une meilleure durabilité des bétons obtenus.

3.2 Valorisation de la fraction sableuse

Les blocs de grès présentent une faible résistance mécanique. Leur potentiel d'utilisation étant très faible, ils seront concassés pour générer des particules de sable. Il sera ainsi obtenu un sable grossier qui pourra être mélangé au sable fin naturel lavé de la

molasse. Le mélange des deux sables pourrait constituer un sable à béton de 0 à 4 mm. Le processus de concassage générera 3% de grains fins de 0 à 1 mm qui pourront être introduits comme additifs dans le sable fin correcteur.

Le mélange de sable pourrait maximiser le potentiel de réutilisation de cette fraction. Les différents sous-produits seront mélangés avec un système PLC (système automatique développé par MS) dans des proportions ajustables pour créer un sable recombéné.

En fonction des spécifications requises pour le sable, toute la fraction de sable déficitaire (appelée « sable maître ») sera mélangée à une partie de la fraction de sable excédentaire (appelée « sable esclave ») par une goulotte à deux ou trois voies munies de volets de répartition. Ces clapets pourront être actionnés automatiquement en fonction des informations fournies par les capteurs de pesage intégrés au convoyeur. À l'issue de ce processus, il sera obtenu un sable dont la granulométrie sera adaptée à celle d'un sable du commerce.

Les grès de la région lémanique sont principalement composés de quartz (40 à 70%), de calcite (20 à 45%) et de feldspaths (5 à 10%), ce qui est une pétrographie adaptée à la production d'un sable conforme aux normes. Les essais menés sur la fraction fine montrent qu'un mélange avec le sable concassé plus grossier permet d'obtenir une granulométrie adaptée aux sables à béton ($FM = 2,5 - 2,7$; $SE(10) > 80$). Les valeurs de $MB < 0,9$ mettent en évidence un sable propre.

La fraction sableuse représentera environ la moitié du volume de produits molassiques valorisés. Le marché régional pourrait absorber ces quantités parce que la production envisagée représentera moins de 20% de la consommation annuelle estimée et qu'il s'agira d'un matériau très recherché qui, autrement, devrait être prélevé directement dans le milieu naturel.

3.3 Valorisation de la molasse polluée aux hydrocarbures

Les matériaux fortement pollués aux hydrocarbures seront évacués vers des cimenteries situées à proximité du projet pour y être valorisés [1]. L'expérience acquise lors du Projet du CERN HL-LHC Point 1 a montré que la priorité devra être donnée à cette solution rentable.

Si les quantités de molasse fortement polluée devaient dépasser la capacité d'absorption des cimenteries, la réduction de la concentration en hydrocarbures en dessous des seuils réglementaires par bioremédiation et donc par injection de micro-organismes (bactéries) pourrait être envisagée. Néanmoins, ce procédé, bien qu'intéressant, impliquerait l'occupation de grandes surfaces pendant une longue période.

Enfin, si les concentrations d'hydrocarbures des matériaux potentiellement pollués pouvaient être réduites à un niveau convenant à la réutilisation de la matière molassique et à sa transformation en ressource pour l'industrie de la construction, ces matériaux pourraient être réintégrés dans le cycle de vie des matières molassiques non polluées décrit plus haut.

Désignation	Part [pour 1 m³]	Quantité estimée [m³ en place]	Filières de valorisation envisagées pour les molasses issues du FCC CERN
Blocs de grès et graviers 4/20 mm	0.15	975 000	Concassés pour générer des grains de sable, et mélangés au sable fin naturel lavé de la molasse pour constituer un sable à béton 0/4 mm
Sables concassés 0,5/4 mm	0.03	195 000	Recombinés en 0/4 mm : secteur des matériaux granulaires (sable à béton, sable correcteur, sable de filtration, remblai de tranchées, etc.)
Fines 63/500 µm	0.12	780 000	
Limons 15/63 µm	0.12	780 000	Secteur des matériaux granulaires (correcteur pour les sables grossiers)
Argiles < 15 µm	0.48	3 120 000	36 à 48 % de la molasse semble appropriée pour l'activation thermique et la production de ciment bas carbone. Les argiles ne pouvant être activées seront mélangées à des sables 0/1 mm pour obtenir un béton de terre crue ou des briques en terre cuite.
Molasses polluées	0.10	650 000	Cimenteries, (bioremédiation)

Crédit: Sans objet

Tableau 1 Répartition des matériaux molassiques par quantité et filière de valorisation

3.4 Synthèse des valorisations envisagées

Il est envisagé de réaliser des essais de type « industriel » sur plusieurs tonnes d'échantillons de matériaux molassiques excavés dans le cadre du projet FCC. En complément des essais de laboratoire, ces derniers permettraient de bénéficier de plus grandes quantités de produits finis valorisés et de perfectionner les techniques de valorisation prévues à l'aide d'un outil industriel performant comme mis en évidence dans le [Tableau 1](#).

4 Conclusion

Le début des travaux du FCC est planifié au milieu des années 2030. Il offrira une opportunité exceptionnelle de développer une filière industrielle de valorisation de la molasse extraite.

D'ici là, d'autres grands projets seront réalisés. Il conviendrait donc de trouver des synergies dans les investissements nécessaires au développement puis à la production de divers composés minéraux utilisables par l'industrie de la construction, tant dans le cadre de ces projets que sur le marché transfrontalier local.

Plus de la moitié des matériaux valorisés pourraient être vendus sur le marché du sable et de ses produits associés. Le potentiel d'activation des argiles donnera lieu au développement du premier ciment bas carbone de molasse activée au monde. Ainsi donc, le concept d'économie circulaire trouvera ici toute sa pertinence.

Références

- [1] Voiron, J., et al. 2020. CERN HL-LHC Point 1, Gestion des matériaux d'excavation potentiellement contaminés par des hydrocarbures. Congrès de l'AFTES, Paris, 2021.
- [2] Voiron, J., et al. 2022. FCC, Molasse is the new ore. Concours Mining the Future, Genève, 2022.