

Annexe D

Étude de stabilité géotechnique de la halde de co-disposition



Plan de réaménagement et de restauration pour le site du projet minier Matawinie		Original Version 00
24/10/2019	654068-6200-4EER-0001	Rapport technique

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	i	

Titre du document :

ANALYSE DE STABILITÉ DE LA HALDE DE CO-DISPOSITION

Client :

NOUVEAU MONDE GRAPHITE

Projet :

MATAWINIE

Préparé par : Fannie Lessard, in., M. ing.

Révisé par : Denis Vachon, ing.

Approuvé par : Martine Paradis, ing., M.Sc.A., PMP

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	ii	

LISTE DES RÉVISIONS APPORTÉES AU DOCUMENT

Révision				Pages Révisées	Remarques
#	Prép.	App.	Date		
PA	MO		2019-01-29	Toutes (v. anglaise)	Émis pour traduction français
PA	FL	DV	2019-02-19	Toutes (v. française)	Émis pour approbation interne
PB	FL/DV	MP	2019-02-21	Toutes (v. française)	Émis pour approbation client
00	FL	MP	2019-03-13	Révision des commentaires	Émission version finale

AVIS AU LECTEUR

Ce document fait état de l'opinion professionnelle de SNC-Lavalin inc. («SNC-Lavalin») quant aux sujets qui y sont abordés. Son opinion a été formulée en se basant sur ses compétences professionnelles en la matière et avec les précautions qui s'imposent. Le document doit être interprété dans le contexte de la convention en date du 7 décembre 2017 (la «Convention») intervenue entre SNC-Lavalin et Nouveau Monde Graphite (le «Client»), ainsi que de la méthodologie, des procédures et des techniques utilisées, des hypothèses de SNC-Lavalin ainsi que des circonstances et des contraintes qui ont prévalu lors de l'exécution de ce mandat. Ce document n'a pour raison d'être que l'objectif défini dans la Convention et est au seul usage du Client, dont les recours sont limités à ceux prévus dans la Convention. Il doit être lu comme un tout, à savoir qu'une portion ou un extrait isolé ne peut être pris hors contexte.

En préparant ses estimations, le cas échéant, SNC-Lavalin a suivi une méthode et des procédures et pris les précautions appropriées au degré d'exactitude visé, en se basant sur ses compétences professionnelles en la matière et avec les précautions qui s'imposent, et est d'opinion qu'il y a une forte probabilité que les valeurs réelles seront compatibles aux estimations. Cependant, l'exactitude de ces estimations ne peut être garantie. À moins d'indication contraire expresse, SNC-Lavalin n'a pas contre-vérifié les hypothèses, données et renseignements en provenance d'autres sources (dont le Client, les autres consultants, laboratoires d'essai, fournisseurs d'équipements, etc.) et sur lesquelles est fondée son opinion. SNC-Lavalin n'en assume nullement l'exactitude et décline toute responsabilité à leur égard.

Dans toute la mesure permise par les lois applicables, SNC-Lavalin décline en outre toute responsabilité envers le Client et les tiers en ce qui a trait à l'utilisation (publication, renvoi, référence, citation ou diffusion) de tout ou partie du présent document, ainsi que toute décision prise ou action entreprise sur la foi dudit document.

 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	iii	

TABLE DES MATIÈRES

1.0	Introduction.....	1
2.0	Données d'entrée pour les analyses	1
2.1	Géométrie de la halde et de la fosse	1
2.2	Coupes types utilisées pour les analyses	2
2.3	Propriétés géotechniques des matériaux.....	2
2.4	Niveaux piézométriques	5
3.0	Analyses de stabilité géotechnique et de tassement.....	5
3.1	Méthodologie	5
3.2	Critères de conception pour les analyses de stabilité.....	5
3.3	Résultats des analyses de stabilité géotechnique	7
3.4	Résultats des analyses de tassement.....	8
4.0	Conclusion et recommandations	9
5.0	Références	11

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 2-1 :	Propriétés géotechniques des matériaux.....	4
Tableau 3-1 :	Critères relatifs à la géométrie de la halde et à sa stabilité	6
Tableau 3-2 :	Résultats des analyses de stabilité géotechnique	8

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE A : Localisation du projet, de la halde de co-disposition et cellule de co-disposition typique
- ANNEXE B : Résultats des analyses de stabilité géotechnique
- ANNEXE C : Résultats des analyses de tassement



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
	654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	1

1.0 Introduction

Le site du projet Matawinie, de Nouveau Monde Graphite (NMG), est situé à environ 5 km au sud-ouest de la municipalité de Saint-Michel-des-Saints et à l'ouest du Lac aux Pierres, dans la région de Lanaudière au Québec, et vise le développement d'un gisement de graphite. L'exploitation sera faite dans une fosse à ciel ouvert. Le calendrier d'exploitation de la fosse a été divisé en cinq phases de production en fonction du plan minier. La durée de vie de la mine est estimée à 25,5 ans et un total de 26 ans est utilisé pour les fins de l'ingénierie.

Dans le cadre de ce projet, SNC-Lavalin a été mandatée pour réaliser l'étude de faisabilité sur la gestion des résidus et stériles miniers ainsi que sur la conception des infrastructures connexes de gestion de l'eau. Les résidus miniers et stériles miniers seront gérés par un retour dans la fosse lorsqu'un espace sécuritaire sera disponible, et dans une halde de co-disposition à proximité de la fosse pour la balance des résidus et stériles miniers.

L'objectif de cette note technique est de valider la stabilité géotechnique de la halde de co-disposition des résidus et stériles miniers. La validation comprend une revue des informations disponibles relativement aux propriétés des matériaux et des fondations, l'élaboration des critères de conception, une analyse de stabilité géotechnique de la halde de co-disposition et une analyse du comportement de tassement sur les sols de fondations. Les résultats de ces travaux sont présentés dans cette note.

2.0 Données d'entrée pour les analyses

2.1 Géométrie de la halde et de la fosse

La halde de co-disposition sera localisée au nord-ouest de la fosse à ciel ouvert pendant les cinq premières années d'exploitation (60% du volume total de résidus produits) et ensuite la co-disposition se poursuivra dans la fosse (40% du volume total de résidus produits) et dans la halde de co-disposition jusqu'à la cession minière prévue en 2026 (voir figure 1 de l'annexe 1). Durant les 5 premières années, une distance minimale sécuritaire de 70 m de long sera maintenue entre le pied de la halde et la fosse à ciel ouvert en exploitation.

Les dimensions finales de la fosse à ciel ouvert seront approximativement de 2 600 m de longueur en surface (dans l'axe SSO-NNE) avec une largeur variant de 155 à 380 m pour une superficie approximative de 680 000 m² après 26 ans. Avec le remblaiement progressif de la fosse, à l'année 26 elle aura une superficie d'environ 352 000 m² encore ouverte où le niveau des eaux souterraines va remonter jusqu'à son niveau statique pour former un lac.

Elle sera exploitée avec des pentes globales de 55° et 60° pour les parois ouest et est, respectivement. Le niveau final de la halde variera entre 30 m et 50 m de hauteur, ce qui représente une élévation maximale de 586 m par rapport au-dessus du niveau actuel de la mer. La pente globale de la halde sera de 3H:1V à la fermeture de la mine et de 2,5H:1V pour chacun des bancs durant l'opération. L'empreinte finale de la halde de co-disposition atteindra 140 ha (MC-DRA, 2018). Le concept de co-disposition consiste à gérer dans une même aire d'accumulation les stériles miniers et les résidus miniers. Les résidus du concentrateur seront traités par flottation et séparation magnétique pour produire deux (2) types de résidus : des résidus faiblement sulfurés (non générateur d'acide, ou « NGA ») et des résidus sulfurés (potentiellement générateur d'acide ou « PGA »). Les résidus NGA et les résidus PGA seront épaissés et filtrés (asséchés) pour atteindre un taux d'humidité de 15% pour les résidus PAG et 17,5% pour les résidus NAG. Ils seront ensuite entreposés dans des dômes dédiés à chacun des types de résidus avant d'être acheminés par camion vers la halde de co-disposition ou vers la fosse. La halde de co-disposition sera constituée de cellules dans lesquelles les propriétés granulométriques des différents matériaux seront utilisées pour favoriser la stabilité géotechnique de l'ouvrage, mais aussi la stabilité géochimique



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
	654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	2

des résidus miniers PGA et des stériles miniers PGA. Les cellules auront une dimension de 200 m par 100 m et auront une hauteur de 6 m. Les figures 1 à 3 de l'Annexe A présentent respectivement un plan de localisation du projet, une coupe de la halde de co-disposition ainsi qu'une cellule typique.

2.2 Coupes types utilisées pour les analyses

Deux coupes transversales jugées critiques de la halde de co-disposition ont été sélectionnées pour les analyses de stabilité, soit une coupe transversale est-ouest (coupe A) de la halde de co-disposition située au nord-ouest de la fosse à ciel ouvert et une coupe transversale nord-sud (coupe B) de la co-disposition dans la fosse. Les Figures 4-A à 7-A de l'annexe A présentent la localisation des coupes ainsi que les scénarios pour les analyses utilisées. Pour les analyses en condition statique et pseudo-statique, la stabilité géotechnique globale de la halde de co-disposition a été vérifiée pour les scénarios suivants :

- > Coupe A : Hauteur maximale de la halde atteinte à l'année 5
- > Coupe A : Fosse à ciel ouvert complètement exploitée à l'année 20 ans pour vérifier l'effet du pompage (rabattement de la nappe basé sur l'étude hydrogéologique (SNC, 2018e)) pendant l'exploitation sur la stabilité de la halde de co-disposition
- > Pente ouest de la coupe A : Stabilité local du premier banc de la halde de co-disposition dans des conditions de charge statique
- > Coupe B : Déposition des résidus et stériles dans la fosse à l'année 26 ans (fin de la vie de la mine).

2.3 Propriétés géotechniques des matériaux

Les propriétés géotechniques des sols utilisées dans les analyses de stabilité sont montrées au tableau 2-1 et sont basées sur des études géotechniques et hydrogéologiques (SNC-Lavalin, 2018a-e et 2019a-b), des essais en laboratoire (Golder Associés et SGS, 2018) ainsi que l'étude de faisabilité NI43-101 (MC-DRA, 2018).

La stratigraphie des dépôts de surface dans l'empreinte de la halde de co-disposition est composée d'une couche de sable et de silt (till) en proportion variable (sable silteux à silt et sable) variant de 0,35 à 2,95 m d'épaisseur recouverte d'une couche superficielle de sols organiques majoritairement sableux variant entre 50 et 100 mm d'épaisseur. Il a été assumé dans le cadre des analyses que cette dernière sera excavée avant la construction de la halde de co-disposition. Selon la classification USCS, le dépôt de sable et de silt est de type SM (sable silteux) de compacité moyenne lâche à compact ($10 < N < 15$), la fraction fine de ces sols est non plastique et la perméabilité est estimée entre 1×10^{-5} et 1×10^{-6} m/s. Un poids volumique total de 19 kN/m^3 similaire au poids volumique saturé a été assumé étant donné un niveau de la nappe phréatique élevé et en fonction des teneurs en eau mesurées dans les sols de fondation (sable silteux). L'angle de frottement conservateur de 32° a été considéré, c'est-à-dire lorsque le sol de fondation est complètement saturé et lâche. Cette valeur a été confirmée par des essais de cisaillement direct. Le dépôt de sable silteux repose sur le socle rocheux qui consiste en un gneiss charnockitique, un paragneiss mixte et, une quartzite impure avec une zone fracturée d'environ 10 m d'épaisseur recouvrant un roc qualifié de bonne à excellente qualité (RQD de 84 à 99%). Une moyenne du poids volumique total du roc intact ($\gamma = 26,2 \text{ kN/m}^3$) a été établie en fonction des résultats des analyses de laboratoire. La résistance au cisaillement du roc intact a été évaluée en utilisant le critère généralisé de Hoek et Brown en utilisant la désignation de la qualité de la roche (RQD) et une résistance en compression uniaxiale variant entre 191 MPa et 242 MPa. Les caractéristiques de résistance typiques, les modules d'élasticité (ou module de Young) et le coefficient de Poisson pour les sols et le roc ont été estimés d'après l'expérience acquise avec des sols et roches similaires ainsi que la



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	3	

littérature (Obrzud et Truty 2018; Goodman, 1980). Les paramètres élastiques-plastiques ont été utilisés pour les sols naturels dans l'analyse de tassement afin de simuler des conditions non drainées (tassement immédiat).

Pour les stériles miniers, un poids volumique de 21,21 kN/m³ a été utilisé ainsi qu'un facteur de foisonnement présumé de 25%. La résistance au cisaillement des stériles miniers diminue généralement à des contraintes de confinement plus élevées en raison de l'écrasement des points de contact des particules et d'une réduction de la dilatance du matériau. La résistance au cisaillement est également liée à la densité et à la durabilité du matériau et à la distribution granulométrique. L'estimation de l'angle de friction des stériles miniers est basée sur une moyenne de la densité relative des grains (D_r) et une contrainte normale effective (σ'_n) approximative de 1 MPa (Leps, 1970). Des valeurs de poids volumiques pour les résidus potentiellement générateur de drainage minier acide (PGA) et non générateur de drainage minier acide (NGA) de 22,17 kN/m³ et 18,84 kN/m³ ont été respectivement imposées au modèle de stabilité ainsi qu'un angle de frottement identique de 33°. Les deux type de résidus sont de type ML (silt) selon la classification USCS et sont non plastiques. Les résidus miniers sont pulvérulents et, par conséquent, seuls les paramètres élastiques linéaires sont utilisés pour ceux-ci dans l'analyse de tassement. La sélection de ces paramètres est basée sur la littérature (Lowrie, 2002).

Pour l'étanchéisation des fondations, une géomembrane de polyéthylène haute densité (HDPE) avec une surface lisse (représentant le pire cas) recouverte d'un géotextile et d'une couche de sable d'environ 30 cm d'épaisseur a été considéré dans l'analyse. Il a été assumé que la couche de sable de protection proviendrait de l'excavation des sols de fondation, donc les mêmes propriétés géotechniques ont été utilisées. Un angle de frottement entre 20° et 24°, basé sur la littérature, a été établi (Negussey et al., 1988 et Lechowicz et Wrzesinski, 2015).



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite		Révisé par : Denis Vachon		
			Rév	Date	Page
654068-1000-4GER-0001		00	13 mars 2019	4	

Tableau 2-1 : Propriétés géotechniques des matériaux

Matériau	Poids volumique total (γ)	Cohésion (c)	Angle de frottement effectif (φ)	Module Élastique (E)	Coefficient de Poisson (ν)
	(kN/m ³)	(kPa)	(degré)	(MPa)	(-)
Résidus miniers PGA	22,17 (1)	-	33° (5)	30 (9)	0,33 (9)
Résidus miniers NGA	18,84 (1)	-	33° (5)	30 (9)	0,33 (9)
Stériles miniers	21,7 (2)	-	40° (6)	75 (9)	0,33 (9)
Sol fondation (sable silteux à silt et sable)	19,0 (4)	-	32°	30 (9)	0,35 (9)
Roc fracturé	25,0 (3)	10 (7)	40° (7)	15 000 (9)	0,25 (9)
Roc intact	26.2 (2)	20 000	-	15 000	0,25
Géomembrane	0	-	20° (8)	-	-

Note (s) :

- 1) Basé sur les densités relatives de la NI43-101 et selon la teneur en eau attendue après filtration.
- 2) Poids volumique unitaire total moyen basé sur les résultats des essais en laboratoire, tel que rapporté sur les rapports de forage GT-17-09 et GT-17-10 (SNC-Lavalin, 2018b).
- 3) Estimation basée sur la densité relative de la NI43-101 et un facteur de foisonnement présumé de 25%.
- 4) Le poids volumique total est semblable au poids volumique saturé étant donné le niveau élevé de la nappe phréatique (SNC-Lavalin, 2018b), et est typique d'un sable lâche. L'angle de frottement a été confirmé par un essai de cisaillement direct drainé (Golder Associés, 2018).
- 5) L'angle de frottement estimé est basé sur les résultats des essais de cisaillement direct (Golder Associates, 2018).
- 6) L'angle de frottement moyen estimé en fonction de la densité moyenne des stériles et de la contrainte normale de confinement d'environ (σ'_n) = 1,0 MPa (Leps, 1970)
- 7) La résistance au cisaillement du roc a été évaluée en utilisant le critère généralisé de Hoek et Brown avec les forces de compression uniaxiales et le RQD de la roche, telle que rapportée sur les rapports de forage géotechniques, c.-à-d. 191 MPa (GT-17-10-22) et 242 MPa (GT17-09 CR8).
- 8) L'angle de frottement de l'interface est entre 20° et 24° selon la littérature (Negussey et. Al., 1988 et Lechowicz et Wrzesinski, 2015).
- 9) Les paramètres matériels des sols de fondation et du socle rocheux sont estimés à partir de l'expérience acquise avec des sols et des roches similaires et des ouvrages publiés (p. ex. caractéristiques de résistance typiques et module Young pour les rejets miniers et les sols de Lowrie, 2002, et Obrzud et Truty 2018; Valeurs de résistance typiques pour le roc d'après Goodman, 1980).



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
	654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	5

2.4 Niveaux piézométriques

Des piézomètres de type Casagrande ont été installés dans les trous de forage suite au retrait des tubages. Selon les lectures obtenues dans les instruments de surveillance des 7 piézomètres installés à l'emplacement de la future halde de co-disposition et mesurés entre le 18 et 21 novembre 2017 (SNC, 2018b), le niveau de la nappe d'eau dans les sols varie entre 1,5 et 2,5 m de profondeur.

3.0 Analyses de stabilité géotechnique et de tassement

3.1 Méthodologie

Les analyses de stabilité ont été réalisées avec le logiciel SLOPE/W de la suite Geostudio 2016 (version 8.16.0.12829), par Geo-Slope International Ltd, Calgary, Canada (Geo-Slope, 2016). Ce logiciel en est un d'usage courant et reconnu internationalement dans le domaine de la stabilité de pente et d'ouvrage. Les analyses ont été réalisées en utilisant la méthode d'équilibres limites de type Morgenstern-Price, à la fois en conditions statiques et avec la méthode pseudo-statique pour obtenir des facteurs de sécurité minimaux (FoS) associés aux surfaces de rupture circulaire critiques. La condition de chargement sismique a été modélisée en effectuant une analyse pseudo-statique sur les 2 coupes types à l'étude. Les conditions limites suivantes ont été fixées dans les modèles numériques afin de simuler les surfaces de rupture potentielle :

- > Coupe A et B : considère que les propriétés du roc ne peuvent pas influencer la stabilité de la halde de co-disposition, donc il est considéré impénétrable. Cela permet de simuler une surface de rupture dans les sols de fondation ;
- > Coupe A : la couche de mort-terrain a été fixée comme impénétrable pour simuler une surface de rupture le long de la géomembrane.

L'analyse des tassements a été réalisée à l'aide du logiciel d'élément fini SIGMA/W de la suite Geostudio 2016 à partir de la coupe A de la halde de co-disposition de l'année 5. Un modèle 2D avec un maillage rectangulaire et triangulaire (taille d'élément 2 m x 2 m) a été utilisé. Le modèle se compose d'un nombre total de 25 044 éléments. La figure 1-C illustre la configuration de la halde de co-disposition (année 5) et les sols de fondation ainsi que l'emplacement de la section A utilisée dans l'analyse. En raison de la surcharge résultant de la halde de co-disposition à la surface, le tassement sera gouverné par un tassement immédiat (compression élastique) à court terme en condition non drainé. L'hypothèse que la halde de co-disposition sera construite en 12 étapes (c.-à-d. banc par banc) a été considérée dans l'analyse.

Prendre note que les conditions des eaux souterraines et le niveau d'eau dans la halde (élévation du niveau d'eau associé à la charge maximale d'eau dans la halde) prises en compte dans les modèles SLOPE/W sont issues d'analyses d'écoulement réalisées à partir du logiciel SEEP/W sur chaque section transversale avant les analyses de stabilité géotechnique. Les détails ces analyses sont fournies dans la note technique 654068-1000-4WER-0001 (SNC, 2019a). L'état des eaux souterraines est basé aussi sur l'étude hydrogéologique pour le gisement de graphite du projet Matawinie (SNC, 2018e).

3.2 Critères de conception pour les analyses de stabilité

Les critères retenus pour établir la stabilité de la halde de co-disposition sont basés sur les normes en vigueur qui sont issues de la *Directive 019 (D019)* sur l'industrie minière (MDDEP, 2012), l'Association canadienne des barrages (ACB, 2014) et le guide et modalités de préparation du plan et exigences générale en matière de restauration des sites miniers au Québec du Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN, 2016).



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite		Révisé par : Denis Vachon		
			Rév	Date	Page
654068-1000-4GER-0001		00	13 mars 2019	6	

Les critères minimaux sont présentés au tableau 3-1. Il convient de noter que les FoS recommandés par la D019 et de l'ACB et présentés au tableau 3-1 sont applicables aux structures avec rétention d'eau alors que ceux du MERN s'appliquent aux haldes de stériles miniers et s'appliquent donc à la halde de co-disposition pour l'analyse de stabilité actuelle.

Tableau 3-1 : Critères relatifs à la géométrie de la halde et à sa stabilité

Condition de chargement	D019	ACB	MERN	Établi
Stabilités locales (pour chaque banc)				
Conditions statiques : court terme ¹	N/A	N/A	1,0 à 1,1	1,0
Conditions statiques : long terme	N/A	N/A	1,2	1,2
Stabilités globales (rupture en profondeur ou dans les fondations)				
Conditions statiques : court terme (durant la construction et/ou à la fin)	1,3 à 1,5	>1,3 ¹	1,3 à 1,5 ¹	1,5
Conditions statiques : long terme	1,5	1,5	1,5	1,5
Conditions pseudo-statiques pour un séisme ayant une période de récurrence 1/2475 ans et un $K_h = 0,064$ g	1,0	1,0	1,1 à 1,3 ¹	1,1
Conditions post-sismiques	1,3	1,2	1,3 ¹	1,3
Notes				
1) Selon le risque et l'incertitude				
2) K_h : Coefficient pseudo-statique utilisé dans les analyses de stabilité				

Concernant les analyses en conditions pseudo-statiques, le coefficient pseudo-statique à utiliser dépend de la période de récurrence applicable. Pour ce faire, la résistance aux séismes a d'abord été évaluée par rapport à l'emplacement de l'ouvrage et aux dommages causés en cas de rupture. La classification a été réalisée sur la base des recommandations de l'ACB. En termes de conséquence, la classification de la halde de co-disposition est de niveau important. Pour cette classe de conséquence, les périodes de récurrences de sismicité en période opérationnelle et de fermeture sont 1/1 000 ans et 1/2 475 ans, respectivement. Toutefois, selon la D019, la période de récurrence du séisme de conception ne doit pas être inférieure à la probabilité de dépassement annuelle de 1/2 475 ans pour les ouvrages avec retenue d'eau. Pour la simulation d'un tremblement de terre, cette période de récurrence considérée comme étant conservatrice pour une halde de co-disposition a été adoptée comme le séisme de conception maximal pour la vie de la halde de co-disposition.



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
	654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	7

La valeur d'accélération sismique est basée sur les nouveaux modèles émis dans l'édition 2015 du Code national du bâtiment – Canada (CNB) et est présentées ci-dessous en fonction des récurrences cibles.

- > Période de récurrence de 1/2 475 ans = 0,128 g

L'analyse pseudo-statique applique une force horizontale (coefficient sismique) au modèle pour simuler la charge sismique. Le coefficient sismique horizontal (K_h) utilisé dans l'analyse de stabilité sismique a été estimé à l'aide de la formule suivante développée par Melo et Sharma (2004) :

$$K_h = \text{accélération sismique} \times 0,5 =$$

$$0,128 \text{ g} \times 0,5 = 0,06 \text{ g (n'inclus pas la classe de site ni les effets topographiques)}$$

Le FoS minimum requis pour l'analyse en condition pseudo-statique est 1,1. Le fait de satisfaire à cette exigence implique que les événements sismiques de conception entraîneraient des déformations acceptables et n'affecteraient pas l'intégrité de la halde de co-disposition.

L'effet des vibrations produites par les opérations de dynamitage n'a pas été considéré dans cette étude, car il est assumé que la vitesse maximale des vibrations permises au sol n'excède pas 12,7 mm/s (D019, 2012). Cette vitesse de vibrations est considérée comme étant conservatrice étant donné que, selon la littérature, la liquéfaction des sables saturés lâches peut être induite lorsque la vitesse maximale des vibrations sismiques dépasse 75 mm/s (Charlie et al. 1988).

3.3 Résultats des analyses de stabilité géotechnique

Le tableau 3-3 résume les résultats des analyses de stabilité réalisées sur les deux coupes types de la halde de co-disposition. L'Annexe B présente toutes les figures des analyses effectuées.

Dans tous les cas, le FoS calculé pour les coupes types A et B dépasse le FoS minimum requis pour la stabilité de la halde de co-disposition dans des conditions de chargement statique et sismique (méthode pseudo-statique). La stabilité locale du premier banc de la halde a été évaluée dans des conditions de charge statique sur la pente ouest de la coupe A. Le FoS calculé respecte le minimum requis de FoS de 1,2.



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE		Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite		Révisé par : Denis Vachon		
	654068-1000-4GER-0001		Rév	Date	Page
			00	13 mars 2019	8

Tableau 3-2 : Résultats des analyses de stabilité géotechnique

Analyse	FoS calculé			FoS Requis	Figures (Annexe A)
	Section A		Section B		
	Rupture à travers la géomembrane	Rupture à travers le sol de fondation	Pente nord		
Stabilités locales (pour chaque banc)					
Conditions statiques	N/A	1,78	N/A	1,2	Figure 1-B
Stabilités globales (rupture en profondeur ou dans les fondations)					
Conditions statiques : 5 ans	1,72	2,14	N/A	1,5	Figure 2-B et 3-B
Conditions pseudo-statiques : 5 ans	1,39	1,75	N/A	1,1	Figure 4-B et 5-B
Conditions statiques : 20 ans (pente ouest)	1,84	2,45	N/A	1,5	Figure 6-B et 7-B
Conditions pseudo-statiques : 20 ans	1,47	2,00	N/A	1,1	Figure 8-B et 9-B
Conditions statiques : 26 ans	N/A	N/A	1,98	1,5	Figure 10-B
Conditions pseudo-statiques : 26 ans	N/A	N/A	1,53	1,1	Figure 11-B

3.4 Résultats des analyses de tassement

La Figure 1 de l'annexe C présente l'amplitude des tassements anticipés sous l'empreinte de la halde de co-disposition et sa variation le long de la coupe A. Les résultats suggèrent qu'un tassement total maximal de 0,3 m se produirait dans les sols de fondation au stade 12, où la halde de co-disposition serait entièrement construite.

La Figure 2 de l'annexe C présente la répartition des contraintes totales dans les sols de fondation. Une déformation maximale de l'ordre de 2% à 3% attribuable au tassement total des sols de fondation a aussi été observée dans les résultats d'analyses. La contrainte totale maximale estimée est relativement bien inférieure à la contrainte de conception d'un système de revêtement avec des contraintes permises de l'ordre de 6% à 8% (contrainte admissible pour la géomembrane en HDPE) (Peggs et al., 2005).



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
	654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	9

4.0 Conclusion et recommandations

La stabilité de la halde de co-disposition du projet Matawinie de Nouveau Monde Graphite a été évaluée dans le cadre de l'étude d'ingénierie de faisabilité. Les objectifs de l'étude était de valider l'effet de la hauteur maximale de la halde atteinte après 5 ans, du rabattement de la nappe d'eau souterraine (pompage pour le maintien à sec de la fosse) après 20 ans d'opération et de la déposition des stériles et résidus dans la fosse à l'année 26 ans (cessation minière) sur la stabilité géotechnique globale de la halde de co-disposition. La stabilité locale du premier banc de la halde a aussi été vérifiée. Les analyses de stabilité ont été réalisées en conditions statiques et sismiques (méthode pseudo-statique) à l'aide de deux coupes types, soit une coupe est-ouest (A) et une coupe nord-sud (B).

Pour tous les scénarios simulés, le facteur de sécurité calculé dépasse les valeurs minimales requises pour la stabilité de la halde de co-disposition dans des conditions de chargement statique et sismique. Puisque tous les critères de stabilité ont été respectés en conditions sismiques, aucune analyse de déformation n'a été effectuée.

Dans la plupart des cas, le tassement immédiat ne sera pas préoccupant parce qu'il se produira au fil de la construction. Le tassement total (tassement différentiel) qui pourrait se produire le long de l'interface de la géomembrane correspond à une déformation maximale de l'ordre de 2% à 3% ce qui est relativement bien inférieure à la contrainte de conception d'une géomembrane avec des contraintes permises de l'ordre de 6% à 8%. Il est également possible que des poches localisées de tassement pourraient apparaître en raison de la création de vides dans les sols sous-jacents à la géomembrane. L'érosion des sols peuvent être générée par l'infiltration d'eau via des fuites dans la géomembrane. Tel que démontré dans l'analyse d'écoulement d'eau les débits de fuite mesurés dans de possibles défauts circulaires de la géomembrane sont relativement faibles (2019a). De plus, la géomembrane sera composée d'un renfort (géotextile) de manière à prévenir les tassements localisés (Christensen et al., 1993).

Les principales recommandations pour les travaux d'ingénierie détaillée suivantes sont basées sur les résultats des analyses de stabilité de l'ingénierie de faisabilité :

- > Une investigation géotechnique complémentaire est nécessaire pour confirmer la stratigraphie exacte des sols de fondation dans la zone proposée (aire d'accumulation) pour la halde de co-disposition.
- > Selon les connaissances actuelles, il est possible que le dépôt de sable silteux soit liquéfiable en condition saturée dû à sa compacité moyenne lâche à compact. Des essais in situ de compacité seront aussi à réaliser (essais de pénétration standard «SPT») afin de statuer sur le potentiel de liquéfaction des sols de fondation, qui n'a pu être évalué dans la présente étude. S'il s'avère que les sols sont liquéfiables, des analyses de stabilité supplémentaires en condition post-sismique devront être réalisées.
- > Une différence significative des propriétés géotechniques des matériaux lors de la mise en place de la halde, en particulier ceux des résidus miniers et des stériles, affecteraient de manière significative les résultats de la présente analyse de la stabilité globale de la halde de co-disposition et le tassement des sols de fondation :
 - > Il est recommandé de réaliser des tests de cisaillement et/ou des tests triaxiaux sur des échantillons de résidus miniers et de stériles pour connaître leur résistance au cisaillement (correspondant à la densité cible) non drainé et leur comportement dynamique, c'est-à-dire leur susceptibilité à l'écrouissage négatif (*strain softening*) et à l'écrouissage négatif cyclique (*cyclic softening*).



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
	654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	10

- > La stabilité géotechnique de la halde de co-disposition devra être validée selon les propriétés des matériaux mises à jour.
- > Des modifications du plan de déposition des résidus et stériles miniers pourraient entraîner des modifications importantes de la géométrie de la halde de co-disposition, en particulier sur la configuration des cellules, et du niveau d'eau dans la halde. La stabilité géotechnique de la halde de stériles devrait alors être validée selon la mise à jour de la géométrie et la configuration des cellules de résidus.
- > Un suivi de la qualité du roc afin de vérifier le rayon d'influence du dynamitage dans la fosse. S'il s'avère que les propriétés du roc changent, les analyses de stabilité géotechnique de la halde de co-disposition devront être validées selon les propriétés mises à jour.
- > Une étude de stabilité incluant le recouvrement pour la restauration finale de la halde de co-disposition sera nécessaire pour vérifier la stabilité long terme de celui-ci mais une pente globale conservatrice a été utilisée pour l'ingénierie de faisabilité (3 :1).
- > La pente globale et les conditions (géotechniques, hydrologique, hydrogéologique et opérationnelles) à respecter pour la halde au-dessus de la fosse remblayée pendant l'exploitation et post-exploitation de la fosse devront être validées lors de l'ingénierie détaillée.
- > Pour le tassement immédiat, il doit être pris en compte lorsqu'il y a construction de plusieurs bancs en même temps. Un suivi à une fréquence plus rapprochée est alors recommandé et des correctifs devront être apportés au besoin.
- > Des analyses de stabilité spécifiques pour évaluer l'effet du dynamitage sur la stabilité de la halde, principalement dans les sections de la halde superposées au remblai dans la fosse.
- > Des validations sur l'enrochement de protection à mettre en place sur le secteur de la halde dans la fosse en contact avec le futur lac.



 SNC • LAVALIN	NOTE TECHNIQUE	Préparé par : Marjan Oboudi (simulation numérique) \ Fannie Lessard		
	Stabilité géotechnique de la halde de co-disposition du projet Nouveau Monde Graphite	Révisé par : Denis Vachon		
		Rév	Date	Page
	654068-1000-4GER-0001	00	13 mars 2019	11

5.0 Références

- D. NEGUSSEY, W. K. D. WIJEWICKREME AND Y. P. VAID (1988), Geomembrane interface friction
- Golder Associés (2018). *Consolidated Drained Direct Shear Test, Project No. 1898583 (6000)*
- Goodman R.E. (1980). Introduction to Rock Mechanics, Wiley, New York, pp.305-8
- Charlie, W. A., Doehring, D. O., Veyera, G. E., & Hassen, H. A. (1988). *Blast induced liquefaction of soils: laboratory and field tests. COLORADO STATE UNIV FORT COLLINS DEPT OF CIVIL ENGINEERING.*
- Christensen, T. H., Cossu, R., & Stegmann, R. (Eds.). (1993). *Landfilling of waste: Barriers* (Vol. 2). CRC Press.
- Lechowicz and Wrzesinski (2015). Assessment of embankment slope stability with geomembrane sealing
- Leps, T.M. (1970). Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Review of Shearing Strength of Rockfill, Juillet 1970.
- MDDEP (2012). Directive 019, Ministère du développement durable, de l'Environnement et des Parcs, mars 2012.
- MERN (2016). Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, novembre 2016.
- National Building Code of Canada (NBCC, 2015)
- Obrzud and Truty (2018). The hardening soil model – A practical guidebook 100701 Report revised 21.10.2018
- Peggs, I. D., Schmucker, B., & Carey, P. (2005). Assessment of maximum allowable strains in polyethylene and polypropylene geomembranes. In *Waste Containment and Remediation* (pp. 1–16).
- Lowrie, R. L. (Ed.). (2002). *SME mining reference handbook*. SME.
- SNC-Lavalin (2018a). Rapport géotechnique Nouvelle mine de graphite - Projet Matawinie Sites de disposition des résidus. 633679 (rap-1) — Étude géotechnique — site de l'usine, Avril 2018.
- SNC-Lavalin (2018b). Rapport géotechnique Nouvelle mine de graphite - Projet Matawinie Sites de disposition des résidus. 633679 (rap-2) — Étude géotechnique — site de disposition des résidus, Janvier 2018.
- SNC-Lavalin (2018c). Rapport géotechnique Nouvelle mine de graphite - Projet Matawinie Sites de disposition des résidus. 633679 (rap-3) — Étude géotechnique — excavation du mort-terrain – fosse, Avril 2018.
- SNC-Lavalin, (2018d). Rapport hydrogéologique – Projet Matawinie site du gisement de graphite -633679.- Étude hydrogéologique- Avril 2018
- SNC-Lavalin (2018e). Rapport d'étude conceptuelle de la halde de co-disposition - Étude conceptuelle pour la co-disposition de résidus et stériles miniers.
- SNC-Lavalin (2019a). Analyse d'écoulement à travers la halde de co-disposition - Projet Matawinie Sites de disposition des résidus. Rapport 654068-9000-4GER-0001
- SNC-Lavalin (2019b). Étude hydrogéologique Nouvelle mine de graphite - Projet Matawinie Sites de disposition des résidus. Rapport 654068-9300-4WER-0001
- SGS (2018). *Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort - NAG Tails and Sulphide Conc PAG , Test Report ref. No. 14236-010*
- Stress deformation modelling with SIGMA/W, GEO-SLOPE International Ltd, July 2013 Edition





Annexe A

Figures générales





Figure 2-B : Coupe typique de la halde de co-disposition

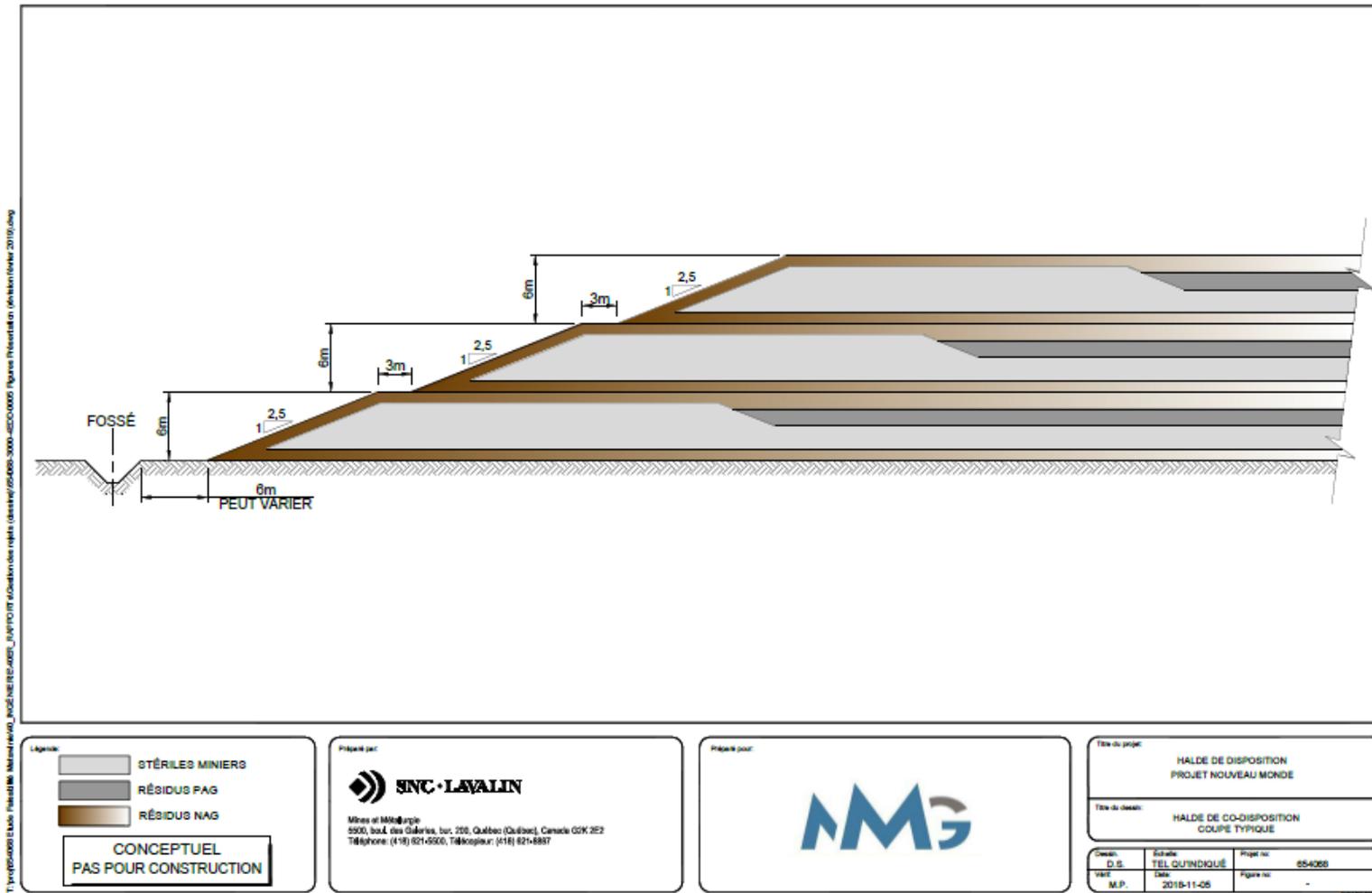




Figure 3-A : Coupe typique cellule de co-disposition

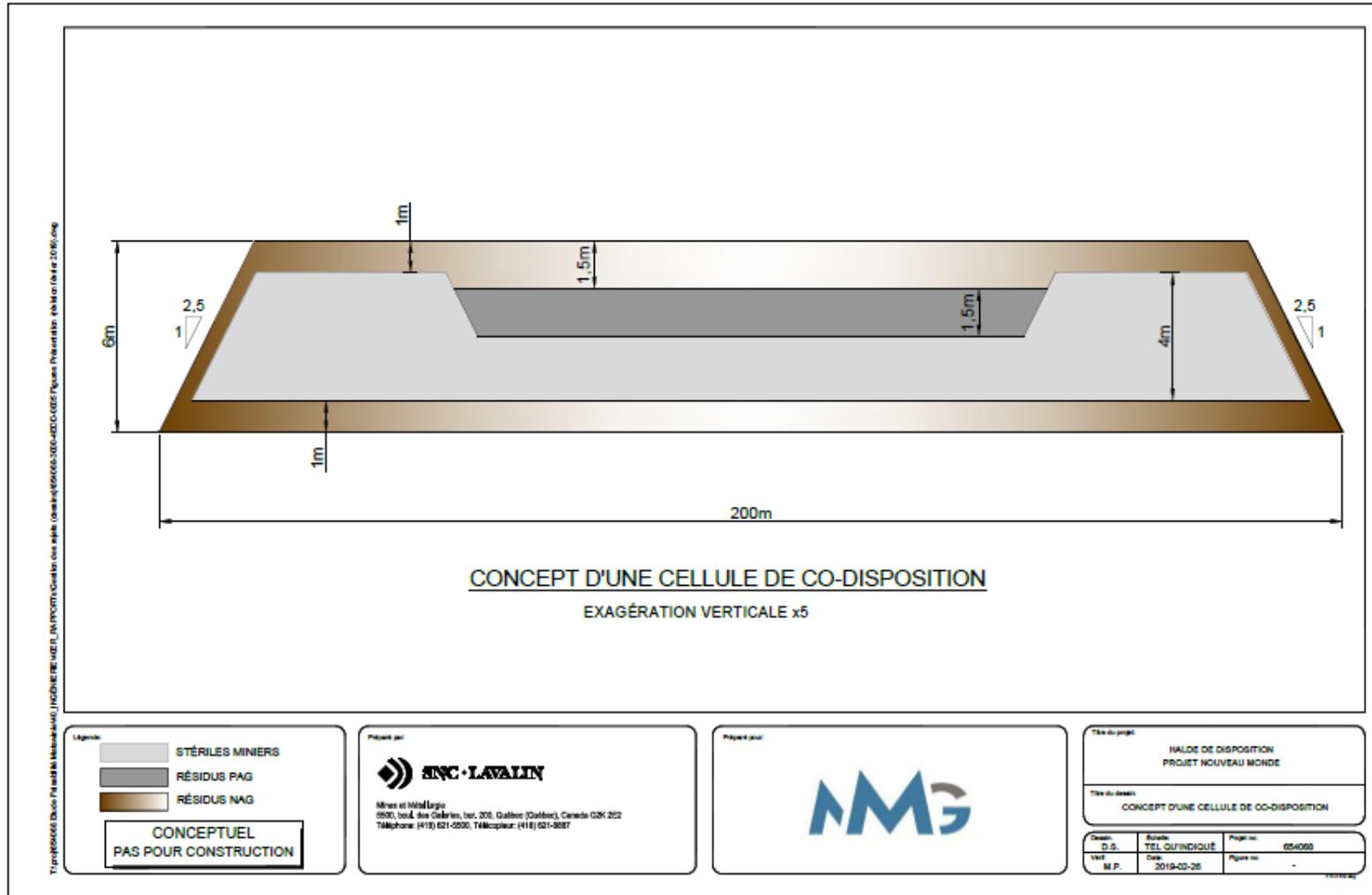




Figure 4-A : Halde de co-disposition à l'année 5, coupe A ouest

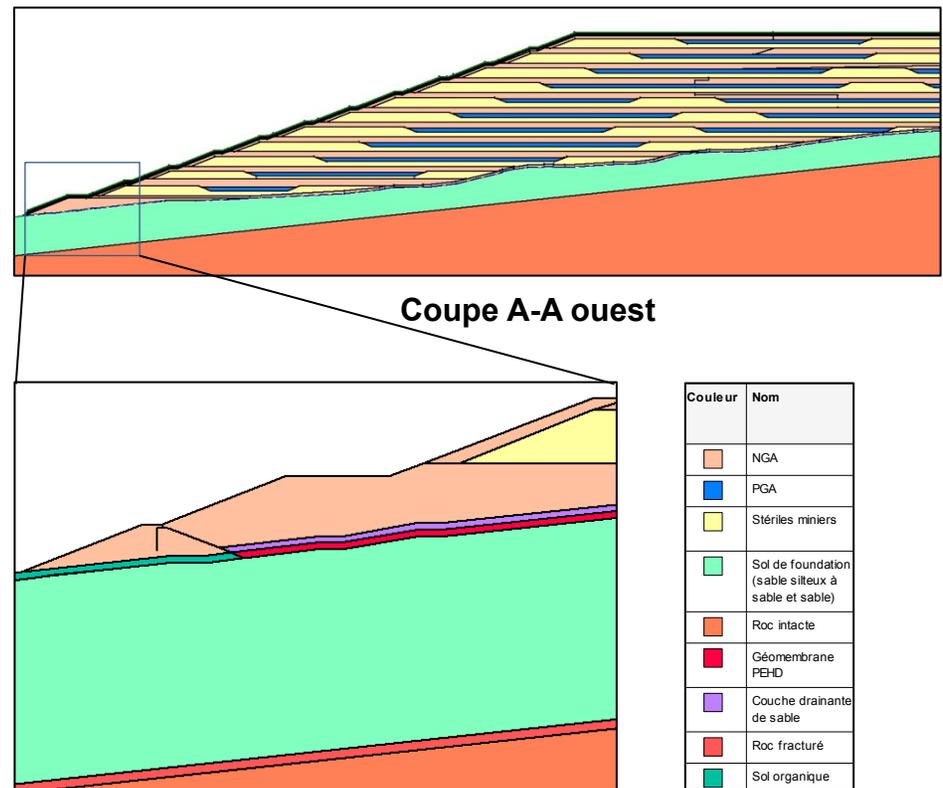
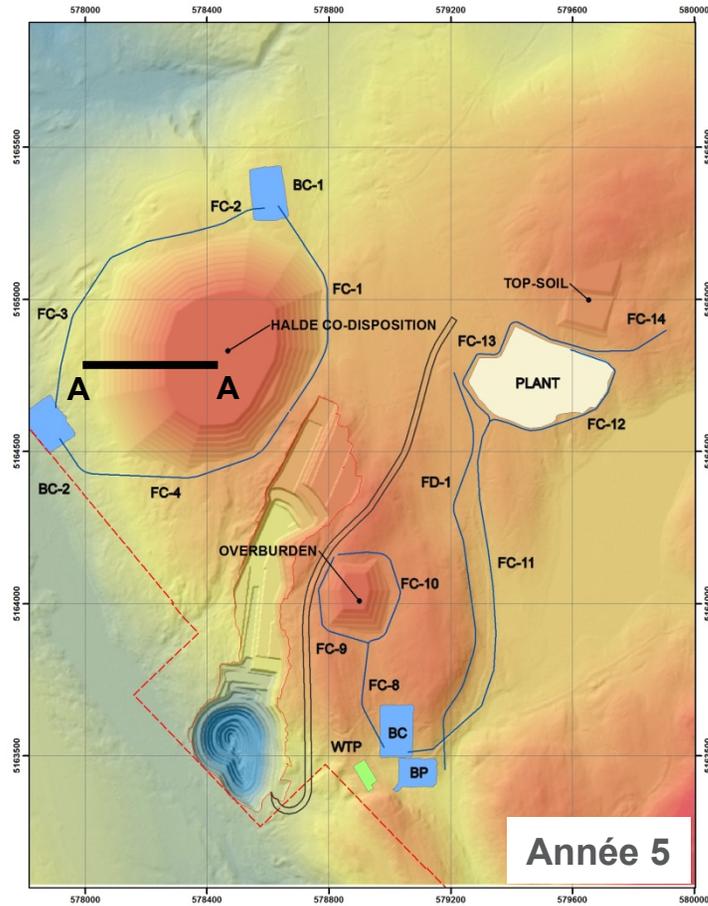
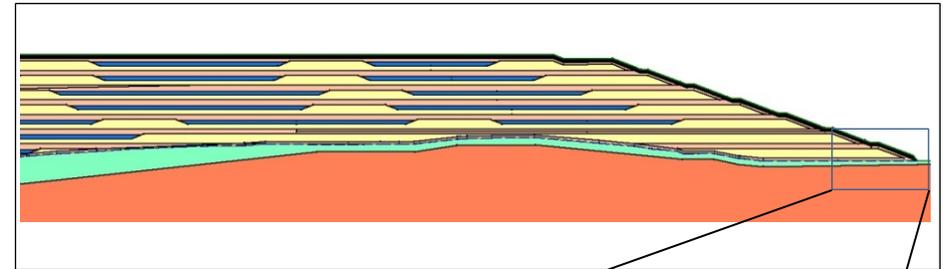
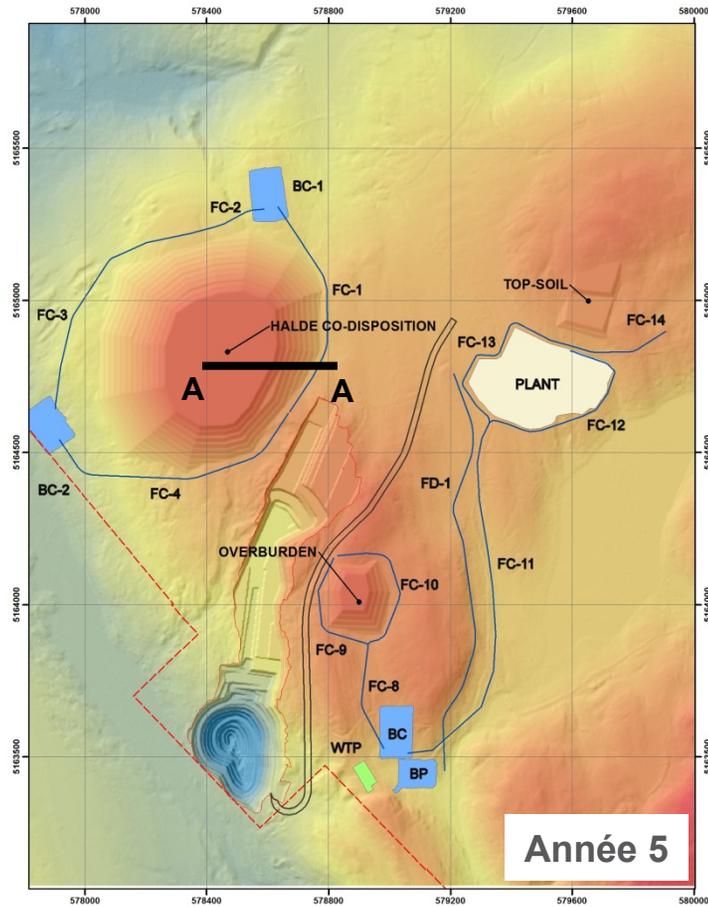




Figure 5-A : Halde de co-disposition à l'année 5, coupe A est



Coupe A-A est

Couleur	Nom
	NGA
	PGA
	Stériles miniers
	Sol de fondation (sable silteux à sable et sable)
	Roc intacte
	Géomembrane PEHD
	Couche drainante de sable
	Roc fracturé
	Sol organique

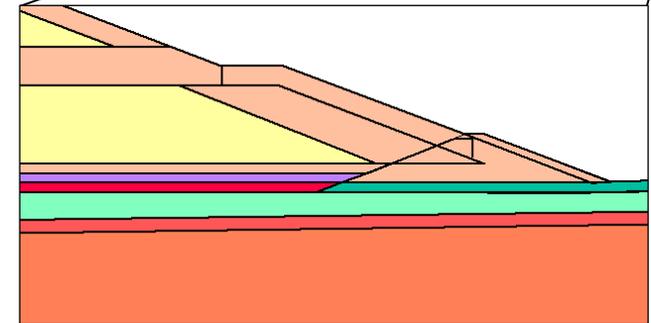




Figure 6-A : Halde de co-disposition à l'année 20

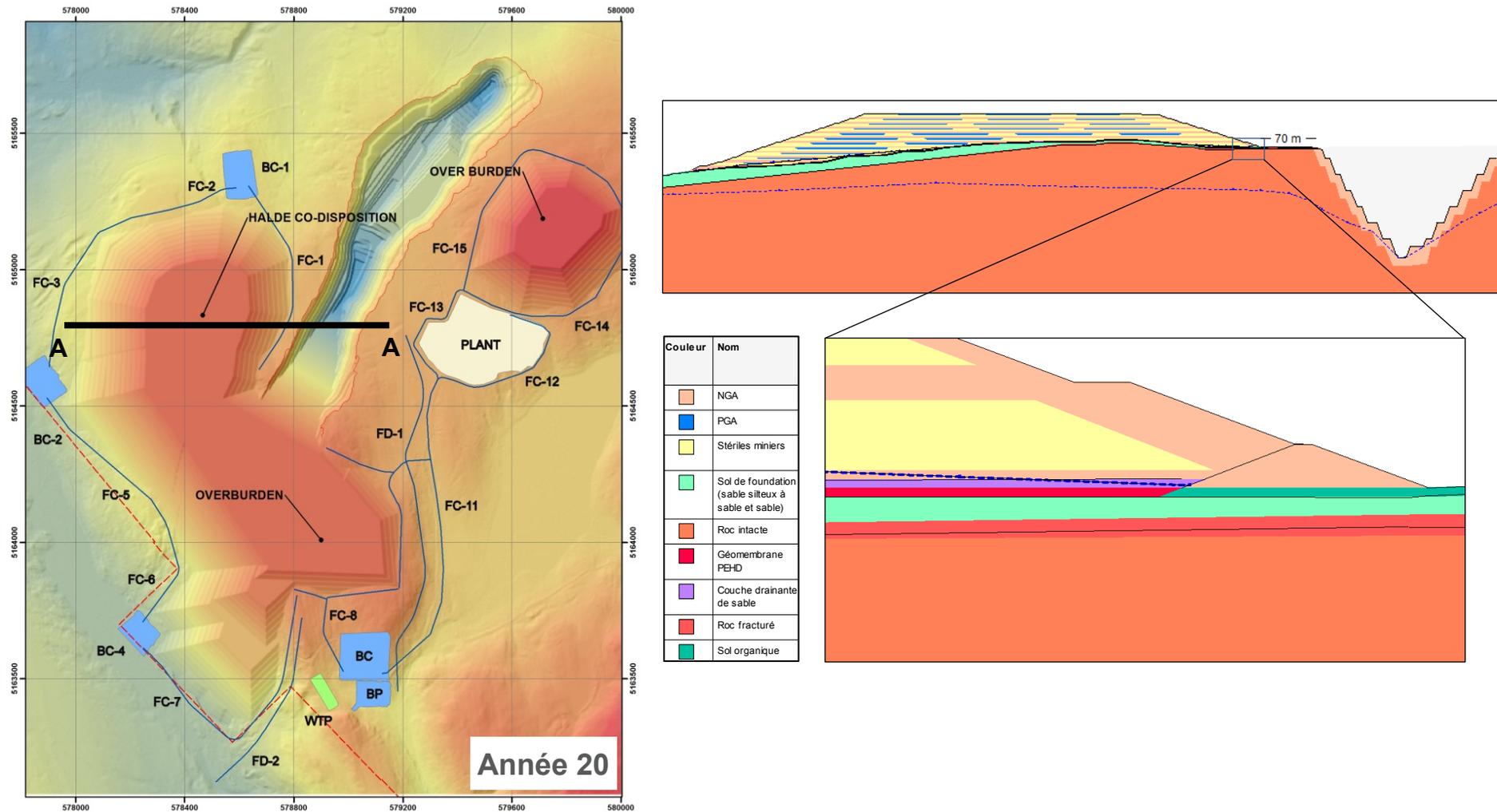
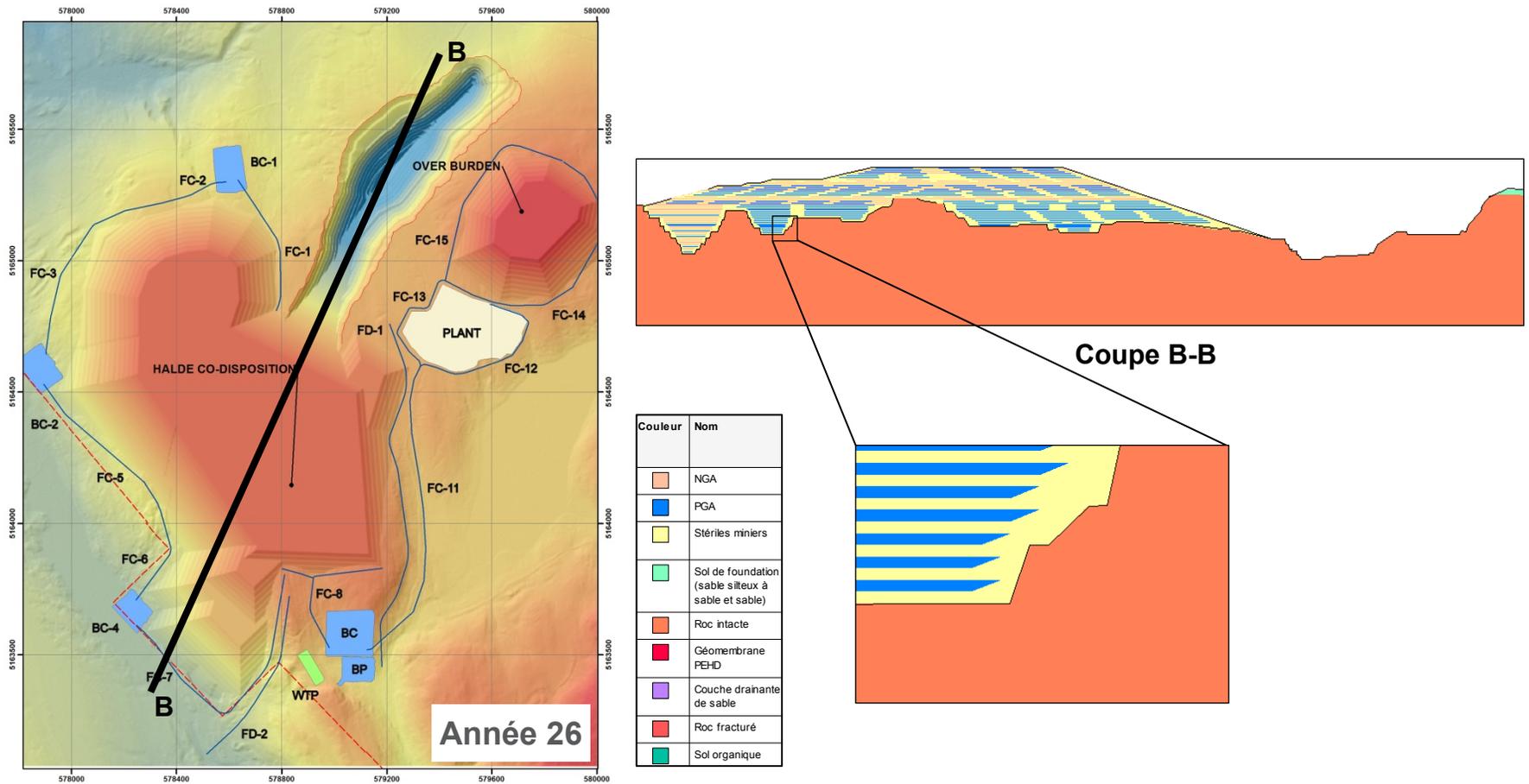




Figure 7-A : Halde de co-disposition à l'année 26, coupe B centrale





Annexe B

Résultats analyse de stabilité géotechnique





Figure 2-B : Résultat de l'analyse de stabilité locale en condition statique pour la coupe A
(FoS calculé de 1,78 < FoS requis de 1,2)

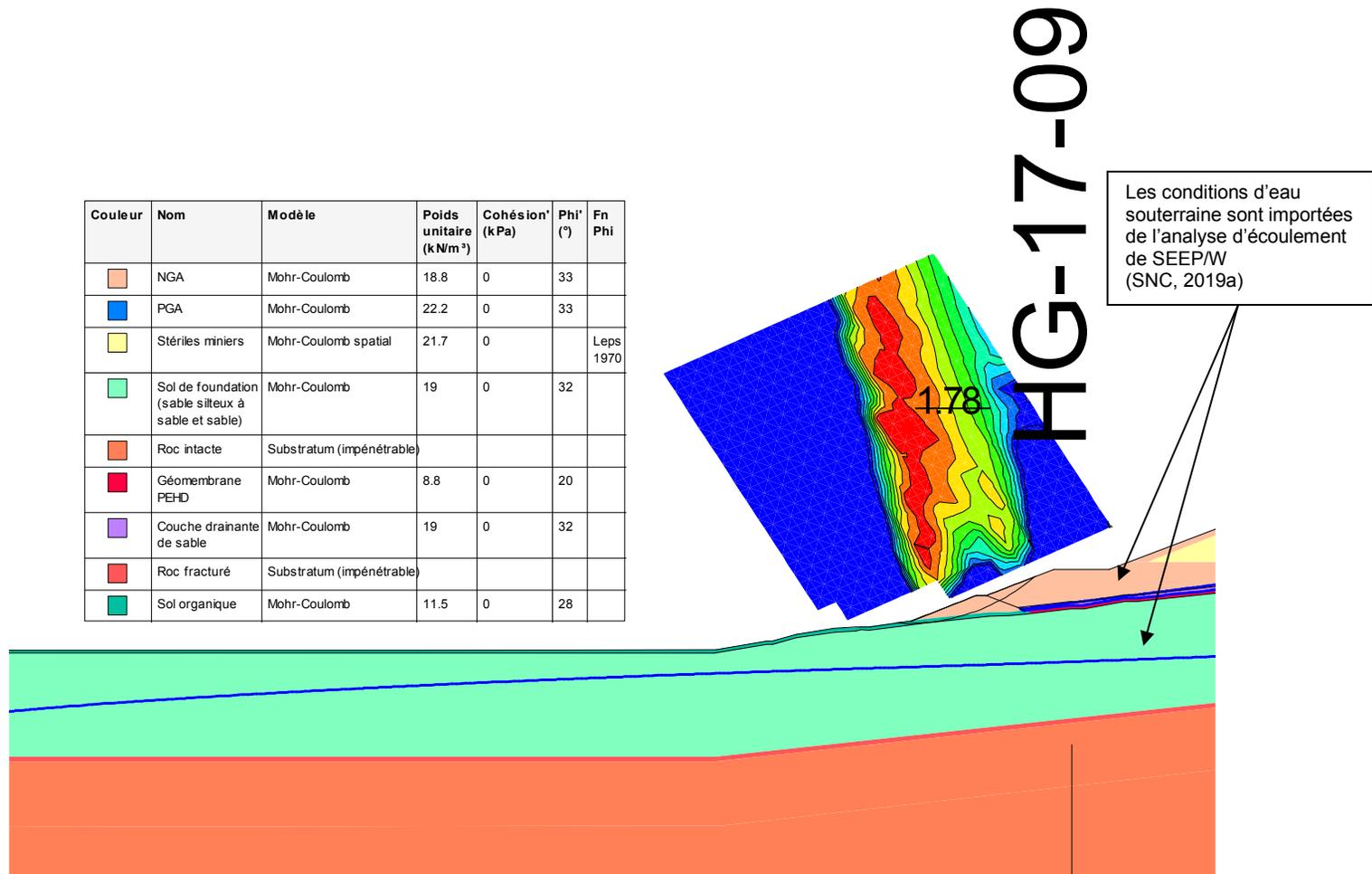




Figure 2-B : Résultat de l'analyse de stabilité 5 ans en condition statique pour la Coupe A, rupture à travers la géomembrane (FoS calculé de 1,72 < FoS requis de 1,5)

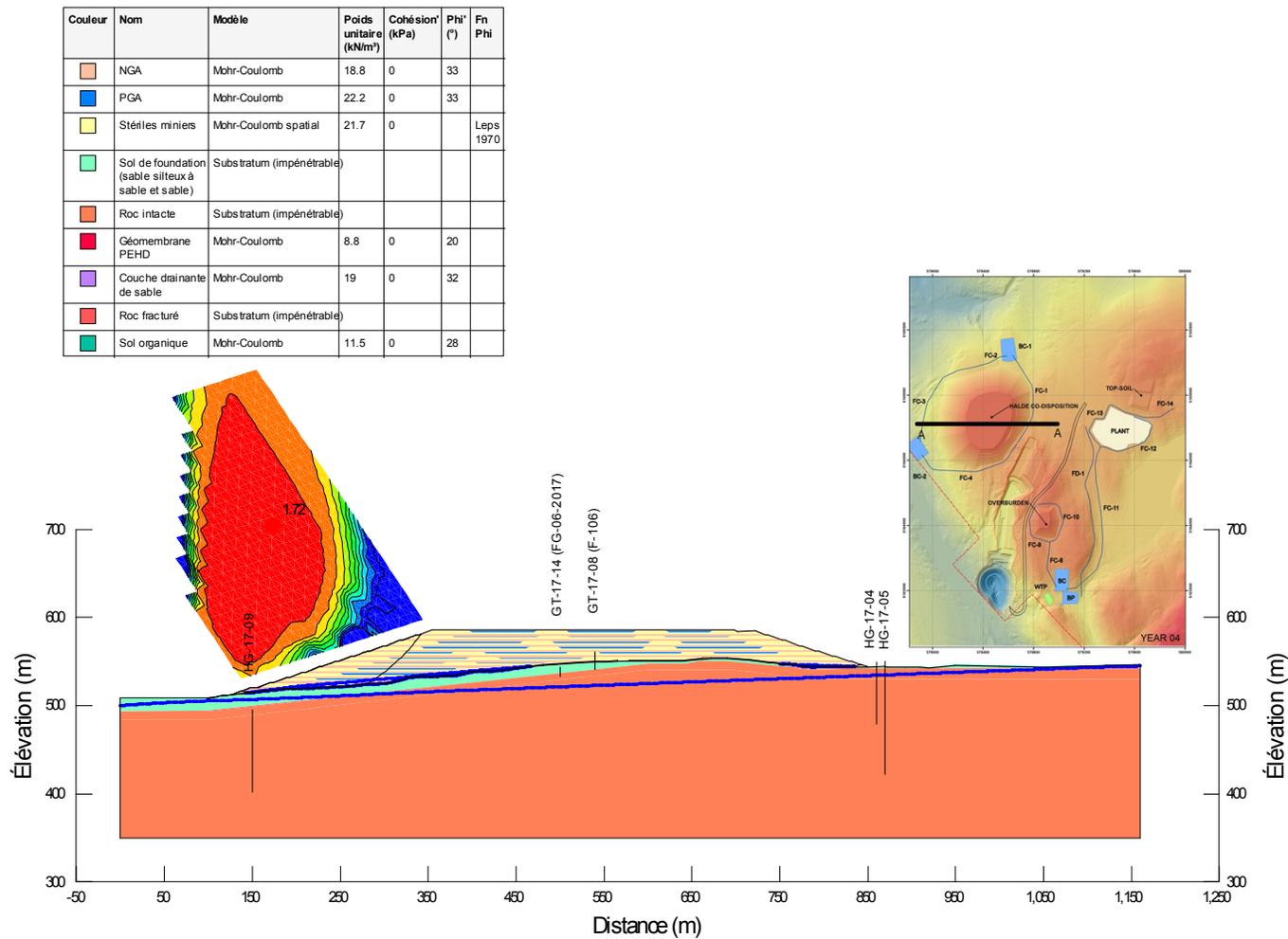




Figure 3-B : Résultat de l'analyse de stabilité 5 ans en condition pseudo-statique de la coupe A, rupture à travers la géomembrane (FoS calculé de 1,39 < FoS requis de 1,1)

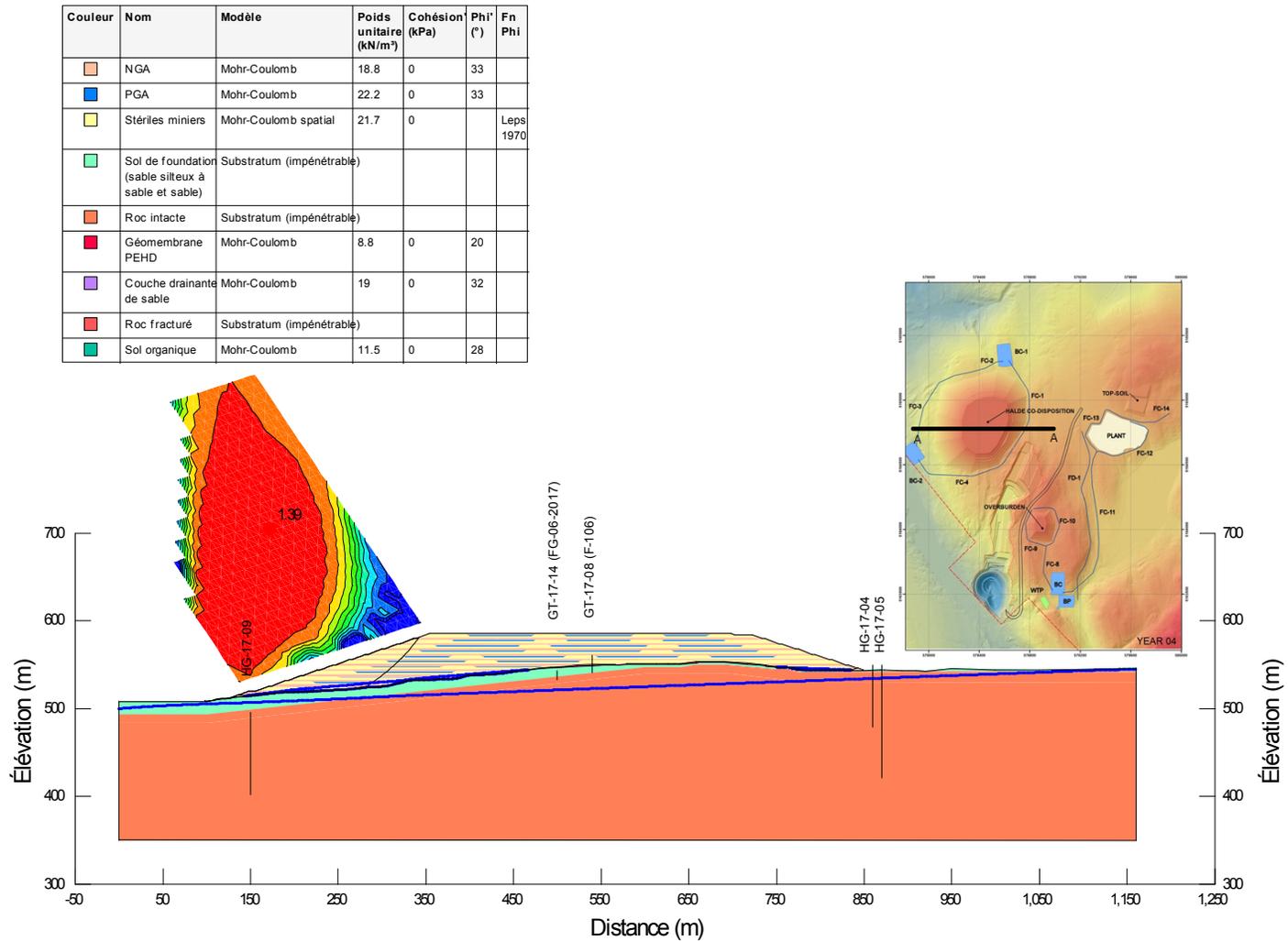




Figure 4-B : Résultat de l'analyse de stabilité 5 ans en condition statique de la coupe A, rupture à travers le sol de fondation (FoS calculé de 2,14 < FoS requis de 1,5)

Couleur	Nom	Modèle	Poids unitaire (kN/m ³)	Cohésion (kPa)	Phi (°)	Fn Phi
Orange	NGA	Mohr-Coulomb	18.8	0	33	
Bleu	PGA	Mohr-Coulomb	22.2	0	33	
Jaune	Stériles miniers	Mohr-Coulomb spatial	21.7	0		Leps 1970
Vert clair	Sol de fondation (sable silteux à sable et sable)	Mohr-Coulomb	19	0	32	
Orange foncé	Roc intacte	Substratum (impénétrable)				
Rouge	Géomembrane PEHD	Mohr-Coulomb	8.8	0	20	
Violet	Couche drainante de sable	Mohr-Coulomb	19	0	32	
Rouge foncé	Roc fracturé	Substratum (impénétrable)				
Vert foncé	Sol organique	Mohr-Coulomb	11.5	0	28	

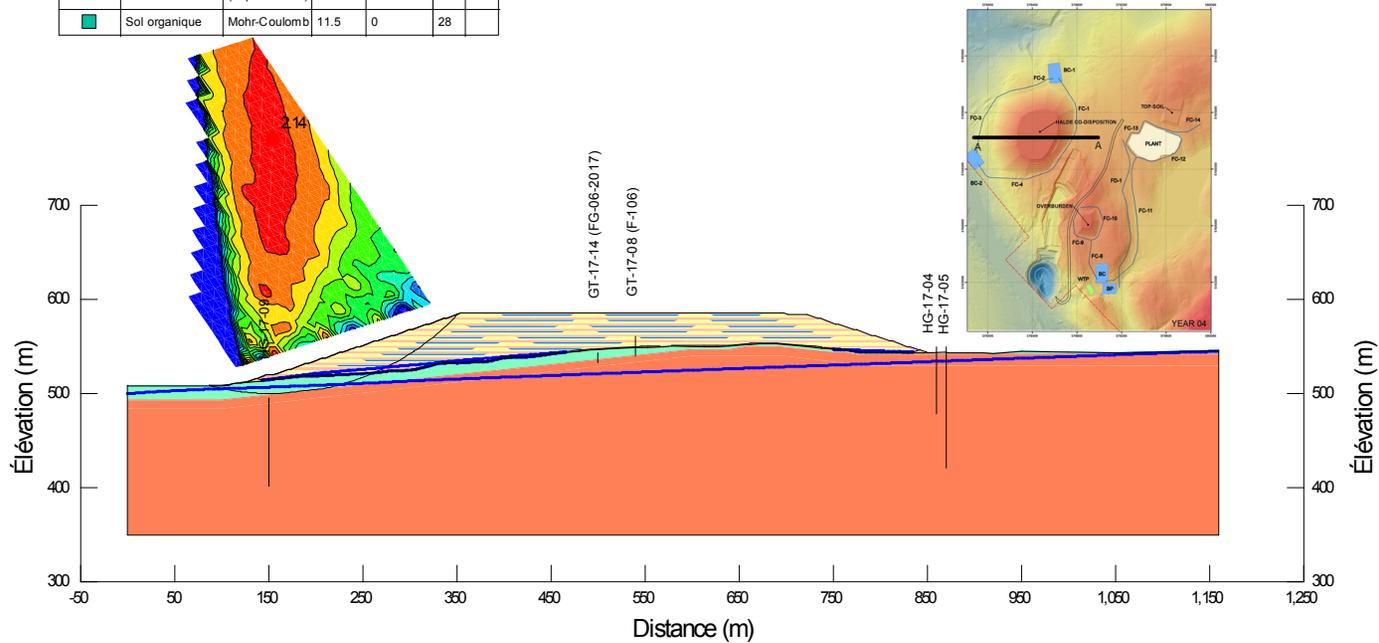




Figure 5-B : Résultat de l'analyse de stabilité 5 ans en condition pseudo-statique de la coupe A, rupture à travers le sol de fondation (FoS calculé de 1,75 < FoS requis de 1,1)

Couleur	Nom	Modèle	Poids unitaire (kN/m ³)	Cohésion (kPa)	Phi (°)	Fn Phi
Orange	NGA	Mohr-Coulomb	18.8	0	33	
Bleu	PGA	Mohr-Coulomb	22.2	0	33	
Jaune	Stériles miniers	Mohr-Coulomb spatial	21.7	0		Leps 1970
Vert clair	Sol de fondation (sable silteux à sable et sable)	Mohr-Coulomb	19	0	32	
Orange foncé	Roc intacte	Substratum (impénétrable)				
Rouge	Géomembrane PEHD	Mohr-Coulomb	8.8	0	20	
Violet	Couche drainante de sable	Mohr-Coulomb	19	0	32	
Rouge foncé	Roc fracturé	Substratum (impénétrable)				
Vert foncé	Sol organique	Mohr-Coulomb	11.5	0	28	

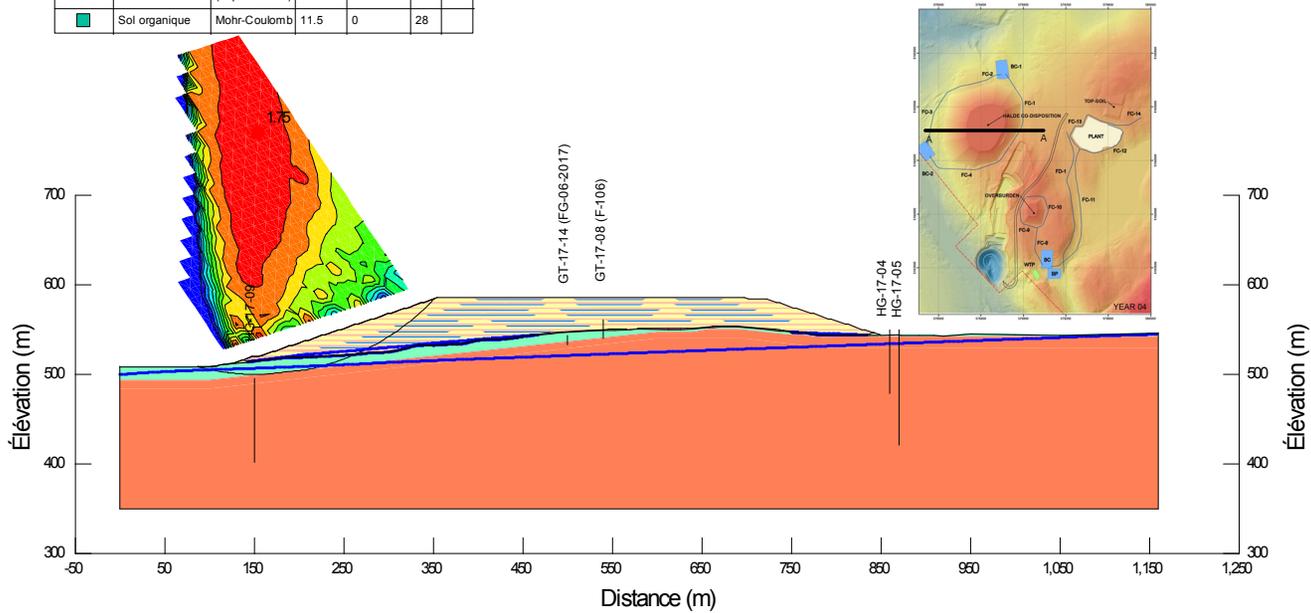




Figure 6-B : Résultat de l'analyse de stabilité en condition statique de la coupe A, rupture à travers la géomembrane, 20 ans
(FoS calculé de 1,84 < FoS requis de 1,5)

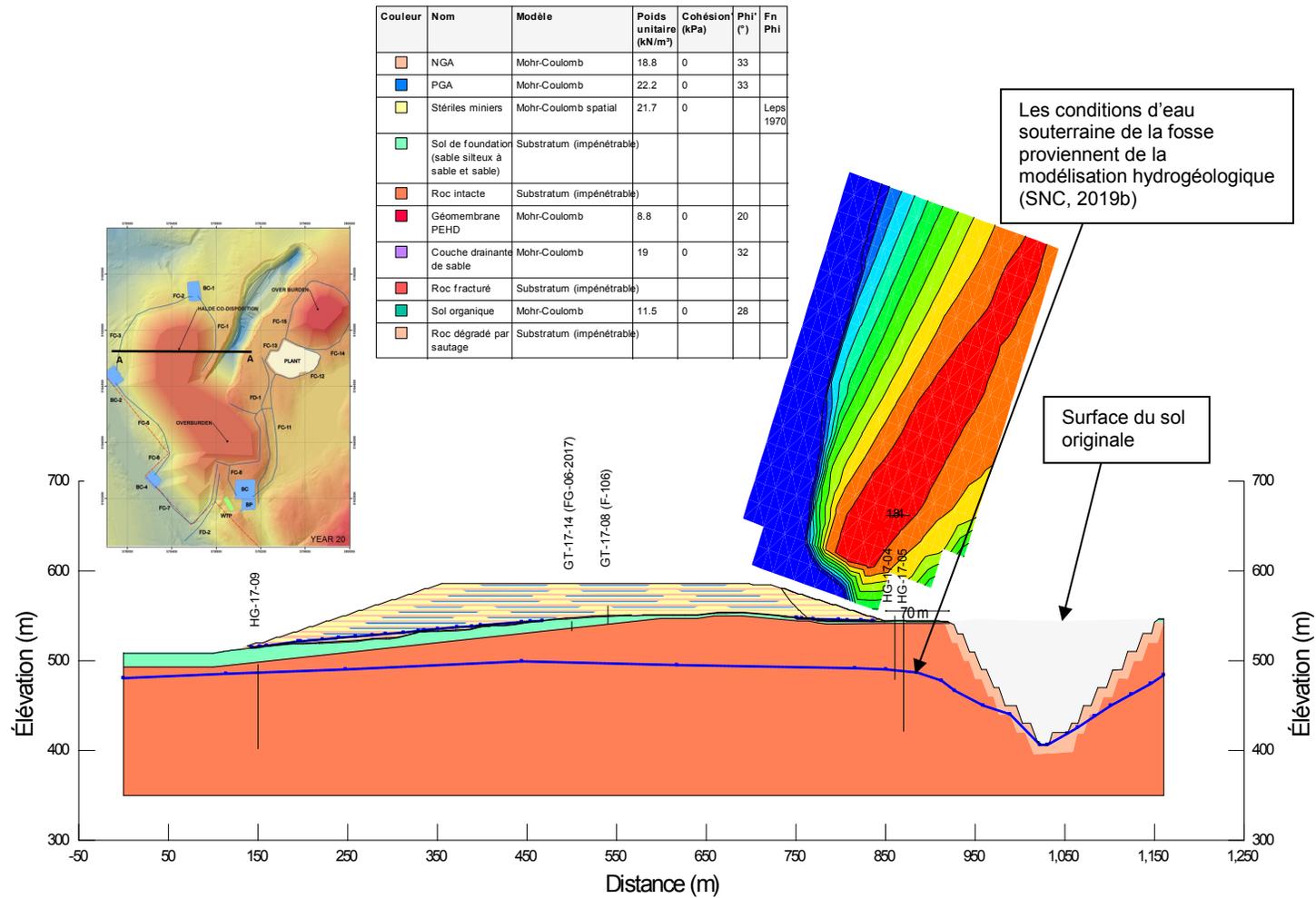




Figure 7-B : Résultat de l'analyse de stabilité en condition pseudo-statique de la coupe A, rupture à travers la géomembrane, 20 ans (FoS calculé de 1,47 < FoS requis de 1,1)

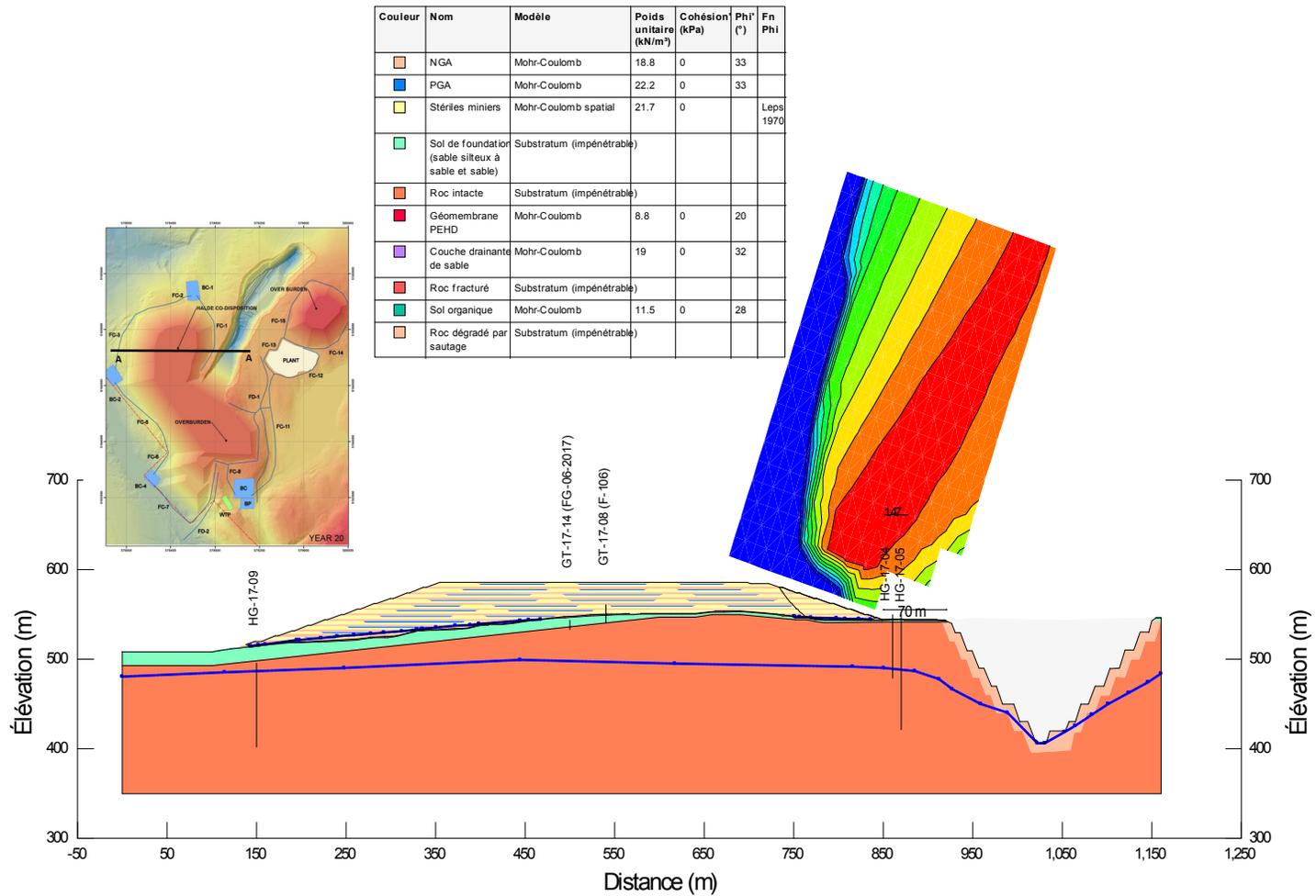




Figure 8-B : Résultat de l'analyse de stabilité en condition statique de la coupe A, rupture à travers le sol de fondation, 20 ans (FoS calculé de 2,45 < FoS requis de 1,5)

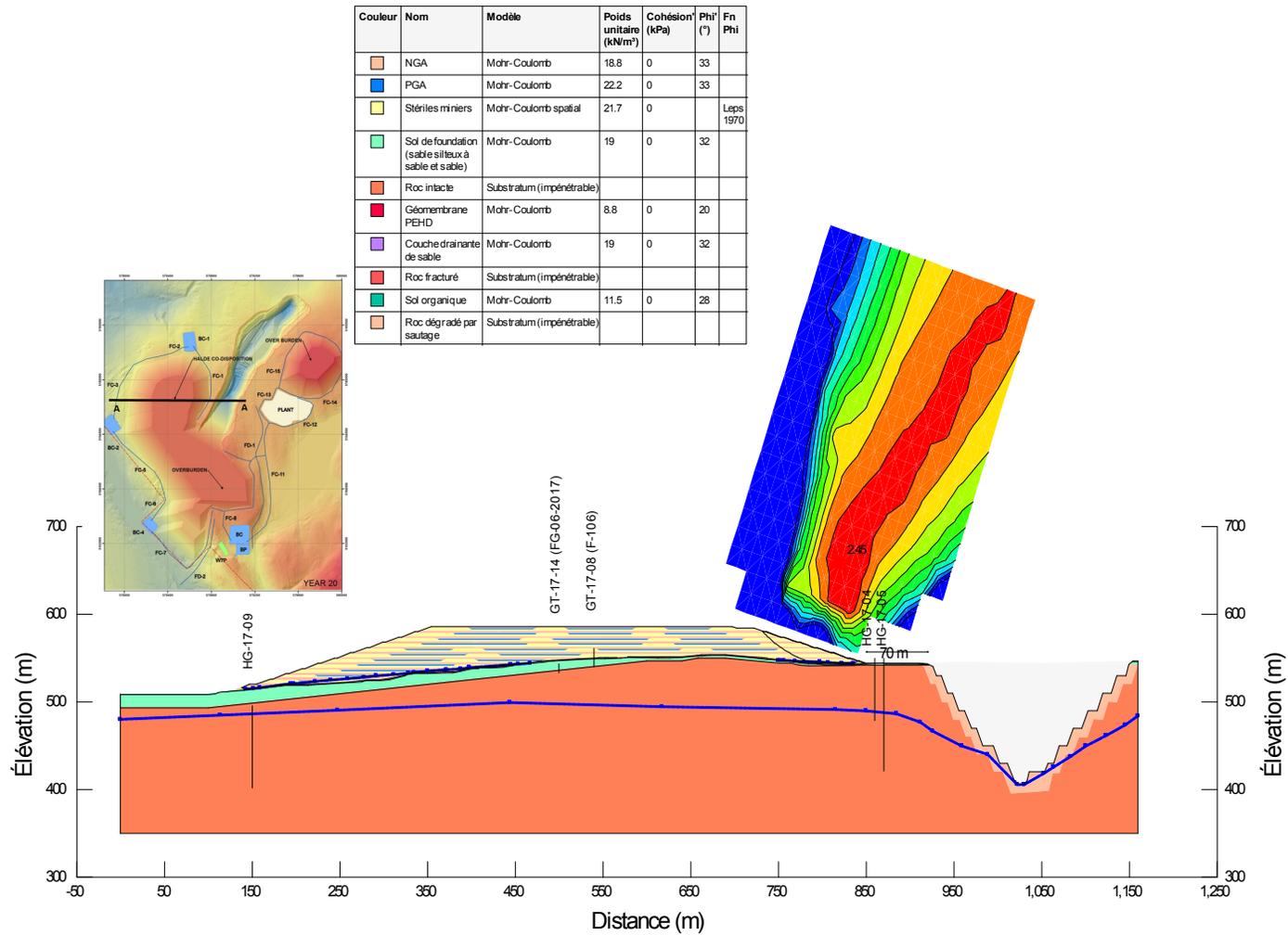




Figure 9-B : Résultat de l'analyse de stabilité en condition pseudo-statique de la coupe A, rupture à travers le sol de fondation, 20 ans (FoS calculé de 2,0 < FoS requis de 1,1)

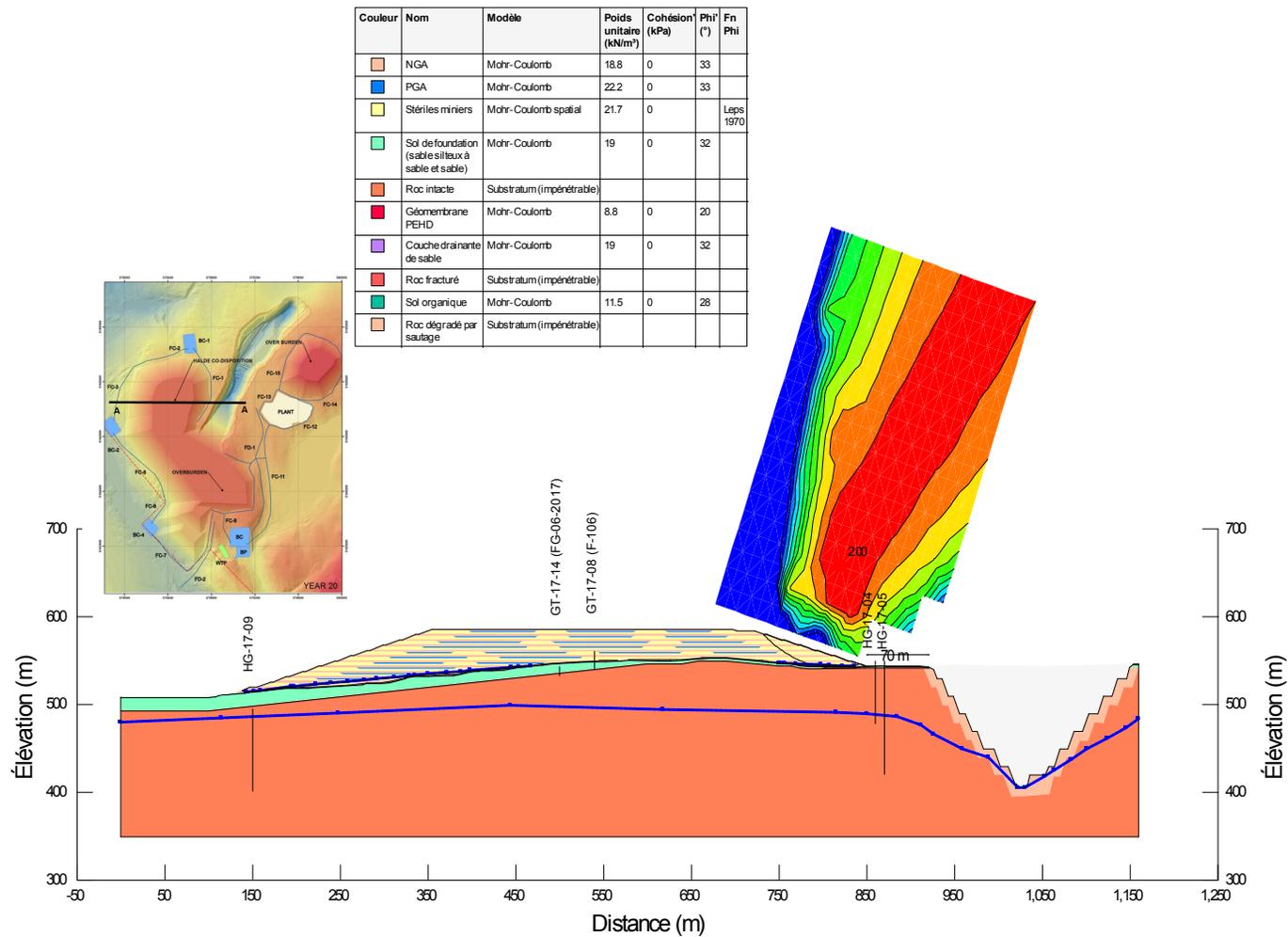




Figure 10-B : Résultat de l'analyse de stabilité en condition statique de la coupe B, pente nord, 26 ans
(FoS calculé de 1,98 < FoS requis de 1,5)

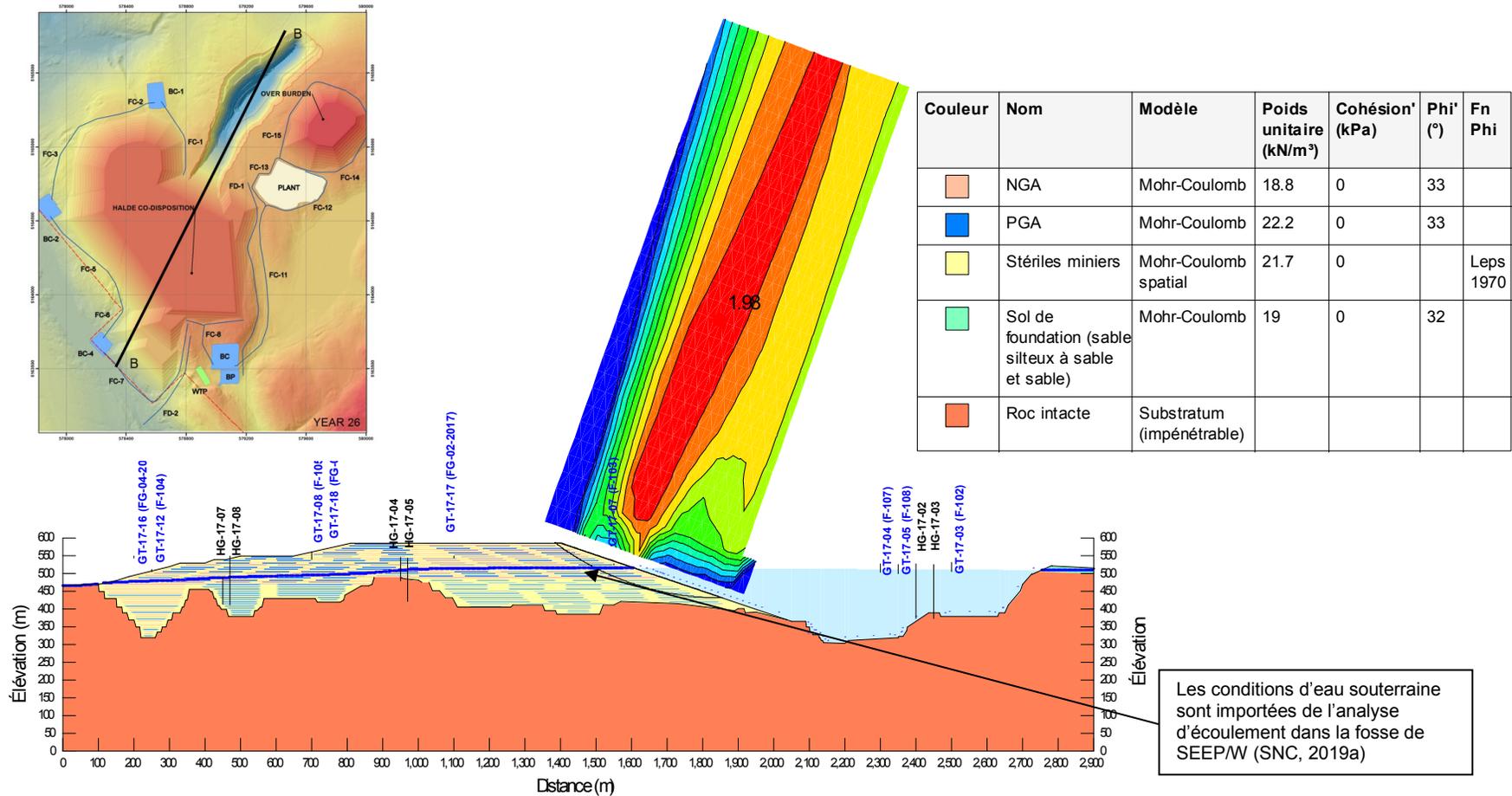
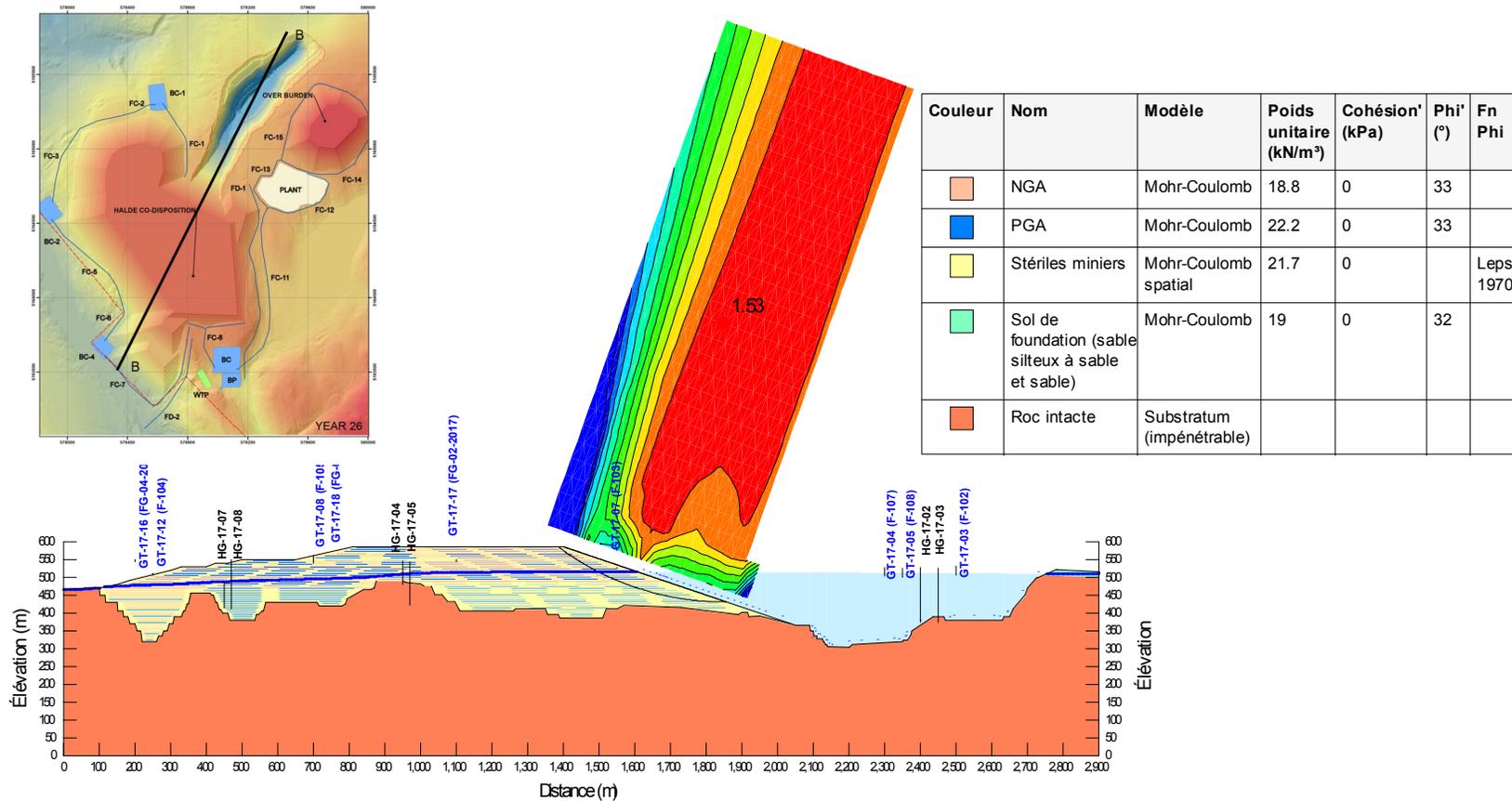




Figure 11-B : Résultat de l'analyse de stabilité en condition pseudo-statique de la coupe B, pente nord, 26 ans
(FoS calculé de 1,53 < FoS requis de 1,1)





Annexe C

Résultats des analyse de tassement



Figure 1-C : Résultat de l'analyse de tassement dans les sols de fondation sous la halde de co-disposition, coupe A

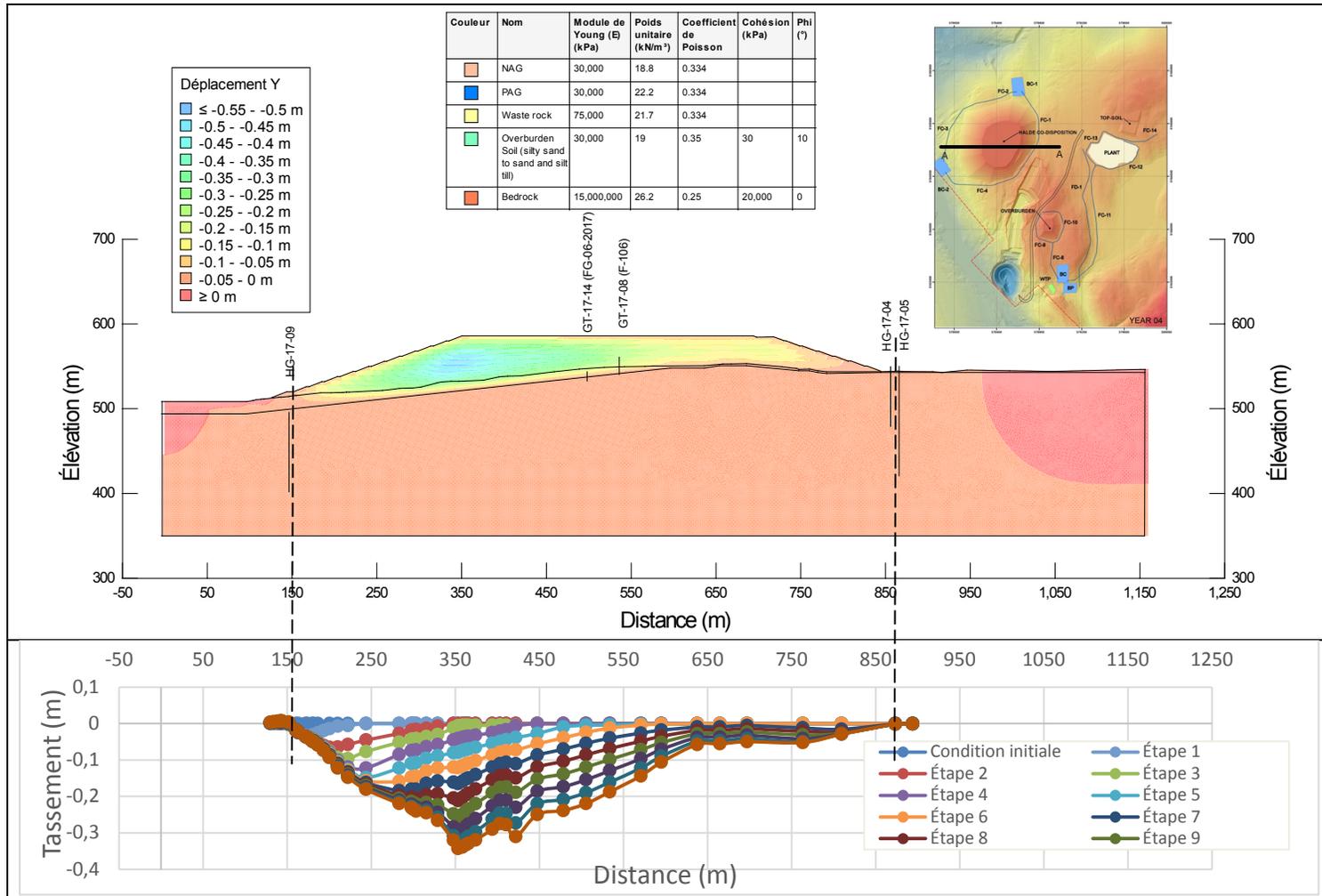




Figure 2-C : Résultat de l'analyse de tassement maximale dans les sols de fondations, coupe A

