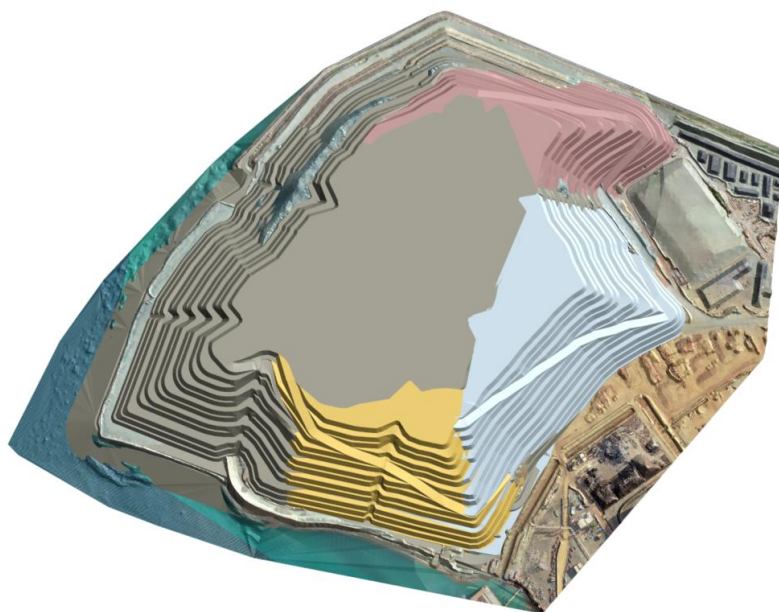


MINE DE DONIAMBO

**JUSTIFICATIONS GEOTECHNIQUES ET
HYDRAULIQUES RELATIVES A L'EXTENSION DE
LA VERSE A SCORIES**

Etude avant- projet détaillé Phases 1, 2, 3

Client : SLN



Réf : MC-25-156-SLN-22-R01

B	24/03/2026	MAJ		
A	27/01/2026	Création		
Révision	Date	Objet de la modification		
		Rédacteurs	Vérificateurs	Approbateur
Nom et prénom		Meriem BEN HAMIDA Mariem BEL MABROUK	Seif ASKRI Rihem JABNOUN	Samir ENNOUR
Fonction		Ingénieurs d'études	Ingénieurs spécialiste	Expert géotechnique

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	1
1.1.	Contexte général	1
1.2.	Consistance de l'étude Avant-Projet Détaillé	1
2	DOCUMENT DE REFERENCES	2
3	DESCRIPTION GENERALE DU PROJET	2
4	DONNEES DE BASES ET CRITERES DE DESIGN	5
4.1	Contexte géologique et caractérisation mécanique des matériaux	5
4.2	Données bathymétriques	8
4.3	Données piézométriques	10
4.4	Contexte sismique	10
4.5	Démarche de l'analyse de stabilité de l'extension de la verse	12
4.5.1	Etape 1 : Analyse de la stabilité de l'extension en cours de construction - Court terme	12
4.5.2	Etape 2 : Analyse de la stabilité de l'extension en fin de construction - Court terme	14
4.5.3	Etape 3 : Analyse de la stabilité de l'extension de la verse à long terme	15
4.5.4	Etape 4 : Analyse de la stabilité de la verse vis-à-vis de l'aléa sismique	16
4.6	Critères de design des ouvrages hydrauliques	17
5	JUSTIFICATION GEOTECHNIQUE DE LA PHASE 1 – ZONE GAZIERE	18
5.1	Modèle de calcul	18
5.2	Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en cours de construction - stabilité court-terme	20
5.2.1	Géométrie du modèle et conditions aux limites	20
5.2.2	Phases de chargement simulées dans la modélisation	20
5.2.3	Résultats des simulations	21
5.2.4	Interprétations des résultats	30
5.2.5	Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en phase ultime en condition non drainée	33
5.2.6	Analyse de la stabilité de verse à long terme	33
5.2.7	Synthèse des résultats des calculs de stabilité long terme	35
6	JUSTIFICATION GEOTECHNIQUE DE LA PHASE 2 – ZONE CASSE-FONTE AU NORD	39
6.1	Modèle de calcul	39
6.2	Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en cours de construction - stabilité court-terme	41
6.2.1	Géométrie du modèle et conditions aux limites	41
6.2.2	Phases de chargement simulées dans la modélisation	41

6.2.3	Résultats des simulations	42
6.2.4	Interprétation des résultats	47
6.3	Analyse de la stabilité de l'extension de la zone Casse Fonte au Nord en phase ultime en condition non drainée	47
6.4	Analyse de la stabilité de la verse à long terme	48
6.4.1	Synthèse des résultats des calculs de stabilité long terme	50
7	JUSTIFICATION GEOTECHNIQUE DE LA PHASE 3 – ZONE 5S ET PARC A BOUES	54
7.1	Modèle de calcul	54
7.2	Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en cours de construction - stabilité court-terme	55
7.2.1	Géométrie du modèle et conditions aux limites	55
7.2.2	Phases de chargement simulées dans la modélisation	56
7.2.3	Résultats des simulations	56
7.2.4	Interprétations des résultats	61
7.3	Analyse de la stabilité de l'extension de la zone par à boues en phase ultime en condition non drainée	61
7.4	Analyse de la stabilité de la verse à long terme	62
7.4.1	Synthèse des résultats des calculs de stabilité long terme	64
8	JUSTIFICATION HYDRAULIQUE DES TROIS PHASES	68
8.1	Présentation du dispositif de drainage de la verse autorisée	71
8.2	Présentation du dispositif de drainage de la phase 1 - Zone GAZIERE	71
8.3	Présentation du dispositif de drainage de la phase 2 - Zone casse-fonte	72
8.4	Présentation du dispositif de drainage de la phase 3 - Zone 5S et parc à Boues	72
8.5	Dimensionnement des ouvrages hydrauliques	72
9	SURVEILLANCE ET DISPOSITIFS D'AUSCULTATION	77
9.1	Programme d'auscultation – Phase 1	77
9.2	Programme d'auscultation - Phase 2	78
9.3	Programme d'auscultation - Phase 3	79
10	DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES PARTICULIERES	80
11	CONCLUSION	81

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 1	3
Figure 2 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 2.....	3
Figure 3 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 3.....	4
Figure 4. Plan d'implantation des sondages	6
Figure 5. Log synthétiques des sondages carottés (Réf : 1639 B – Rapport n° R. 81 363 A)	7
Figure 6. Donnée bathymétrique	9
Figure 7. Plan d'implantation du dispositif d'auscultation - piézomètres.....	10
Figure 8. Zonage et classement de l'aléa sismique – Nouvelle Calédonie.....	11
Figure 9- BRGM 2021. Valeurs du PGA-Nouvelle Calédonie.....	11
Figure 10. Classification du sol au sens de l'Eurocode 8	12
Figure 11. Implantation de la coupe étudiée à court terme de la Phase 1	19
Figure 12. Géométrie du modèle de calcul de la Phase 1	19
Figure 13. Conditions aux limites adoptées pour la modélisation de la Phase 1 - Zone gazière	20
Figure 14. Evolution des surpressions interstitielles et du coefficient de sécurité en fonction de la réhausse de l'extension de la VAS Phase 1 – Variante 1	23
Figure 15. Surface de glissement en fin de construction (FS = 1,8) – Phase 1 - Variante 1	24
Figure 16. Répartition des surpressions interstitielles en fin de construction de l'extension de la VAS – Phase 1 - Variante 1	25
Figure 17. Evolution des surpressions interstitielles et du coefficient de sécurité en fonction de la réhausse de l'extension de la VAS.....	27
Figure 18. Surface de glissement en fin d construction de l'extension de la VAS (FS = 1,8) – Phase 1 - Variante 2.....	28
Figure 19. Répartition des surpressions interstitielles en fin de construction de la VAS – Phase 1 - Variante 2.....	29
Figure 20. Evolution des surpressions interstitielles en fonction des variantes des cadences	31
Figure 21. Evolution des coefficients de sécurité en fonction de cadence	32
Figure 22. Résultat de calcul court terme en fin de construction - Phase 1 - Zone Gazière.....	33
Figure 23. Modèles de calcul de justification vis-à-vis de la stabilité à long terme - Phase 1	34
Figure 24. Implantation de la coupe étudiée à court terme de la Phase 2.....	40
Figure 25. Géométrie du modèle de calcul de la Phase 2 - Zone Casse-fonte au Nord.....	40
Figure 26. Conditions aux limites adoptées pour la modélisation de la Phase 2 – Zone Casse-fonte au Nord	41
Figure 27. Evolution des surpressions interstitielles et du coefficient de sécurité en fonction de la réhausse de l'extension de la VAS – Phase 2.....	44
Figure 28. Surface de glissement en fin de construction (FS = 1,6) – Phase 2.....	45
Figure 29. Répartition des surpressions interstitielles en fin de construction de l'extension de la VAS – Phase 2	46
Figure 30. Résultat de calcul court terme en fin de construction – Phase 2 - Zone de la Casse Fonte au Nord	48

Figure 31. Modèles de calcul – Phase 2	49
Figure 32. Implantation de la coupe étudiée à court terme de la Phase 3.....	54
Figure 33. Géométrie du modèle de calcul de la Phase 3	55
Figure 34. Conditions aux limites adoptées pour la modélisation de la Phase 3.....	56
Figure 35. Evolution des surpressions interstitielles et du coefficient de sécurité en fonction de la réhausse de l'extension de la VAS – Phase 3.....	58
Figure 36. Surface de glissement en fin de construction (FS = 1,9) – Phase 3	59
Figure 37. Répartition des surpressions interstitielles en fin de construction de l'extension de la VAS – Phase 3	60
Figure 38. Résultat de calcul court terme en fin de construction – Phase 3 - Zone parc à boues	61
Figure 39. Modèles de calcul - Phase 3	63
Figure 40. Coupe type de la tranchée enterrée	68
Figure 41. Tranchée ouverte au pied de la verse	69
Figure 42. Profil type de la piste périphérique	69
Figure 43 : Profil type des descentes d'eau du (point de rejet).....	70
Figure 44 : Coupe type du talus ultime de la verse.....	70
Figure 45 : Profil en long des descentes d'eau principales.....	71
Figure N°46. Descente d'eau en enrochements	74
Figure N°47. Coupe type de la descente d'eau en enrochements	75
Figure N°48 : Descente d'eau en Matelas Reno.....	76
Figure N°49 : Descente d'eau en Perrés maçonnés.....	76
Figure N°50 : Descente d'eau en concrete canvas.....	77
Figure 51. Implantation du dispositif d'auscultation (Phase 1).....	78
Figure 52. Implantation du dispositif d'auscultation (Phase 2).....	79
Figure 53. Implantation du dispositif d'auscultation (Phase 3).....	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données géométriques du talus final.....	4
Tableau 2. Récapitulatif de l'ensemble des données hydromécaniques des campagnes géotechniques menées (Réf : 1639 B – Rapport n° R. 81 363 A).....	6
Tableau 3. Récapitulatif de la géométrie des modèles de calcul des différentes phases de l'étude APD	13
Tableau 4. Caractéristiques mécaniques du sol adoptées pour le calcul Plaxis.....	14
Tableau 5. Caractéristiques mécaniques du sol adoptées pour le calcul Geoslope.....	16
Tableau 6. Paramètres géotechniques retenus pour les calculs long terme Geo-slope	17
Tableau 7. Bases du design	17
Tableau 8. Méthodes de design adoptées pour les justifications hydrauliques du projet.....	17
Tableau 9. Résultats de calculs relatifs à l'étude de la stabilité vis-à-vis de la consolidation en phase de construction- Phase 1 - Variante 1	21
Tableau 10. Résultats de calculs relatifs à l'étude de la stabilité vis-à-vis de la consolidation en phase de construction-Phase 1 - Variante 2.....	26
Tableau 11. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel – Phase 1	35
Tableau 12. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel en condition post- sismique – Phase 1	38
Tableau 13. Résultats de calculs relatifs à l'étude de la stabilité vis-à-vis de la consolidation en phase de construction-Phase 2.....	42
Tableau 14. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel en condition post-sismique - Phase 2.....	53
Tableau 15. Résultats de calculs relatifs à l'étude de la stabilité vis-à-vis de la consolidation en phase de construction Phase 3.....	57
Tableau 16. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel en condition post- sismique – Phase 3.....	67
Tableau 17. Calculs des débits et les dimensions des descentes d'eau.....	73
Tableau 18 : Optimisation du diamètre des enrochements	75

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE N°1 : COUPES DE CALCUL ET PLAN DE SITUATION _____	- 1 -
ANNEXE N°2 : SORTIES PLAXIS – CALCUL EN COURS DE CONSTRUCTION DE LA PHASE 1 – Variante 1 _____	- 5 -
ANNEXE N°3 : SORTIES PLAXIS – CALCUL EN COURS DE CONSTRUCTION DE LA PHASE 1 – Variante 2 _____	- 18 -
ANNEXE N°3 : SORTIES GEOSLOPE – CALCUL LONG TERME DE LA PHASE 1 _____	- 32 -
ANNEXE N°5 : : SORTIES PLAXIS – CALCUL EN COURS DE CONSTRUCTION DE LA PHASE 2	38
ANNEXE N°6 : : SORTIES GEOSLOPE – CALCUL LONG TERME DE LA PHASE 2 _____	- 52 -
ANNEXE N°7 : SORTIES PLAXIS – CALCUL EN COURS DE CONSTRUCTION DE LA PHASE 3 - 57 -	
ANNEXE N°8 : : SORTIES GEOSLOPE – CALCUL LONG TERME DE LA PHASE 3 _____	- 70 -
ANNEXE N°9 : DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS _____	- 75 -

1 INTRODUCTION

1.1. Contexte général

Les scories de fusion de l'usine de Doniambo, sont actuellement, stockées dans une verse à scories, reposant sur le fond marin à moins de 10 m de profondeur et située à proximité de l'usine.

Dans le cadre des réflexions menées par la SLN sur les capacités futures de stockage des scories, MECATER a été sollicitée pour réaliser les justifications géotechniques et hydrauliques des projets d'extension de la verse actuelle sur trois phases.

Dans ce rapport, nous présentons l'ensemble des justifications géotechnique et hydraulique des trois phases d'extension de la verse à scories. Ces trois phases permettent d'apporter une capacité de stockage supplémentaire de 4 700 000 m³, jusqu'à la côte +65 NGNC.

1.2. Consistance de l'étude Avant-Projet Détaillé

Dans le cadre du projet d'extension de la verse à scories, les phases 1,2 et 3 feront l'objet d'une étude d'Avant-Projet Détaillé (APD) permettant de concevoir et justifier techniquement les aménagements nécessaires à l'extension de la VAS, tout en garantissant la stabilité géotechnique de l'ouvrage et la maîtrise des impacts environnementaux.

Dans ce rapport nous présentons :

- L'évaluation de la stabilité de la verse au cours de construction des trois phases d'extension ;
- L'évaluation de la stabilité mécanique des trois phases de la verse à long terme et vis-à-vis des sollicitations sismiques ;
- La gestion des eaux de la verse durant la construction et en phase ultime de chaque phase d'extension de la verse ;
- Le dimensionnement des ouvrages hydrauliques ;
- Les dispositifs d'auscultation et de surveillance de la verse ;
- Les dispositions constructives à mettre en œuvre.

2 DOCUMENT DE REFERENCES

- [1] Etude APD de stockage des scories de fusion réalisée par TEC-INGENIERIE en 2003 : (Réf: *Rapport 1639 B – n° 81 369 B.pdf*) ;
- [2] Synthèse géotechnique réalisée par TEC-INGENIERIE dans le cadre de l'étude APD de stockage des scories de fusion : (Réf: *1639 B – Rapport n° R. 81 363 A.pdf*) ;
- [3] Projet de construction de verse à scorie à Doniambo-APS-Etude du comportement hydrodynamique de la verse réalisé par MECATER en 2003 : (Réf: *Synthèse étude hydro scorie.pdf*) ;
- [4] Evaluation probabiliste de l'aléa sismique de la Nouvelle-Calédonie-brgm-2022 : (Réf: *BRGM/RC-71577-FR Version 1 du 22 mars 2022.pdf*) ;
- [5] Etude d'exécution de la verse à scorie de Doniambo réalisée par MECATER en 2008 – (Réf: *Mecater/SLN/14/SG/D/2008*) ;
- [6] Justification de l'augmentation de cadence de stockage au niveau de la VAS, réalisée par MECATER en 2024 : (Réf: *MC-24-116-SLN-05*) ;
- [7] Design de l'extension de la verse à scories phase 1 (Réf: *projet_ext1_vas_v4_cut.dxf*) ;
- [8] Design de l'extension de la verse à scories phase 2 (Réf: *projet_ext2_vas_v2_sr_cut.dxf*) ;
- [9] Design de l'extension de la verse à scories phase 3 (Réf: *projet_ext3_vas_v3_sr_v2_cut.dxf*) ;
- [10] Levé topographique du 31/12/2025 (Réf: *20251231_extrait_topo_dbo_vas.dwg*)
- [11] Drains zone maritime tel que construit : (Réf: *20240826_SLN_45B10-PDE-T-0002_A_recolement_drain_zone_maritime.dwg*) ;
- [12] Optimisation de la section des descentes d'eau de la verse à scories (Réf: *MC-23-140-SLN-20-R01*).

3 DESCRIPTION GENERALE DU PROJET

Dans ce rapport nous considérons les trois phases d'extension de la verse à scorie suivantes :

- **Phase 1 :** Zone gazière : cette phase consiste au comblement de l'ancienne zone « Menaouer ». Cette extension se fera sur une emprise de 8,30 ha et offre une capacité de stockage de 1,06 Mm³ ;
- **Phase 2 :** Zone Casse-fonte : cette phase consiste à stocker les scories de fusion au niveau de la zone de Casse-fonte située au Nord de la verse actuelle sur une emprise de 8,65 ha. Cette extension offre une capacité de stockage supplémentaire de 1,14 Mm³ ;

- **Phase 3 :** Zone 5 S et parc à boues : cette phase consiste à stocker les scories de fusion au niveau de la zone dédiée actuellement au stockage des boues. L'extension couvre une emprise de 13,95 ha et permet d'apporter un volume supplémentaire de l'ordre de 2,5 Mm³.

L'extension sera réalisée sur une ancienne plateforme de scorie située à la cote +10m NGNC et assez loin du contour maritime et limitée au Nord par le tas historique des scories calcosodiques. En phase ultime, ces trois phases offrent une capacité de stockage cumulée de 4,7 Mm³.

Il est à préciser que les phases d'extension sont indépendantes. Le phasage de mise en œuvre et l'ordonnancement des opérations de stockage sont définis par l'exploitant.

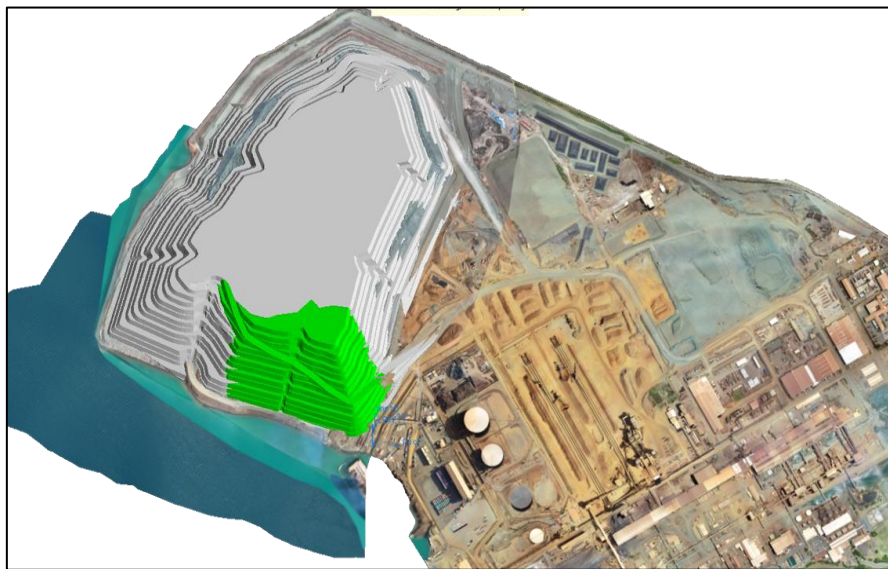


Figure 1 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 1

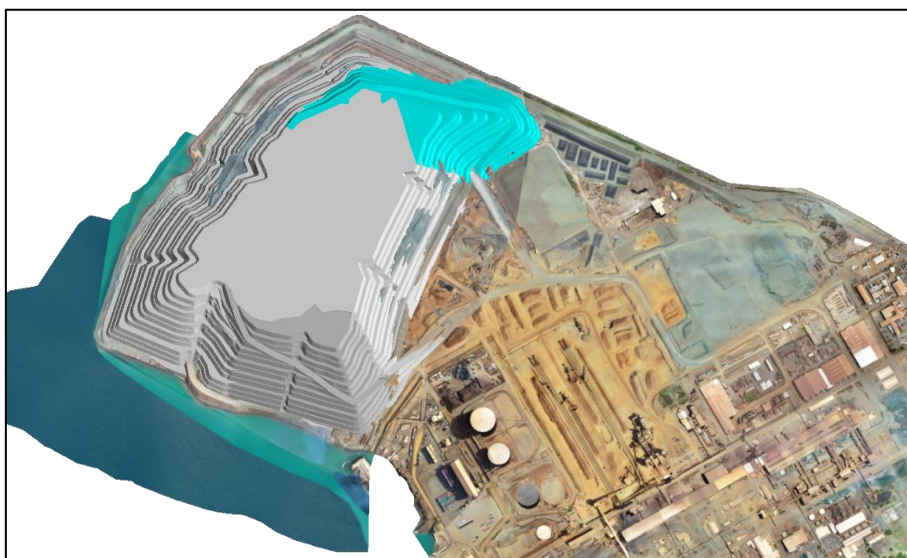


Figure 2 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 2

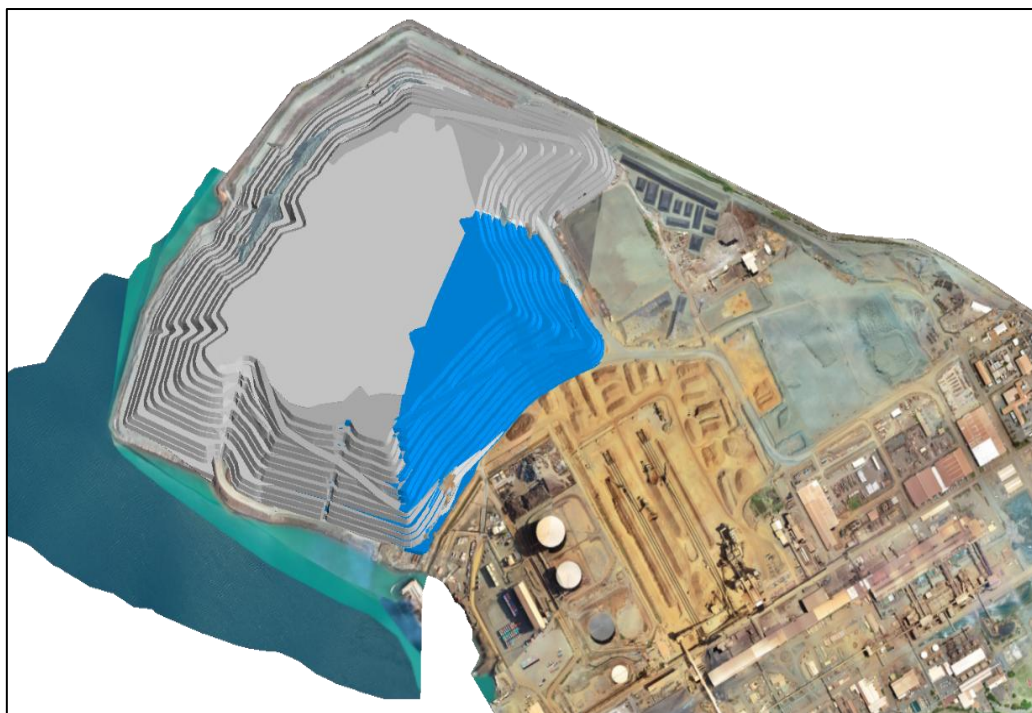


Figure 3 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 3

Le projet d'extension de la verse à scorie sera construit par niveaux de 5 m qui présentent une pente locale de 35° . Une banquette de 2,6 m sera maintenue entre deux niveaux successifs. De plus une banquette de 7,5 m de largeur sera maintenue tous les 10 m.

La pente intégratrice maximale est de 25° . Elle est de 23° pour les talus interceptés par la piste d'accès.

Les caractéristiques géométriques du projet sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Données géométriques du talus final

Largeur Pistes	Pente piste	Pente Intégratrice	Pente locale	H. du niveau	Banquettes	
					Larg.	Devers
18 m	<10%	$23^\circ/25^\circ$	35°	5 m	2,6 m 7,5 m	4% 5% (tous les 10 m)

4 DONNEES DE BASES ET CRITERES DE DESIGN

4.1 Contexte géologique et caractérisation mécanique des matériaux

La plateforme de la verse à scories a été construite par remblaiement avec de la scorie, en site maritime sur des horizons vasards de fond de baie. Le stockage des scories de fusion repose sur les formations quaternaires superficielles de type colluvions.

Des campagnes de reconnaissance géotechnique réalisées en 1993 et 2001, ont été complétées par un programme de reconnaissance en 2003, pour les besoins de l'étude de l'extension de la capacité de stockage de la verse. La campagne de reconnaissance complémentaire a été réalisée par LBTP entre mai et août 2003 et comporte :

- **2 sondages carottés** en PQ, référencés SC4 et SC5, de profondeur respective 30 et 45 m, avec prélèvements d'échantillons intacts dans les niveaux sous-jacents à la scorie ;
- **2 sondages destructifs** en NQ, référencés SD1 et SD2, de profondeur respective 18 et 10 m, avec réalisation dans la scorie de 9 essais de perméabilité type Lefranc par injection ;
- **6 essais de cisaillement au phicomètre** dans la scorie (3 dans SD1 et 3 dans SC5), aucun échantillon intact n'ayant pu être prélevé dans cet horizon.

Les prélèvements d'échantillons intacts ont permis la réalisation des essais de laboratoire suivants :

- 10 identifications complètes (teneur en eau, poids spécifique des grains, poids spécifique apparent, limites d'Atterberg, analyse granulométrique) ;
- 7 essais triaxiaux de type consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU+u) ;
- 6 essais œdométriques.

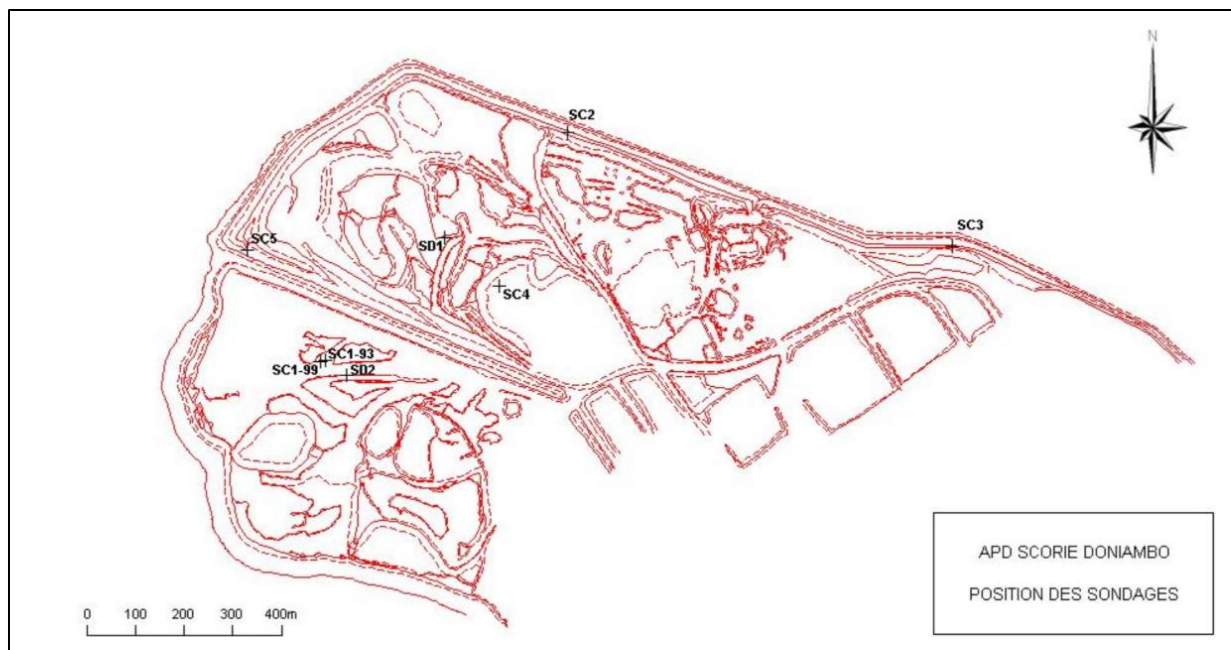


Figure 4. Plan d'implantation des sondages

Ci-dessous tableau récapitulatif de l'ensemble des données hydromécaniques acquises au cours des trois campagnes géotechniques réalisées sur le site.

Tableau 2. Récapitulatif de l'ensemble des données hydromécaniques des campagnes géotechniques menées (Réf : 1639 B – Rapport n° R. 81 363 A)

Lithologie			Propriétés physiques					Propriétés mécaniques												Hydro géologie
Horizon	Description	Puissance (m)	γ kN/m ³	w %	<80 μ %	w _L %	I _p	c _{UU} kPa	ϕ_{UU} (°)	c _i kPa	ϕ_i (°)	c' kPa	ϕ' (°)	e ₀	Cc	σ'_p kPa	Rc MPa	Em MPa	Pl MPa	K _L m/s
Remblai	Scorie de fusion	11,8 à 21,3								2 à 8	32 à 42							1,4 à 2	0,3 à 0,5	1,1.10 ⁻⁶ à 1,4.10 ⁻⁵
Argile vaseuse		3,5 à 7	17 à 19	33 à 56	42 à 99	40 à 92	20 à 68	46	0	35	0	0 à 65	10 à 30	0,93 à 1,87	0,26 à 0,69	44 à 75		2 à 7	0,5 à 0,6	
Argile grise		1 à 9	17 à 20	24 à 61	45 à 97	67 à 81	47 à 57	10	24			0	20	0,92 à 1,85	0,11 à 0,65	59 à 63		5 à 15	0,5 à 1,4	
Roche altérée		SC4 : 9 SC5 : >9	26,5														13,3 à 25,3	50 à 77	4,8 à 5,2	
Roche saine		SC4 : >3																		

Valeurs en italique : une seule mesure réalisée
 γ : poids volumique apparent (humide)
w : teneur en eau
<80 μ : passant à 80 microns
w_L : limite de liquidité
I_p : indice de plasticité
c_{UU} : cohésion apparente mesurée à l'appareil triaxial
 ϕ_{UU} : angle de frottement apparent mesuré à l'appareil triaxial
c_i : cohésion apparente mesurée au phicomètre
 ϕ_i : angle de frottement apparent mesuré au phicomètre
c' : cohésion effective (long terme)
 ϕ' : angle de frottement effectif (long terme)
e₀ : indice des vides en place
Cc : indice de compression
 σ'_p : pression de préconsolidation
Rc : résistance à la compression simple
Em : module pressiométrique
Pl : pression limite
K_L : perméabilité Lefranc

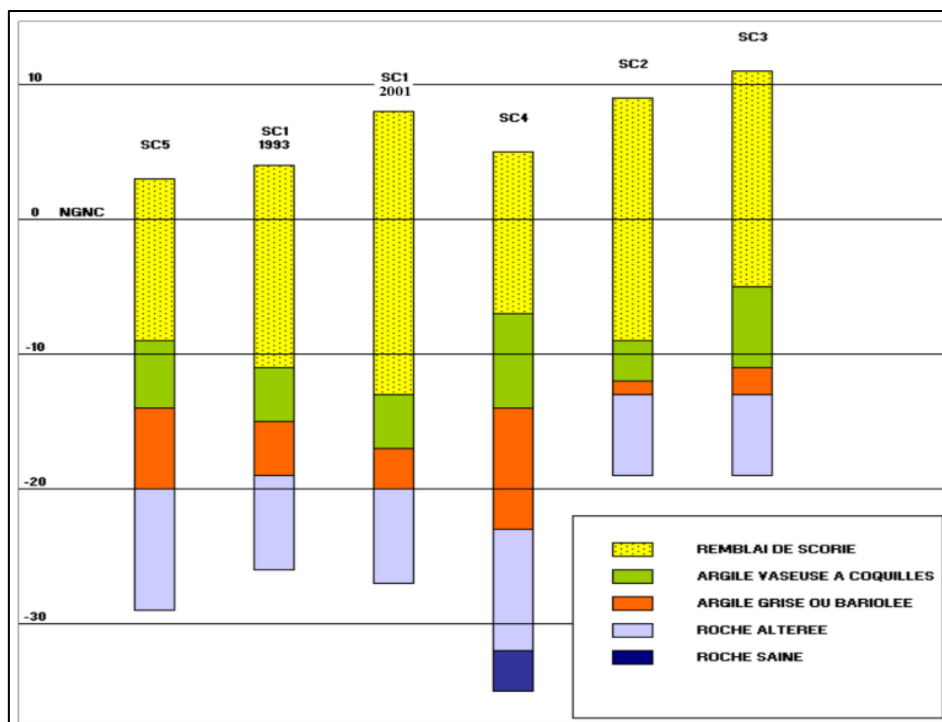


Figure 5. Log synthétiques des sondages carottés (Réf : 1639 B – Rapport n° R. 81 363 A)

L'interprétation des sondages carottés et les différents essais en laboratoire ont mis en évidence la succession des formations géologiques suivantes :

- **Remblai de scorie** : reconnue sur des épaisseurs allant de **11,8 à 21,3 m** au droit des sondages carottés. La scorie de Nickel est un sable de type 0/5 mm, mal gradué, très propre (pas de fines) et peu dégradé. Il s'agit d'un **matériau frottant à cohésion nulle** ;
- **Couche de transition composée d'un mélange de scorie et d'argile vaseuse**, sur une épaisseur variable de **1 à 2 m** ;
- **Argile vaseuse avec débris de coquilles** : reconnue sur des épaisseurs allant de **3,5 à 7 m** au droit des sondages carottés. Il s'agit d'une argile **plastique à très plastique**, grise verdâtre, contenant des débris de coquilles et à **teneur en eau très élevée**. L'argile vaseuse a une consistance ferme à très molle. C'est un horizon **sous-consolidé, moyennement compressible à très compressible**. La résistance au cisaillement à long terme de l'argile vaseuse est très variable : la cohésion varie de **0 à 65 kPa (24 kPa en moyenne)**, l'angle de frottement interne varie de **10 à 30 degrés (18° en moyenne)** ;
- **Argile grise ou bariolée « soupe de sorail »** : reconnue sur des épaisseurs allant de **1 à 9 m** au droit des sondages carottés. Il s'agit d'une **argile plastique à très plastique**, de consistance ferme à très ferme, moyennement compressible en général et à **teneur en eau très variable**. Il existe des passages sableux et graveleux au sein de cet horizon. Cet horizon présente des caractéristiques pressiométriques variables mais assez élevées dans l'ensemble. Les rapports E/Pl correspondent à une

argile normalement consolidée. Les caractéristiques de cisaillement à long terme disponibles à ce jour sont faibles ;

- **La roche altérée** : reconnue sur des épaisseurs allant **de 5,9 à 9,2 m** au droit des sondages carottés. Il s'agit d'un faciès de transition entre l'argile grise ou bariolée et la roche saine (grès tufacé). Le toit de ce niveau de transition est généralement représenté par une argile graveleuse très ferme avec des caractéristiques pressiométriques élevées. La base est représentée par un grès plus ou moins désagrégé avec une fracturation très dense ;
- Le toit de **la roche saine** se trouve à la cote **-32 NGNC**. L'horizon sain a été reconnu sur 3 m d'épaisseur au droit de ce sondage. Il s'agit de grès tufacés de l'Eocène III.

Du point de vue structural, le substratum rocheux est probablement affecté par les structures géologiques majeures identifiées au niveau du presqu'île de Nouméa qui correspondent sensiblement à l'orientation générale de fracturation de la Grande Terre (Nord-Ouest/Sud-Est).

Il est à noter que l'extension de la verse est constituée de scories de fusion qui seront mise en œuvre par couche de 5 m maximum de hauteur. L'extension repose sur des scories de fusion d'épaisseur variable, mises en place sur le fond marin pour la création de plateforme de stockage.

4.2 Données bathymétriques

La zone de levé bathymétrique est représentée en vert claire. Le reste de la zone a été extrapolée.

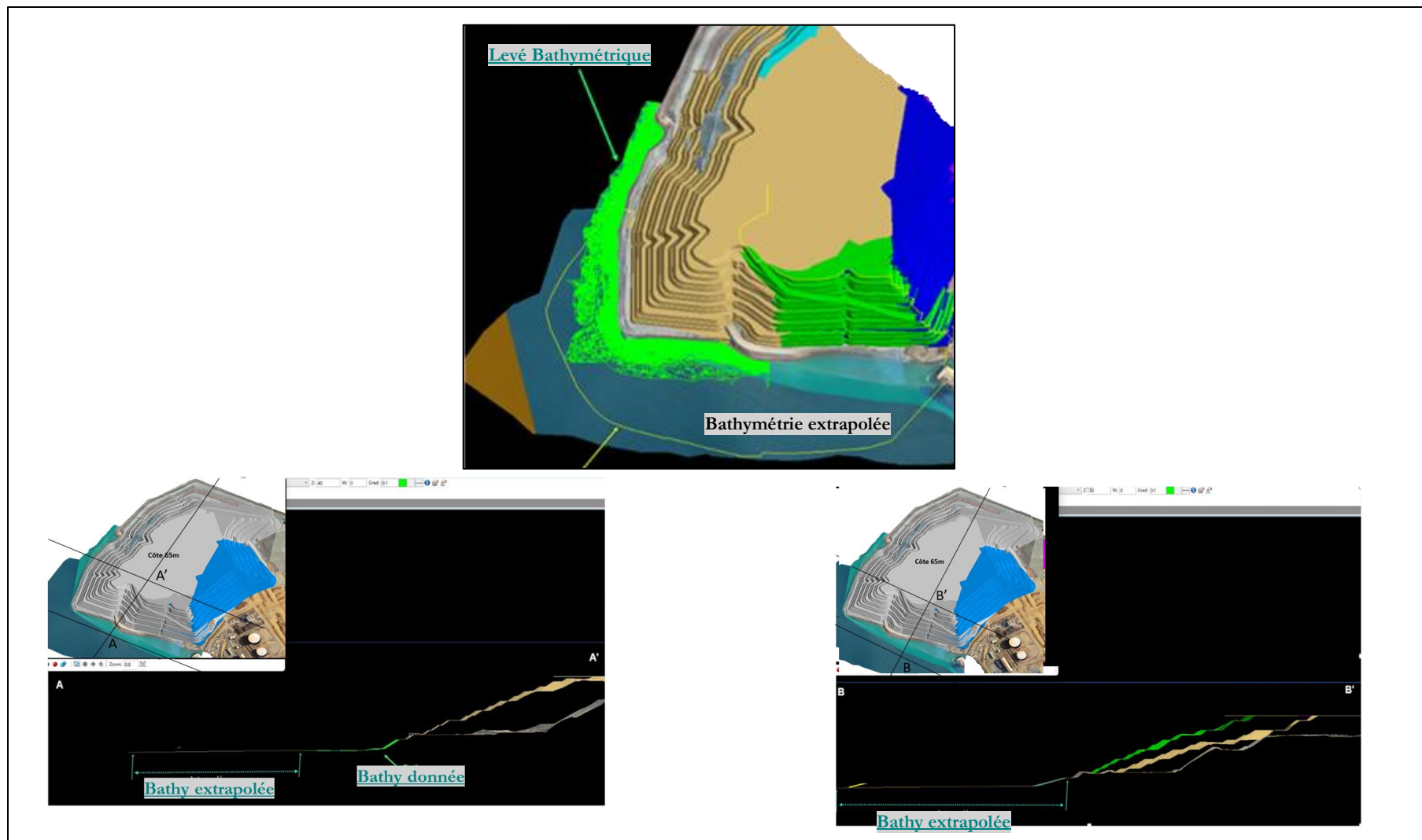


Figure 6. Donnée bathymétrique

4.3 Données piézométriques

Le dispositif d'instrumentation installé au niveau de la verse à scories comporte 6 piézomètres.



Figure 7. Plan d'implantation du dispositif d'auscultation - piézomètres

Les relevés piézométriques réalisés montrent que le niveau de la nappe est quasi constant (selon le dernier levé 2024) :

- **PZ11** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de +0,26 et +0,61 NGNC ;
- **PZ21** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de +0,43 et +1,23 NGNC ;
- **PZ31** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de -0,16 et +0,62 NGNC ;
- **PZ41** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de -0,09 et +0,65 NGNC ;
- **PZ51** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de -0,04 et +0,68 NGNC ;
- **PZ61** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de -0,19 et +0,54 NGNC.

Le niveau piézométrique serait proche du niveau de la mer et fluctue entre la côte -0,15 NGNC et +1,2 NGNC. Le niveau hydrostatique retenu pour l'analyse sera à **+ 1 m NGNC**.

4.4 Contexte sismique

D'après le zonage proposé par l'étude BRGM-2007 et mis à jour en 2022, la verse à scorie de Doniambo serait située dans une zone où l'activité superficielle est faible (**R2-**

Bombement Externe diffus), de profondeur 20 km, avec une accélération horizontale maximale du sol de l'ordre de **0,99 m/s²**.

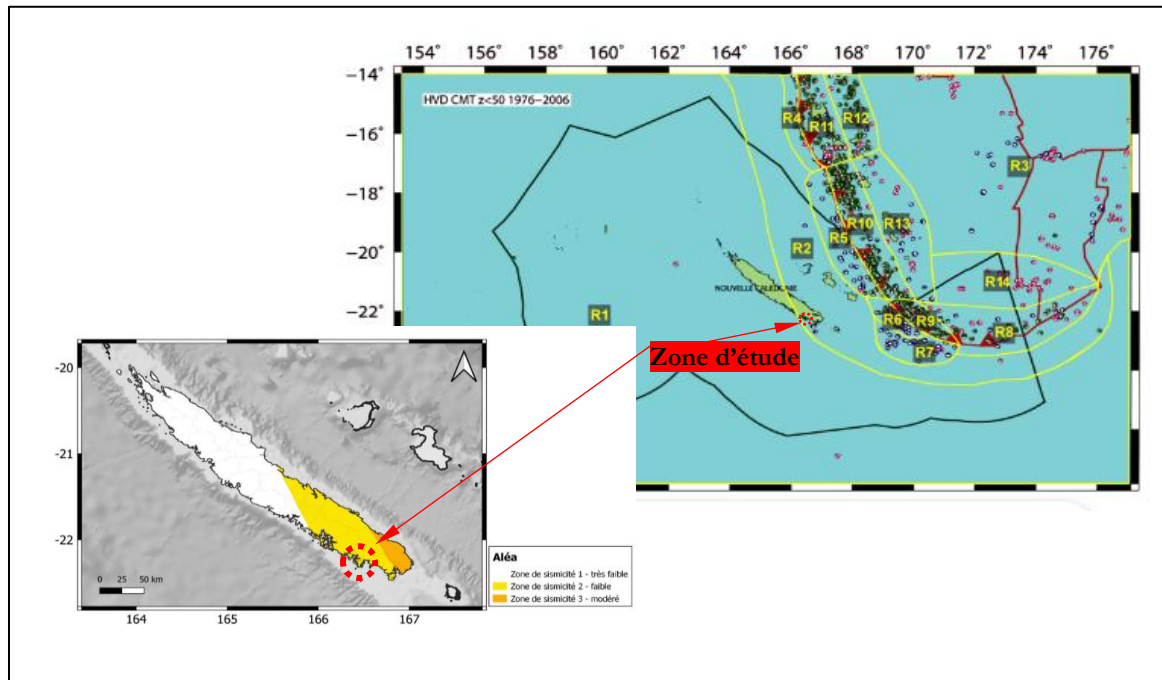


Figure 8. Zonage et classement de l'aléa sismique – Nouvelle Calédonie

Période de retour	475 ans	2 000 ans	5 000 ans	10 000 ans
Moyenne (cm/s ²)	99.1	181.3	254	321.5
P15% (cm/s ²)	69.1	130.5	176	214.2
Médiane (p50%) (cm/s ²)	99.2	176.2	244.5	309.1
P85% (cm/s ²)	121.2	223	308.8	384.9

Figure 9- BRGM 2021. Valeurs du PGA-Nouvelle Calédonie

Cette zone de sismicité (R2) correspond à un aléa faible à très faible. Le sol de fondation est considéré comme sol de catégorie E ou S1 au sens de l'Eurocode 8 : « Sols meubles / très compressibles ».

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (coups/30 cm)	c_u (kPa)
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de v_s de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $v_s > 800$ m/s			
S_1	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ($PI > 40$) et une teneur en eau importante.	< 100 (valeur indicative)	—	10 – 20
S_2	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S_1 .			

Figure 10. Classification du sol au sens de l'Eurocode 8

4.5 Démarche de l'analyse de stabilité de l'extension de la verse

Pour la justification de la stabilité mécanique du talus de l'extension de la verse à scories, nous adoptons la démarche décrite ci-après :

4.5.1 Etape 1 : Analyse de la stabilité de l'extension en cours de construction - Court terme

- **Méthode de calcul**

La justification de la stabilité de l'extension de la verse à scorie pendant les différentes phases de construction, se fera par calcul aux éléments finis ; code de calcul PLAXIS, en contraintes effectives et en utilisant les caractéristiques intrinsèques des matériaux constitutifs de l'assise et des scories de la verse (scories de fusion) : cohésion et angle de frottement **drainés**.

Les pressions interstitielles générées par la consolidation des matériaux de l'assise (argile vaseuse et argile bariolée) seront calculées par le modèle selon la théorie de Terzaghi. Ces pressions qui dépendront de la cadence de la mise en place de l'extension de la verse seront calculées en temps réel. A chaque instant, et en tous points du modèle, les pressions interstitielles seront déduites des contraintes totales et permettront ainsi de calculer les contraintes effectives et les déformations.

Ces calculs permettront d'évaluer :

- Les pressions interstitielles de consolidation et le temps nécessaire pour leur dissipation,
- Le potentiel de stabilité de la verse à chaque phase de construction par la détermination des coefficients de sécurité et visualisation des surfaces de rupture.

Nous adoptons comme critère de stabilité **un coefficient de sécurité proche de 1,3**.

- **Phasages de chargement simulés dans la modélisation**

Etape 1 : Chargement gravitaire du modèle permettant de créer l'état de contraintes initiales du terrain avant la mise en place de la verse. A la fin de cette phase, les déplacements seront annulés ;

Etape 2 : Etude de la consolidation des couches compressibles (argileuses) **selon la cadence retenue** ;

Etape 3 : Etude de stabilité et calcul du coefficient de sécurité avec visualisation des surfaces de rupture au niveau de la verse à la fin du chargement de chaque niveau par un calcul Phi/C réduction. Ce calcul se base sur une réduction progressive de la cohésion et de l'angle de frottement de tous les matériaux constitutifs du modèle ;

- **Choix des coupes de référence pour les calculs**

Le choix des coupes, pour chaque phase d'extension a été établi de manière à pouvoir évaluer la stabilité des talus libres de la verse au cours des différentes phases de l'extension de la verse et plus particulièrement l'extension par endigage de la zone maritime. Ce choix permet aussi d'analyser l'impact de l'extension sur les bâtiments existants et sur la géomembrane enveloppant les scories sodiques (tas historique).

En l'absence de données bathymétriques couvrant l'ensemble de la zone d'étude, la morphologie des fonds marins a été déduites par extrapolation des données des sondages carottés des campagnes géotechniques réalisées sur le site depuis 1993.

Ci-dessous un tableau récapitulatif des géométries prise en compte :

Tableau 3. Récapitulatif de la géométrie des modèles de calcul des différentes phases de l'étude APD

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Zone évaluée	Côté marin	Côté marin	Tas historique-SCS
Fond marin*	-9 m NGNC	-8 m NGNC	-7 m NGNC
Nappe phréatique	+1 NGNC		
Lithologie/assise	<u>Niv. 1</u> : Scories de fusion en place (ép. Variable) <u>Niv. 2</u> : Argile vaseuse (ép. 6 m) <u>Niv. 3</u> : Argile bariolée (ép. 7 m) <u>Niv. 4</u> : Roche altérée (ép. 8 m) <u>Niv. 5</u> : Roche saine (substratum)		
Pente intégratrice talus	Bordure maritime : 23° Partie sommitale : 22°	Bordure intermédiaire : 23° Partie sommitale : 20°	Bordure maritime : 24° Partie sommitale : 23°

*Le niveau des fonds marin a été déduit des logs synthétiques des sondages carottés des campagnes géotechnique 1993, 2001 et 2003.

• Caractéristiques hydromécaniques adoptées pour les différents modèles

Les caractéristiques hydromécaniques de l'ensemble des matériaux constitutifs de l'extension de la verse et de l'assise qui seront utilisées dans la modélisation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4. Caractéristiques mécaniques du sol adoptées pour le calcul Plaxis

	ép (m)	Y _{sat} (kN/m ³)	Modèle de calcul	C' (kPa)	φ' (°)	ν	e ₀	C _c	C _s	K	E (MPa)
Scorie de fusion	-	16	M.Coulomb	5	35	0,3	0,5	-	-	1E-05	5
Argile vaseuse	6	18	Soft-soil	20	24	0,35	1,0	0,3	0,01	5E-09	-
Argile bariolée	7	18	Soft-soil	20	24	0,35	1,0	0,3	0,03	1E-08	-
Roche altérée	-	24	M.Coulomb	50	35	0,25	-	-	-	1E-07	91
Roche saine	-	24	M.Coulomb	100	35	0,25	-	-	-	1E-07	500

Densité saturée (γ_{sat} en kN/m³), Angle de frottement (φ' en °), Cohésion (C' en kPa), Coefficient de Poisson (ν), Indice de vide initial (e_0), Indice de compression (C_c), Indice de gonflement (C_s), Indice de fluage (C_a), Perméabilités (K en m/s), Module de déformation (E en MPa).

• Contraintes de mise en verse des scories – Cadence de mise en place

Une étude visant à déterminer la cadence optimale a été réalisée pour le profil le plus défavorable, à savoir celui de la *Phase 1-Zone gazière – Coupe 1*. Deux variantes de cadence ont été analysées :

- Une cadence de **5m/an** sur l'ensemble de la hauteur du remblai de l'extension ;
- Une cadence de **5 m/an**, jusqu'à la cote **+30 m NGNC**, puis **10 m/an** jusqu'à la cote ultime, **+65 NGNC**.

Ces deux variantes seront étudiées et comparées pour la phase 1. A l'issue de cette comparaison nous maintenons la variante optimale pour les phases 2 et 3.

4.5.2 Etape 2 : Analyse de la stabilité de l'extension en fin de construction - Court terme

Il s'agit de la vérification de la stabilité de la verse **en phase ultime** et en **condition non drainées**. L'étude comprend la stabilité globale du talus (passage par la couche compressible) et/ou la stabilité interne du talus (passage par le pied du talus).

Ces calculs seront menés à l'aide du logiciel Slope/W par la méthode de l'équilibre limite Morgenstern-Price. Nous adoptons comme critère de stabilité en conditions normales, **un coefficient de sécurité proche de 1,5**.

- **Caractéristiques adoptées pour les différents modèles**

Matériau	Modèle de calcul	γ_{unsat} (kN/m ³)	Stabilité court/long terme				Stabilité post-pic ¹	
			C'(kPa)	φ' (°)	$(S_u/\sigma'_v)^2$	$S_{u\text{min}}$ (kPa)	S_u/σ'_v	$S_{u\text{min}}$ (kPa)
Scorie de fusion	<i>Mohr Coulomb</i>	16	5	35	-	-	-	-
Argile vaseuse	<i>Shansep</i>	18	20	24	0,3	20	0,24	16
Argile Bariolée	<i>Shansep</i>	18	20	24	0,35	30	0,28	24
Roche altérée	<i>Mohr Coulomb</i>	24	50	35	-	-	-	-
Roche saine	<i>Mohr Coulomb</i>	24	100	35	-	-	-	-

4.5.3 Etape 3 : Analyse de la stabilité de l'extension de la verse à long terme

Il s'agit de la vérification de la stabilité de la verse **en phase ultime** et en **condition drainées** (après dissipation des pressions interstitielles dans l'assise). Les caractéristiques intrinsèques des différents matériaux de l'assise et des scories stockés en verse seront en condition **drainée** (**C', φ'**). L'étude de la stabilité long terme concerne :

- La stabilité globale du talus (passage par la couche compressible) ;
- La stabilité interne du talus (passage par le pied du talus).

Ces calculs seront menés à l'aide du logiciel Slope/W par la méthode de l'équilibre limite Morgenstern-Price. Nous adoptons comme critère de stabilité en conditions normales, **un coefficient de sécurité proche de 1,5**. Les caractéristiques hydromécaniques de l'ensemble des matériaux constitutifs de l'extension de la verse et de l'assise qui seront utilisées dans la modélisation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

¹ (**) Les valeurs résiduelles post-pic de la cohésion non drainée sont déduits par réduction des caractéristiques de cisaillement de 20%.

² (*) Ce sont des valeurs estimées selon le retour d'expérience sur des matériaux similaires

Tableau 5. Caractéristiques mécaniques du sol adoptées pour le calcul Geoslope

	ép (m)	Modèle de calcul	Y (kN/m³)	C' (kPa)	φ' (°)
Scorie de fusion	-	Mohr Coulomb	16	5	35
Argile vaseuse	6		18	20	24
Argile bariolée	7		18	20	24
Roche altérée	8		24	50	35
Roche saine	-		24	100	35
Le niveau de la nappe sera pris à +1m					

4.5.4 Etape 4 : Analyse de la stabilité de la verse vis-à-vis de l'aléa sismique

Les calculs de stabilité en conditions **sismiques** est réalisée en considérant la verse dans sa phase **ultime**, en condition **non drainée de l'assise** (couche compressible).

Les calculs sont menés en contraintes totales en tenant compte de l'augmentation de la cohésion non drainée sous l'effet de la consolidation au fur et à mesure de la rehausse.

L'effet du séisme est modélisé par une accélération pseudo-statique horizontale k_h et verticale k_v (dans le sens pesant et allégeant) dépendant de l'accélération de référence du site prise égale à **0,99 m/s²**, pour une période de retour de 475 ans ;

Les calculs de stabilité en situation **post-sismique** est la vérification de la stabilité de la verse après passage du séisme et en considérant des caractéristiques mécaniques résiduelles réduites des différents matériaux.

Ces calculs seront menés à l'aide du logiciel Geo-Slope. Nous adoptons comme critère de stabilité **un coefficient de sécurité de 1,1** en conditions sismique et post-sismique.

Les caractéristiques hydromécaniques de l'ensemble des matériaux constitutifs de l'extension de la verse et de l'assise qui seront utilisées dans la modélisation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6. Paramètres géotechniques retenus pour les calculs long terme Geo-slope

Matériau	Modèle de calcul	γ_{unsat} (kN/m ³)	Stabilité court/long terme				Stabilité post-pic ³	
			C' (kPa)	Φ' (°)	(S_u/σ'_v) ⁴	S_u min (kPa)	S_u/σ'_v	S_u min (kPa)
Scorie de fusion	Mohr Coulomb	16	5	35	-	-	-	-
Argile vaseuse	Shansep	18	20	24	0,3	20	0,24	16
Argile Bariolée	Shansep	18	20	24	0,35	30	0,28	24
Roche altérée	Mohr Coulomb	24	50	35	-	-	-	-
Roche saine	Mohr Coulomb	24	100	35	-	-	-	-

4.6 Critères de design des ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques sont dimensionnés en se basant sur les courbes IDF de la station météo de **Tomo** située à environ 46 Km de Nouméa.

Tableau 7. Bases du design

Description	Unité	Valeur
Station météorologique	-	Tomo
Période de retour pour le design des descentes d'eau de drainage de la verse	an	100
Diamètre des enrochements	m	V ² /45

La mise en œuvre des critères de design présentés dans le tableau N°7 sera réalisée suivant les méthodes de calcul détaillées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8. Méthodes de design adoptées pour les justifications hydrauliques du projet

Description	Méthode de calcul	Code de calcul
Calcul des débits		
Temps de concentration	Temps de concentration t_c du bassin versant donné par la formule de Giandoti (heures) : $t_c = \frac{1,5L + 4\sqrt{S}}{0,8\sqrt{H}}$ Avec : L : Longueur de l'écoulement (km) ;	Analytique

³ (**) Les valeurs résiduelles post-pic de la cohésion non drainée sont déduits par réduction des caractéristiques de cisaillement de 20%.

⁴ (*) Ce sont des valeurs estimées selon le retour d'expérience sur des matériaux similaires

Description	Méthode de calcul			Code de calcul
	S : Surface du bassin versant en km ² ; H : dénivelée moyenne en m			
Débit de pointe	Le débit maximum Q (m ³ /s) relative à une récurrence donnée est donné par la méthode CIA : $Q = \frac{C \times I \times S}{3.6}$ Avec : C : Coefficient de ruissellement ; I : Intensité de la pluie mm/h ; S : superficie du bassin versant (km ²).			Analytique
Dimensionnement des ouvrages hydrauliques				
Ouvrages trapézoïdaux	0.5 m à la base	Dimensionnés pour une récurrence de 100 ans	Formule de Manning-Strickler : $Q = V.S = S.K.R_H^{2/3}.i^{1/2}$ K : Coefficient de Manning-Strickler Rh : Rayon hydraulique I : Pente moyenne de l'ouvrage (%)	Analytique

5 JUSTIFICATION GEOTECHNIQUE DE LA PHASE 1 – ZONE GAZIERE

5.1 Modèle de calcul

La coupe la plus défavorable correspond à celle intégrant l'influence de la proximité de la zone maritime sur la stabilité du talus de la zone d'extension projetée.

Lors des travaux d'endiguage, localisés à l'extrémité Sud-Ouest de la verse, le fond marin a été estimé à la cote -8 m NGNC. **Dans cette zone, la plateforme actuelle de scorie est située à la cote +5 m NGNC.**

D'après les sondages géotechniques les plus proches de cette zone, à savoir *SC1-1993* et *SC1-2001*, le toit de l'argile vaseuse est rencontré à des profondeurs comprises entre -11 m NGNC et -12 m NGNC. **Les argiles vaseuses situées au droit de cette zone d'extension sont supposées consolidées sous une couche de scorie de 13 m d'épaisseur.**

Dans le cadre de notre modélisation, et afin de tenir compte des incertitudes liées à la bathymétrie locale, nous adoptons une hypothèse conservatrice, en considérant le niveau du fond marin à la cote **-9 m NGNC**.

Le modèle de calcul est présenté ci-dessous :

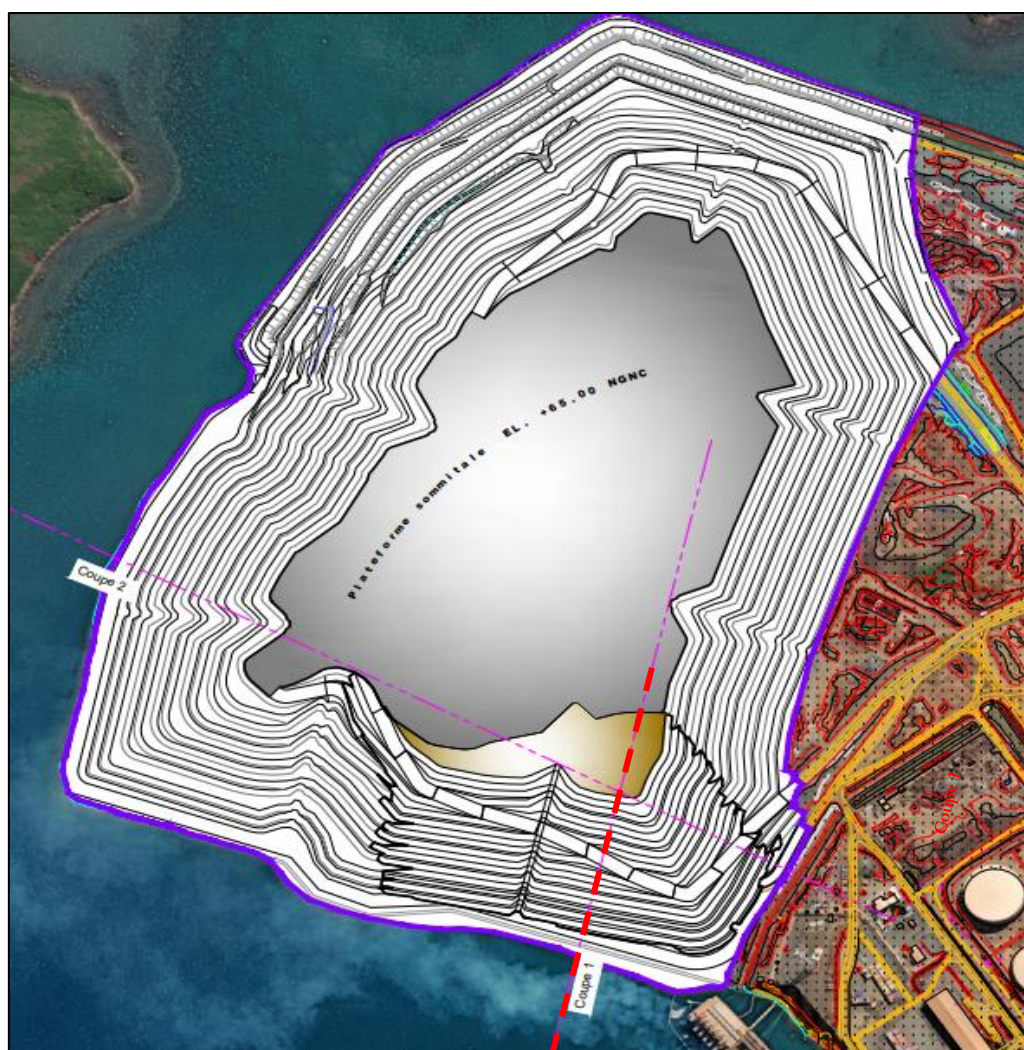


Figure 11. Implantation de la coupe étudiée à court terme de la Phase 1

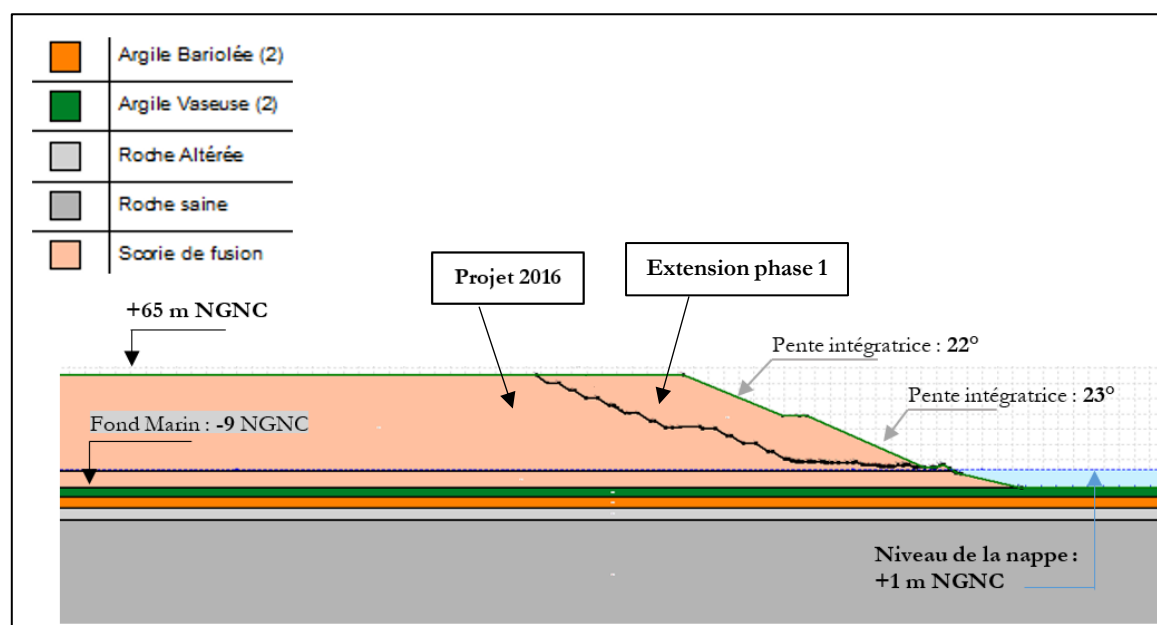


Figure 12. Géométrie du modèle de calcul de la Phase 1

5.2 Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en cours de construction - stabilité court-terme

Pour la vérification de la stabilité de l'extension de la verse en cours de construction, nous avons effectué une modélisation aux éléments finis à l'aide du logiciel Plaxis, simulant ainsi les différentes phases de construction.

5.2.1 Géométrie du modèle et conditions aux limites

Les calculs avec ce modèle bidimensionnel sont réalisés en déformations planes. Dans ces conditions, l'extension latérale de la verse est supposée infinie.

Les conditions aux limites adoptées pour le modèle de calcul dans la simulation numérique sont les suivantes :

- Côté gauche du modèle : Supposé plan de symétrie, avec des déplacements horizontaux nuls et frontière imperméable.
- Côté droit du modèle : c'est limite lointaine avec des déplacements horizontaux nuls et une charge hydraulique imposée au niveau hydrostatique + 1 m NGNC.
- Base du modèle : Déplacements horizontaux et verticaux nuls et frontière imperméable.

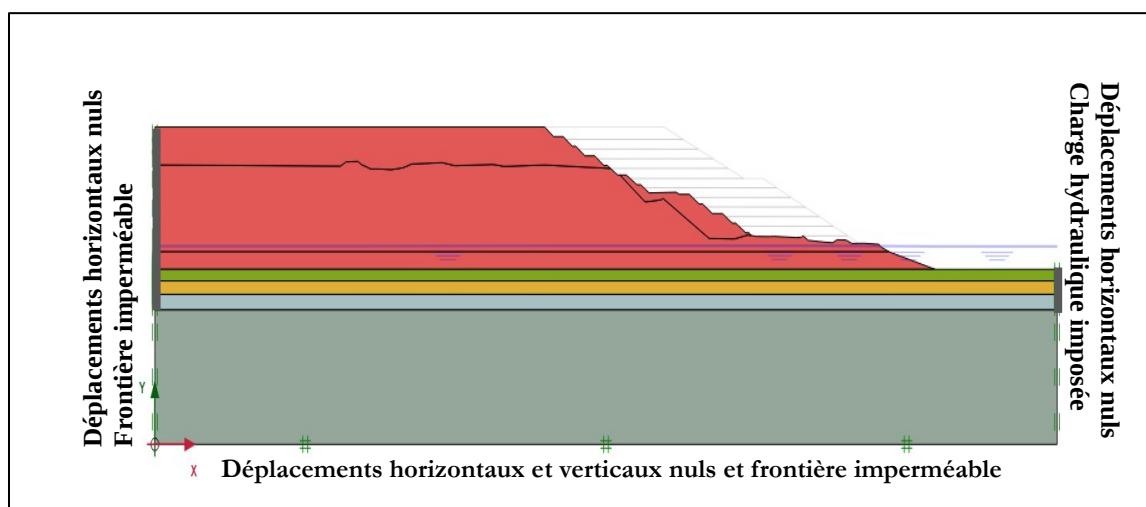


Figure 13. Conditions aux limites adoptées pour la modélisation de la Phase 1 - Zone gazière

5.2.2 Phases de chargement simulées dans la modélisation

Les étapes de construction de l'extension de la verse simulées, selon les variantes, sont les suivantes :

- **Etape 1 :** Chargement gravitaire du modèle permettant de créer l'état de contraintes initiales du terrain avant la mise en place du projet. A la fin de cette phase, les déplacements seront annulés.
- **Etape 2 :** Mise en place et consolidation de la scorie de fusion par couche de 5 m, avec les cadences suivantes :

- Variante 1 : cadence de 5 m/an sur les 30 premiers mètres de hauteur puis 10 m/an jusqu'à atteindre la cote finale soit +65 mNGNC ;
- Variante 2 : 5 m/an sur l'ensemble de la hauteur.
- **Etape 3** : Etude de stabilité et calcul du coefficient de sécurité avec visualisation des surfaces de rupture au niveau de la verse à la fin du chargement de chaque couche par un calcul appelé Phi/C réduction. Ce calcul se base sur une réduction progressive de la cohésion et de l'angle de frottement de tous les matériaux constitutifs du modèle.

5.2.3 Résultats des simulations

Les résultats de calculs des variantes 1 et 2, à savoir les valeurs de surpressions interstitielles maximales relatives à chaque phase de chargement ainsi que le coefficient de sécurité correspondants sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous et les sorties des calculs sont en annexe N°2 et N°3 :

Tableau 9. Résultats de calculs relatifs à l'étude de la stabilité vis-à-vis de la consolidation en phase de construction- Phase 1 - Variante 1

Cadence	H _{couche} (m)	z _{couche} (m NGNC)	Temps (j)	Surpressions interstitielles (kPa)		Coefficient de sécurité
Cadence 5 m/an	4	+8,4	73	Mise en place	27,9	2,01
			219	Consolidation	12,4	
	5	+13,4	90	Mise en place	55,9	2,02
			275	Consolidation	16,0	
	5	+18,4	90	Mise en place	55,1	2,02
			275	Consolidation	13,2	
	5	+23,4	90	Mise en place	49,2	1,98
			275	Consolidation	9,9	
	5	+28,4	90	Mise en place	42,9	1,91
			275	Consolidation	7,7	
	5	+33,4	90	Mise en place	40,1	1,85
			275	Consolidation	6,8	
Cadence 10 m/an	4,8	+38,2	88	Mise en place	37,5	1,81
			262	Consolidation	6,2	
	5,3	+43,5	49	Mise en place	39,3	1,81
			145	Consolidation	11,1	
	5	+48,5	46	Mise en place	40,4	1,81

Cadence	H _{couche} (m)	z _{couche} (m NGNC)	Temps (j)	Surpressions interstitielles (kPa)		Coefficient de sécurité
			137	Consolidation	12,2	
	5	+53,5	46	Mise en place	41,0	1,80
			137	Consolidation	11,5	
	5	+58,5	46	Mise en place	39,3	1,79
			137	Consolidation	10,4	
	6,5	+65	59	Mise en place	38,9	1,80
			178	Consolidation	8,3	

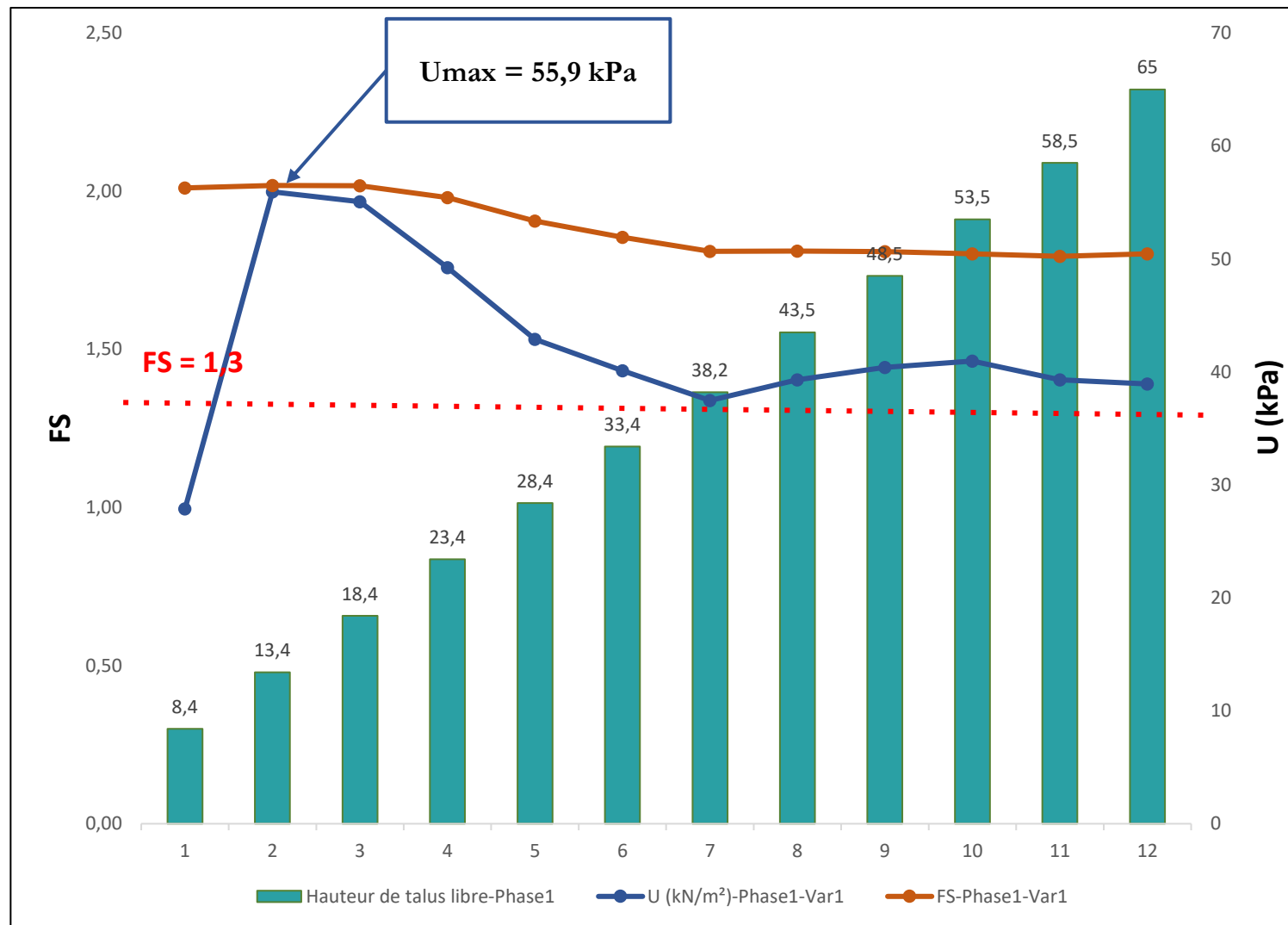


Figure 14. Evolution des surpressions interstitielles et du coefficient de sécurité en fonction de la réhausse de l'extension de la VAS Phase 1 – Variante

1

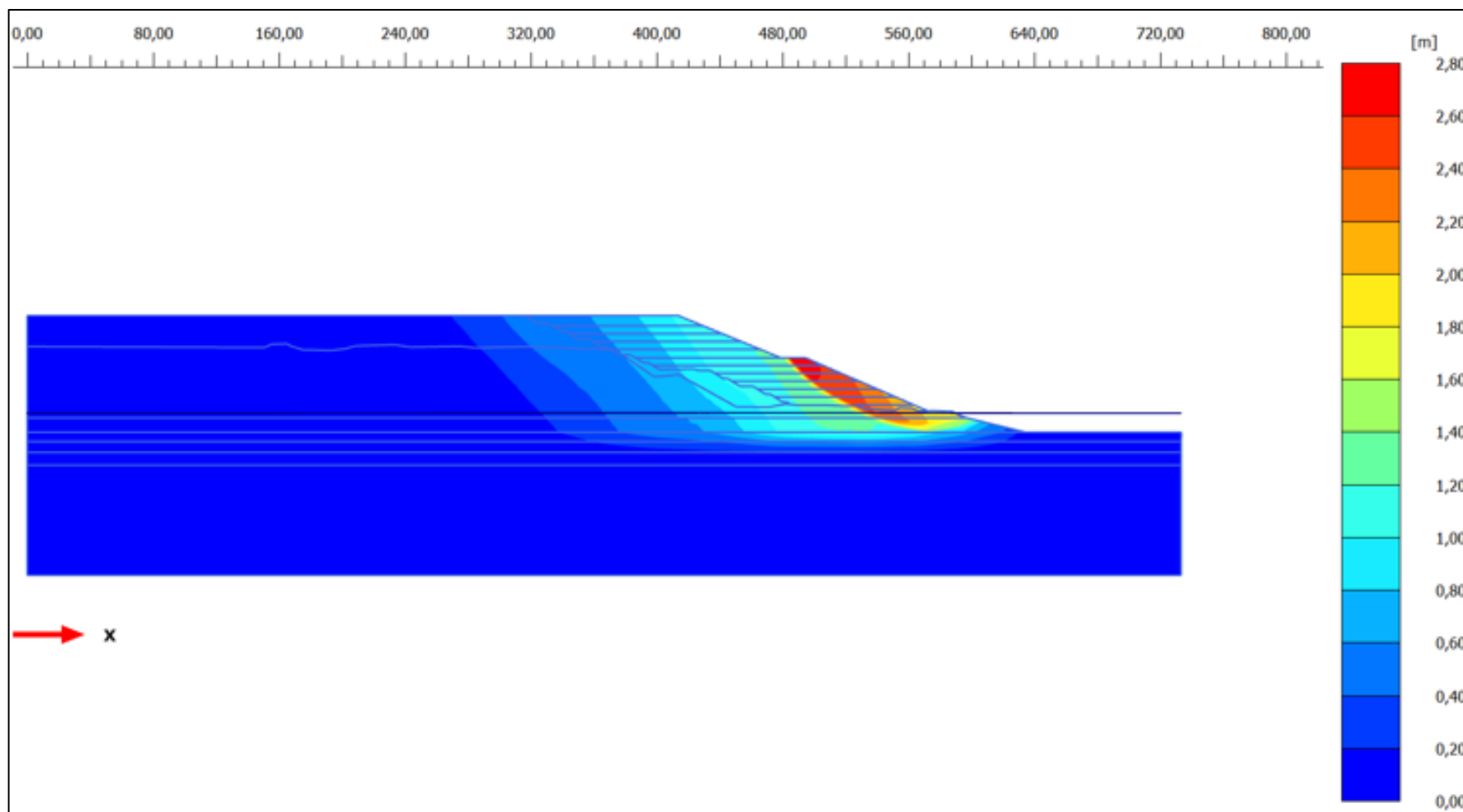


Figure 15. Surface de glissement en fin de construction (FS = 1,8) – Phase 1 - Variante 1

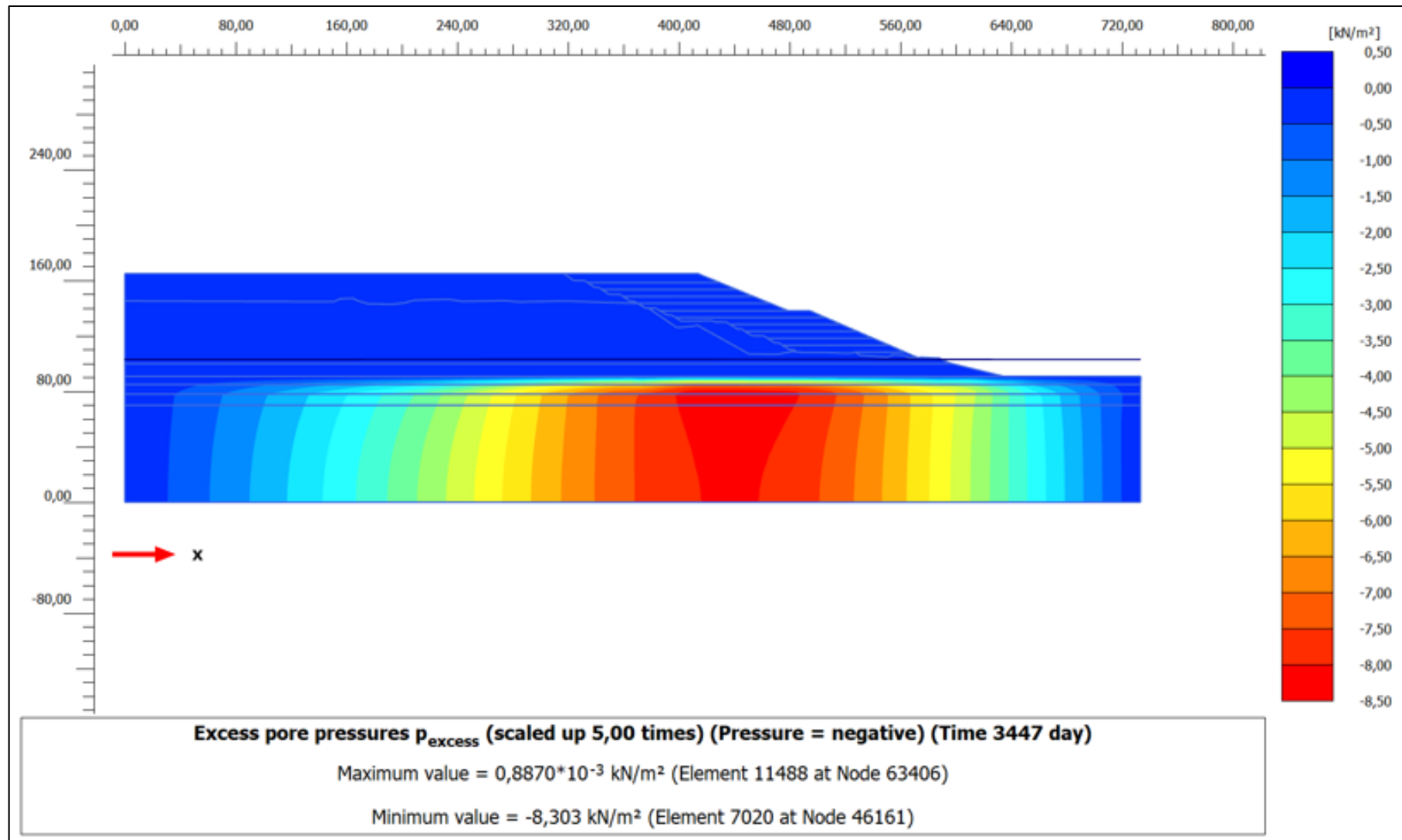


Figure 16. Répartition des surpressions interstitielles en fin de construction de l'extension de la VAS – Phase 1 - Variante 1

Tableau 10. Résultats de calculs relatifs à l'étude de la stabilité vis-à-vis de la consolidation en phase de construction-Phase 1 - Variante 2

Cadence	H _{couche} (m)	Z _{couche} (mNGNC)	Temps (j)	Surpressions interstitielles (kPa)		Coefficient de sécurité
Cadence 5 m/an	4	+8,4	73	Mise en place	27,9	2,01
			219	Consolidation	12,4	
	5	+13,4	90	Mise en place	55,9	2,02
			275	Consolidation	16,0	
	5	+18,4	90	Mise en place	55,1	2,02
			275	Consolidation	13,2	
	5	+23,4	90	Mise en place	49,2	1,98
			275	Consolidation	9,9	
	5	+28,4	90	Mise en place	42,9	1,91
			275	Consolidation	7,7	
	5	+33,4	90	Mise en place	40,1	1,85
			365	Consolidation	6,8	
	4,8	+38,2	88	Mise en place	37,4	1,81
			262	Consolidation	6,1	
	5,3	+43,5	97	Mise en place	29,8	1,81
			290	Consolidation	4,0	
	5	+48,5	90	Mise en place	27,2	1,80
			275	Consolidation	3,7	
	5	+53,5	90	Mise en place	26,5	1,81
			275	Consolidation	3,3	
	5	+58,5	90	Mise en place	25,2	1,80
			275	Consolidation	2,8	
	6,5	+65	119	Mise en place	25,4	1,80
			356	Consolidation	1,8	

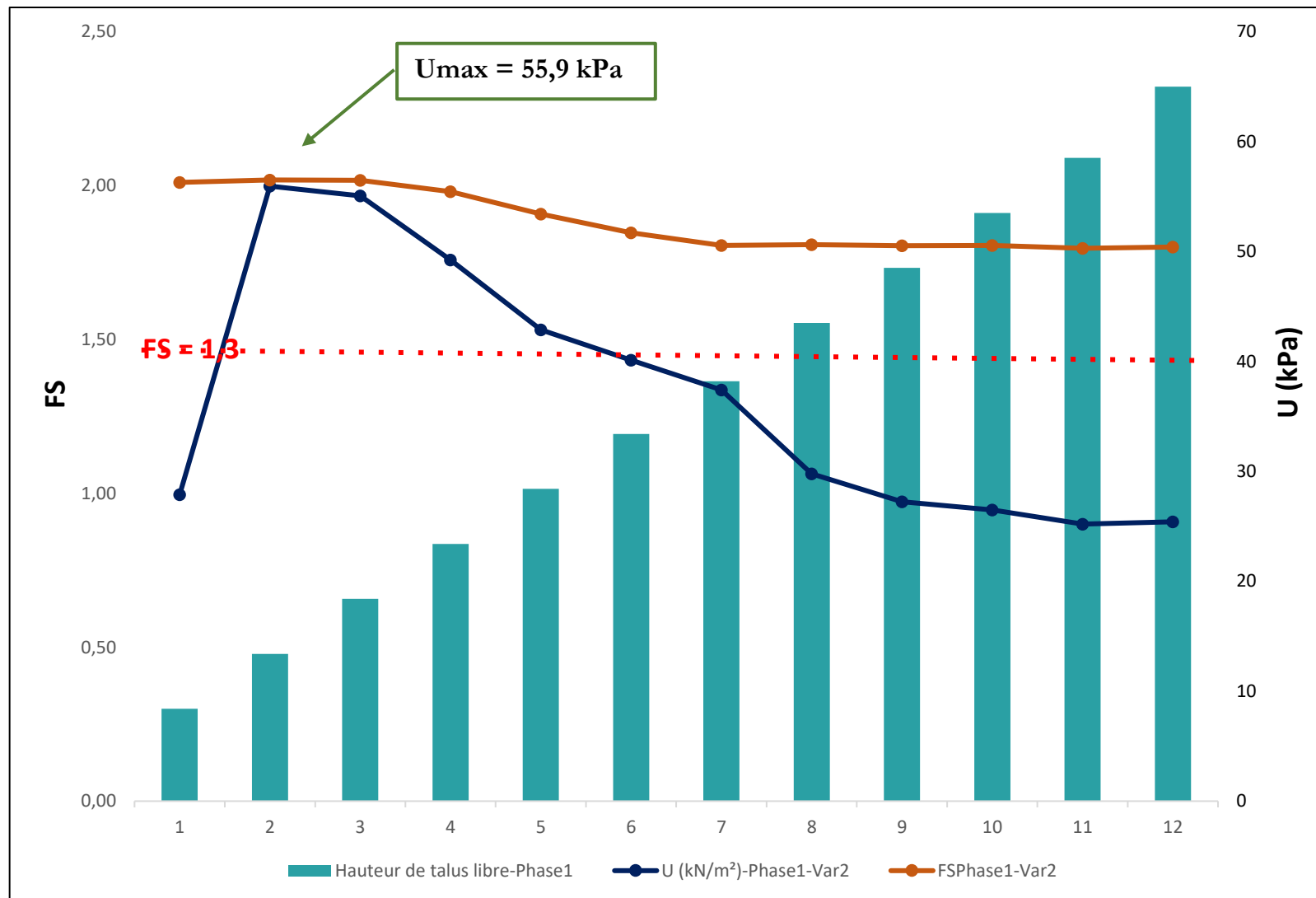


Figure 17. Evolution des surpressions interstitielles et du coefficient de sécurité en fonction de la réhausse de l'extension de la VAS
Phase 1 – Variante 2

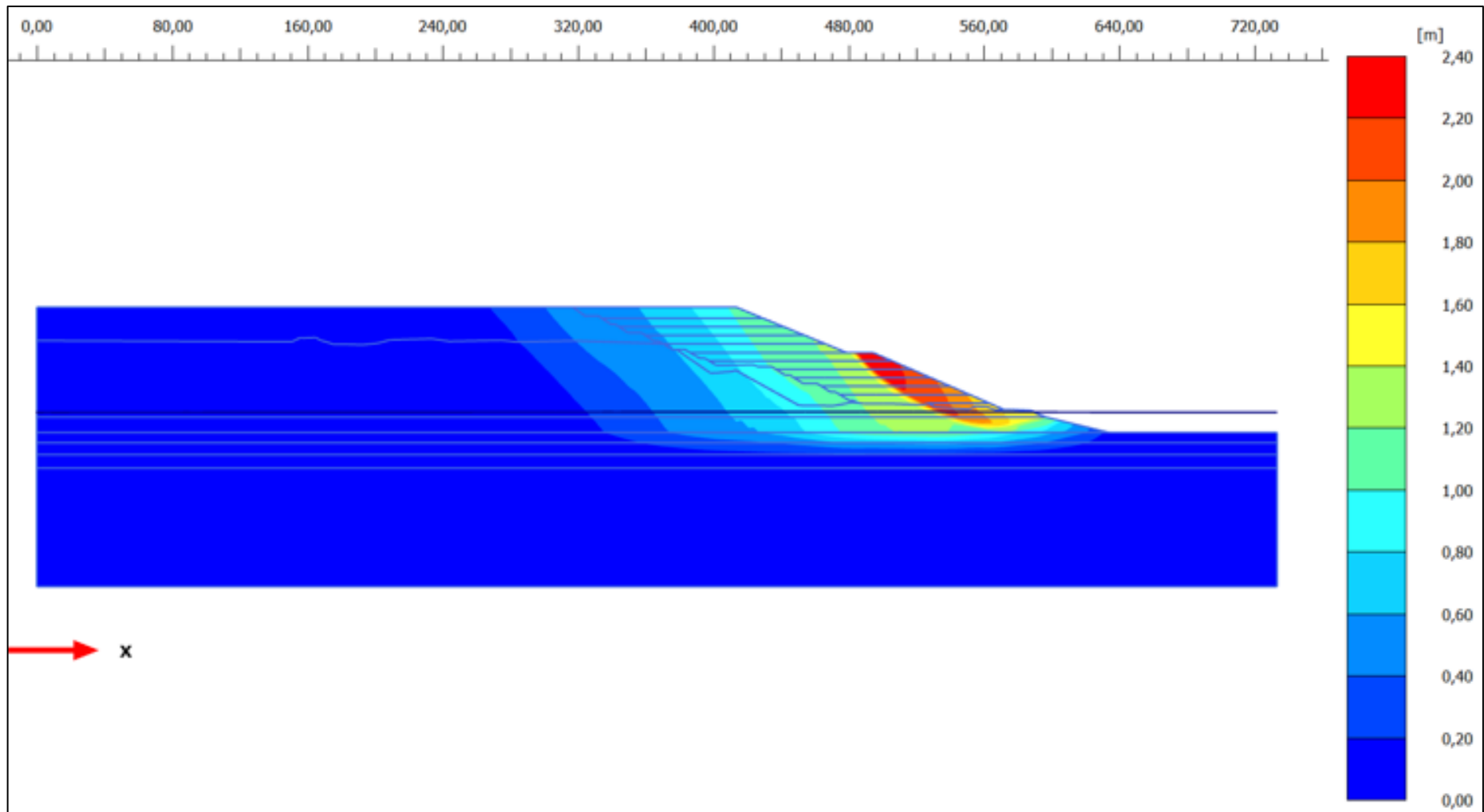


Figure 18. Surface de glissement en fin de construction de l'extension de la VAS (FS = 1,8) – Phase 1 - Variante 2

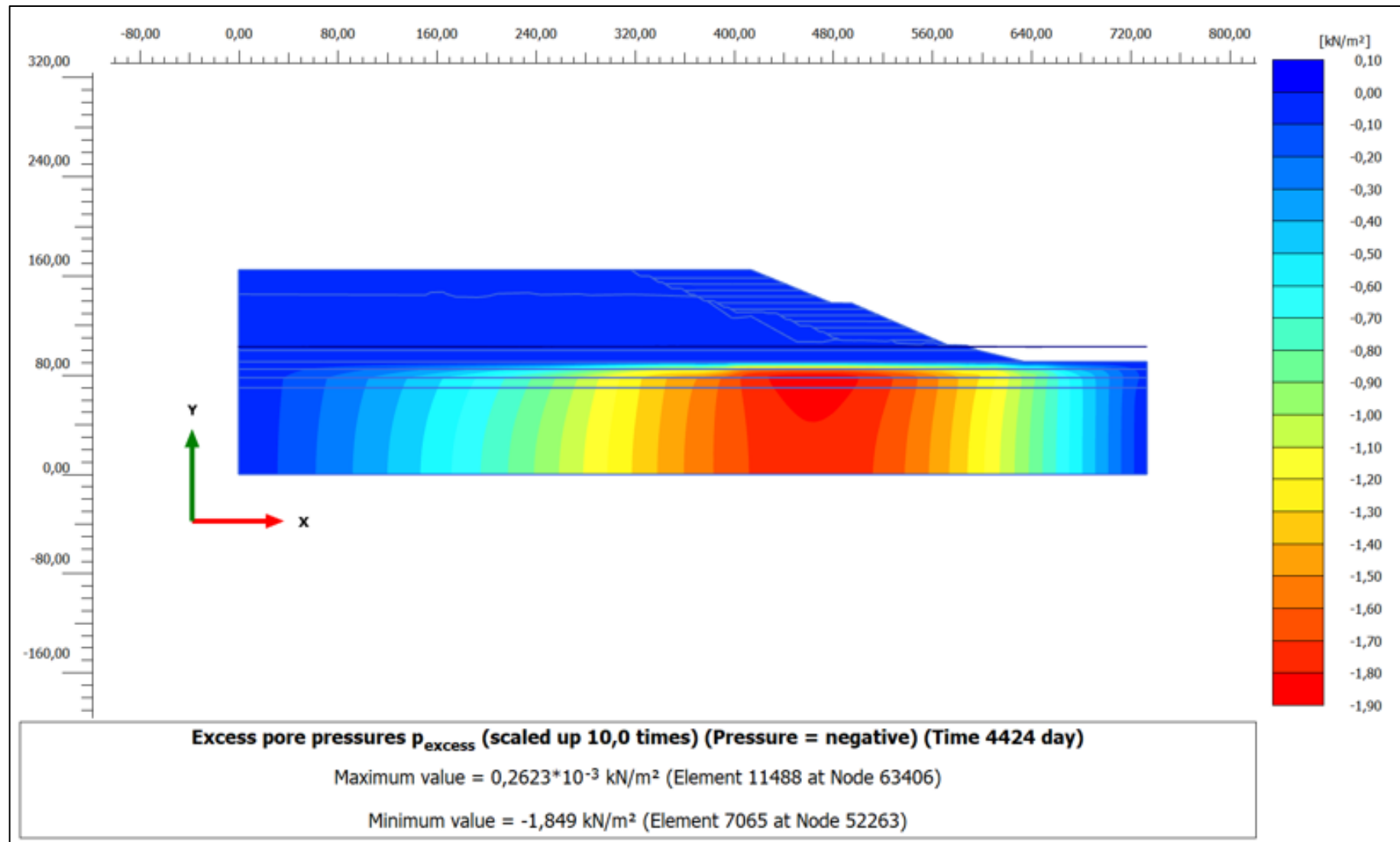


Figure 19. Répartition des surpressions interstitielles en fin de construction de la VAS – Phase 1 - Variante 2

5.2.4 Interprétations des résultats

Les résultats des calculs de stabilité en cours de construction montrent que :

- Les surpressions interstitielles maximales se développent essentiellement au sein des couches constituant l'assise compressible argile vaseuse et argile bariolée puis se drainent par remontée d'eau dans la scorie et par infiltration dans le substratum rocheux ;
- Au fur et à mesure de la construction de l'extension, et étant donnée la géométrie du talus, le noyau de surpression, confiné dans les couches argileuses de l'assise, s'éloigne progressivement du pied du talus. Les surpressions interstitielles maximales atteignent un ordre de grandeur de 60 kPa, valeur observée lors de la construction de la couche 2. Ces surpressions diminuent progressivement au fur et à mesure de la rehausse, pour atteindre des valeurs inférieures à 10 kPa en fin de construction ; (Cf. Figure 20).

L'analyse de la stabilité vis-à-vis du glissement montre que les coefficients de sécurité calculés pour les différentes étapes de construction demeurent **supérieurs à 1,3**. En fin de construction le coefficient de sécurité sera de 1,8 ; (Cf. Figure 21).

Compte tenu de l'ensemble de ces résultats, notamment l'évolution des surpressions interstitielles et les coefficients de sécurité obtenus, il a été démontré que la stabilité de l'extension en phase de construction est assurée pour les deux variantes de cadence analysées. Nous recommandons donc pour **les trois phases d'extension** une cadence de stockage de :

- 5 m/an sur une épaisseur de 30 m ;
- 10 m/an au-delà de 30 m d'épaisseur et jusqu'à la cote finale (+65 m NGNC) pour le calcul de la stabilité des autres phases.



Figure 20. Evolution des surpressions interstitielles en fonction des variantes des cadences

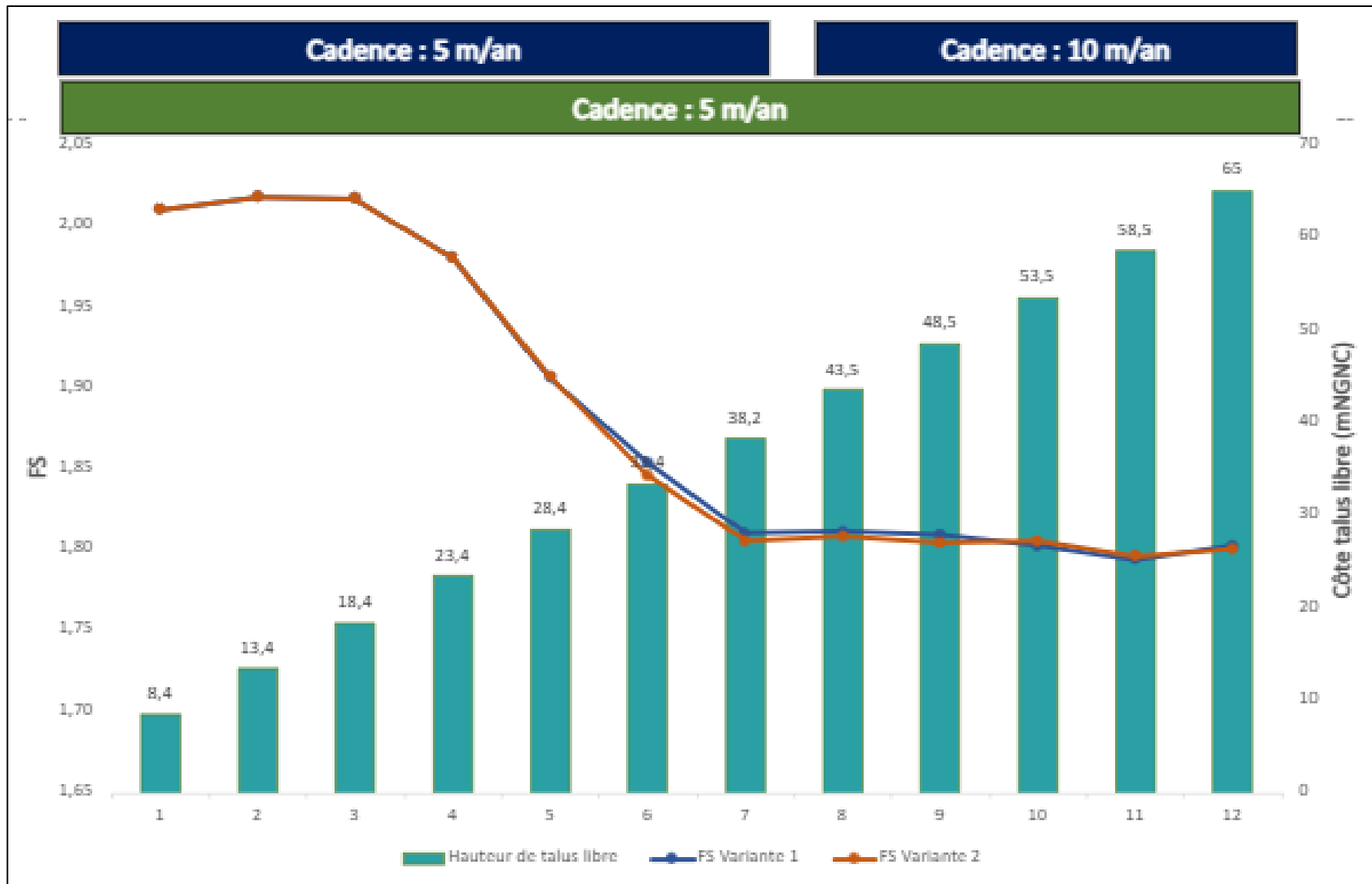


Figure 21. Evolution des coefficients de sécurité en fonction de cadence

5.2.5 Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en phase ultime en condition non drainée

Il s'agit de la vérification de la stabilité vis-à-vis du glissement du talus de l'extension en phase ultime (en fin de construction) **sous l'effet d'une sollicitation rapide : il s'agit de deux événements accidentels, remontée exceptionnelle du niveau hydrostatique ou excavation touchant le pied de la verse au contact des argiles vaseuses).**

Les calculs sont réalisés avec la méthode à l'équilibre limite moyennant le logiciel GeoSlope et en utilisant les caractéristiques mécaniques non drainées (cohésion non drainée des argiles vaseuses après la fin de la consolidation).

Les résultats des calculs donnent un coefficient de sécurité de 1,3. Compte tenu de la faible occurrence de ces deux événements, nous estimons que le facteur de sécurité est acceptable et ce en tenant compte de la piste périphérique de largeur de 20 m projetée au pied des talus de la verse durant les trois phases d'extension.

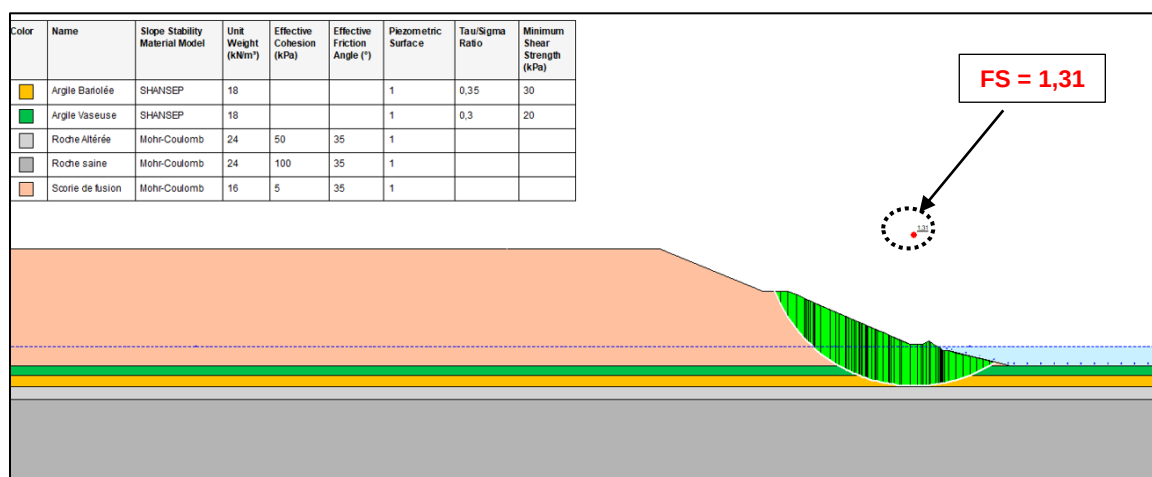


Figure 22. Résultat de calcul court terme en fin de construction - Phase 1 - Zone Gazière

5.2.6 Analyse de la stabilité de verse à long terme

Dans cette analyse, nous analysons la stabilité de la verse vis-à-vis de deux types d'événements :

- Calcul Statique : Il vise à évaluer la stabilité du talus de l'extension en phase ultime après la consolidation des argiles vaseuses et sous l'effet de sollicitations lentes (rehausse importante, redressement du talus de la verse, ...). Dans cette analyse nous considérons les caractéristiques drainées des matériaux de la verse et l'assise ;
- Calcul pseudo-statique : Il permet d'évaluer la stabilité sous l'effet d'un sismique qui surviendrait plusieurs années après la fin de construction de la verse. Dans ces conditions nous supposons que les scories resteront toujours drainées mais les argiles vaseuses seront non drainées puisque la sollicitation sismique provoque des cisaillements cycliques est très rapides.

Afin de réaliser cette analyse, nous avons réalisés deux coupes représentant les cas les plus défavorables du talus de l'extension de la Phase1.

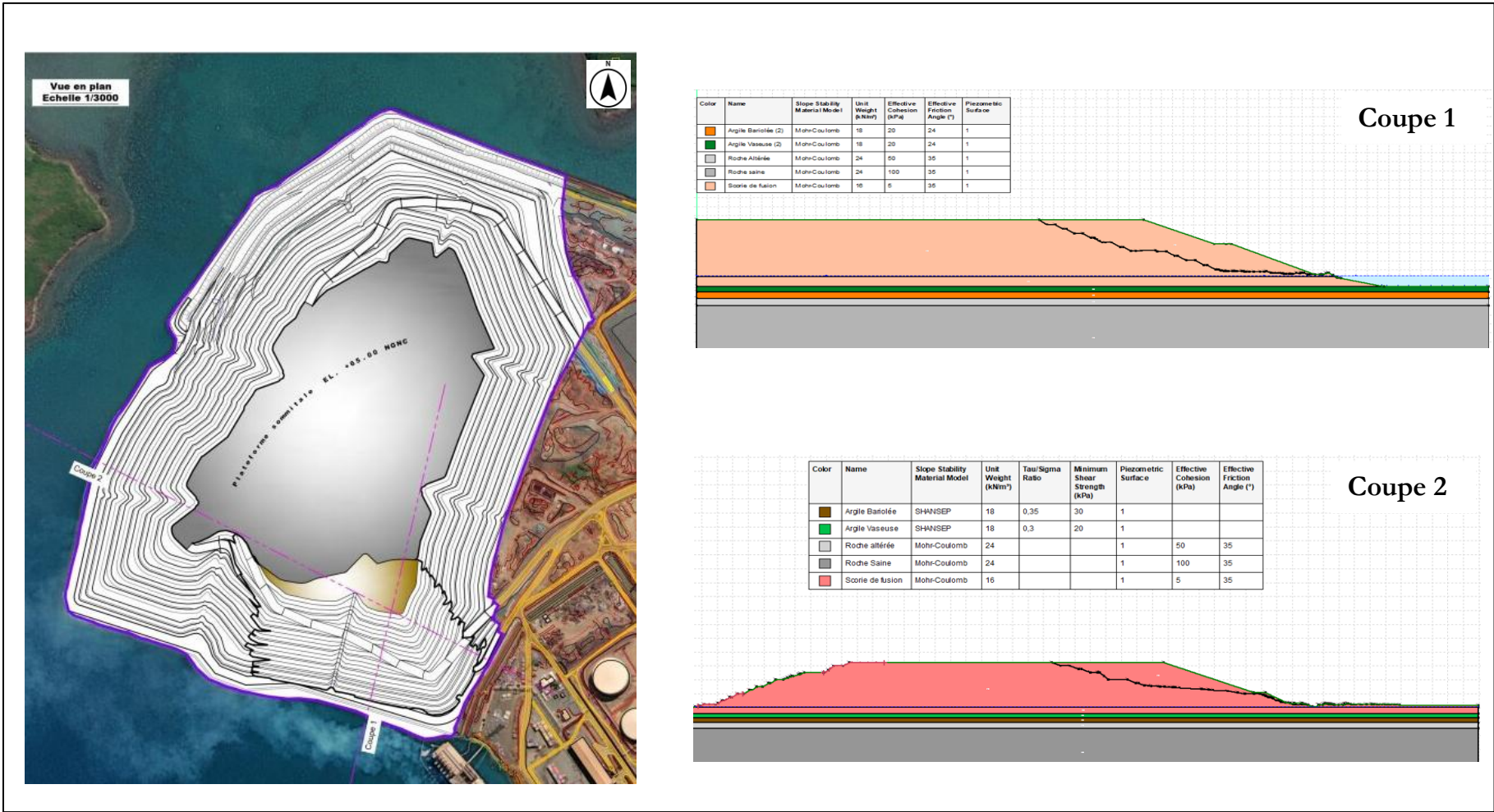
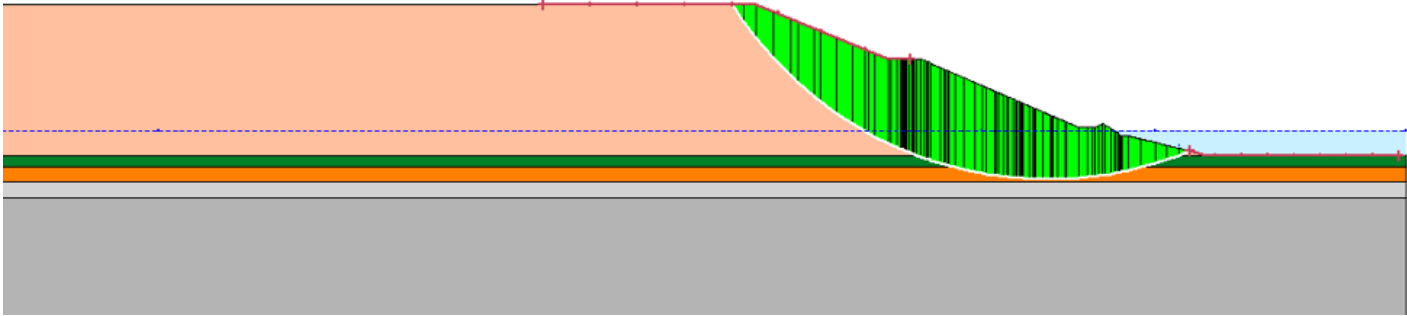
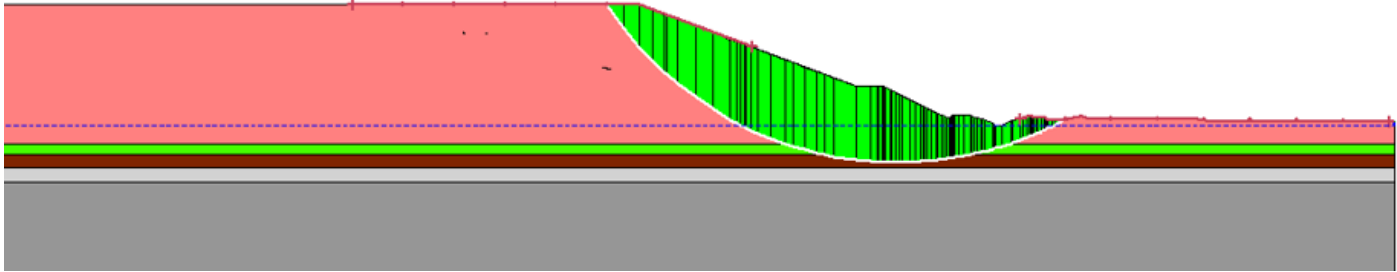
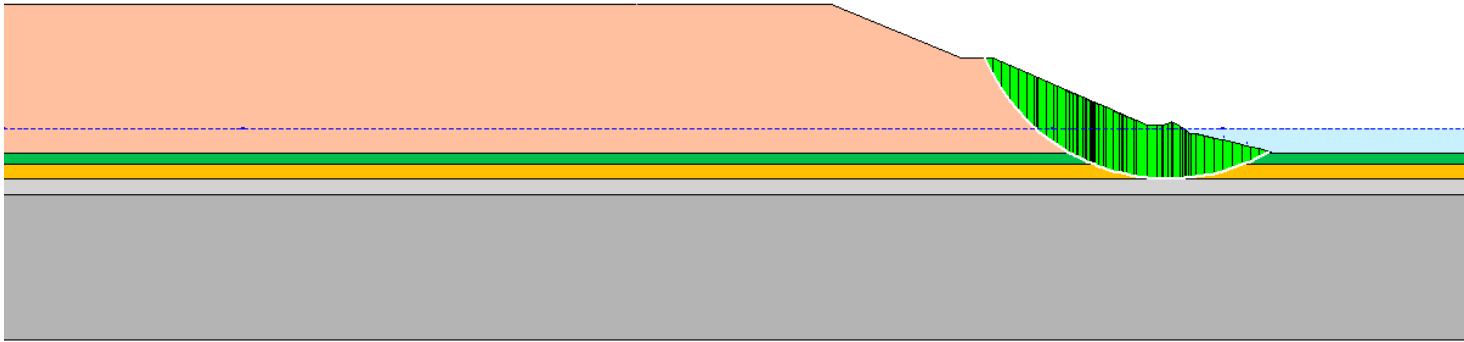


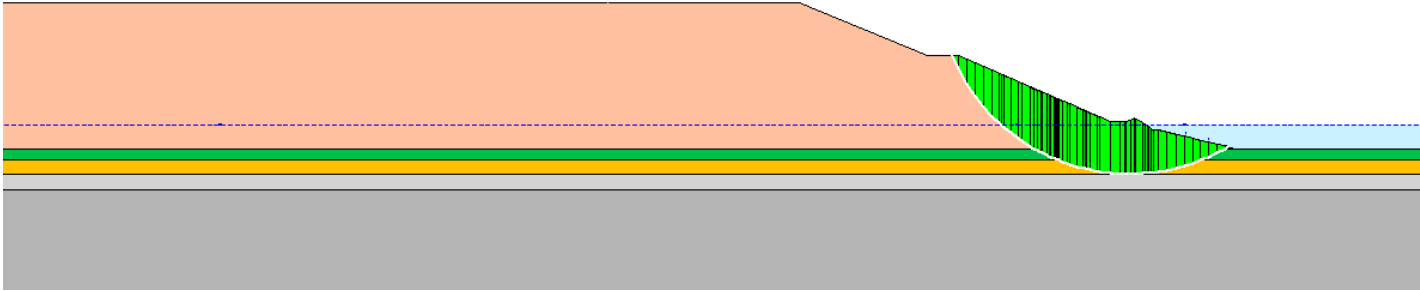
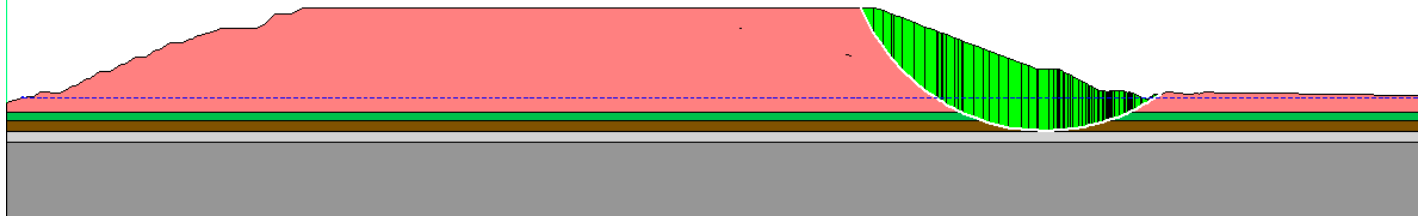
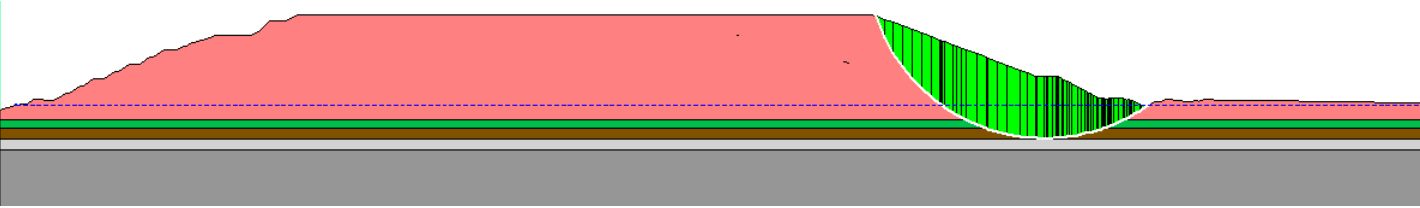
Figure 23. Modèles de calcul de justification vis-à-vis de la stabilité à long terme - Phase 1

5.2.7 Synthèse des résultats des calculs de stabilité long terme

Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau suivant et les sorties des calculs sont en annexe N°4 :

Tableau 11. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel – Phase 1

Type de calcul	FS requis	N° de la coupe		Mécanisme de rupture	FS
Calcul statique en phase ultime	1,5	Coupe1			1,71
		Coupe 2			1,97
Calcul pseudo-statique	1,1	Coupe 1	Allègent		0,95

Type de calcul	FS requis	N° de la coupe		Mécanisme de rupture	FS
		Coupe 2	Pesant		0,86
			Allègent		1,17
			Pesant		1,09

Ces calculs montrent que la stabilité à long terme en conditions drainées est satisfaisante avec un coefficient de sécurité minimal égal à 1,71 supérieur au coefficient de sécurité requis de 1,5 ;

Cependant le coefficient de sécurité évalué avec la méthode pseudo-statique est légèrement inférieur à 1. Sachant que cette méthode simpliste est très pessimiste, nous avons procédé à une vérification de la stabilité de la verse en condition post-sismique et ceux conformément au standard international GISTM (stabilité après le passage du séisme).

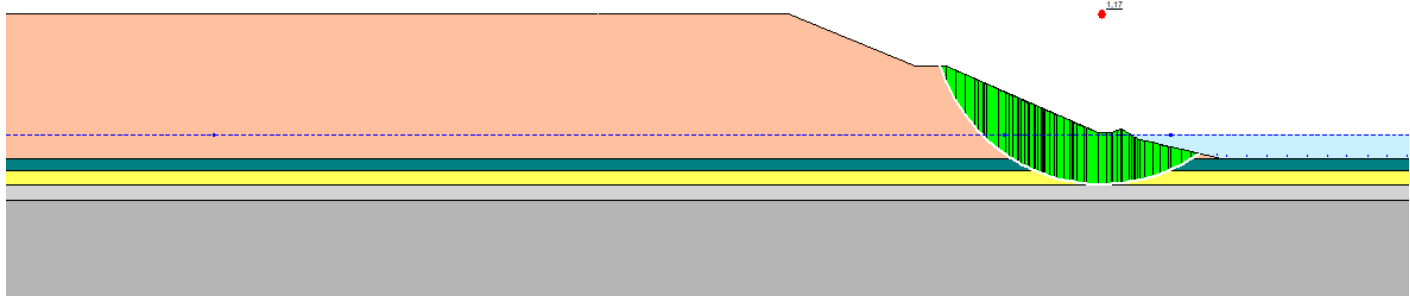
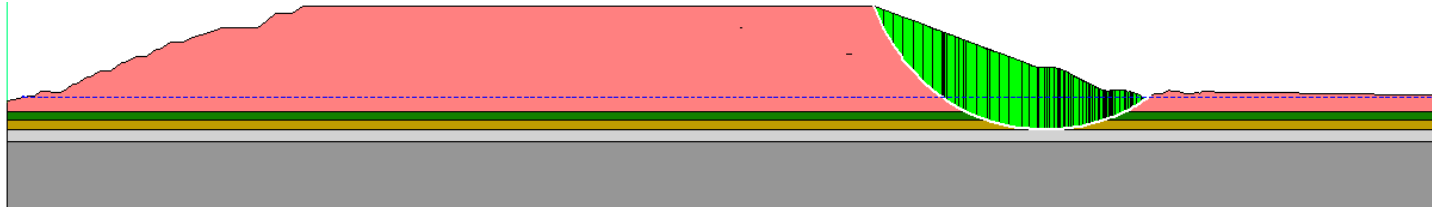
Dans cette analyse on considère que les cisaillements cycliques induits par le séisme provoquent un ramollissement des argiles vaseuses et une réduction de la cohésion non drainée de 20%.

Dans ces conditions, les calculs sont réalisés en statique sans accélération sismique et en conditions non drainées. Le coefficient de sécurité requis est de **1,1**.

Les résultats des calculs sont présentés dans Tableau 12, ils montrent que le coefficient de sécurité est proche de 1,2, supérieur à la valeur requise. Ceci permet de conclure que **les conditions de stabilité de la phase 1 vis-à-vis des sollicitations sismiques sont globalement vérifiées pour une cote ultime à +65 m NGNC.**

Nous tenons à préciser que le résultat de l'analyse du comportement de la verse vis-à-vis du risque sismique est très sensible à la valeur de la cohésion non drainée des argiles vaseuses. À ce titre, la réalisation des essais in-situ de type CPTu sur les argiles vaseuses permettrait d'affiner l'évaluation des paramètres géotechniques et de conforter les résultats obtenus.

Tableau 12. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel en condition post- sismique – Phase 1

Type de calcul	FS visé	N° de la coupe	Mécanisme de rupture	FS
Calcul Statique post-sismique	1,1	Coupe 1		1,17
		Coupe 2		1,42

En situation post-sismique, le coefficient de sécurité est satisfaisant $Fs \approx 1,2$. Ceci permet de conclure que **les conditions de stabilité de la phase 1 vis-à-vis des sollicitations sismiques sont globalement vérifiées pour une cote ultime à +65 mNGNC.**

6 JUSTIFICATION GEOTECHNIQUE DE LA PHASE 2 – ZONE CASSE-FONTE AU NORD

6.1 Modèle de calcul

La coupe la plus défavorable correspond à celle intégrant l'influence de la proximité de la zone maritime sur la stabilité du talus.

D'après les sondages géotechniques les plus proches de cette zone, à savoir *SC2* et *SC3*, le toit de l'argile vaseuse est rencontré à des profondeurs comprises entre - 5 m NGNC et - 9 m NGNC. **Dans cette zone, la plateforme actuelle de scorie est située à la cote +5 m NGNC.**

Dans le cadre de notre modélisation, et afin de tenir compte des incertitudes liées à la bathymétrie locale, nous adoptons une hypothèse conservatrice, en considérant le niveau du fond marin à la cote – 8 m NGNC.

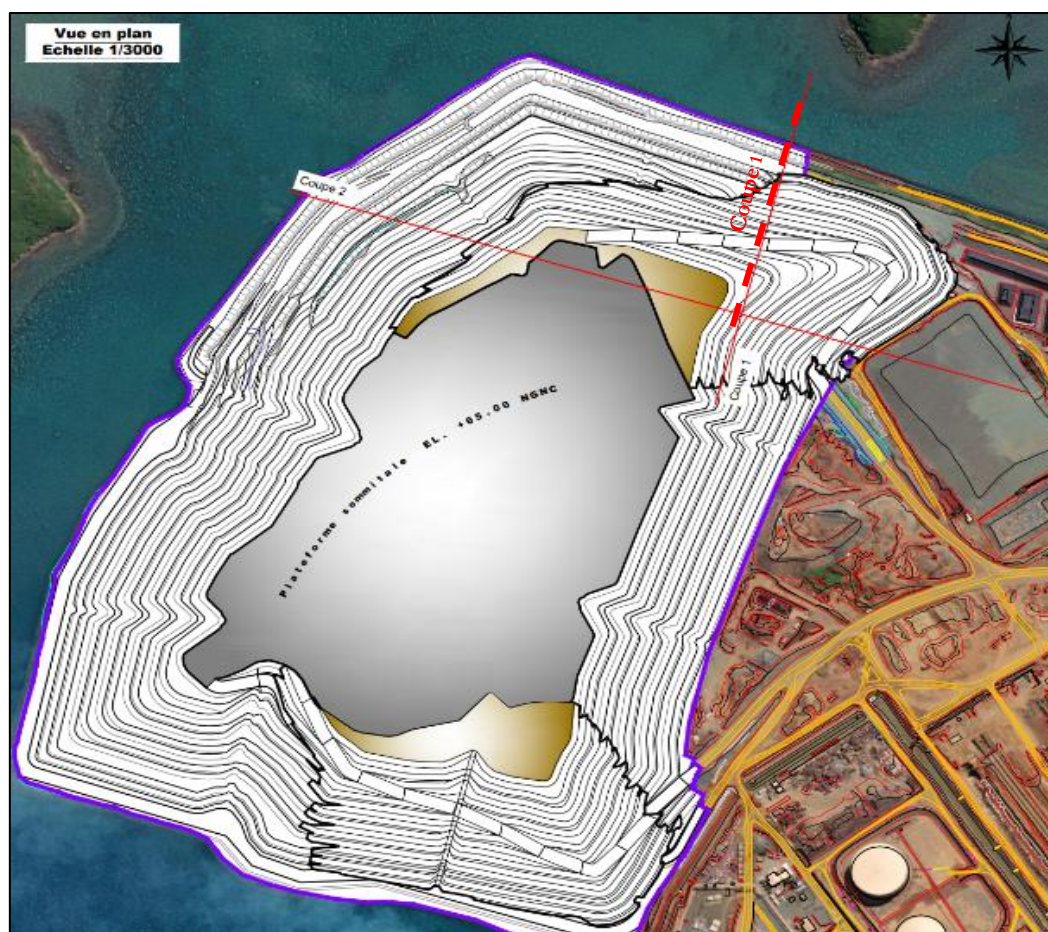


Figure 24. Implantation de la coupe étudiée à court terme de la Phase 2

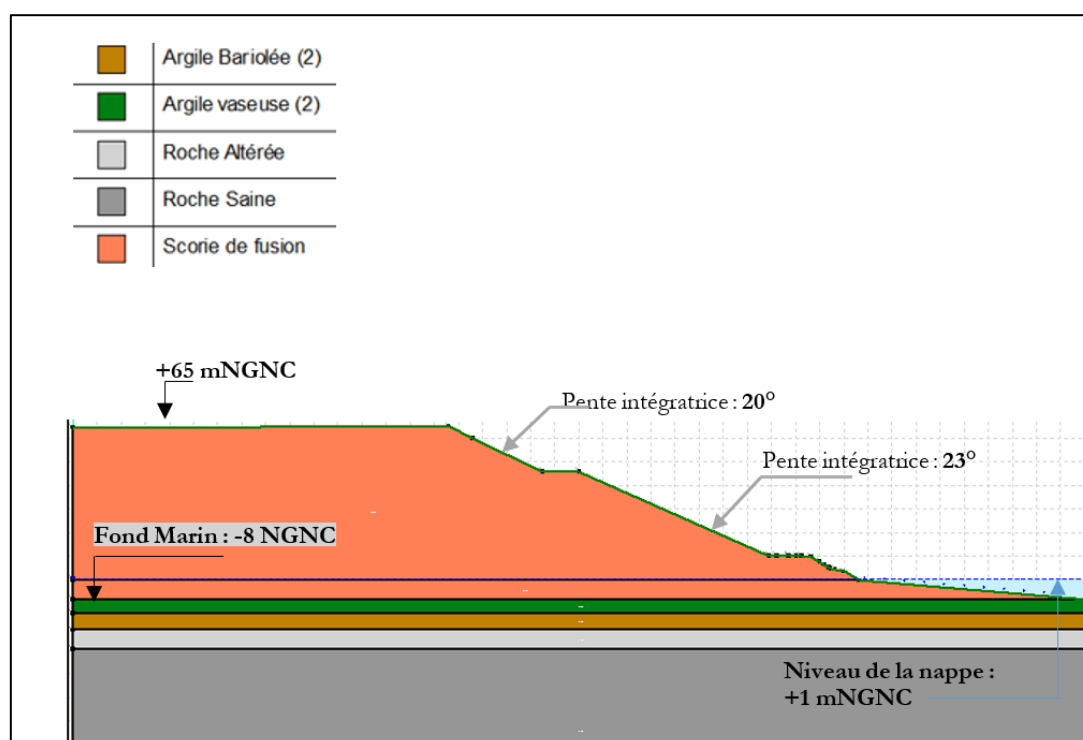


Figure 25. Géométrie du modèle de calcul de la Phase 2 - Zone Casse-fonte au Nord

6.2 Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en cours de construction - stabilité court-terme

Pour la vérification de la stabilité de l'extension de la verse en cours de construction, nous avons effectué une modélisation aux éléments finis à l'aide du logiciel Plaxis, simulant ainsi les différentes phases de construction.

6.2.1 Géométrie du modèle et conditions aux limites

Les calculs avec ce modèle bidimensionnel sont réalisés en déformations planes. Dans ces conditions, l'extension latérale de la verse est supposée infinie.

Les conditions aux limites adoptées pour le modèle de calcul dans la simulation numérique sont les suivantes :

- Côté gauche du modèle : Supposé plan de symétrie, avec des déplacements horizontaux nuls et frontière imperméable ;
- Côté droit du modèle : c'est une limite lointaine avec des déplacements horizontaux nuls et une charge hydraulique imposée au niveau hydrostatique + 1 mNGNC.
- Base du modèle : Déplacements horizontaux et verticaux nuls et frontière imperméable.

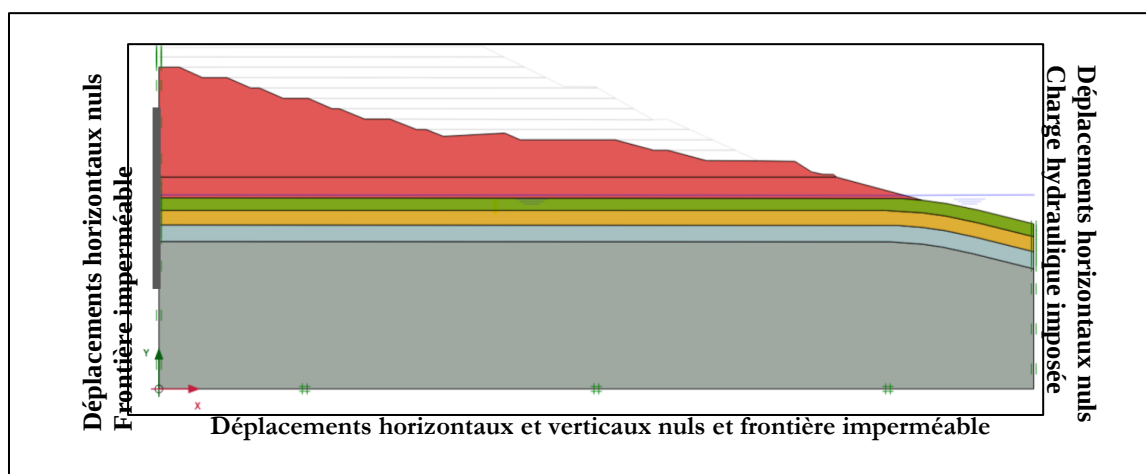


Figure 26. Conditions aux limites adoptées pour la modélisation de la Phase 2 – Zone Casse-fonte au Nord

6.2.2 Phases de chargement simulées dans la modélisation

Les étapes de construction de l'extension de la verse simulées, sont les suivantes :

- **Etape 1** : Chargement gravitaire du modèle permettant de créer l'état de contraintes initiales du terrain avant la mise en place du projet. A la fin de cette phase, les déplacements seront annulés ;
- **Etape 2** : Mise en place et consolidation de la scorie de fusion par couche de 5 m, avec les cadences suivantes :
 - 5 m/an sur les 30 premiers mètres de hauteur

- 10 m/an jusqu'à atteindre la cote finale soit +65 m NGNC.
- **Etape 3** : Etude de stabilité et calcul du coefficient de sécurité avec visualisation des surfaces de rupture au niveau de la verse à la fin du chargement de chaque couche par un calcul appelé Phi/C réduction. Ce calcul se base sur une réduction progressive de la cohésion et de l'angle de frottement de tous les matériaux constitutifs du modèle.

6.2.3 Résultats des simulations

Les résultats de calculs, à savoir les surpressions interstitielles maximales relatives à chaque phase de chargement ainsi que le coefficient de sécurité correspondants sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous et les sorties des calculs sont en annexe N°5 :

Tableau 13. Résultats de calculs relatifs à l'étude de la stabilité vis-à-vis de la consolidation en phase de construction-Phase 2

Cadence	H _{couche} (m)	Z _{couche} (m NGNC)	Temps (j)	Surpressions interstitielles (kPa)		Coefficient de sécurité
Cadence 5 m/an	5	15,6	90	Mise en place	26,1	2,1
			275	Consolidation	4,8	
	5	20,6	90	Mise en place	25,9	2,0
			275	Consolidation	4,2	
	5	25,6	90	Mise en place	41,6	1,8
			275	Consolidation	6,4	
	5	30,5	90	Mise en place	44,4	1,8
			275	Consolidation	5,8	
	5	35,6	90	Mise en place	45,7	1,7
			275	Consolidation	5,1	
	5	40,6	90	Mise en place	42,1	1,7
			275	Consolidation	4,4	
	5	45,6	90	Mise en place	42,2	1,6
			275	Consolidation	3,9	
Cadence 10	5	50,6	46	Mise en place	49,1	1,6

Cadence	H couche (m)	Z _{couche} (m NGNC)	Temps (j)	Surpressions interstitielles (kPa)		Coefficient de sécurité
			137	Consolidation	10,5	
	5	55,6	46	Mise en place	54,4	1,6
			137	Consolidation	10,6	
	5	60,4	46	Mise en place	53,2	1,6
			137	Consolidation	9,5	
	4,6	65	40	Mise en place	50,3	1,6
			121	Consolidation	9,9	

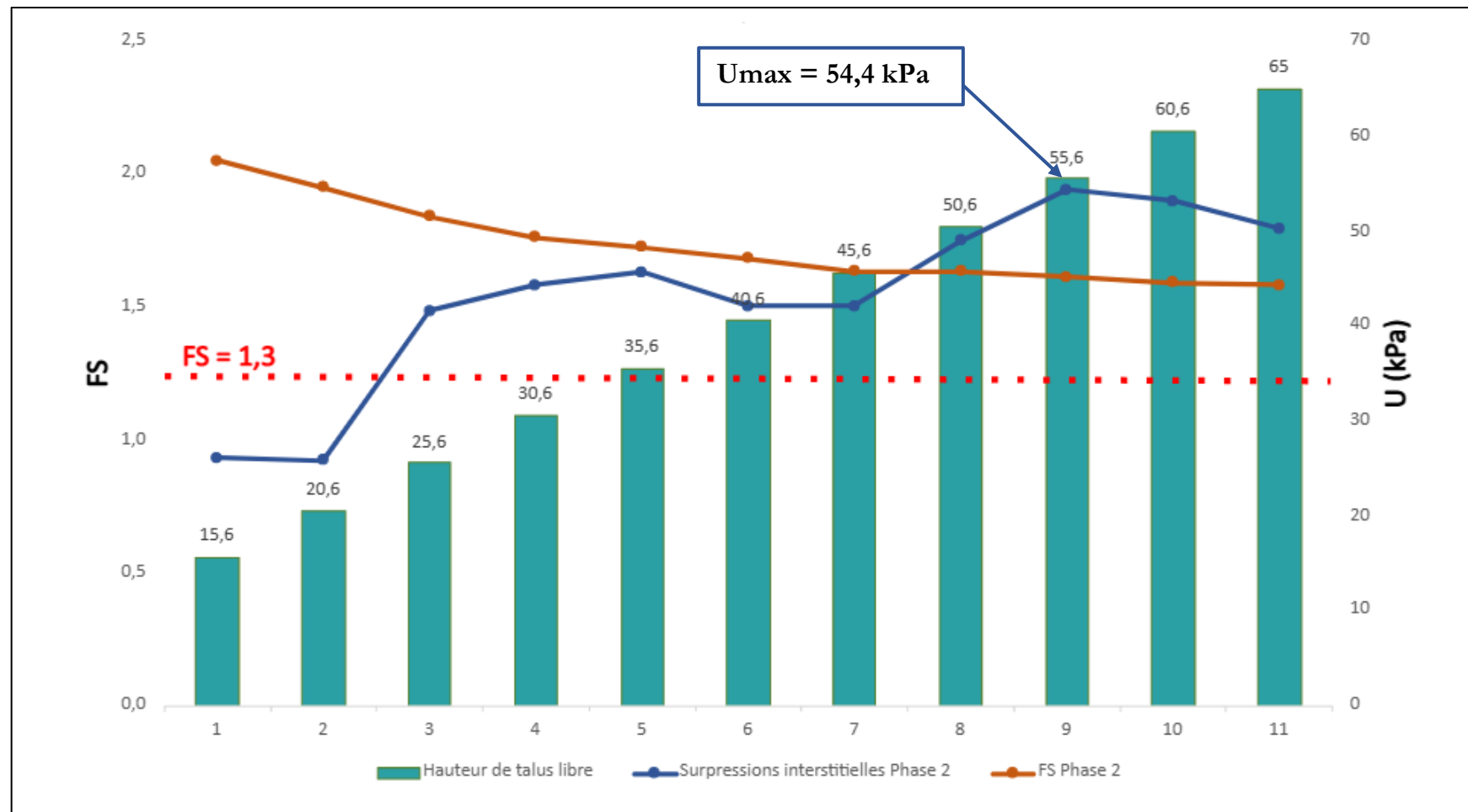


Figure 27. Evolution des surpressions interstitielles et du coefficient de sécurité en fonction de la réhausse de l'extension de la VAS – Phase 2

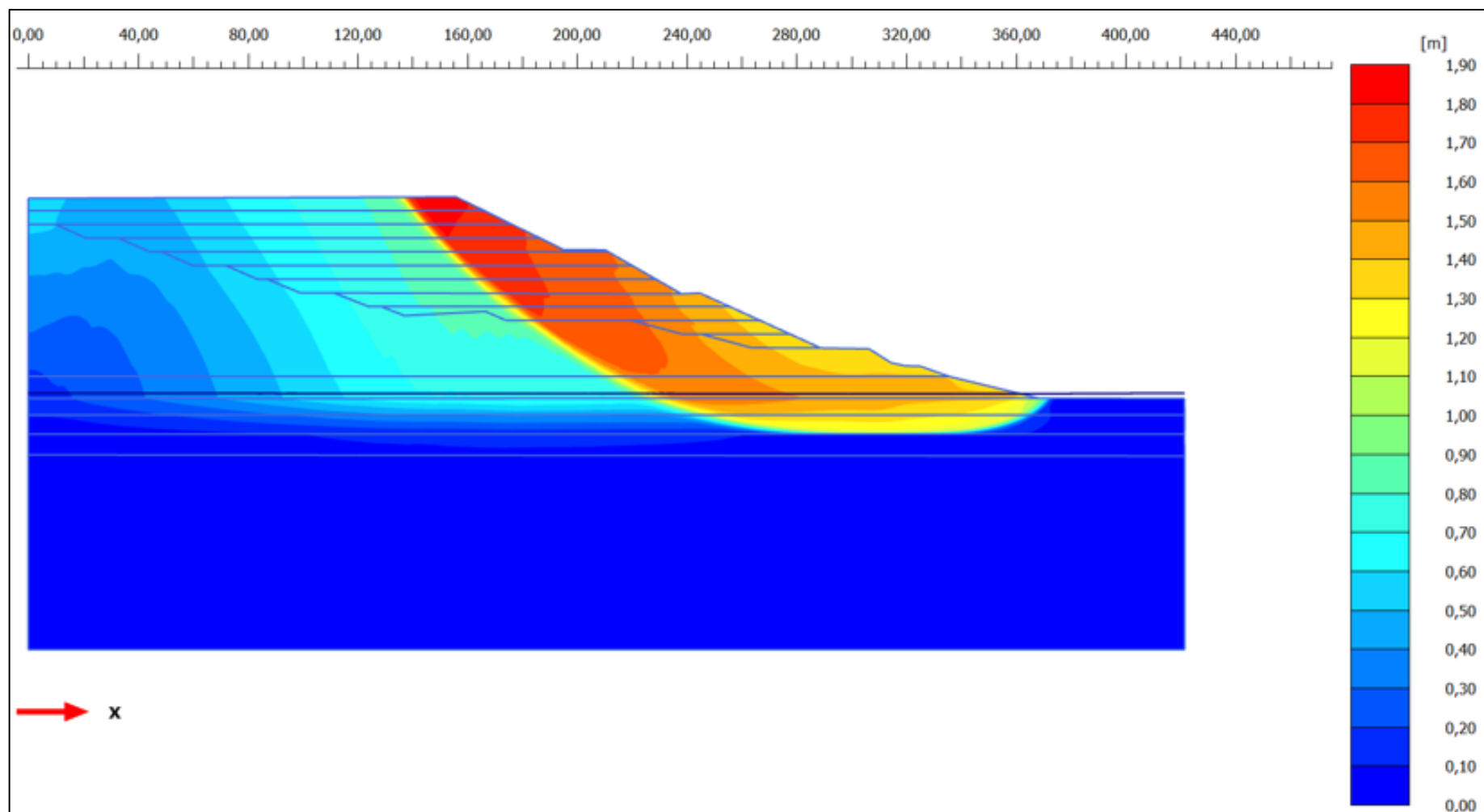


Figure 28. Surface de glissement en fin de construction (FS = 1,6) – Phase 2

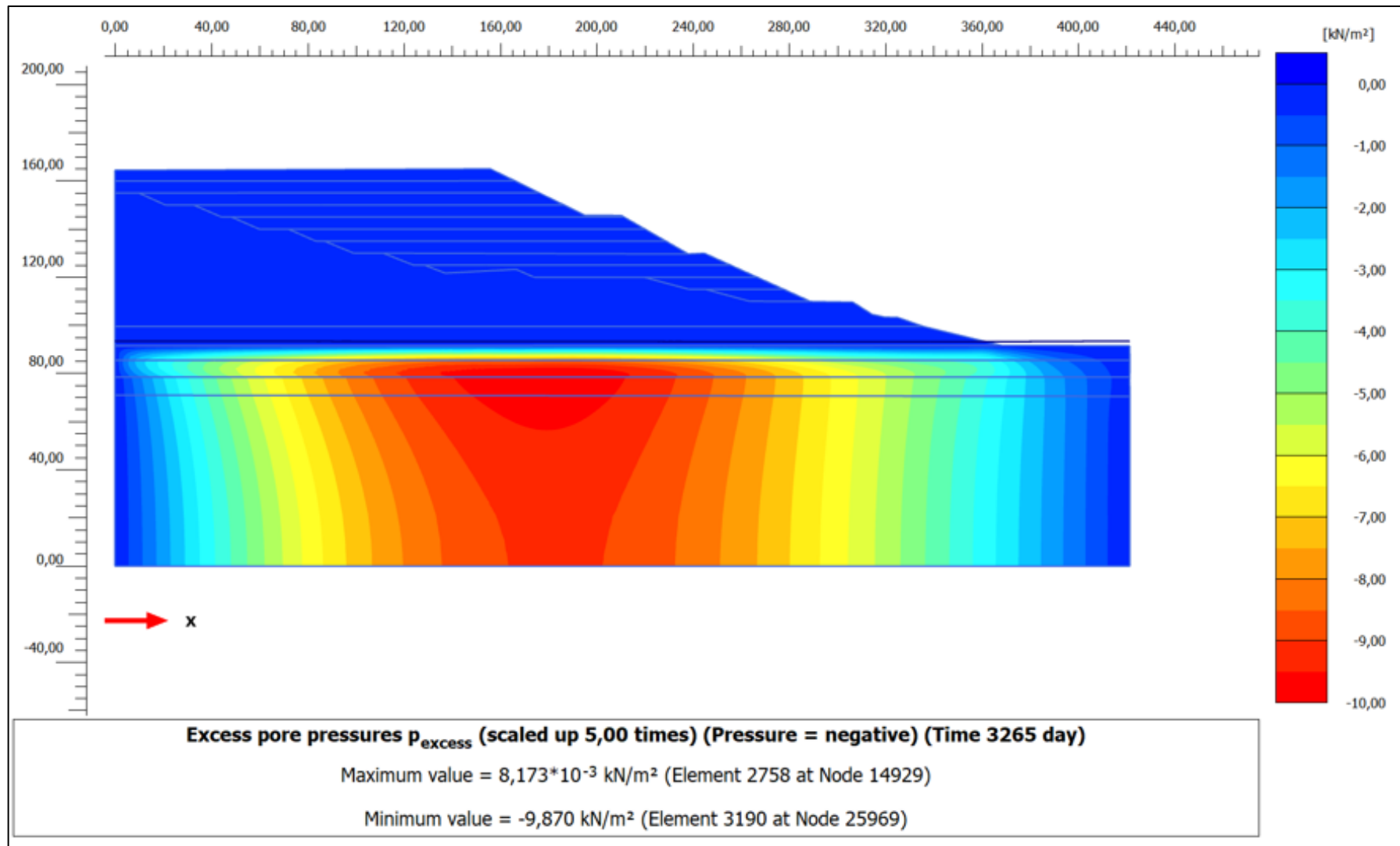


Figure 29. Répartition des surpressions interstitielles en fin de construction de l'extension de la VAS – Phase 2

6.2.4 Interprétation des résultats

Les résultats des calculs de stabilité en cours de construction montrent que :

- Les surpressions interstitielles maximales se développent essentiellement au sein des couches constituant l'assise compressible (argile vaseuse et argile bariolée) ;
- Au fur et à mesure de la construction de l'extension, le noyau de surpression, confiné dans les couches d'assise, s'éloigne progressivement du pied du talus. Les surpressions interstitielles maximales atteignent un ordre de grandeur de 55 kPa, valeur observée lors de la construction de la couche 9. Ces surpressions diminuent progressivement avec la poursuite de la rehausse de l'extension de la VAS, pour atteindre des valeurs d'environ 10 kPa en fin de construction ;
- L'analyse de stabilité vis-à-vis du glissement montre que les coefficients de sécurité calculés pour les différentes étapes de construction demeurent **supérieurs à 1,3**, et le coefficient de sécurité atteint une valeur de 1,6, en fin de construction.

Le potentiel de stabilité du talus ultime de la verse au cours de la construction de la phase 2 de l'extension est satisfaisant.

6.3 Analyse de la stabilité de l'extension de la zone Casse Fonte au Nord en phase ultime en condition non drainée

Il s'agit de la vérification de la stabilité vis-à-vis du glissement du talus de l'extension en phase ultime (en fin de construction) **sous l'effet d'une sollicitation rapide : il s'agit de deux événements accidentels, remontée exceptionnelle du niveau hydrostatique ou excavation touchant le pied de la verse au contact des argiles vaseuses).**

Les calculs sont réalisés avec la méthode à l'équilibre limite moyennant le logiciel Geo.Slope et en utilisant les caractéristiques mécaniques non drainées (cohésion non drainée des argiles vaseuses après la fin de la consolidation).

Les résultats des calculs donnent un coefficient de sécurité de 1,3. Compte tenu de la faible occurrence de ces deux événements, nous estimons que le facteur de sécurité est acceptable.

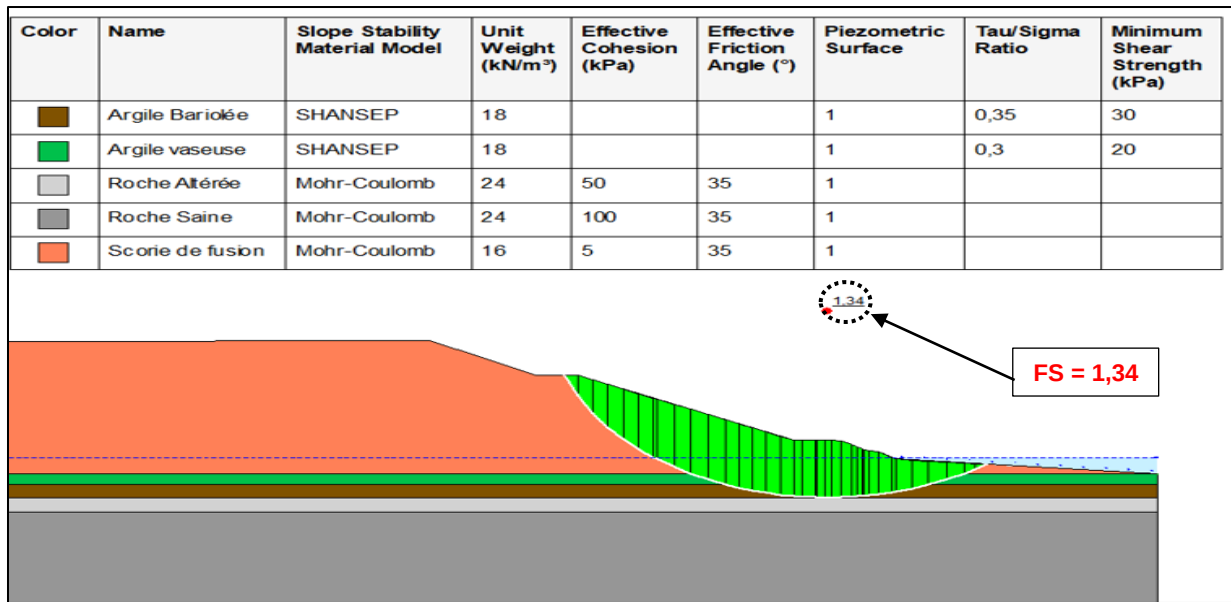


Figure 30. Résultat de calcul court terme en fin de construction – Phase 2 - Zone de la Casse
Fonte au Nord

6.4 Analyse de la stabilité de la verse à long terme

Dans cette analyse, nous analysons la stabilité de la verse vis-à-vis de deux types d'évènements :

- Calcul Statique, il vise à évaluer la stabilité du talus de l'extension en phase ultime après la consolidation des argiles vaseuses et sous l'effet de sollicitations lentes (rehausse importante, redressement du talus de la verse, ...). Dans cette analyse nous considérons les caractéristiques drainées des matériaux de la verse et l'assise ;
- Calcul pseudo-statique, il permet d'évaluer la stabilité sous l'effet d'un séisme qui surviendrait plusieurs années après la fin de construction de la verse. Dans ces conditions nous supposons que les scories resteront toujours drainées mais les argiles vaseuses seront non drainées puisque la sollicitation sismique provoque des cisaillements cycliques est très rapides.

Afin de réaliser cette analyse, nous avons réalisés deux coupes représentant les cas les plus défavorables du talus de l'extension de la Phase 2

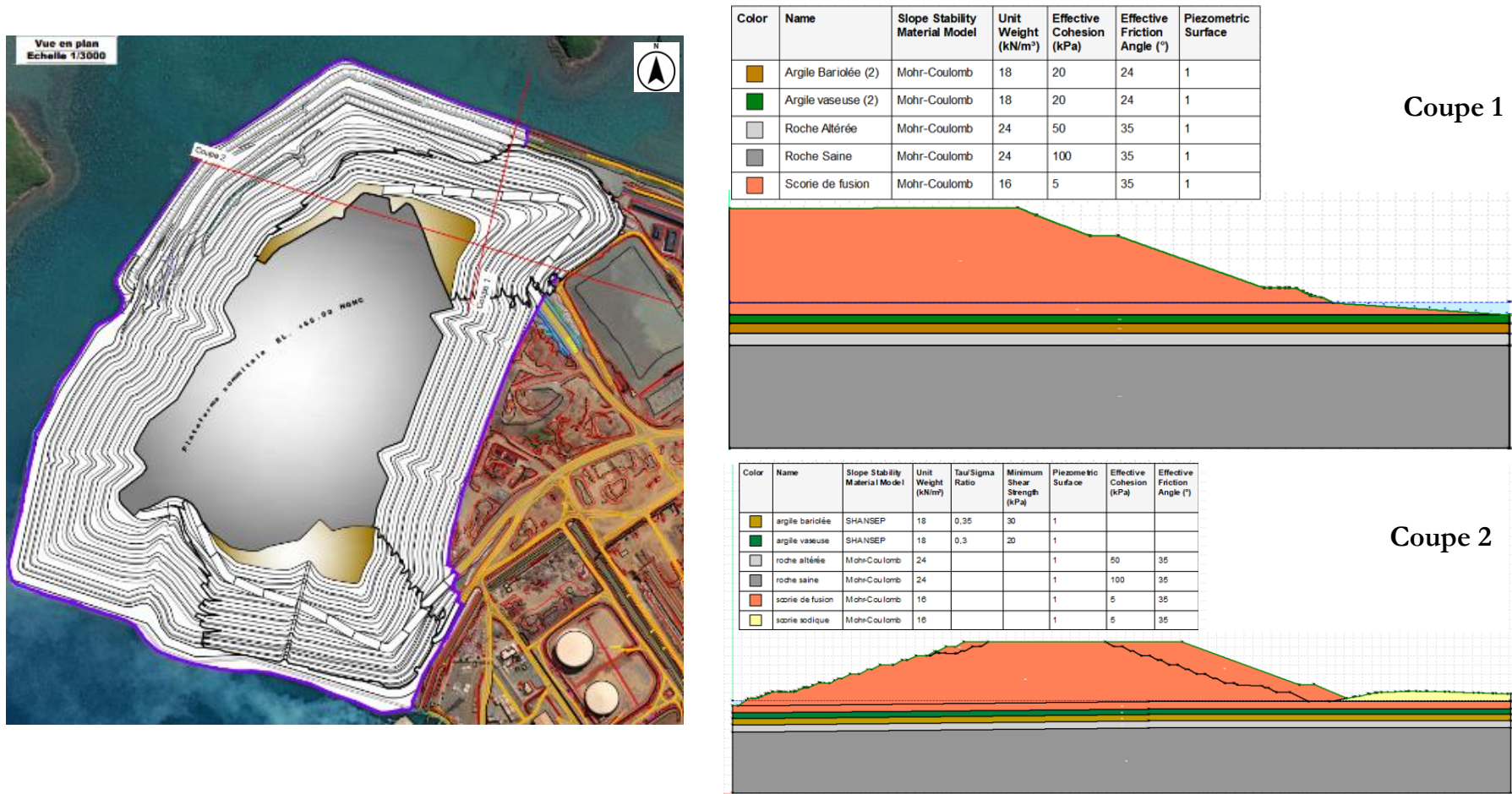
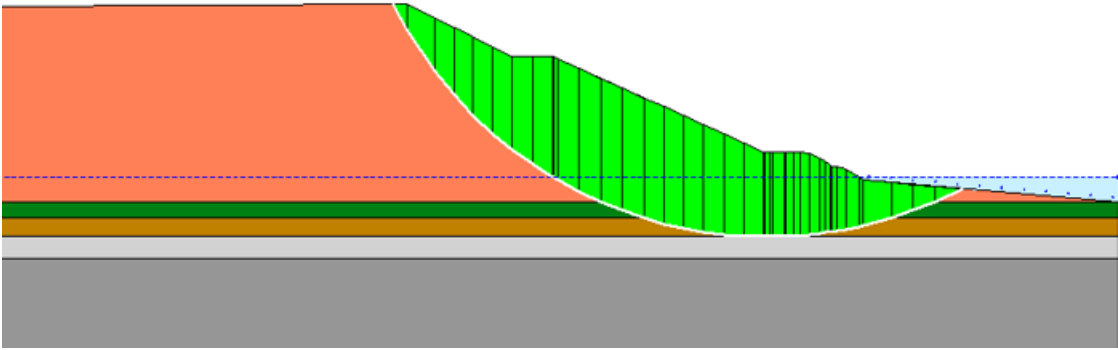
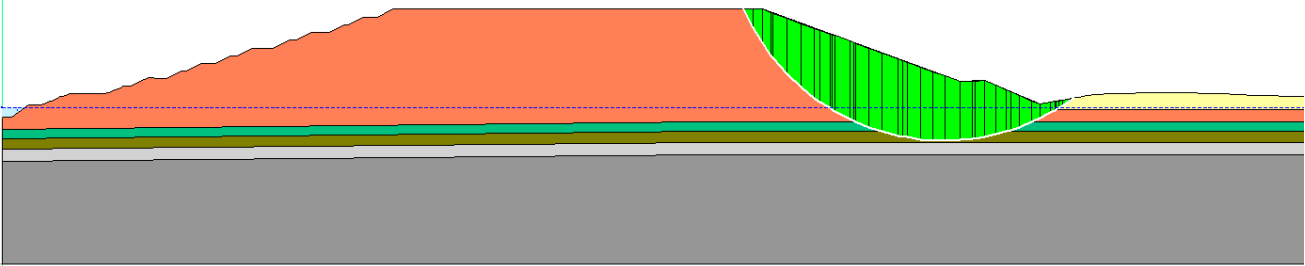
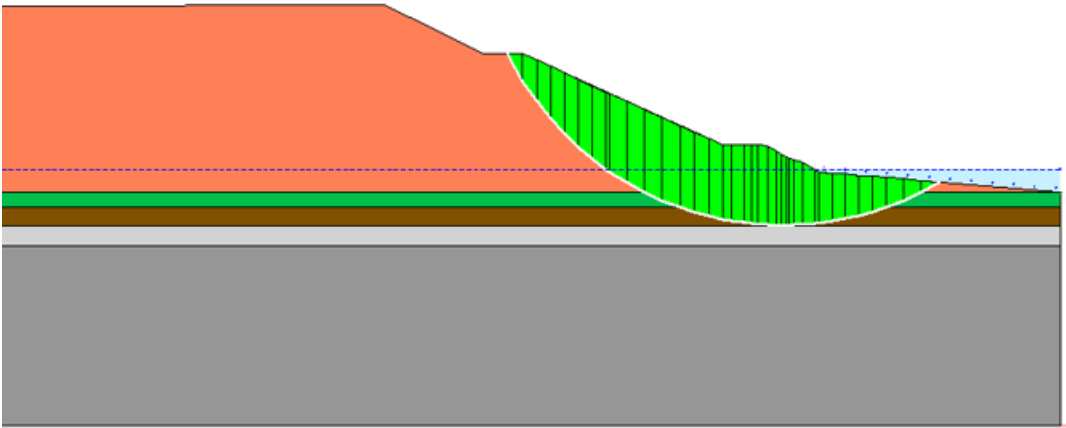
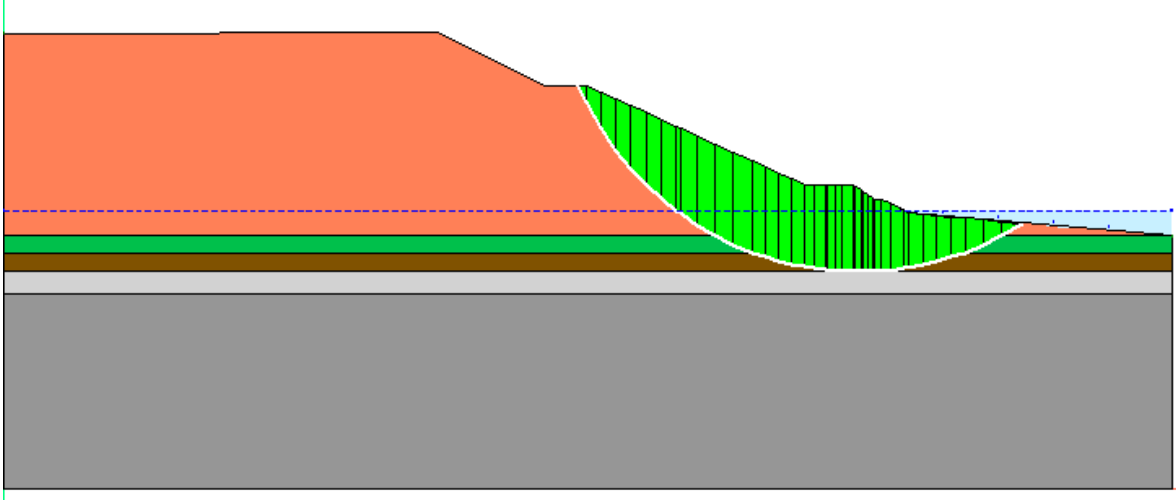
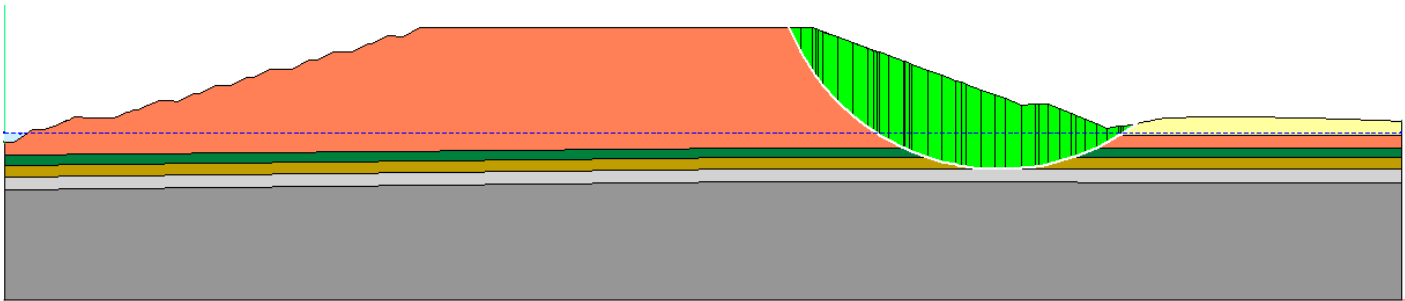
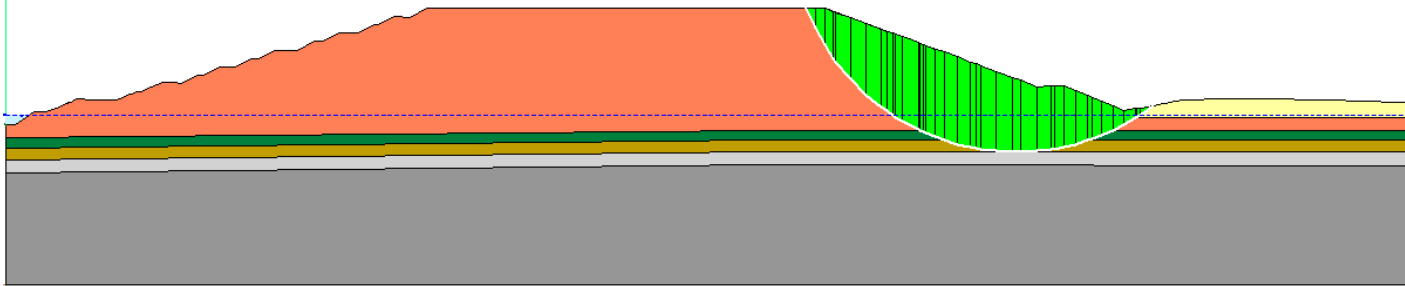


Figure 31. Modèles de calcul – Phase 2

6.4.1 Synthèse des résultats des calculs de stabilité long terme

Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau suivant et les sorties des calculs sont en annexe N°6 :

Type de calcul	FS requis	N° de la coupe		Mécanisme de rupture	FS
Calcul statique en phase ultime	1,5	Coupe1			1,69
		Coupe 2			2,06
Calcul pseudo-statique	1,1	Coupe 1	Allègent		1,00

Type de calcul	FS requis	N° de la coupe		Mécanisme de rupture	FS
		Coupe 2	Pesant		0,92
			Allègent		1,26
			Pesant		1,19

Ces calculs montrent que la stabilité long terme en conditions drainées est satisfaisante avec un coefficient de sécurité minimal égal à 1,69 supérieur au $FS_{requis} = 1,5$;

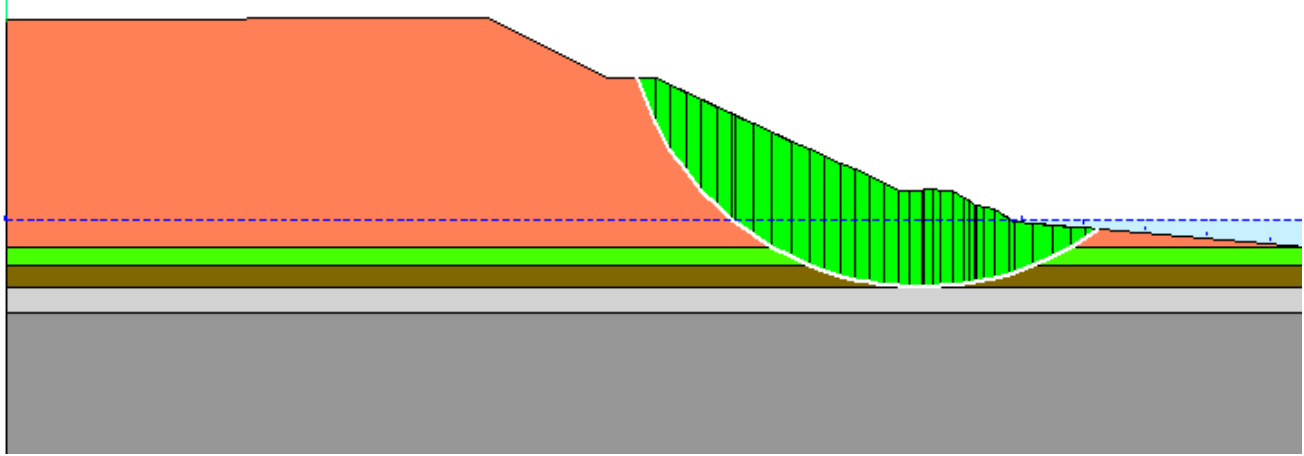
Cependant le coefficient de sécurité évalué avec la méthode pseudo-statique est légèrement inférieur à 1 (coupe 1). Sachant que cette méthode simpliste est très pessimiste, nous avons procédé à une vérification de la stabilité de la verse en condition post-sismique et ceux conformément au standard international GISTM (stabilité après le passage du séisme).

Dans cette analyse on considère que les cisaillements cycliques induits par le séisme provoquent un ramollissement des argiles vaseuses et une réduction de la cohésion non drainée de 20%. Dans ces conditions, les calculs sont réalisés en statique sans accélération sismique et en conditions non drainées. Le coefficient de sécurité requis est de **1,1**.

Les résultats des calculs sont présentés dans Tableau 14, ils montrent que le coefficient de sécurité est égal à 1,2, supérieur à la valeur requise. Ceci permet de conclure que **les conditions de stabilité de la phase 2 vis-à-vis des sollicitations sismiques sont globalement vérifiées pour une cote ultime à +65 m NGNC.**

Nous tenons à préciser que le résultat de l'analyse du comportement de la verse vis-à-vis du risque sismique est très sensible à la valeur de la cohésion non drainée des argiles vaseuses. À ce titre, la réalisation des essais in-situ (CPTu) sur les argiles vaseuses permettrait d'affiner l'évaluation des paramètres géotechniques et de conforter les résultats obtenus.

Tableau 14. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel en condition post-sismique - Phase 2

Type de calcul	FS visé	N° de la coupe	Mécanisme de rupture	FS
Calcul Statique post-pic	1,1	Coupe 1		1,21

7 JUSTIFICATION GEOTECHNIQUE DE LA PHASE 3 – ZONE 5S ET PARC A BOUES

7.1 Modèle de calcul

La coupe la plus défavorable correspond au tas Nord de l'extension situé juste en amont du tas de la scorie calco-sodique (SCS). Nous estimons qu'à ce stade de l'extension la verse n'aura pas d'impact sur le tas de scorie calcosodique. Nous limitons ainsi notre analyse à la stabilité du talus de l'extension.

D'après le sondage géotechnique le plus proches de cette zone, à savoir *SC4*, le toit de l'argile vaseuse est situé à une profondeur de **-7 m NGNC**.

Le modèle de calcul est présenté ci-après :

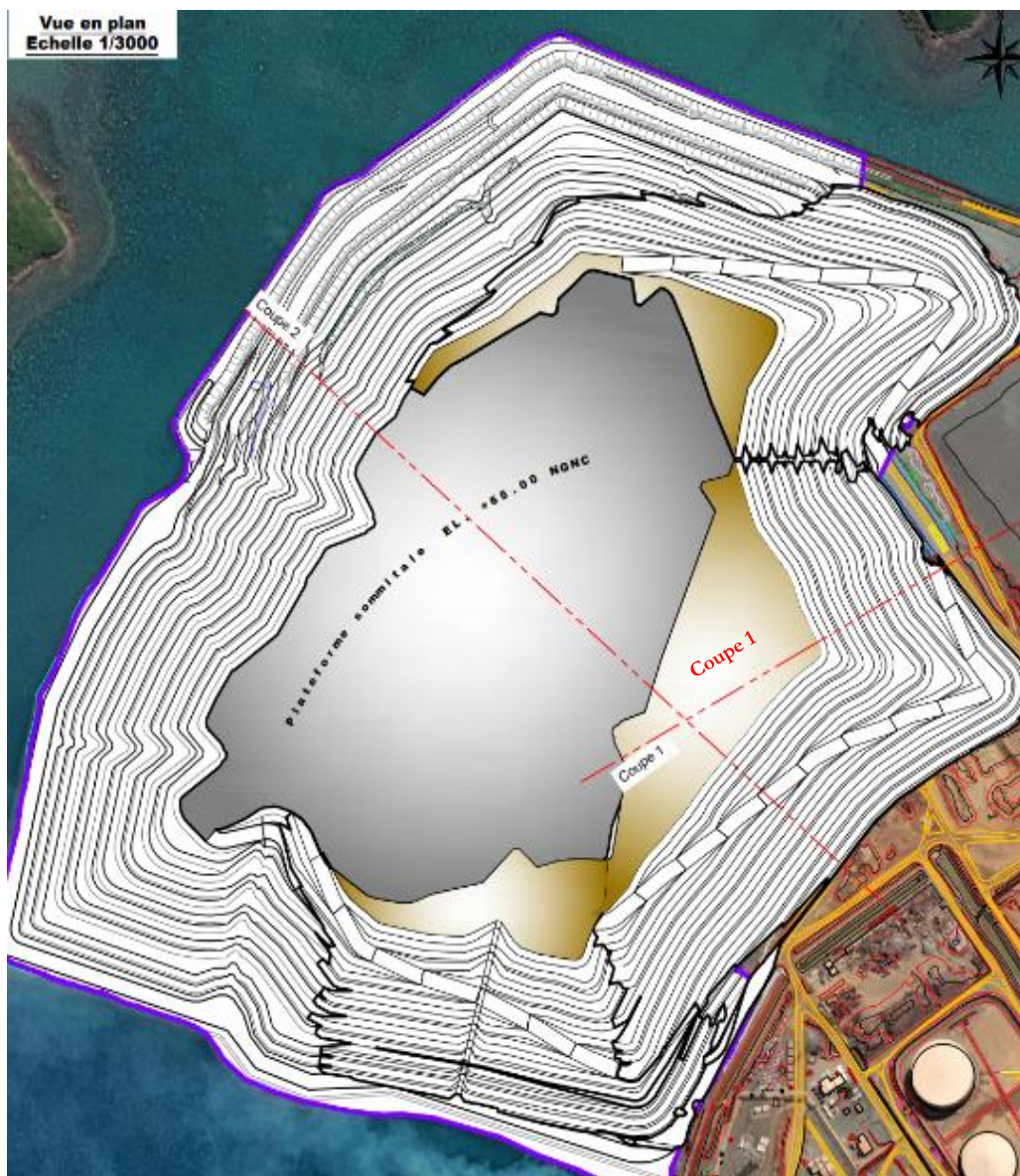


Figure 32. Implantation de la coupe étudiée à court terme de la Phase 3

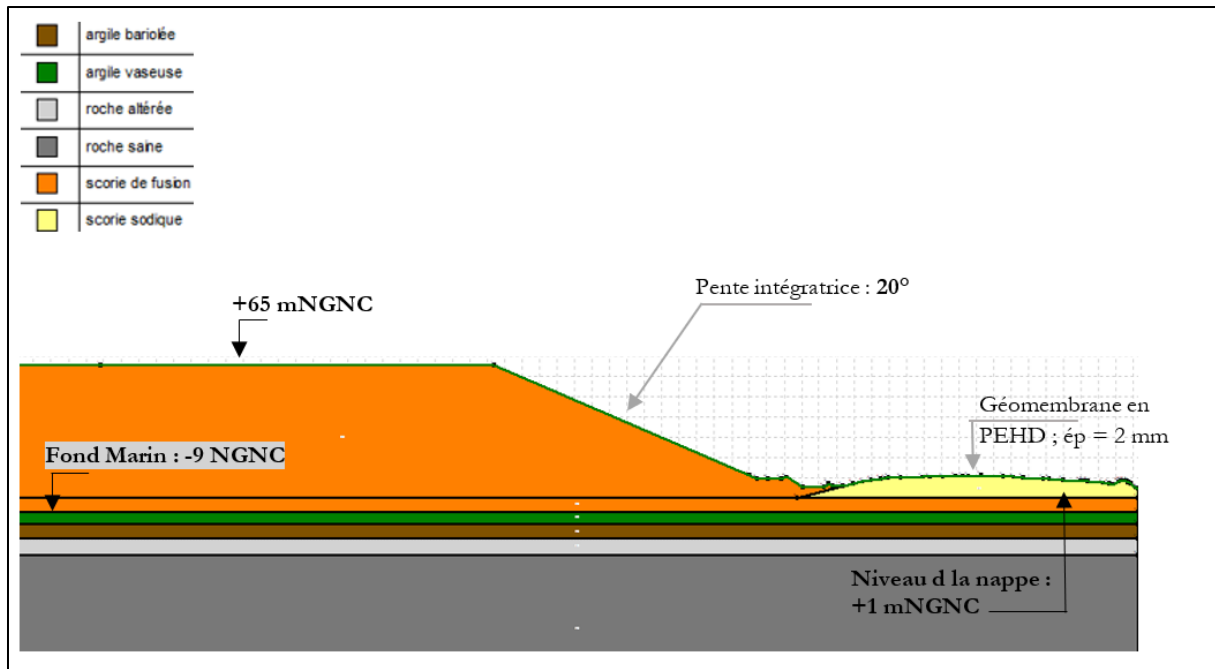


Figure 33. Géométrie du modèle de calcul de la Phase 3

7.2 Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en cours de construction - stabilité court-terme

Pour la vérification de la stabilité de l'extension de la verse en cours de construction, nous avons effectué une modélisation aux éléments finis à l'aide du logiciel Plaxis, simulant ainsi les différentes phases de construction.

7.2.1 Géométrie du modèle et conditions aux limites

Les calculs avec ce modèle bidimensionnel sont réalisés en déformations planes. Dans ces conditions.

Les conditions aux limites adoptées pour le modèle de calcul dans la simulation numérique sont les suivantes :

- Côté gauche du modèle : Supposé plan de symétrie, avec des déplacements horizontaux nuls et frontière imperméable.
- Côté droit du modèle : c'est limite lointaine avec des déplacements horizontaux nuls et une charge hydraulique imposée au niveau hydrostatique + 1 m NGNC.
- Base du modèle : Déplacements horizontaux et verticaux nuls et frontière imperméable.

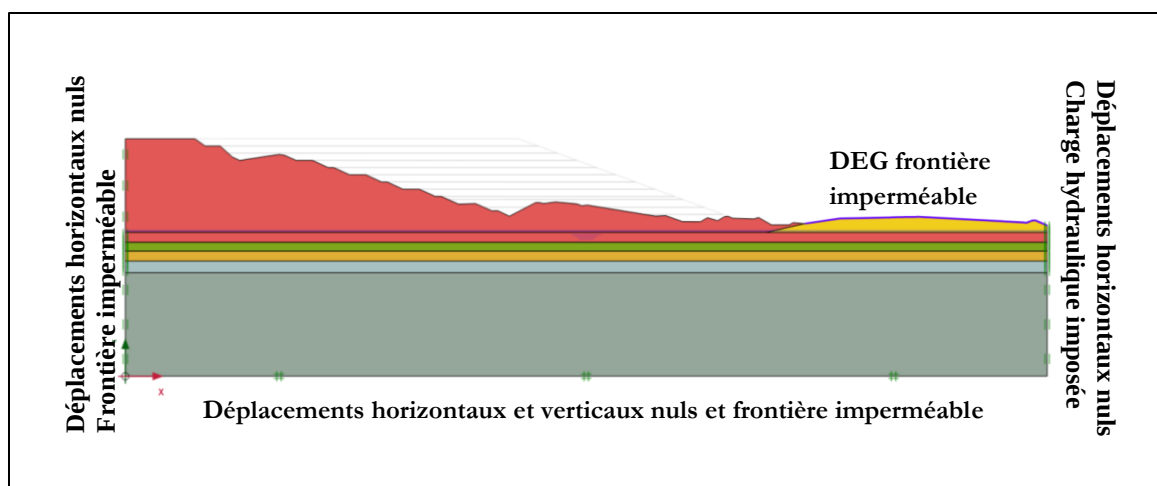


Figure 34. Conditions aux limites adoptées pour la modélisation de la Phase 3

7.2.2 Phases de chargement simulées dans la modélisation

Les étapes de construction de l'extension de la verse simulées, selon les variantes, sont les suivantes :

- **Etape 1 :** Chargement gravitaire du modèle permettant de créer l'état de contraintes initiales du terrain avant la mise en place du projet. A la fin de cette phase, les déplacements seront annulés ;
- **Etape 2 :** Mise en place et consolidation de la scorie de fusion par couche de 5 m, avec les cadences suivantes :
 - 5 m/an sur les 30 premiers mètres de hauteur
 - 10 m/an jusqu'à atteindre la cote finale soit +65 m NGNC.
- **Etape 3 :** Etude de stabilité et calcul du coefficient de sécurité avec visualisation des surfaces de rupture au niveau de la verse à la fin du chargement de chaque couche par un calcul appelé Φ/C réduction. Ce calcul se base sur une réduction progressive de la cohésion et de l'angle de frottement de tous les matériaux constitutifs du modèle.

7.2.3 Résultats des simulations

Les résultats des calculs, à savoir, les surpressions interstitielles maximales relatives à chaque phase de chargement ainsi que le coefficient de sécurité correspondants sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous et les sorties des calculs sont en annexe N°7 :

Tableau 15. Résultats de calculs relatifs à l'étude de la stabilité vis-à-vis de la consolidation en phase de construction Phase 3

Cadence	H _{couche} (m)	Z _{couche} (mNGNC)	Temps (j)	Surpressions interstitielles (kPa)		Coefficient de sécurité
Cadence 5 m/an	5	12,9	90	Mise en place	25,7	4,2
			275	Consolidation	6,3	
	5	17,9	90	Mise en place	40,2	3,0
			275	Consolidation	9,6	
	5	22,9	90	Mise en place	54,6	2,5
			275	Consolidation	12,3	
	2,1	25,9	38	Mise en place	34,7	2,4
			115	Consolidation	16,7	
	5	30	90	Mise en place	60,3	2,3
			275	Consolidation	11,4	
	5	35	90	Mise en place	55,6	2,2
			275	Consolidation	9,1	
Cadence 10 m/an	5	40	46	Mise en place	64,7	2,2
			137	Consolidation	20,4	
	5	45	46	Mise en place	70,2	2,1
			137	Consolidation	21,8	
	5	50	46	Mise en place	69,7	2,1
			137	Consolidation	20,6	
	5	55	46	Mise en place	68,6	2,1
			137	Consolidation	19,9	
	5	60	46	Mise en place	66,0	2,0
			137	Consolidation	18,2	
	5	65	46	Mise en place	63,7	1,9
			137	Consolidation	16,3	

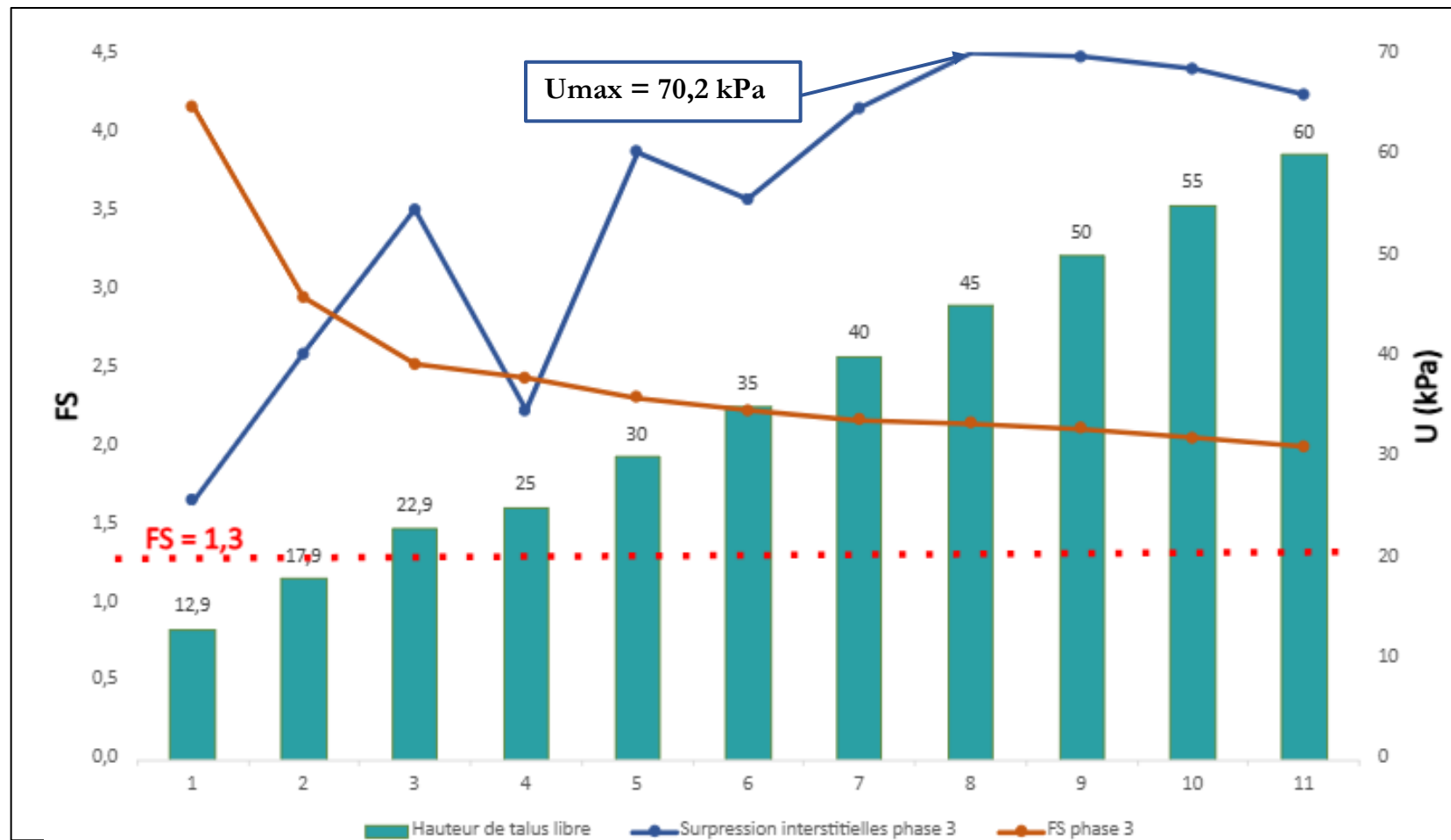


Figure 35. Evolution des surpressions interstitielles et du coefficient de sécurité en fonction de la réhausse de l'extension de la VAS – Phase 3

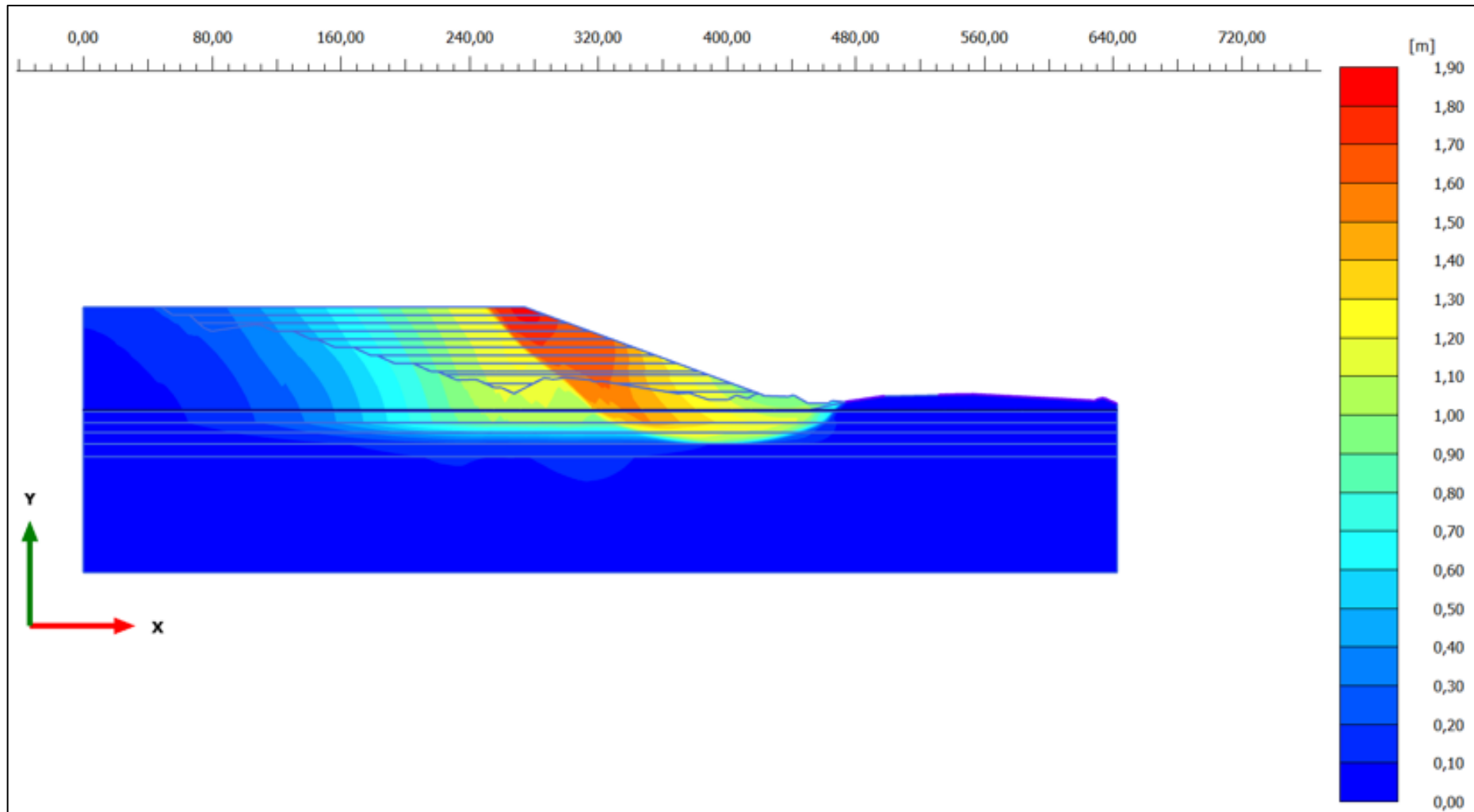


Figure 36. Surface de glissement en fin de construction (FS = 1,9) – Phase 3

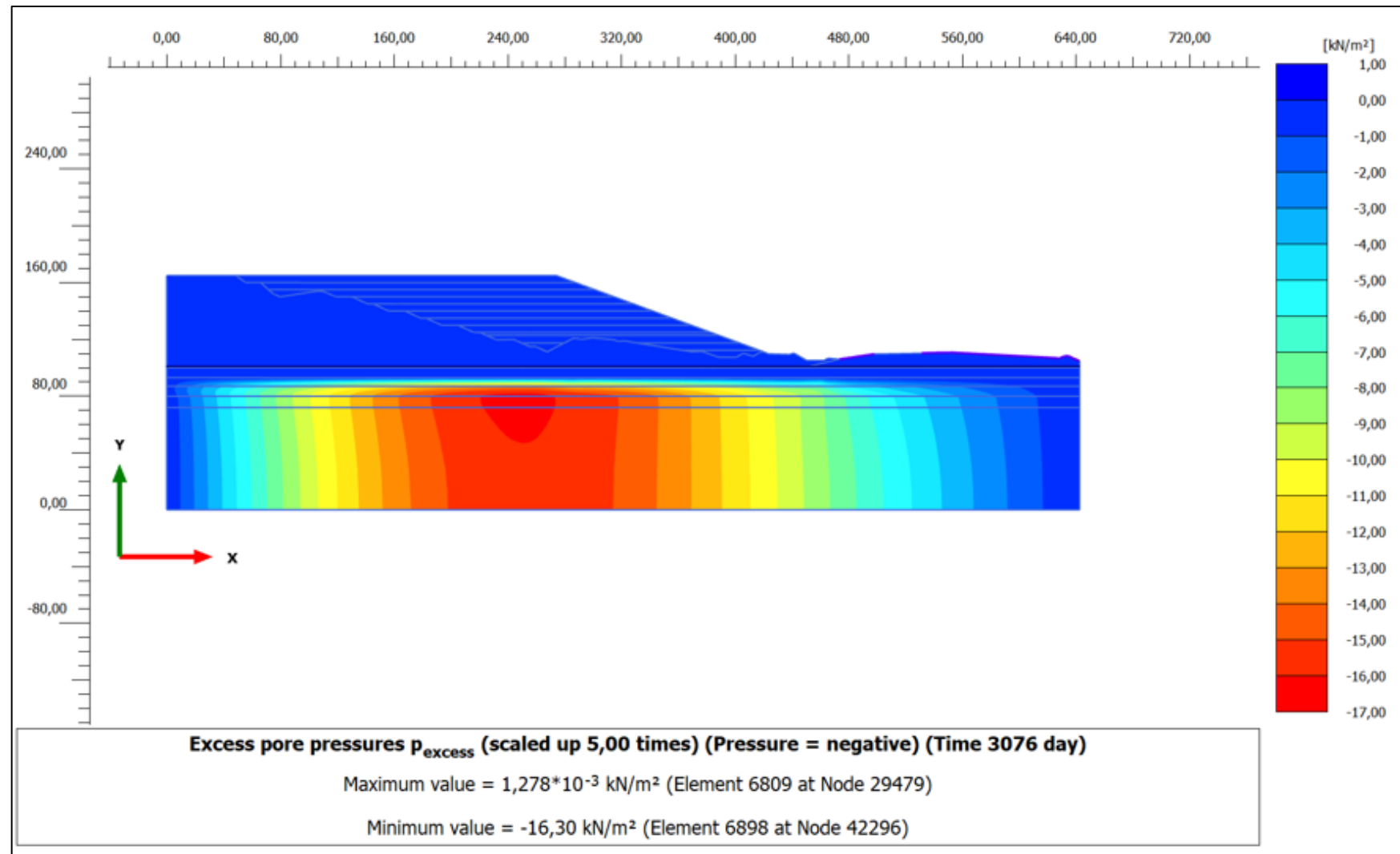


Figure 37. Répartition des surpressions interstitielles en fin de construction de l'extension de la VAS – Phase 3

7.2.4 Interprétations des résultats

Les résultats des calculs de stabilité en cours de construction montrent que :

- Les surpressions interstitielles maximales se développent essentiellement au sein des couches constituant l'assise compressible argile vaseuse et argile bariolée puis se drainent par remontée d'eau dans la scorie et par infiltration dans le substratum rocheux ;
- Au fur et à mesure de la construction de l'extension, le noyau de surpression, confiné dans les couches d'assise, s'éloigne progressivement du pied du talus. Les surpressions interstitielles maximales atteignent un ordre de grandeur de 70 kPa, valeur observée lors de la construction de la couche 8. Ces surpressions atteignent une valeur inférieure à 20 kPa en fin de construction.

L'analyse de stabilité vis-à-vis du glissement montre que les coefficients de sécurité calculés pour les différentes étapes de construction demeurent **supérieurs à 1,3**. En fin de construction, le coefficient de sécurité sera de 1,9.

7.3 Analyse de la stabilité de l'extension de la zone par à boues en phase ultime en condition non drainée

Il s'agit de la vérification de la stabilité vis-à-vis du glissement du talus de l'extension en phase ultime (en fin de construction) **sous l'effet d'une sollicitation rapide : il s'agit de deux événements accidentels, remontée exceptionnelle du niveau hydrostatique ou excavation touchant le pied de la verse au contact des argiles vaseuses**).

Les calculs sont réalisés avec la méthode à l'équilibre limite moyennant le logiciel Geo.Slope et en utilisant les caractéristiques mécaniques non drainées (cohésion non drainée des argiles vaseuses après la fin de la consolidation). Les résultats des calculs donnent un coefficient de sécurité de 1,5. Compte tenu de la faible occurrence de ces deux événements, nous estimons que le facteur de sécurité est satisfaisant.

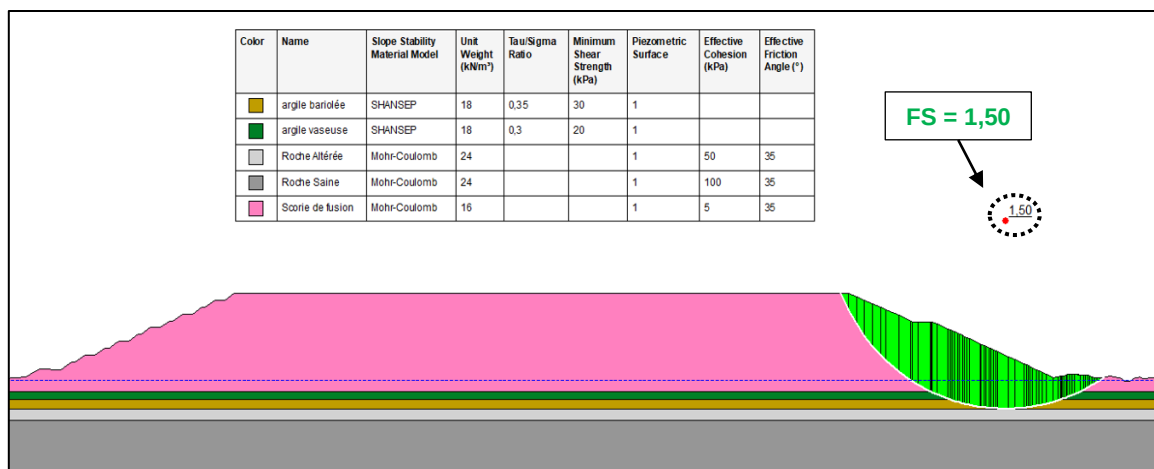


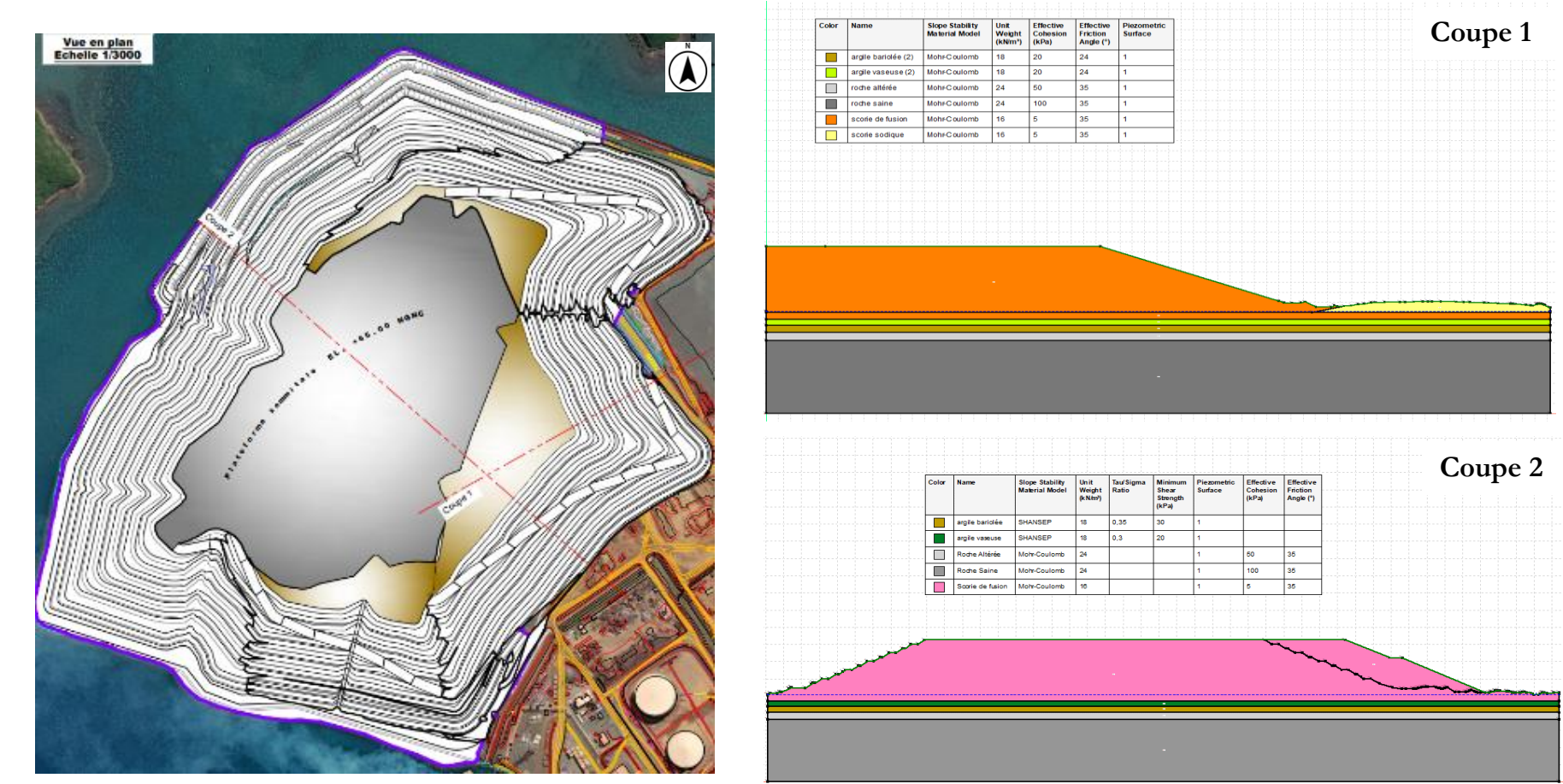
Figure 38. Résultat de calcul court terme en fin de construction – Phase 3 - Zone parc à boues

7.4 Analyse de la stabilité de la verse à long terme

Dans cette analyse, nous analysons la stabilité de la verse vis-à-vis de deux types d'évènements :

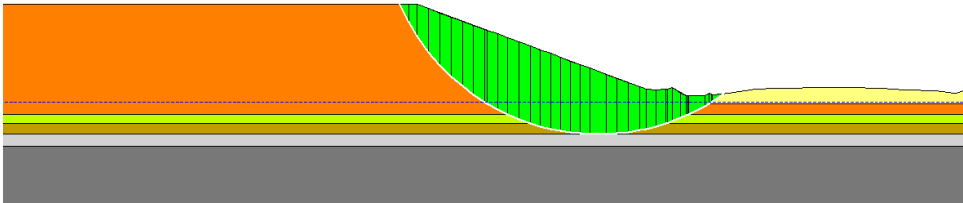
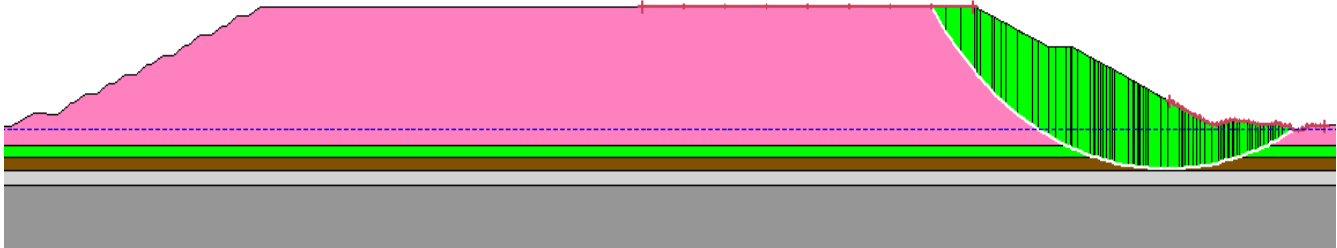
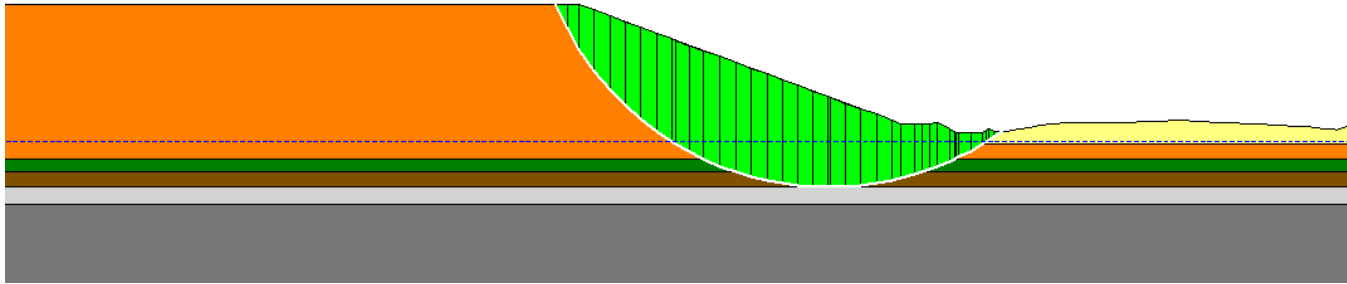
- Calcul Statique, il vise à évaluer la stabilité du talus de l'extension en phase ultime après la consolidation des argiles vaseuses et sous l'effet de sollicitations lentes (rehausse importante, redressement du talus de la verse, ...). Dans cette analyse nous considérons les caractéristiques drainées des matériaux de la verse et l'assise.
- Calcul pseudo-statique, il permet d'évaluer la stabilité sous l'effet d'un sismique qui surviendrait plusieurs années après la fin de construction de la verse. Dans ces conditions nous supposons que les scories resteront toujours drainées mais les argiles vaseuses seront non drainées puisque la sollicitation sismique provoque des cisaillements cycliques est très rapides.

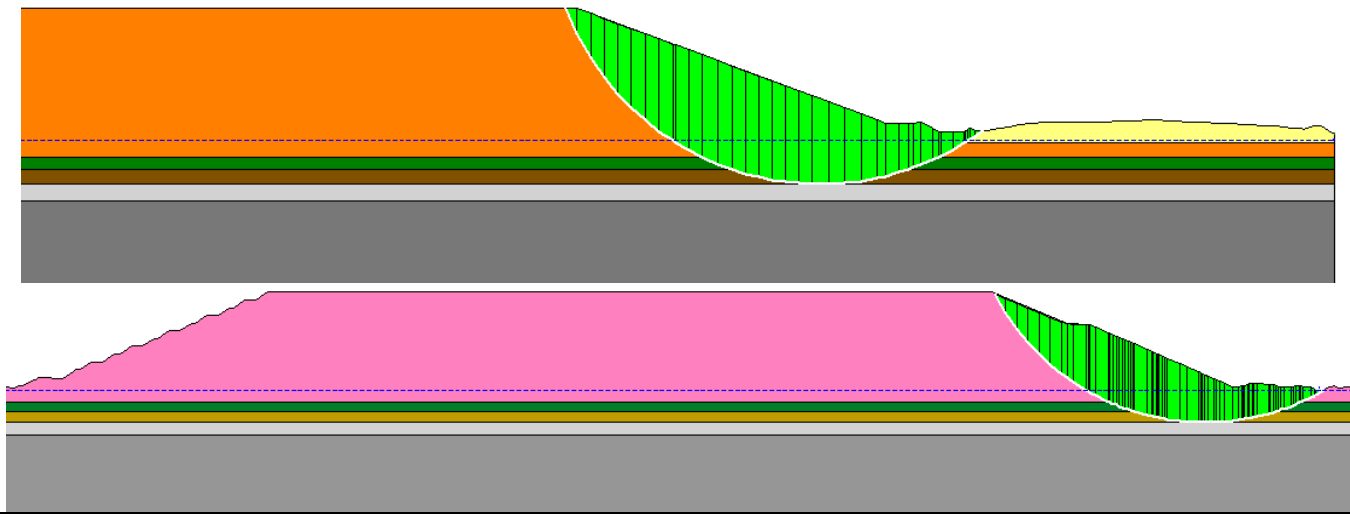
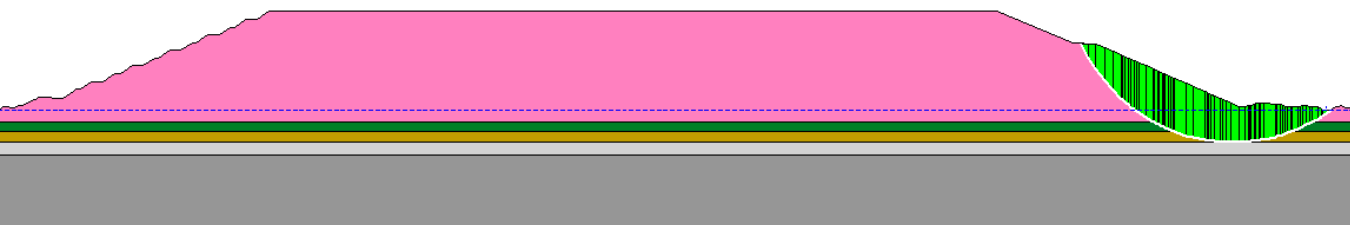
Afin de réaliser cette analyse, nous avons réalisés deux coupes représentant les cas les plus défavorables du talus de l'extension de la Phase 3.



7.4.1 Synthèse des résultats des calculs de stabilité long terme

Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau suivant et les sorties des calculs sont en annexe N°8 :

Type de calcul	FS requis	N° de la coupe		Mécanisme de rupture	FS
Calcul statique en phase ultime	1,5	Coupe1			1,98
		Coupe 2			1,87
Calcul pseudo-statique	1,1	Coupe 1	Allègent		1,22
			Pesant		1,15

Type de calcul	FS requis	N° de la coupe		Mécanisme de rupture	FS
		Coupe 2	Allègent		1,11
			Pesant		1,02

Ces calculs montrent que la stabilité à long terme en conditions drainées est satisfaisante avec un coefficient de sécurité minimal égal à 1,9 supérieur au coefficient de sécurité requis de 1,5 ;

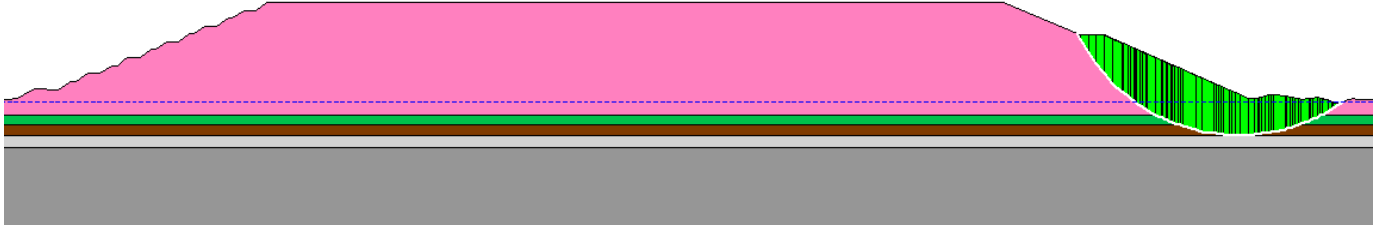
Cependant le coefficient de sécurité évalué avec la méthode pseudo-statique est légèrement inférieur à 1 (coupe 2). Sachant que cette méthode simpliste est très pessimiste, nous avons procédé à une vérification de la stabilité de la verse en condition post-sismique et ceux conformément au standard international GISTM (stabilité après le passage du séisme).

Dans cette analyse on considère que les cisaillements cycliques induits par le séisme provoquent un ramollissement des argiles vaseuses et une réduction de la cohésion non drainée de 20%. Dans ces conditions, les calculs sont réalisés en statique sans accélération sismique et en conditions non drainées. Le coefficient de sécurité requis est de **1,1**.

Les résultats des calculs sont présentés dans Tableau 12, ils montrent que le coefficient de sécurité est égal à 1,2, supérieur à la valeur requise. Ceci permet de conclure que **les conditions de stabilité de la phase 3 vis-à-vis des sollicitations sismiques sont globalement vérifiées pour une cote ultime à +65 m NGNC.**

Nous tenons à préciser que le résultat de l'analyse du comportement de la verse vis-à-vis du risque sismique est très sensible à la valeur de la cohésion non drainée des argiles vaseuses. À ce titre, la réalisation des essais in-situ (CPTu) sur les argiles vaseuses permettrait d'affiner l'évaluation des paramètres géotechniques et de conforter les résultats obtenus.

Tableau 16. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel en condition post- sismique – Phase 3

Type de calcul	FS visé		Mécanisme de rupture	FS
Calcul Statique post-pic	1,1	Coupe 2		1,37

Au regard du niveau de connaissance géotechnique actuellement disponible, la caractérisation des matériaux en place demeure insuffisante pour permettre une définition fine et représentative de leurs paramètres mécaniques et hydrauliques. Dans ce contexte, les hypothèses retenues à ce stade de l'étude conduisent nécessairement à une **sous-estimation conservative des propriétés des matériaux**, acceptable en phase amont du projet et au niveau de l'APD, mais pénalisante au regard de l'état d'avancement actuel.

En effet, la verse étant désormais **en activité**, et compte tenu des **projets d'extension et de rehausse envisagés**, il est recommandé d'affiner la connaissance du site afin de consolider les dimensionnements futurs et, le cas échéant, d'optimiser les scénarios de mise en œuvre.

En conséquence, une campagne de reconnaissance géotechnique complémentaire pourrait être envisagée afin d'affiner la caractérisation de l'argile vaseuse ainsi que le comportement de la nappe. Cette campagne pourrait inclure des sondages carottés avec prélèvements d'échantillons intacts destinés à des essais de laboratoire, ainsi que des essais in situ de type CPTu.

8 JUSTIFICATION HYDRAULIQUE DES TROIS PHASES

La gestion des eaux de la verse à scories consiste essentiellement à l'aménagement des ouvrages hydrauliques suivants :

- Drains enterrés sous le talus de la verse : Il s'agit d'une série de tranchées de 1 m^2 de section, remplis en enrochements et entourées de géotextile séparateur, et qui seront réalisées sous le talus de la verse. Ces drains servent à drainer les sous écoulements en cas d'une montée accidentelle du niveau d'eau dans le talus de la verse ; (Cf. Figure 40) ;

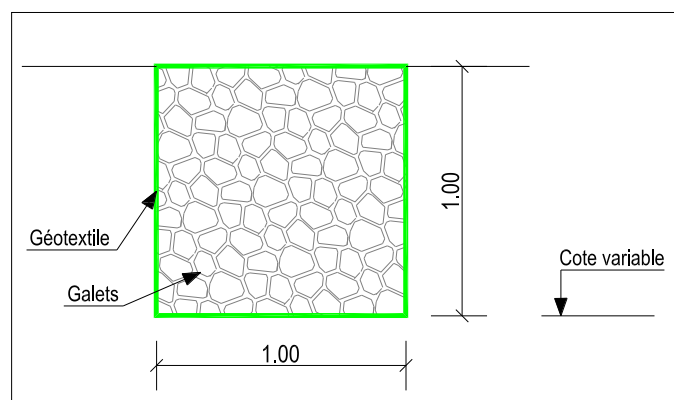


Figure 40. Coupe type de la tranchée enterrée

- Une tranchée périphérique de drainage aménagée au pied de la verse : Cette tranchée sera aménagée le long de la piste périphérique et aura une largeur à la base de 0,5 m, une profondeur de 0,5 m avec des talus de 1V/1,5H. Les parois de la tranchée seront

revêtues en enrochements $\phi 100$ mm sur une épaisseur de 0,25 m posés sur un géotextile séparateur ; (Cf. Figure 41) ;

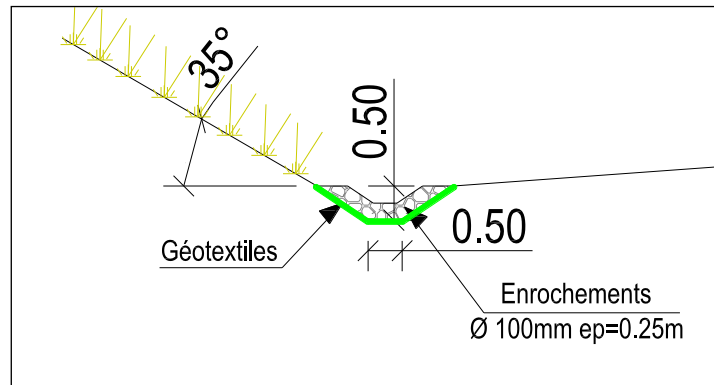


Figure 41. Tranchée ouverte au pied de la verse

La piste périphérique sera aménagée avec un devers amont de 5% vers la tranchée de drainage (ou caniveau) qui sera aménagée en pied de verse.

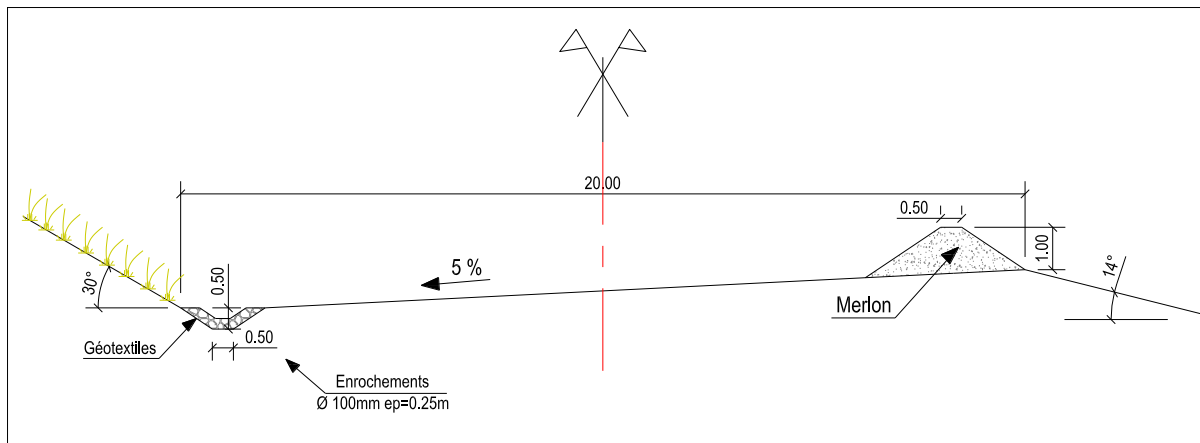


Figure 42. Profil type de la piste périphérique

Afin d'éviter l'accumulation des eaux dans la tranchée, des points de rejet en forme de descente d'eau seront aménagés tous les 200 m sur le talus aval de la piste.

Ainsi, la piste sera découpée en bandes de 200 m de longueur, centrée sur l'axe de la descente d'eau. Ces bandes présentent deux pentes longitudinales de 2 % convergente vers la descente d'eau qui constituera un point bas du profil de la piste.

Afin d'empêcher les débordements et dans le but d'assurer la sécurité des usagers de la piste, un merlon en scorie sera aménagé en crête du talus aval de la piste.

- Descentes d'eau en enrochements sur le talus aval de la piste périphérique : Les eaux ruisselées sur la piste périphérique seront rejetées dans la mer à travers des descentes d'eaux périphériques qui seront aménagées sur le talus aval de la piste tous les 200 m de longueur. Les descentes d'eau seront décaissées sous forme d'entaille dans le talus aval de la route puis recouvertes d'enrochements $\phi 300$ mm posés sur du géotextile séparateur ; (Cf. Figure 43).

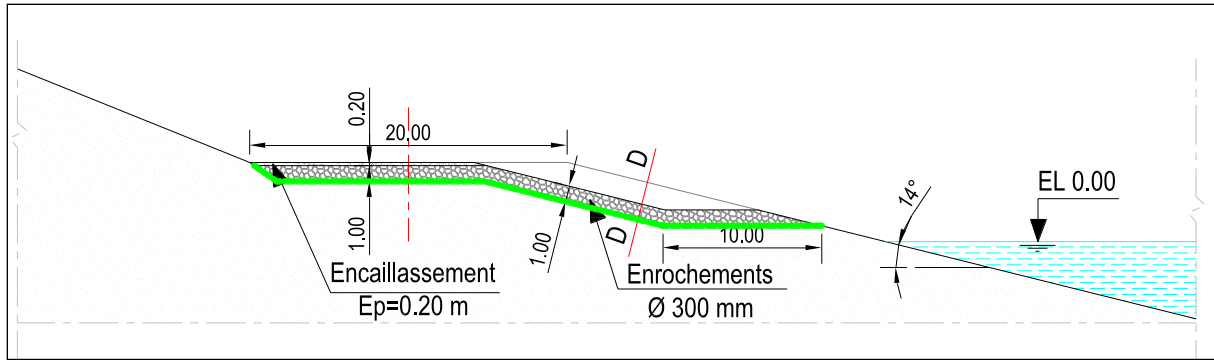


Figure 43 : Profil type des descentes d'eau du (point de rejet)

Afin de faire converger l'eau vers la descente, un cassis en enrochement sera logé au point bas qui sera formé par remodelage en amont immédiat de la descente d'eau. Ainsi le dévers de la piste sera inversé vers l'aval au niveau de chaque cassis.

Afin d'améliorer la cohésion des enrochements, des joints de ciments peuvent être réalisés sur les enrochements (optionnel).

- Niveaux et banquettes drainantes sur le flanc de la verse : Le talus ultime de la verse comportera : des niveaux de 10 m hauteur avec une pente de 35° et des banquettes drainantes de 5 m de largeur. Cette configuration assurera 3 fonctions :
 - Empêcher l'érosion des talus en organisant les écoulements sur les banquettes
 - Améliorer la stabilité des niveaux (stabilité locale)
 - Créer des conditions favorables à la revégétalisation du flanc de la verse.

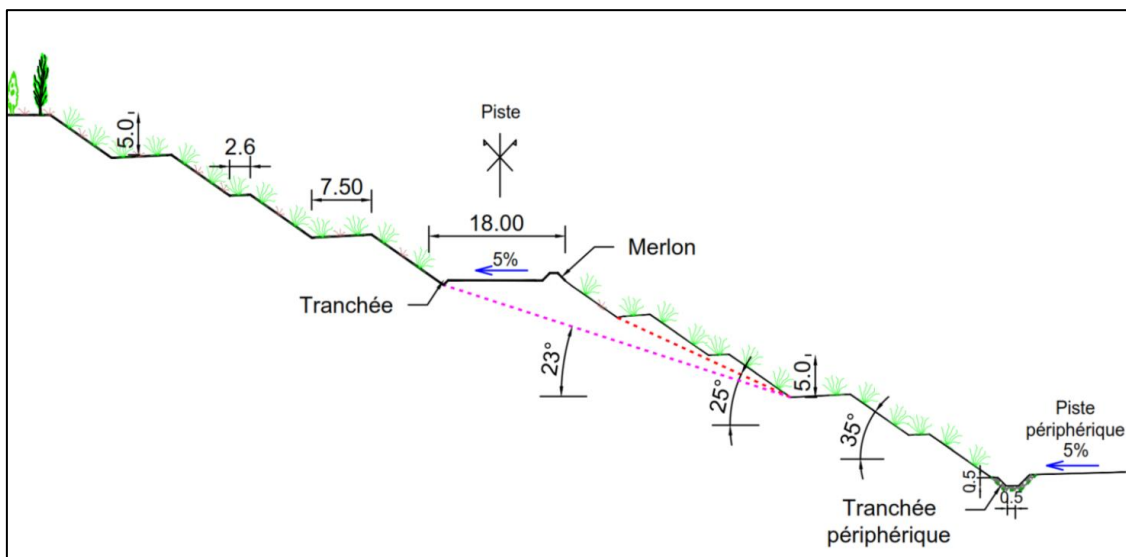


Figure 44 : Coupe type du talus ultime de la verse

- Descentes d'eaux principales : Les descentes d'eau principales seront aménagées sur les talus libres de la verse. Ces descentes d'eau devront permettre de drainer la plateforme sommitale ultime et les banquettes drainantes. Les descentes d'eau seront aménagées en escaliers avec des replats au niveau des banquettes drainantes.

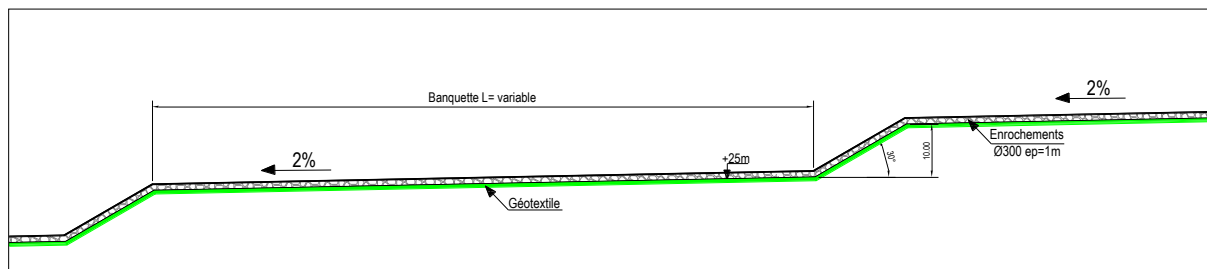


Figure 45 : Profil en long des descentes d'eau principales

8.1 Présentation du dispositif de drainage de la verse autorisée

La verse à scorie autorisée présentera une seule plateforme sommitale calée à la cote 65 NGNC et quatre talus libres.

La gestion des eaux du projet autorisé est constituée des ouvrages hydrauliques suivants :

Onze drains enterrés sont aménagés sous le talus de la verse afin de drainer les sous écoulements en cas d'une montée accidentelle du niveau d'eau dans le talus de la verse.

Les eaux sortantes des drains enterrés seront collectées par la tranchée aménagée le long de la piste périphérique situées au pied de la verse puis rejetées dans la mer.

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P01-A** » présente l'implantation des drains de la verse autorisée.

La gestion des eaux de la plateforme sommitale de la verse et des banquettes se fait moyennant huit descentes d'eau aménagées contre le talus de la verse.

Les eaux collectées seront acheminées vers la tranchée aménagée le long de la piste périphérique.

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P02-A** » présente le dispositif de gestion des eaux en phase ultime de la verse autorisée.

8.2 Présentation du dispositif de drainage de la phase 1 - Zone GAZIERE

Trois (03) drains, dénommés N°100, 116 et 115, seront aménagés au niveau de la zone d'extension afin de drainer les sous écoulements en cas d'une montée accidentelle du niveau d'eau dans le talus de la verse.

A la fin de cette phase, la gestion des eaux de ruissellement issues de la plateforme sommitale de la verse et des banquettes sera assurée par les descentes d'eau existantes implantées sur les talus de la verse autorisée, ainsi que par l'aménagement d'une nouvelle descente d'eau, dénommée DE09. Cette dernière sera construite au droit de la zone

d'extension de la verse (phase 1) et remplacera la descente d'eau DE06, laquelle sera comblée dans le cadre des travaux d'extension.

Les eaux collectées seront acheminées vers la tranchée aménagée le long de la piste périphérique.

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P03-A** » présente le dispositif de gestion des eaux en surface au cours de cette phase.

8.3 Présentation du dispositif de drainage de la phase 2 - Zone casse-fonte

Trois (03) drains, dénommés N°111⁵, 117 et 118, seront aménagés au niveau de la zone d'extension permettant de drainer les sous écoulements en cas d'une montée du niveau d'eau dans le talus de la verse.

A la fin de cette phase, la gestion des eaux de ruissellement issues de la plateforme sommitale de la verse et des banquettes sera assurée par les descentes d'eau existantes implantées sur les talus de la verse.

Les eaux de ruissellement collectées par les descentes d'eau seront acheminées par la tranchée de la piste périphériques vers la mer.

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P04-A** » présente le dispositif de drainage au cours de cette phase.

8.4 Présentation du dispositif de drainage de la phase 3 - Zone 5S et parc à Boues

Trois nouveaux drains, dénommés N°115, 119 et 120, seront aménagés au niveau de la zone d'extension permettant de drainer les sous écoulements en cas d'une montée du niveau d'eau dans le talus de la verse.

À la fin de cette phase, la gestion des eaux de ruissellement provenant de la plateforme sommitale de la verse ainsi que des banquettes sera assurée par les descentes d'eau existantes, complétées par l'aménagement de trois nouvelles descentes d'eau, dénommées DE 10, D11 et D12, au niveau de la zone d'extension.

Il convient de noter que les DE04 et DE05 prévues pour le projet autorisé seront intégralement comblées par le projet d'extension.

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P05-A** » présente le dispositif de drainage au cours de cette phase.

8.5 Dimensionnement des ouvrages hydrauliques

Les bassins versants considérés pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques sont présentées en ANNEXE N°9.

⁵ Drain existant du projet autorisé, à prolonger dans le cadre de l'extension phase 2

Il est à noter que les ouvrages hydrauliques de drainage à ciel ouvert définitifs seront dimensionnés pour une période de retour centennale.

Le tableau ci-dessous présente la synthèse de dimensionnement des descentes d'eau de drainage en surface de la verse.

Tableau 17. Calculs des débits et les dimensions des descentes d'eau

DE N°	S _{BV}	T _c	I ₁₀₀	Q ₁₀₀	Pente	Débit spécifique	Dimensions
	(ha)	(min)	(mm/h)	(m³/s)	(%)	(m³/s/km²)	
1	8,10	22,97	129	2,92	70 et 4	36,05	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale $_{\text{forte pente}} = 0.204 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{forte pente}} = 6.53 \text{ m/s}$ • Lamé d'eau centennale $_{\text{banquette}} = 0.475 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{banquette}} = 2.49 \text{ m/s}$
2	6,60	31,75	112	2,02	70 et 4	31,08	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale $_{\text{forte pente}} = 0.163 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{forte pente}} = 5.72 \text{ m/s}$ • Lamé d'eau centennale $_{\text{banquette}} = 0.383 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{banquette}} = 2.22 \text{ m/s}$
3	4,32	18,43	143	1,72	70 et 4	39,81	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale $_{\text{forte pente}} = 0.149 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{forte pente}} = 5.42 \text{ m/s}$ • Lamé d'eau centennale $_{\text{banquette}} = 0.348 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{banquette}} = 2.10 \text{ m/s}$
4	Comblée						
5	Comblée						
6	Comblée						
7	7,20	25,51	125	2,50	70 et 4	34,72	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale $_{\text{forte pente}} = 0.186 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{forte pente}} = 6.18 \text{ m/s}$ • Lamé d'eau centennale $_{\text{banquette}} = 0.434 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{banquette}} = 2.37 \text{ m/s}$
8	5,85	20,31	137	2,23	70 et 4	38,12	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale $_{\text{forte pente}} = 0.173 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{forte pente}} = 5.93 \text{ m/s}$ • Lamé d'eau centennale $_{\text{banquette}} = 0.406 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{banquette}} = 2.29 \text{ m/s}$
9	9,55	28,75	117	3,11	70 et 4	32,57	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale $_{\text{forte pente}} = 0.211 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{forte pente}} = 6.66 \text{ m/s}$ • Lamé d'eau centennale $_{\text{banquette}} = 0.491 \text{ m}$ • Vitesse d'écoulement $_{\text{banquette}} = 2.53 \text{ m/s}$

DE N°	S _{BV}	T _c	I ₁₀₀	Q ₁₀₀	Pente	Débit spécifique	Dimensions
	(ha)	(min)	(mm/h)	(m³/s)	(%)	(m³/s/km²)	
10	8,10	24,97	125	2,81	70 et 4	34,69	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale forte pente = 0.199m • Vitesse d'écoulement forte pente = 6.43 m/s • Lamé d'eau centennale banquette = 0.464 m • Vitesse d'écoulement banquette = 2.46 m/s
11	5,87	22,12	132	2,15	70 et 4	36,63	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale forte pente = 0.170m • Vitesse d'écoulement forte pente = 5.87m/s • Lamé d'eau centennale banquette = 0.397m • Vitesse d'écoulement banquette = 2.26m/s
12	6,76	25,39	124	2,33	70 et 4	34,47	• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale forte pente = 0.178m • Vitesse d'écoulement forte pente = 6.03 m/s • Lamé d'eau centennale banquette = 0.416 m • Vitesse d'écoulement banquette = 2.32 m/s

Les descentes d'eau aménagées au niveau des flancs libres de la verse feront 2 m de largeur à la base sur 1 m de profondeur et seront revêtues par des enrochements de diamètre 1 000 mm sur 2 m d'épaisseur posés sur du géotextile séparateur.



Figure N°46. Descente d'eau en enrochements

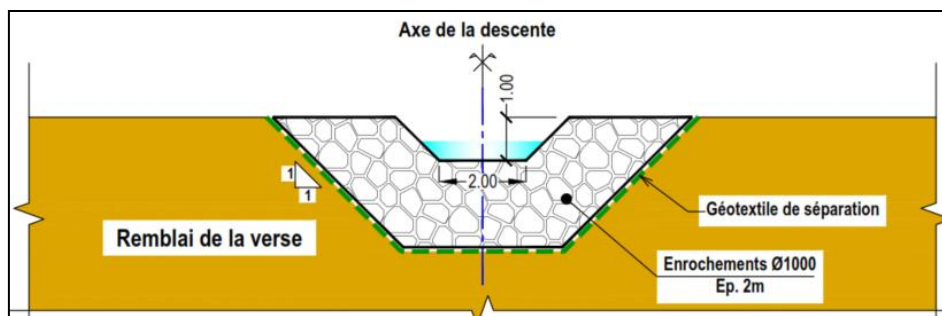


Figure N°47. Coupe type de la descente d'eau en enrochements

Afin d'optimiser le diamètre des blocs utilisés pour la construction des descentes d'eau en enrochements, nous recommandons soit :

- D'élargir les descentes d'eau à 5 m de largeur à la base sur une profondeur de 1 m de façon à réduire la vitesse d'écoulement ;
- De construire des descentes d'eau de travers par rapport au flanc présentant une pente maximale de 25% ;

Ces deux propositions permettent de réduire la taille des enrochements de blocs métrique à des enrochements de diamètre maximale $\phi 500$ mm.

Dans le tableau ci-dessous, un exemple d'optimisation est présenté en prenant le cas de la descente n°9, qui présente le débit le plus important.

Tableau 18 : Optimisation du diamètre des enrochements pour la protection des descentes d'eau

Variante	DE N°	Q ₁₀₀	Pente	Débit spécifique	Dimensions
		(m ³ /s)	(%)	(m ³ /s/km ²)	
Elargissement Descente (5 m au lieu de 2 m)	9	3,11	70 et 4	32,57	• Largeur à la base = 5 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale _{forte pente} = 0.122m • Vitesse d'écoulement _{forte pente} = 5.0 m/s • Lamé d'eau centennale _{banquette} = 0.288 m • Vitesse d'écoulement _{banquette} = 2.04 m/s • ϕEnrochements = 500 mm • Epaisseur enrochements = 1 à 1.5 m
Descente située de travers par rapport au flanc libre			25 et 4		• Largeur à la base = 2 m • Profondeur = 1 m • Lamé d'eau centennale _{forte pente} = 0.287m • Vitesse d'écoulement _{forte pente} = 4.73 m/s • Lamé d'eau centennale _{banquette} = 0.491 m • Vitesse d'écoulement _{banquette} = 2.53 m/s • ϕEnrochements = 500 mm • Epaisseur enrochements = 1 à 1.5 m

Sinon, il est envisageable d'utiliser d'autres matériaux pour la construction des descentes d'eau telle que proposé dans le cadre de l'étude d'optimisation des descentes d'eau de la verse à scories existante réalisée par MECATER ingénierie en 2023 (Réf : MC-23-140-SLN-20-R01-A). En effet, trois autres techniques de construction des descentes d'eau ont été proposées. Soit une :

- 1) Descente d'eau en matelas Reno ; (Cf. Figure N°48) ;
- 2) Descente d'eau en perrés maçonnés ; (Cf. Figure N°49) ;
- 3) Descente d'eau en concrete canvas ; (Cf. Figure N°50)



Figure N°48 : Descente d'eau en Matelas Reno



Figure N°49 : Descente d'eau en Perrés maçonnés



Figure N°50 : Descente d'eau en concrete canvas

9 SURVEILLANCE ET DISPOSITIFS D'AUSCULTATION

Afin d'assurer le suivi géotechnique et la maîtrise des risques associés à la construction des extensions de la verse à scories, nous recommandons de mettre en place un dispositif d'auscultation géotechnique adapté. Celui-ci consistera en l'implantation de **couples inclinomètre / piézomètre**, positionnés **au pied de chaque talus** ainsi qu'**à mi-hauteur des talus**, soit à la **cote +30 m NGNC**.

Ce dispositif permettra :

- Le suivi de l'évolution des fluctuations du niveau de la nappe ;
- Le contrôle des déplacements horizontaux au sein du massif ;
- La surveillance de la stabilité des talus, afin d'anticiper toute déformation ou mécanisme d'instabilité susceptible d'affecter l'ouvrage.

Dans un objectif d'optimisation technique et économique, nous proposons de conserver les dispositifs d'auscultation actuellement en place, dès lors qu'ils ne sont pas impactés par le projet d'extension et qu'ils répondent aux objectifs de surveillance définis.

À ce titre, les dispositifs **INC21B/PZ21**, **INC11B/PZ11** et **INC51B/PZ51** sont maintenus.

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P06-A** » présente l'ensemble des instruments d'auscultation actuels installés au niveau de la verse à scories et à conserver durant les phases 1,2 et 3 d'extension.

9.1 Programme d'auscultation – Phase 1

- Au pied du talus : conservation du dispositif en place **INC21B/PZ21**
- A mi-hauteur du talus (à la cote +30 m NGNC) : Installation de nouveaux instruments : **INC1-ph1/PZ1-ph1**

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P06-A** » présente les dispositifs d'auscultation au niveau de la phase 1 d'extension de la verse à scories.

En plus des dispositifs décrits ci-dessus, il est fortement recommandé de prévoir deux capteurs de pressions interstitielles dans les argiles vaseuses.

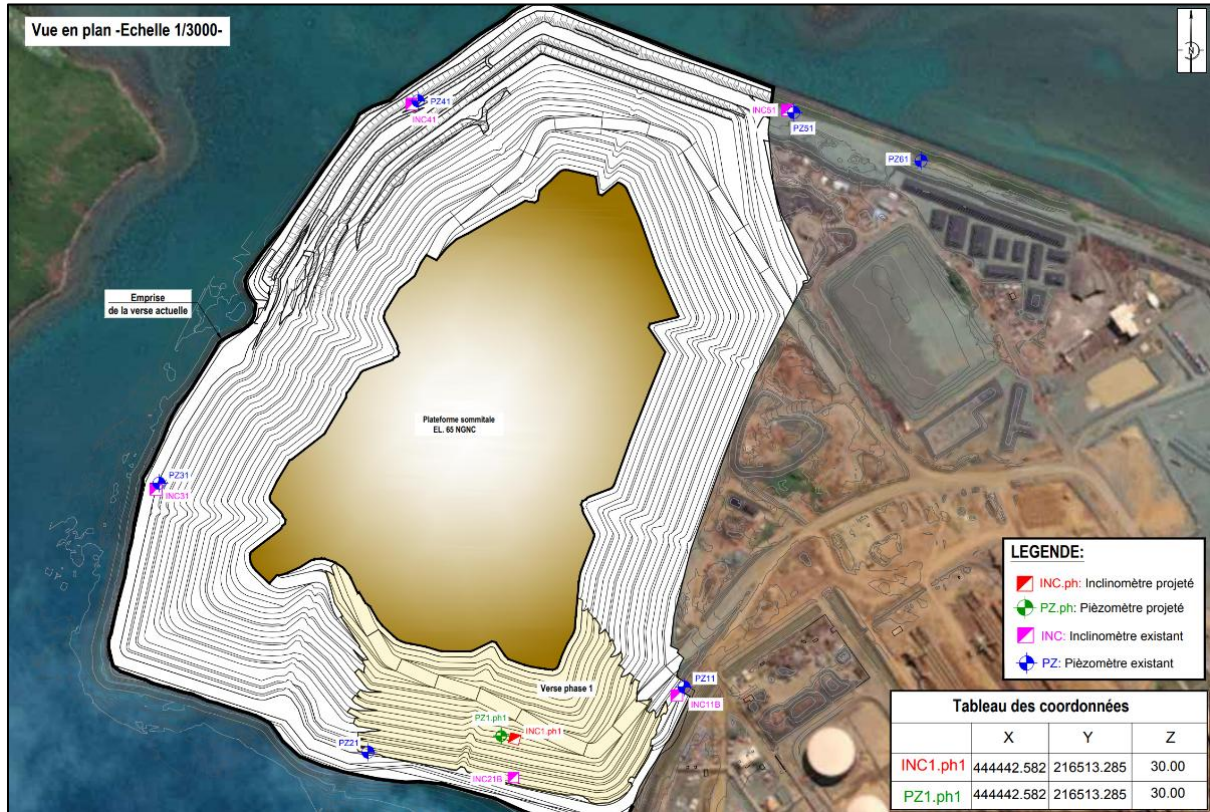


Figure 51. Implantation du dispositif d'auscultation (Phase 1)

9.2 Programme d'auscultation - Phase 2

- Au pied du talus : conservation du dispositif en place **INC51B/PZ51**
- A mi-hauteur du talus (à la cote +30 m NGNC) : Installation de nouveaux instruments : **INC2-ph2/PZ2-ph2**

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P07-A** » présente les dispositifs d'auscultation au niveau de la phase 2 d'extension de la verse à scories.

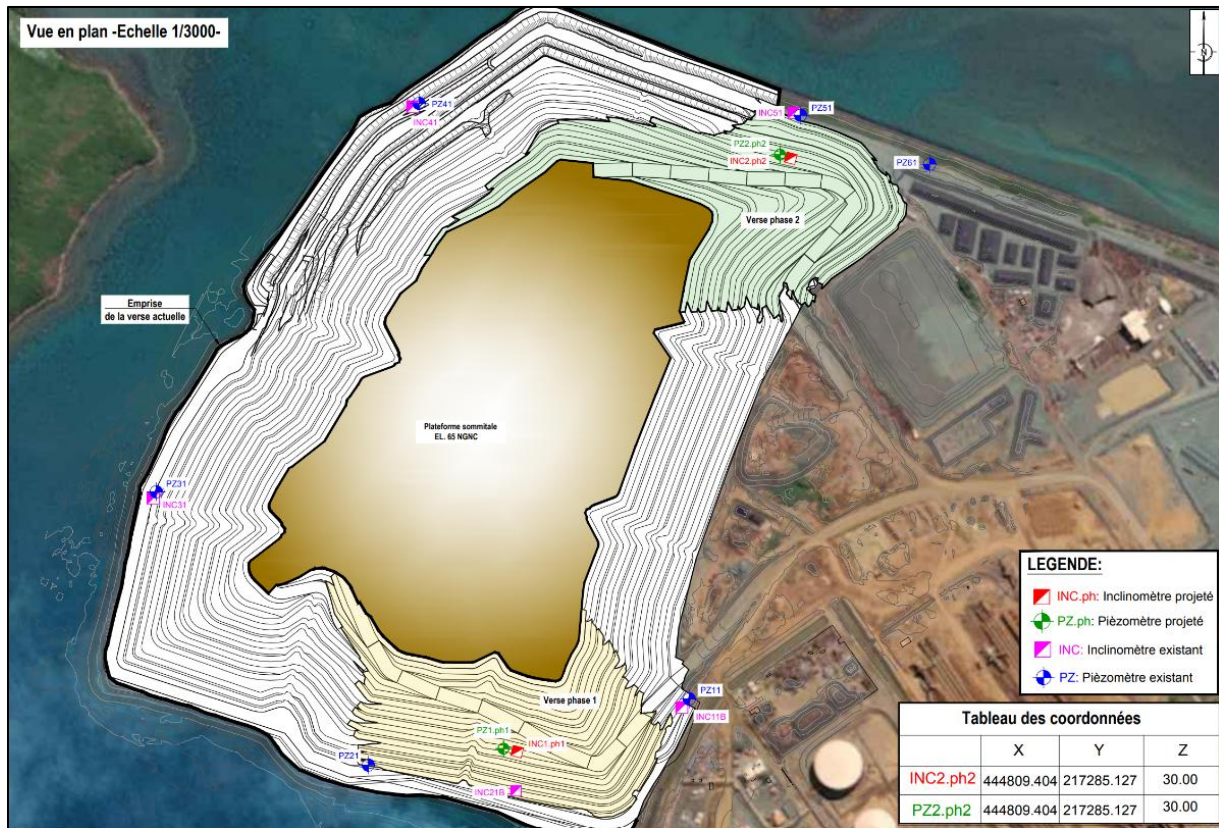


Figure 52. Implantation du dispositif d'auscultation (Phase 2)

9.3 Programme d'auscultation - Phase 3

Le **redressement significatif des pentes**, que présente l'extension de la Phase 3, augmente le niveau de sollicitation géotechnique vis-à-vis du glissement essentiellement.

Dans ce contexte, il est recommandé de mettre en place un **dispositif d'auscultation**, au droit de ce talus, implanté à **mi-hauteur du talus**, à la **cote +30 m NGNC**, au droit de la **banquette de largeur 7,5 m**.

- Au pied du talus : conservation du dispositif en place **INC11B/PZ11**
- A mi-hauteur du talus (à la cote +30 m NGNC) : Installation de nouveaux instruments : **INC3-ph3/PZ3-ph3**

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P08-A** » présente les dispositifs d'auscultation au niveau de la phase 3 d'extension de la verse à scories.

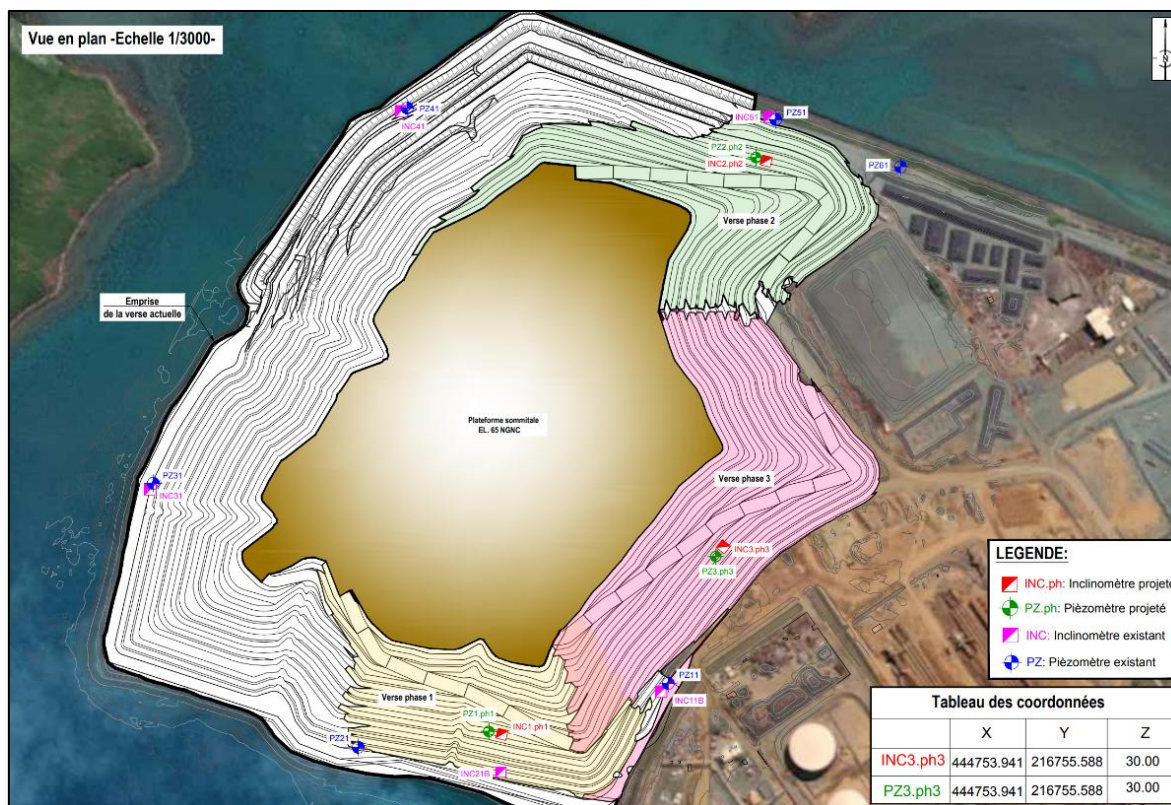


Figure 53. Implantation du dispositif d'auscultation (Phase 3)

10 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES PARTICULIERES

Nous recommandons de respecter les dispositions constructives suivantes :

D1 : Pour assurer l'écoulement, les banquettes drainantes seront aménagées avec un devers amant de 4% à 5% et une pente longitudinale de 1,25% orientée vers les descentes d'eau principales qui seront aménagées sur les flancs de la verse ;

D2 : La banquette comportera une tranchée ouverte au pied du niveau amont et un merlon de protection en scorie de fusion en crête du niveau aval.

D3 : Afin de stabiliser sa surface, la plateforme de la banquette doit être compactée par rouleau ;

D4 : Dès la fin de ces aménagements les niveaux doivent être revégétalisés par semis hydraulique et des plantations d'arbustes ;

D5 : Les descentes d'eau seront aménagées en escaliers avec des replats au niveau des banquettes drainantes ;

D6 : Compacter la surface de descente d'eau avant mise en place du revêtement contre l'érosion ;

D7 : Mettre en place une nappe de géotextile avant mise en place du revêtement ;

D8 : Au droit de l'emprise des descentes d'eau, il faut reprofiler le talus libre de la verse conformément au design initial, à savoir des niveaux de 35° et des banquettes ayant un dévers aval de 4%.

11 CONCLUSION

Les trois premières phases d'extension de la verse à scories sera réalisée sur une ancienne plateforme de scories située globalement à la cote +10 m NGNC, suffisamment éloignée du contour maritime et limitée au Nord par le tas historique de scories calcosodiques. Les trois phases d'extension ne dépassent pas la zone d'endigage existante.

Les justifications de la stabilité des talus de la verse ont été conduites pour l'ensemble des **trois phases** d'extension, et pour les **différentes conditions de calcul** : conditions drainées et non drainées, en cours de construction et en fin de construction. Les résultats des calculs permettent de conclure que :

- La stabilité de la verse en cours de construction, évaluée à l'aide de méthodes aux éléments finis intégrant les phénomènes de consolidation, est assurée à toutes les étapes de construction ;
- La stabilité du talus en phase ultime en condition non drainée, déterminé par les méthodes d'équilibre limite, est globalement acceptable et ce en tenant compte de la piste périphérique de largeur de 20 m projetée au pied des talus de la verse durant les trois phases d'extension.
- Toutefois, **il est fortement recommandé de protéger le pied de l'endigage par des enrochements** et ce dans le but d'empêcher une érosion régressive qui peut compromettre la stabilité de la verse à long terme ;
- La stabilité à long terme de la verse en conditions drainées, évaluée par les méthodes d'équilibre limite, est satisfaisante.
- Les coefficients de sécurité évalués avec la méthode pseudo-statique sont légèrement inférieurs aux facteurs de sécurité requis. Compte tenu du caractère simpliste et conservateur de cette méthode, une vérification de la stabilité de la verse en condition post-sismique a été réalisée conformément au standard international GISTM (stabilité après le passage du séisme). Cette vérification montre que la stabilité vis-à-vis des sollicitations sismiques est satisfaisante.

Ainsi, nous estimons que le projet d'extension de la verse à scorie (phases 1 à 3) satisfait les critères de stabilité requis dans le standard GISTM.

De plus, dans le but d'assurer une construction dans des conditions sécuritaires, un dispositif d'auscultation doit être installé nous recommandons de mettre en place un dispositif d'auscultation géotechnique adapté. Celui-ci consistera en l'implantation de

couples inclinomètre / piézomètre, positionnés au pied de chaque talus ainsi qu'à mi-hauteur des talus, soit à la cote +30 m NGNC.

Dans une optique d'extension et de rehausse de la verse, il est recommandé d'approfondir les reconnaissances géotechniques afin de consolider les dimensionnements futurs et, le cas échéant, d'optimiser les scénarios de mise en œuvre. A cet effet, il est recommandé de réaliser une campagne de reconnaissance géotechnique complémentaire, visant notamment à améliorer la caractérisation de l'argile vaseuse et du comportement de la nappe. Cette campagne devra comprendre des sondages carottés avec prélèvements d'échantillons intacts pour essais en laboratoire, ainsi que des essais in situ de type CPTu.

Néanmoins, ces investigations complémentaires ne constituent pas une condition bloquante pour le démarrage des travaux d'extension des phases 1, 2 et 3.

La gestion des eaux de la verse à scories consiste essentiellement à l'aménagement des ouvrages hydrauliques suivants :

- Drains enterrés sous le talus de la verse servent à drainer les sous écoulements en cas d'une montée accidentelle du niveau d'eau dans le talus de la verse ;
- Une tranchée périphérique de drainage aménagée au pied de la verse ;
- Descentes d'eau en enrochements sur le talus aval de la piste périphérique ;
- Niveaux et banquettes drainantes sur le flanc de la verse ;
- Descentes d'eaux principales aménagées sur les talus libres de la verse.

Les descentes d'eau telle que projetées, perpendiculairement au talus de la verse, de section minimale de 2 m à la base et de profondeur 1 m, doivent être protégées par des enrochements de diamètre $\phi 1000\text{mm}$. Afin d'optimiser la section des enrochements utilisés pour la construction des descentes d'eau, nous recommandons soit :

- D'élargir les descentes d'eau à 5 m de largeur à la base sur une profondeur de 1 m de façon à réduire les vitesses d'écoulement ;
- De construire des descentes d'eau implantées de travers au flanc libre et présentant par conséquent une pente maximale de 25% ;

Ces deux propositions permettent de réduire la taille des enrochements de blocs métrique à des enrochements de diamètre maximale $\phi 500\text{ mm}$.

Il est aussi envisageable d'utiliser d'autre pour la construction des descentes d'eau telle que proposé dans le cadre de l'étude d'optimisation des descentes d'eau de la verse à scories existante réalisée par MECATER ingénierie en 2023 (Réf: MC-23-140-SLN-20-R01-A). En effet, quatre techniques de construction des descentes d'eau ont été proposées. Soit une :

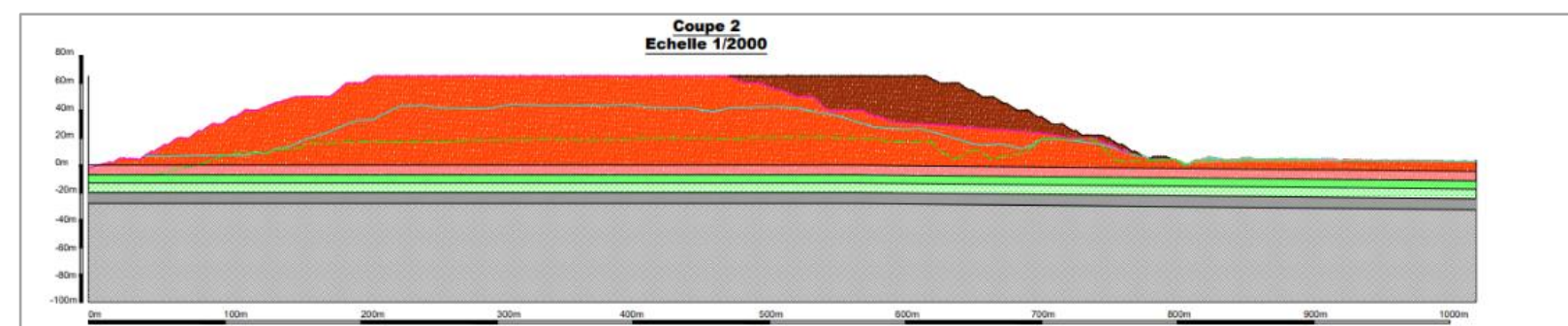
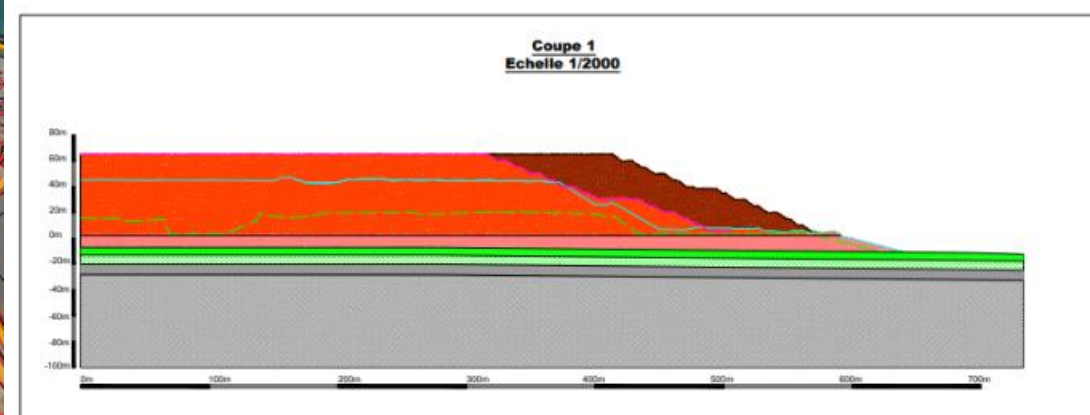
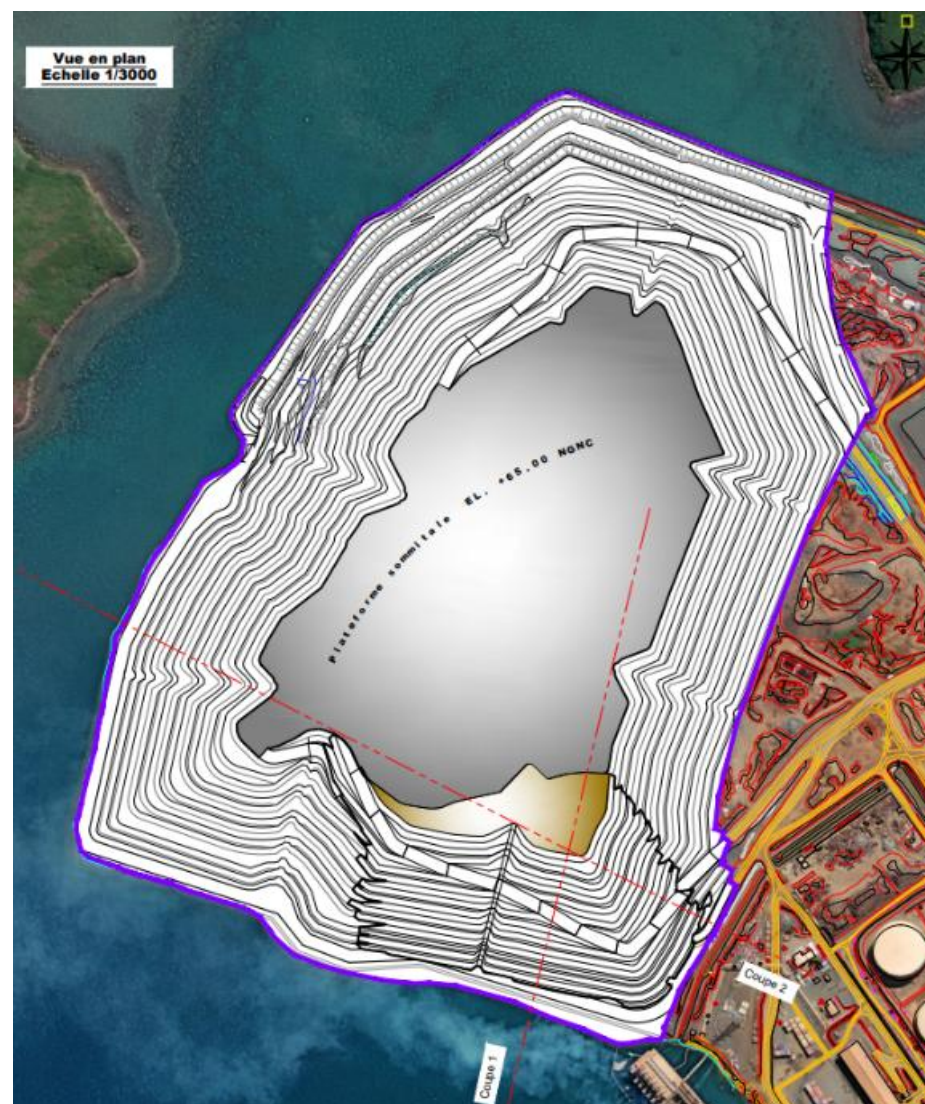
- 1) Descente d'eau en enrochements ;
- 2) Descente d'eau en matelas Reno ;

- 3) Descente d'eau en perrés maçonnés ;
- 4) Descente d'eau en concrete canvas.

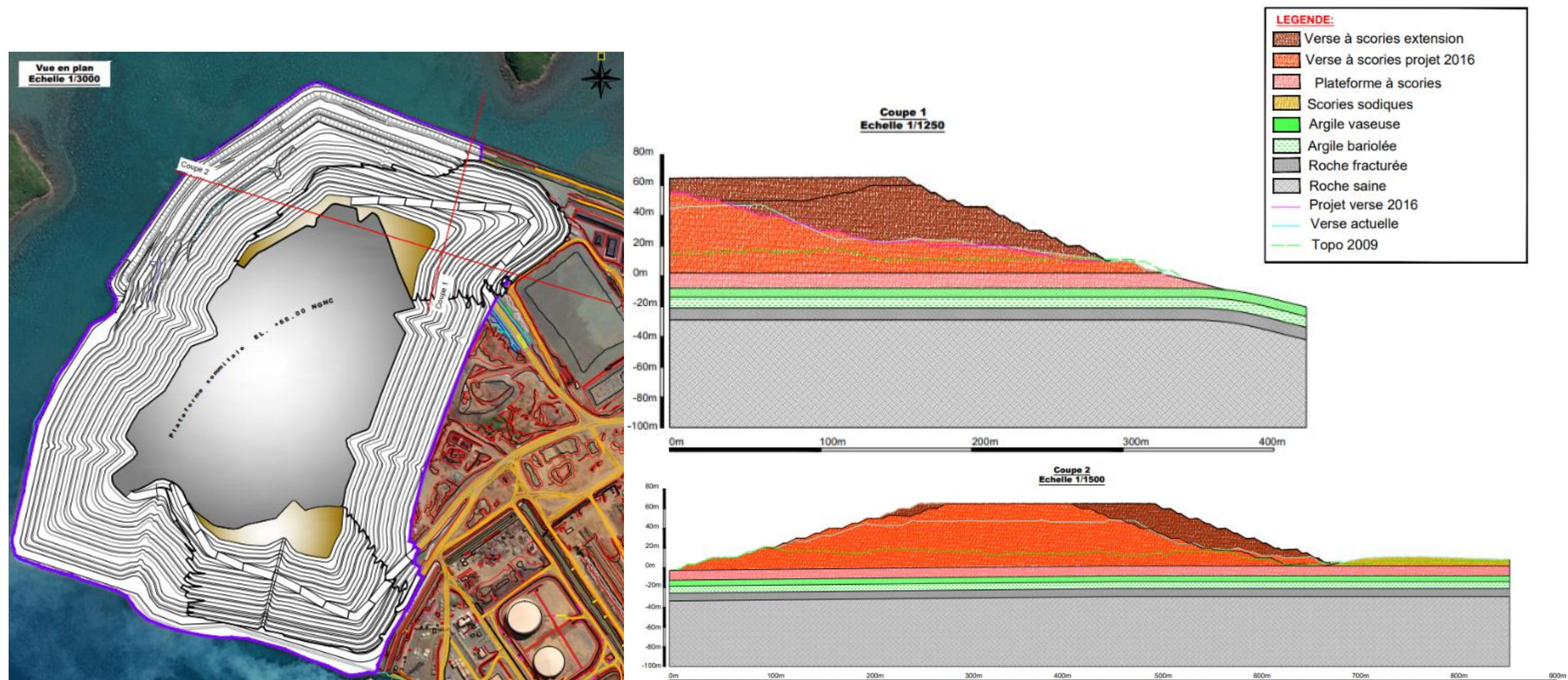
Enfin, au regard du retour d'expérience, il apparaît nécessaire **de mettre à jour le modèle hydrodynamique d'infiltration**. A cet effet, nous recommandons, d'installer un piézomètre au centre de la verse afin de suivre l'évolution de la nappe et de vérifier sa concentration à la base de la verse.

ANNEXE N°1 : COUPES DE CALCUL ET PLAN DE SITUATION

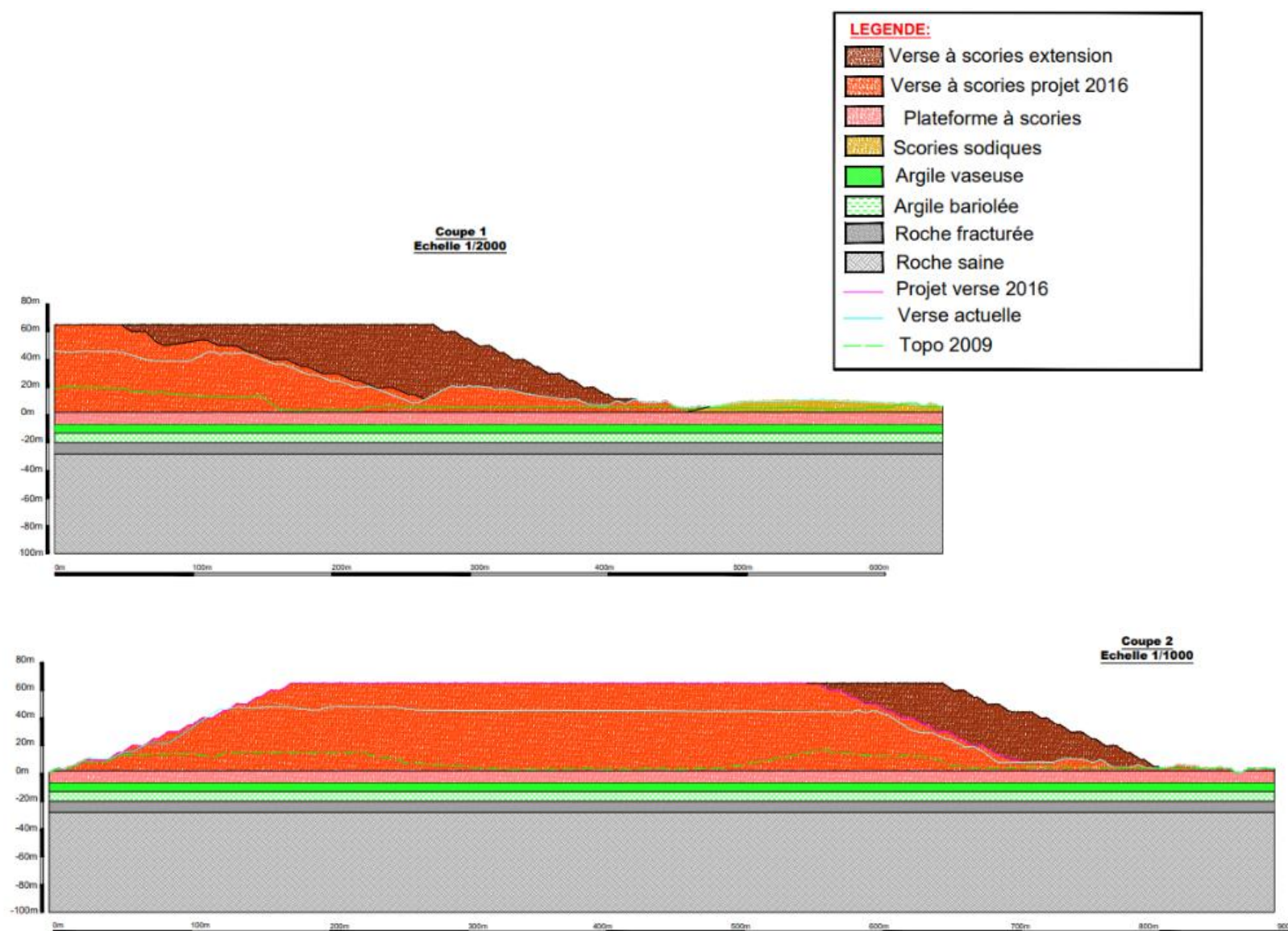
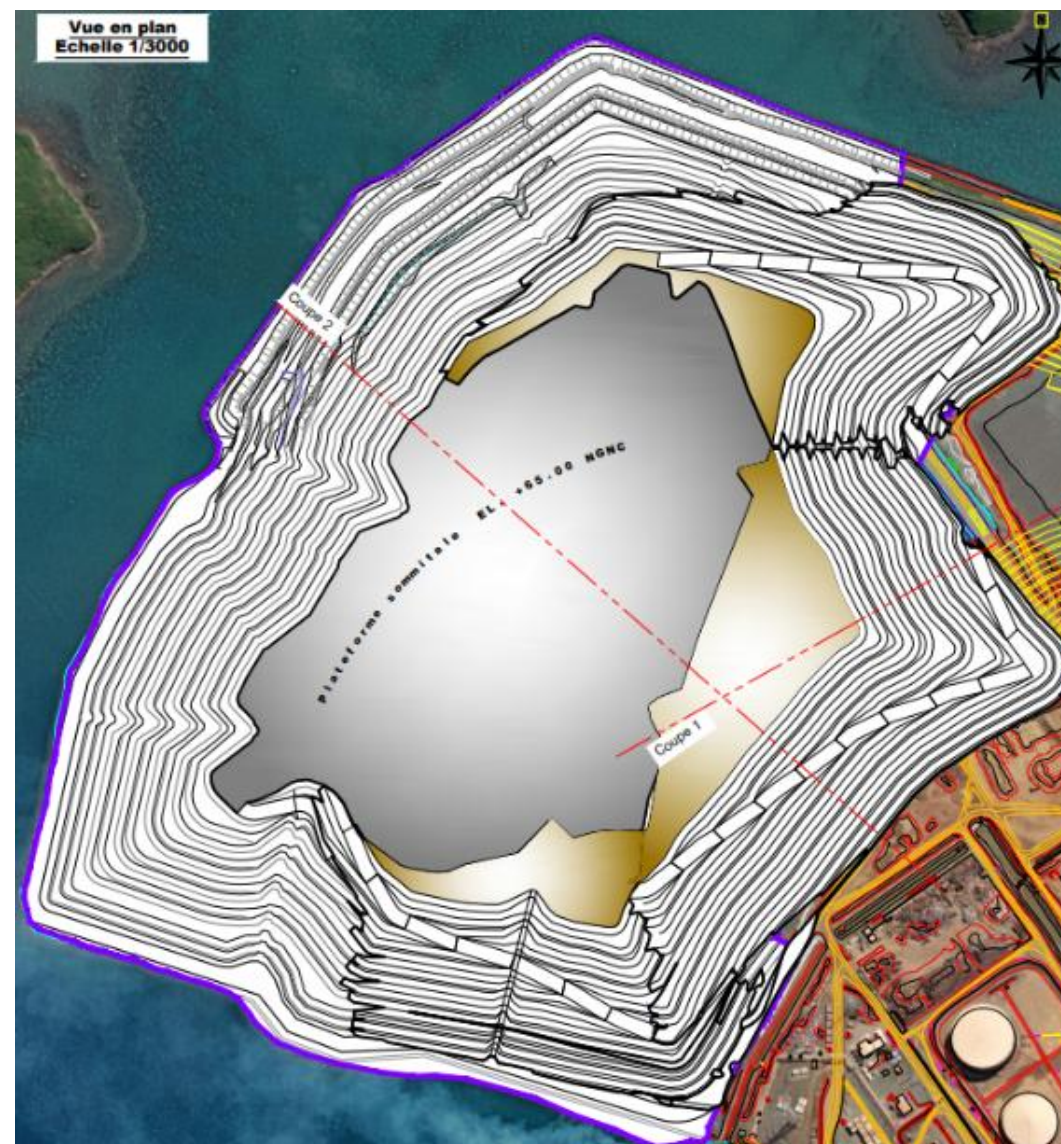
Phase 1 - Zone Gazière



Phase 2 - Zone Casse-Fonte au Nord



Phase 3 – 5 S et parc à boues



**ANNEXE N°2 : SORTIES PLAXIS – CALCUL EN COURS DE
CONSTRUCTION DE LA PHASE 1 – Variante 1**

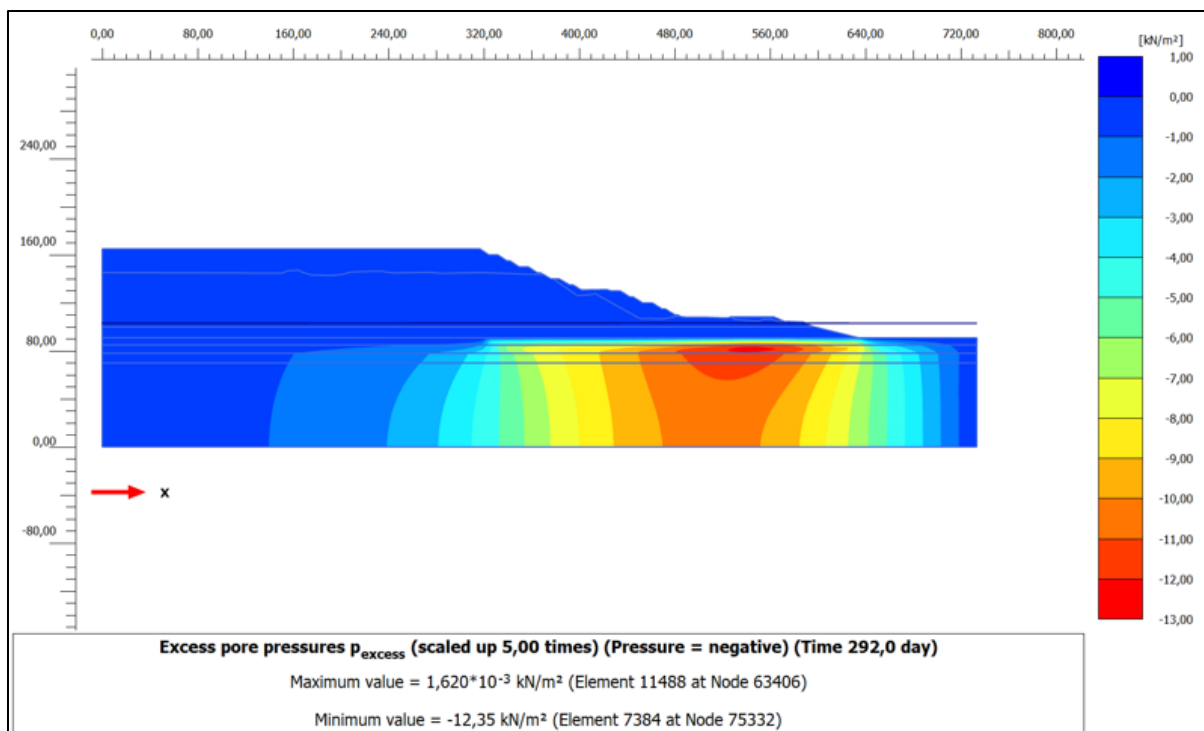


Figure N° 1. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 1^{ère} couche
(Surpressions max= 12,35 kPa)

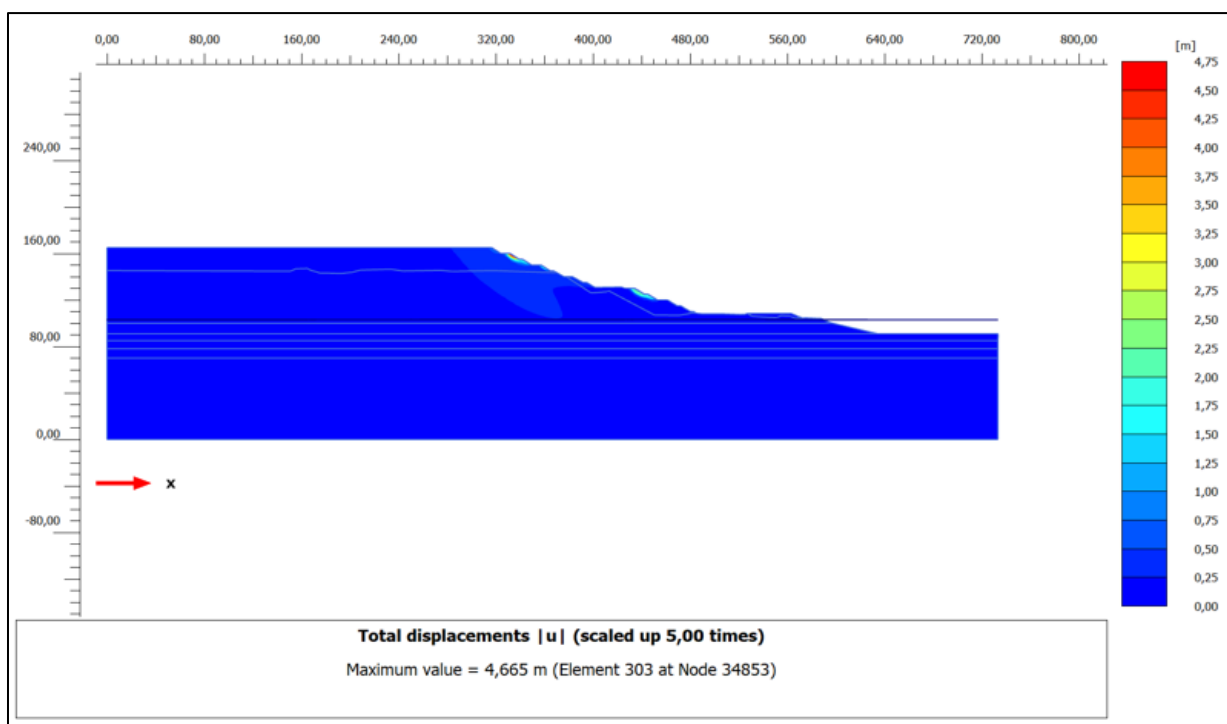


Figure N° 2. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 1^{ère} couche
(FS = 2,01)

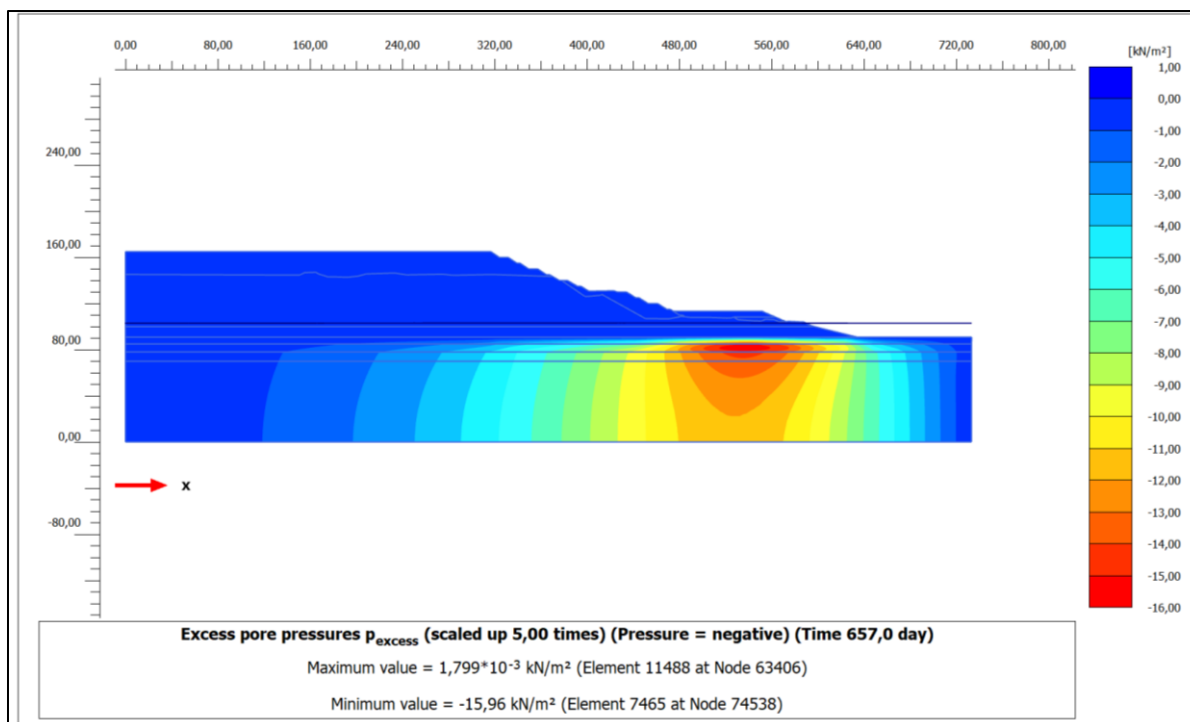


Figure N° 3. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 2^{ème} couche
(Surpressions max= 15.96 kPa)

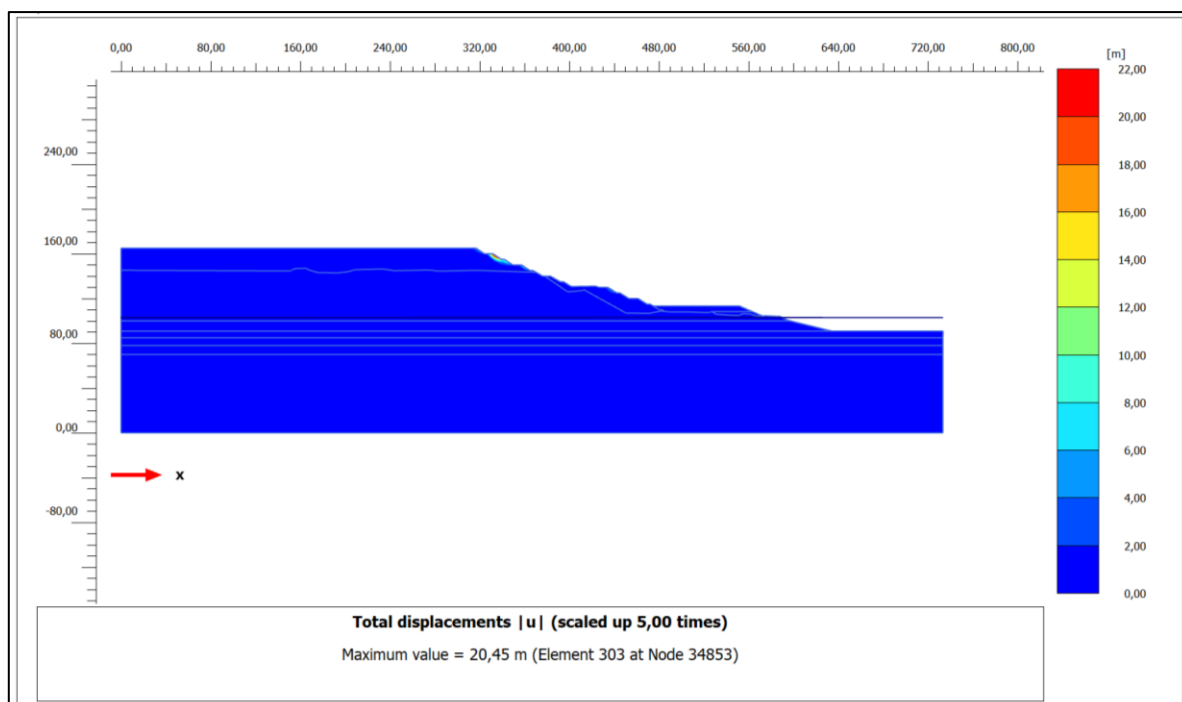


Figure N° 4. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 2^{ème} couche
(FS = 2.02)

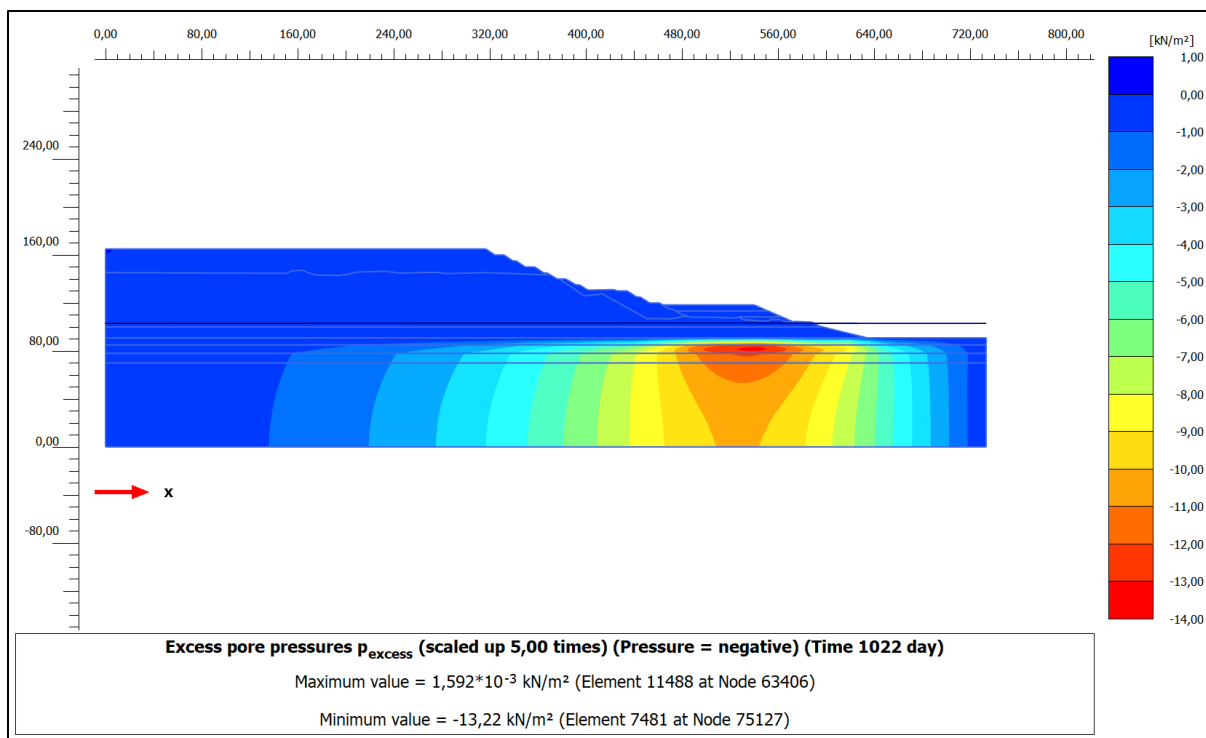


Figure N° 5 Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 3^{ème} couche
(Surpressions max= 13.22 kPa)

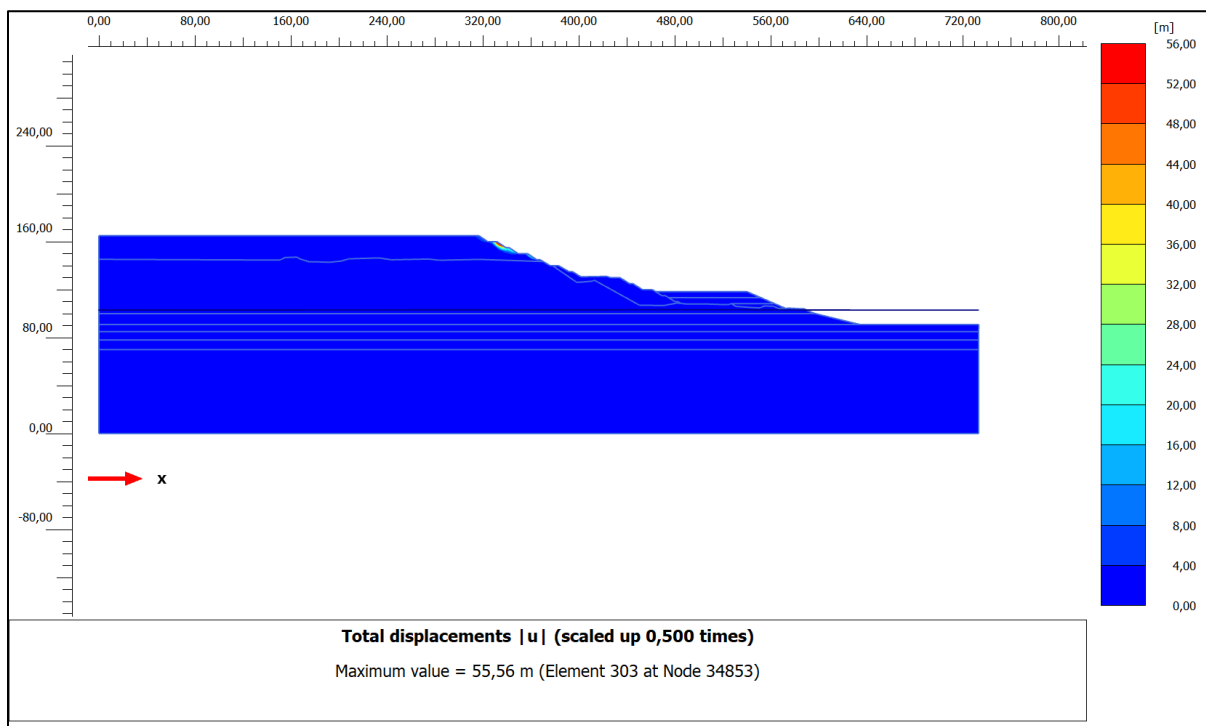


Figure N° 6. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 3^{ème} couche
(FS = 2.02)

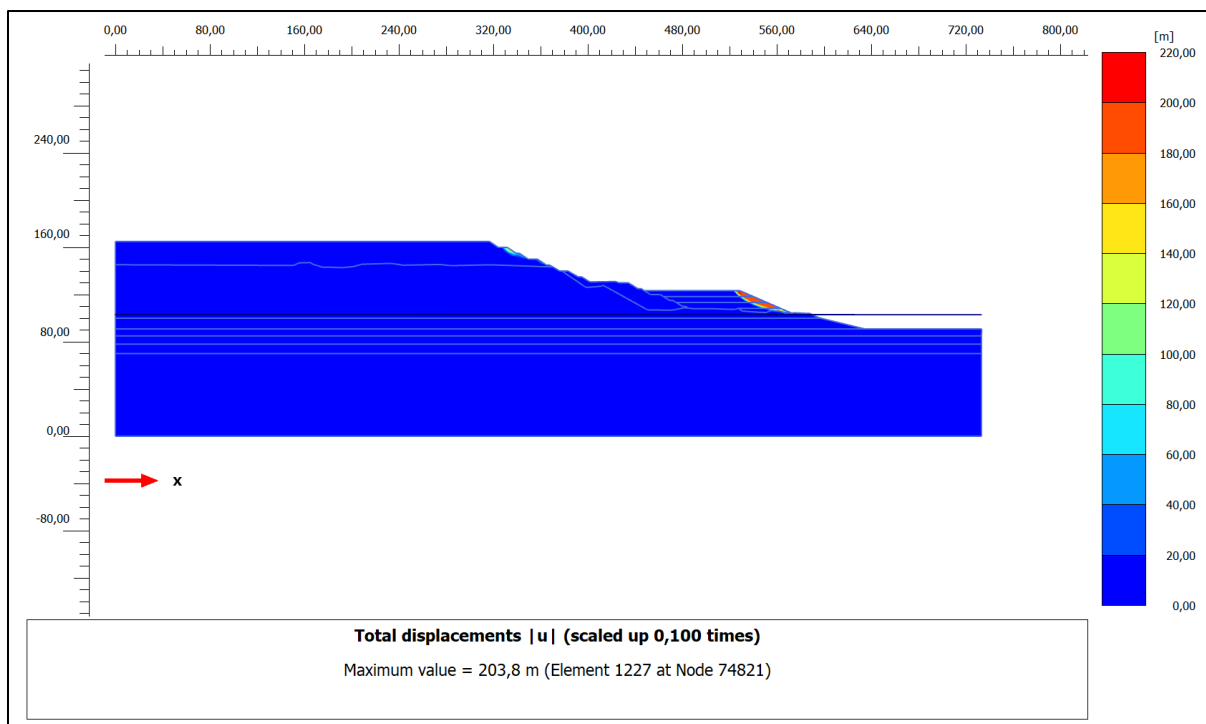


Figure N° 7. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 4ème couche
(Surpressions max= 9,928 kPa)

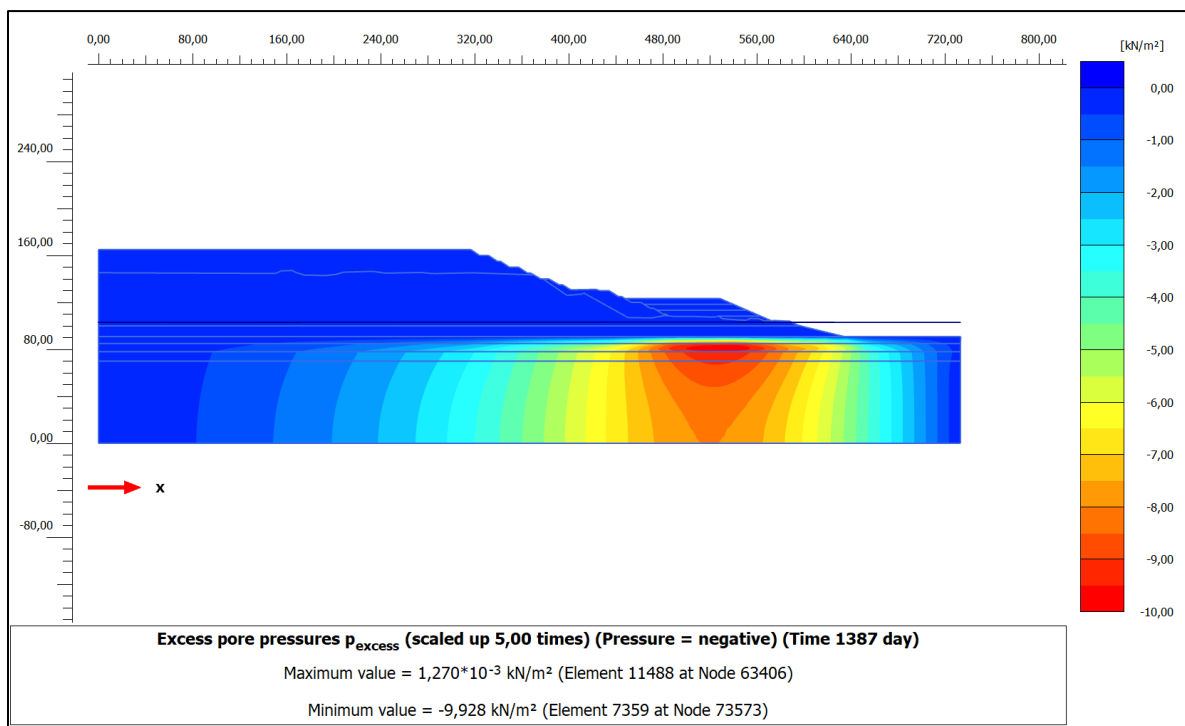


Figure N° 8.. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 4ème couche
(FS = 1.98)

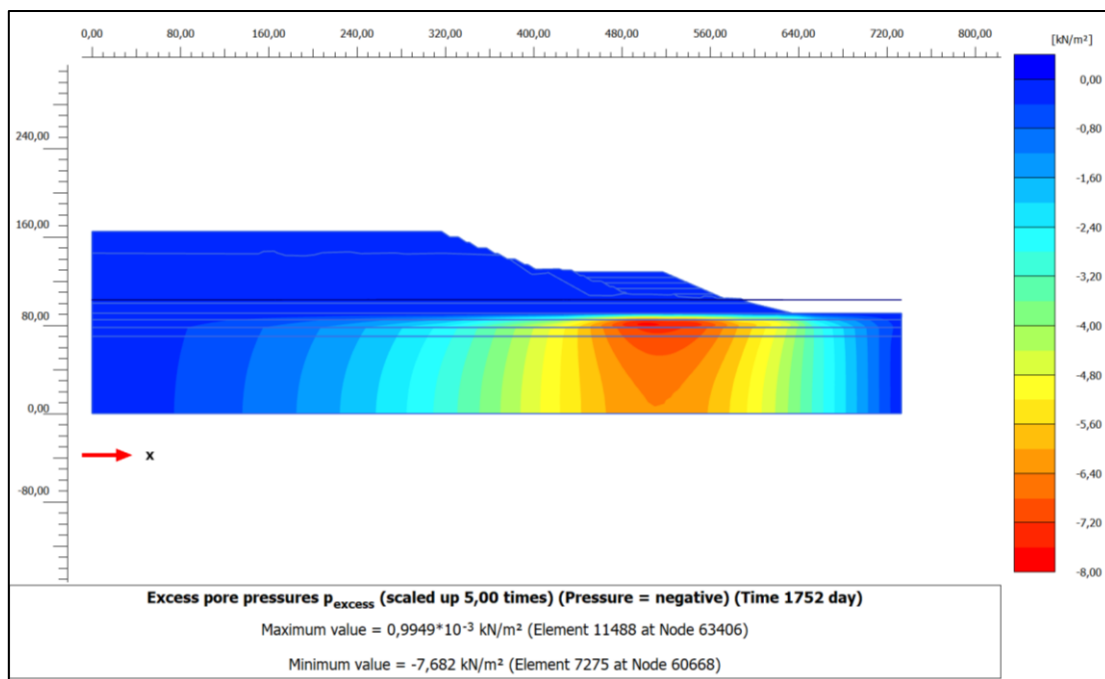


Figure N° 9. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 5^{ème} couche
(Surpressions max= 7.682 kPa)

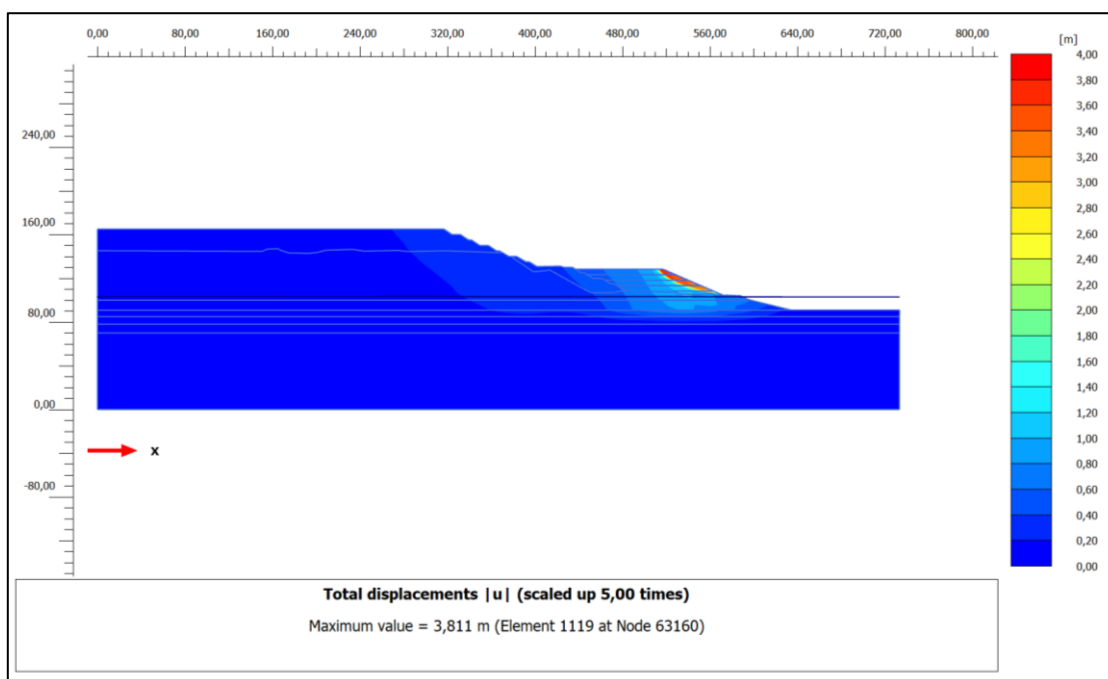


Figure N° 10 Surface de glissement préférentiel après la construction de la 5^{ème} couche (Fs=1.91)

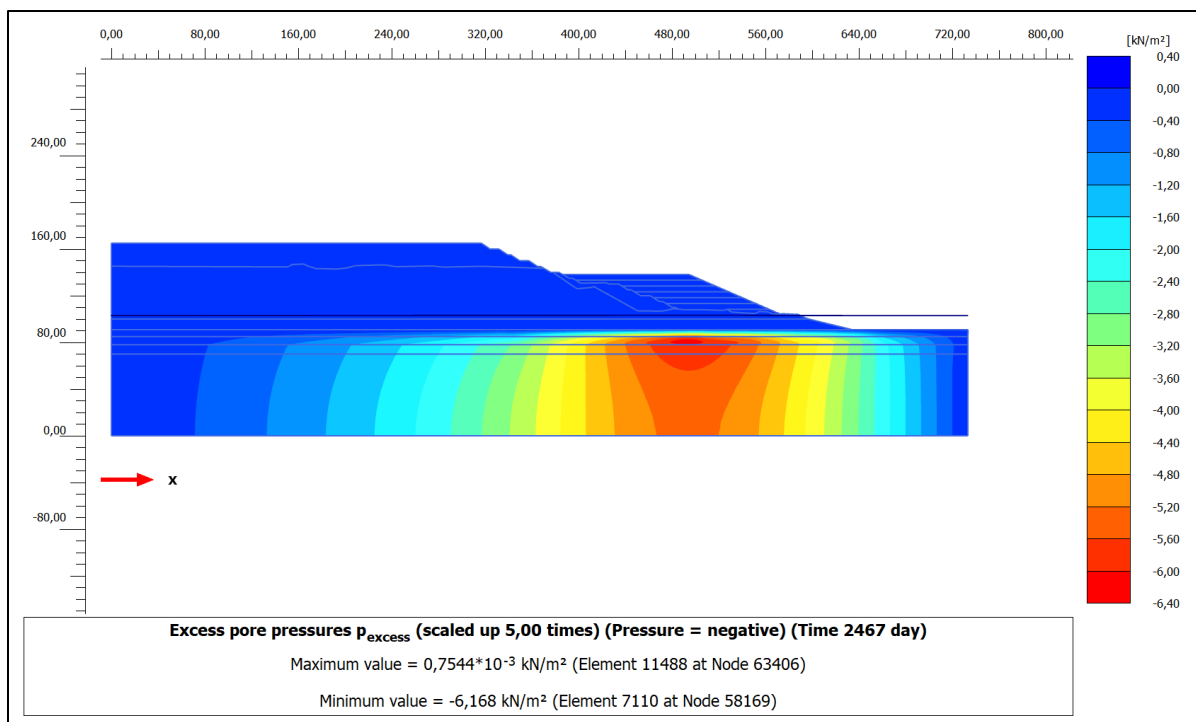


Figure N° 11. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 6^{ème} couche
(Surpressions max= 6.824 kPa)

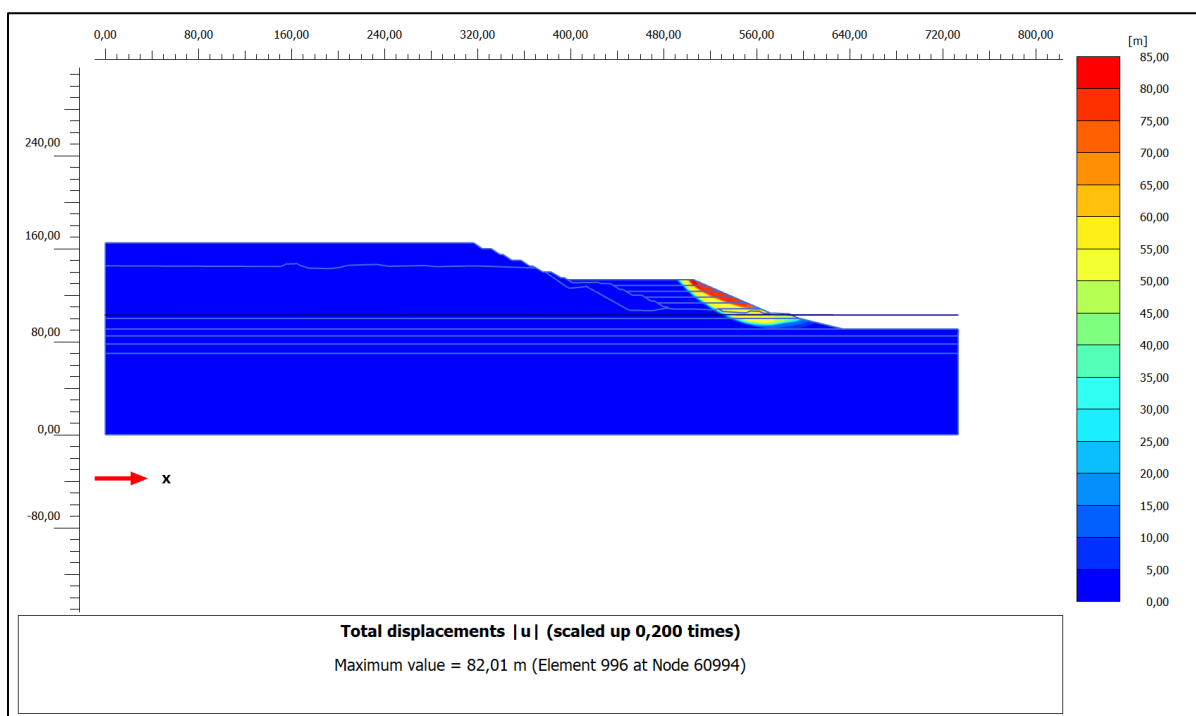


Figure N° 12. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 6^{ème} couche
(FS = 1.85)

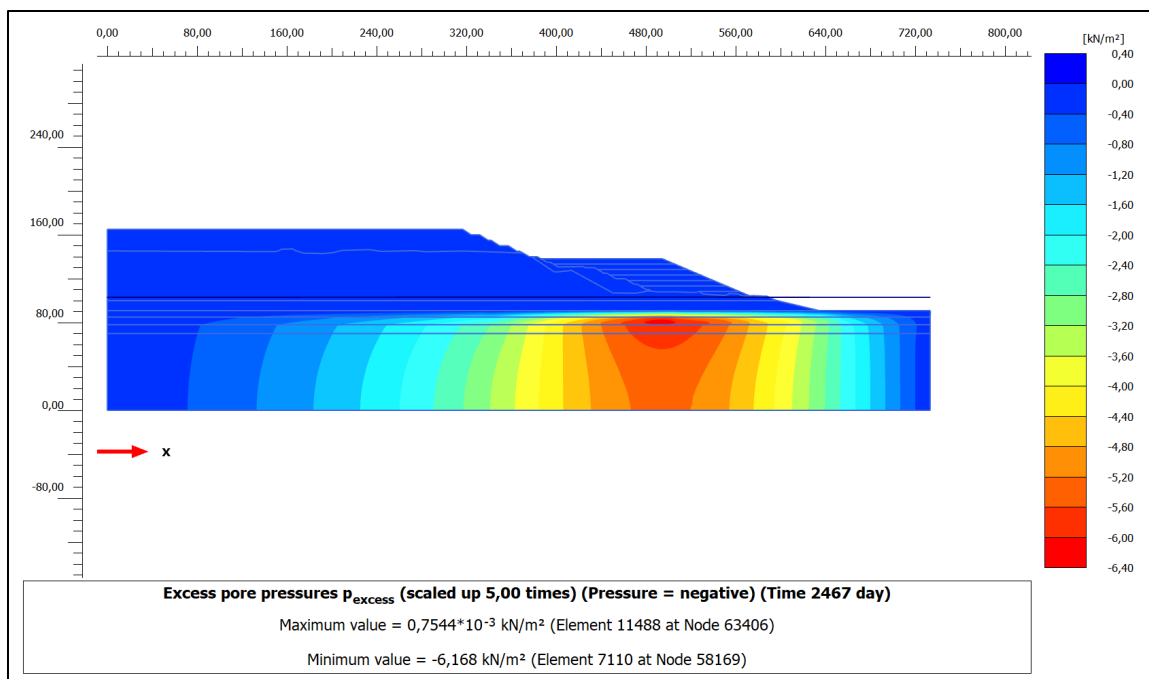


Figure N° 13. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 7^{ème} couche
(Surpressions max= 6.168 kPa)

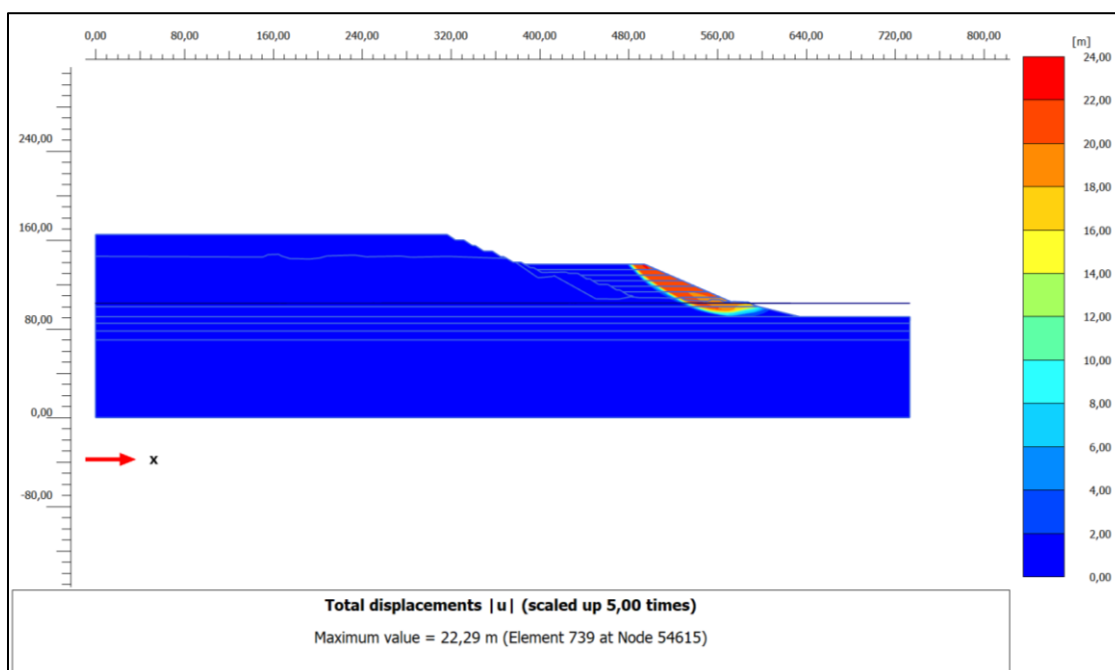


Figure N° 14.. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 7^{ème} couche
(FS=1,81)

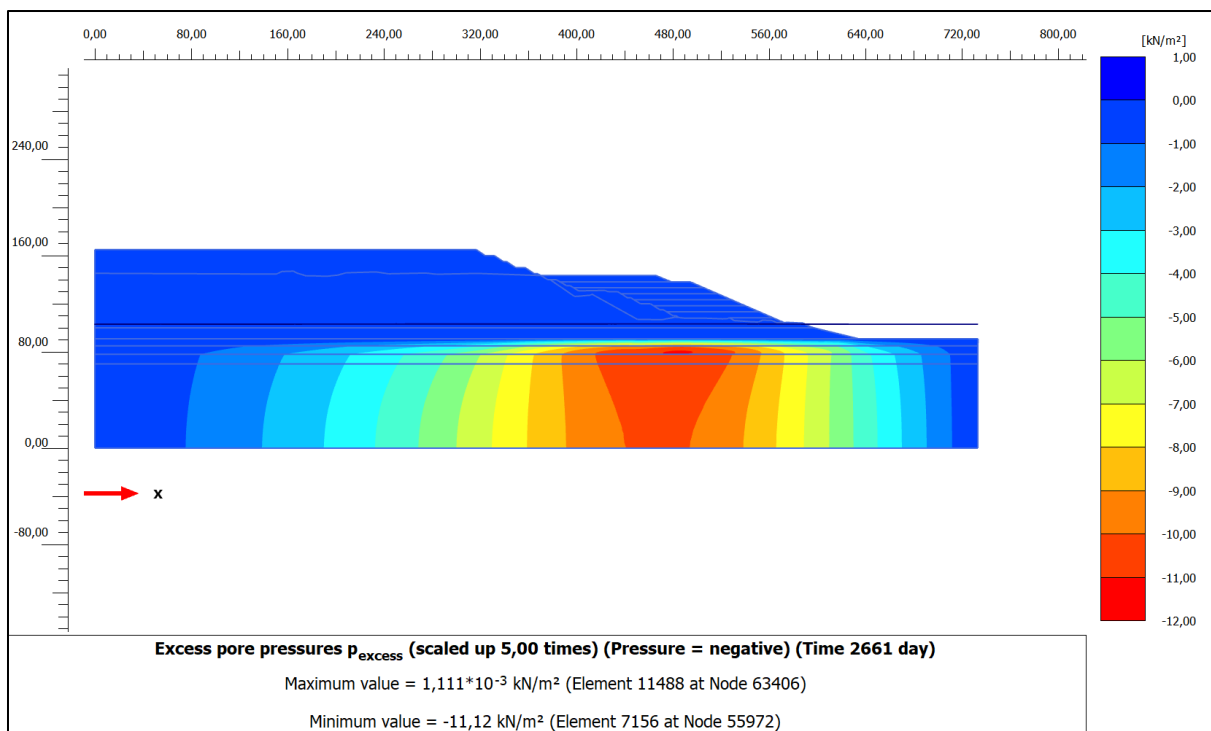


Figure N° 15.. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 8^{ème} couche
(Surpressions max= 11.12 kPa)

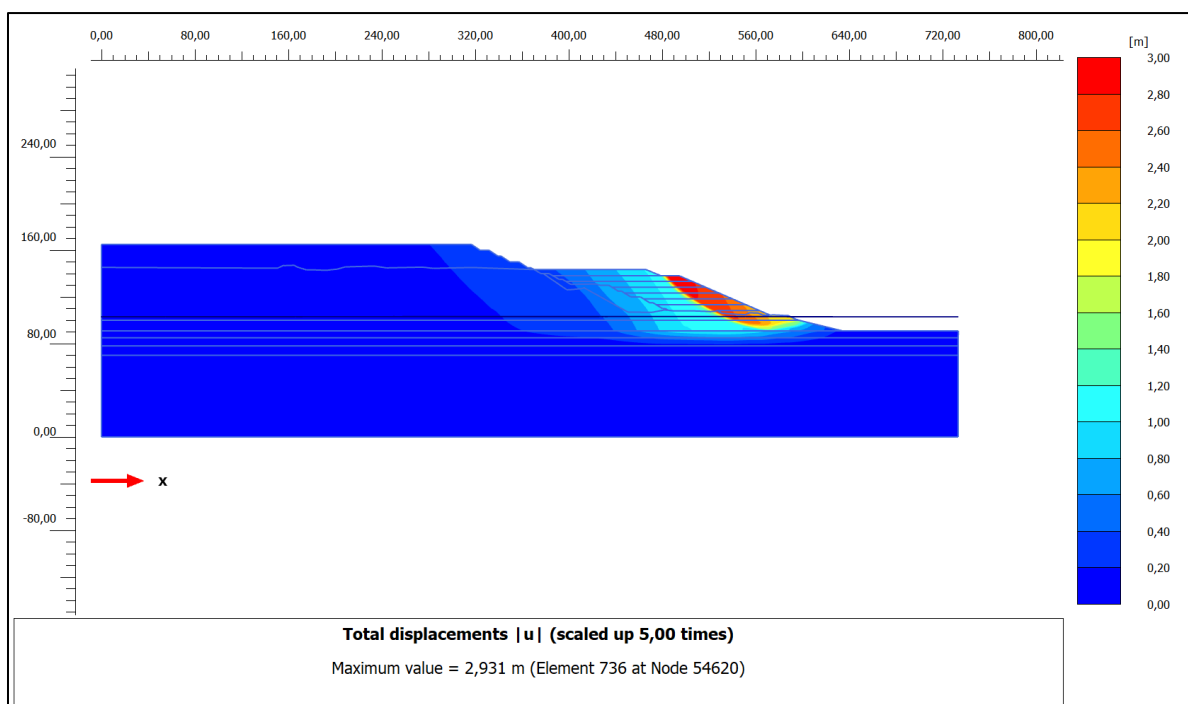


Figure N° 16.. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 8^{ème} couche
(FS = 1.81)

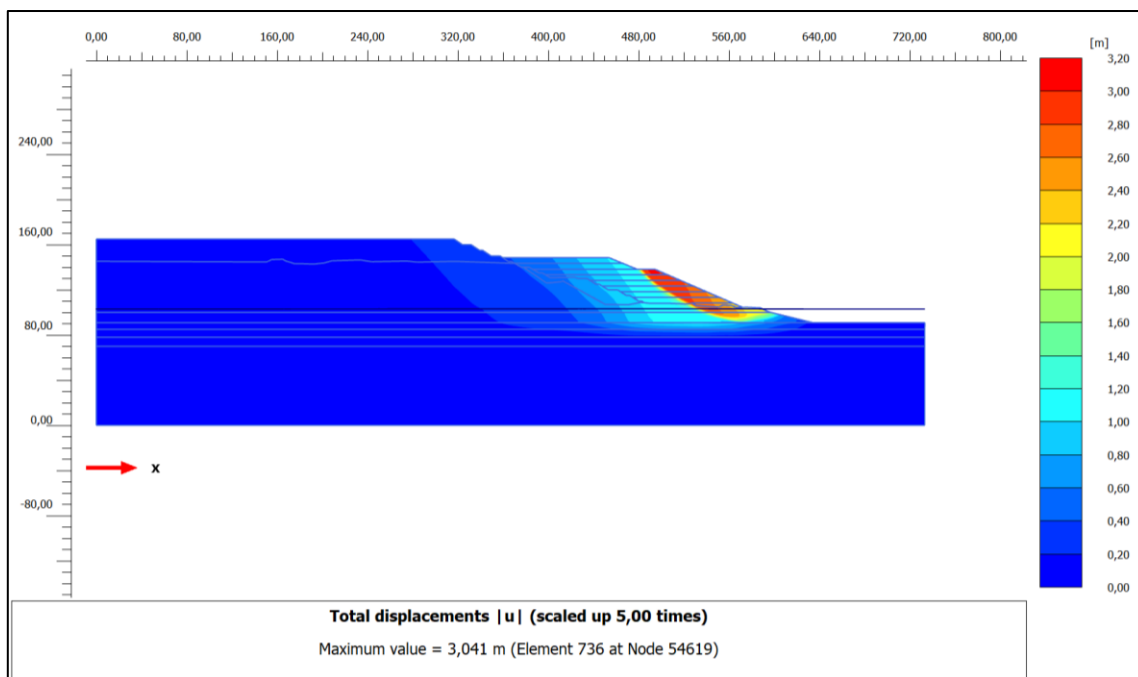


Figure N° 17.. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 9^{ème} couche
(Surpressions max= 12.17 kPa)

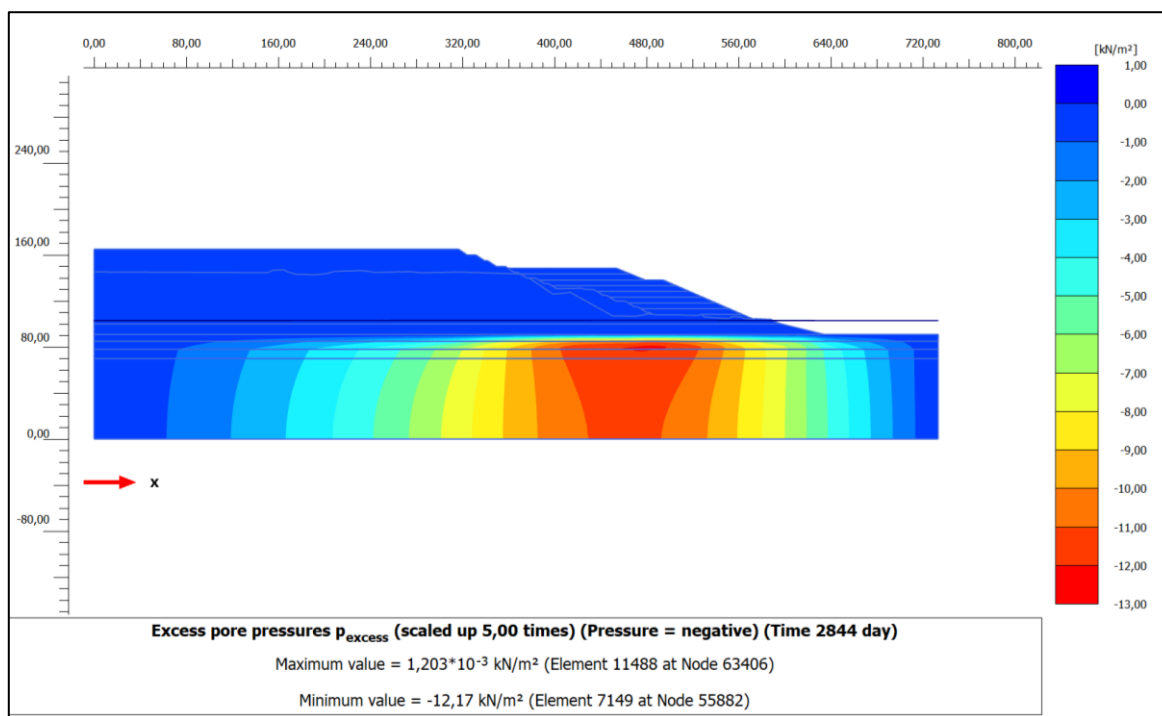


Figure N° 18. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 9^{ème} couche
(FS = 1.81)

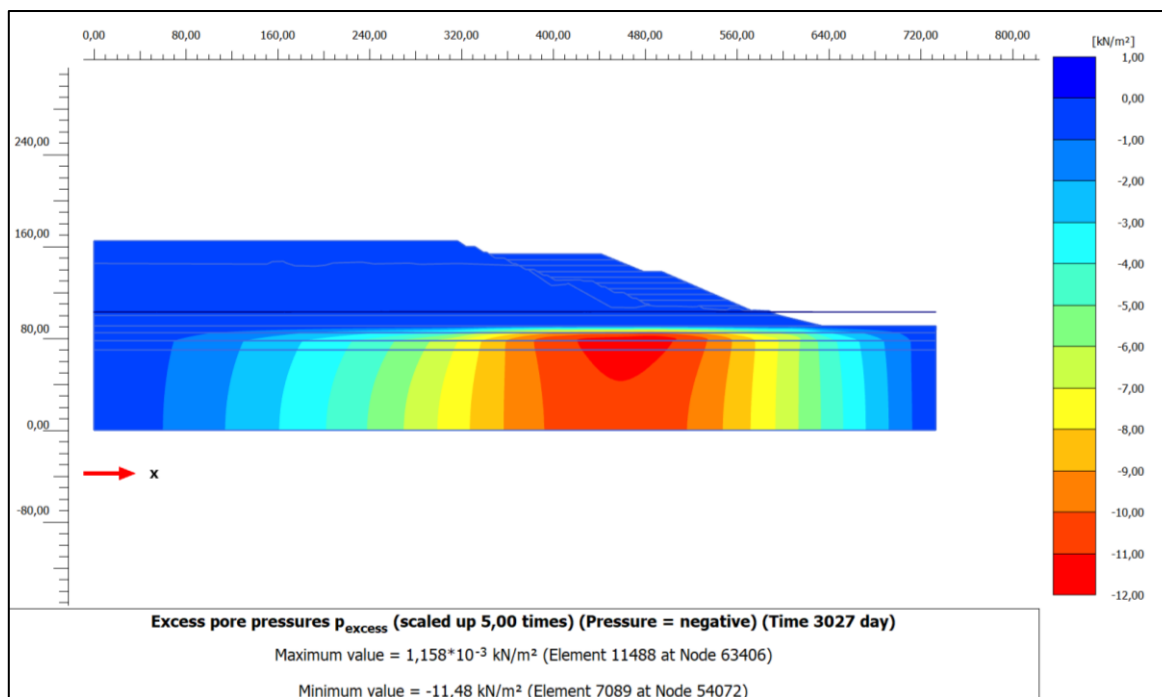


Figure N° 19. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 10^{ème} couche
(Surpressions max= 11.48 kPa)

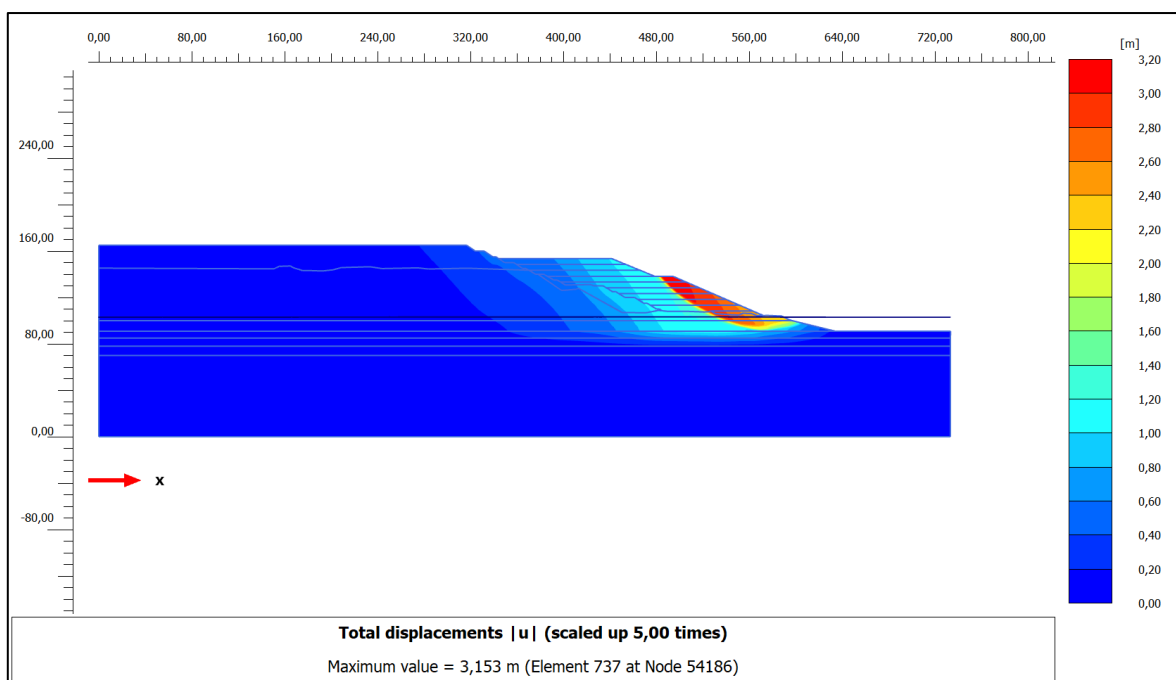


Figure N° 20. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 10^{ème} couche
(FS = 1.80)

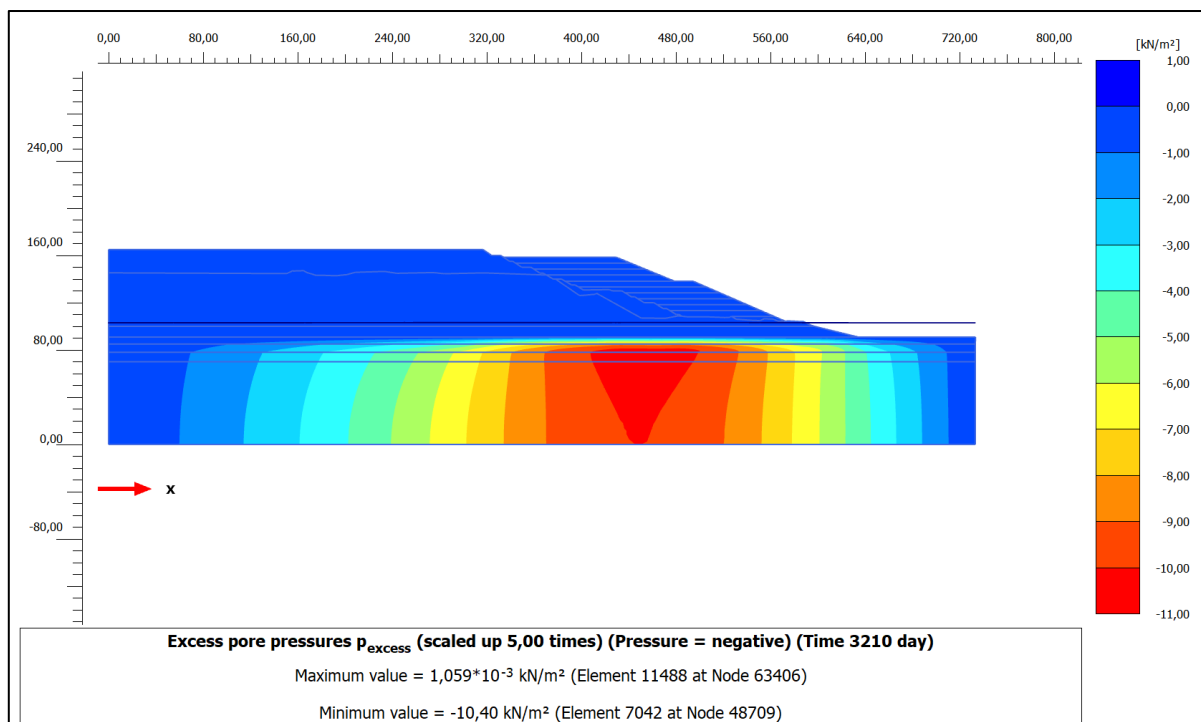


Figure N° 21. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 11^{ème} couche
(Surpressions max= 10.4 kPa)

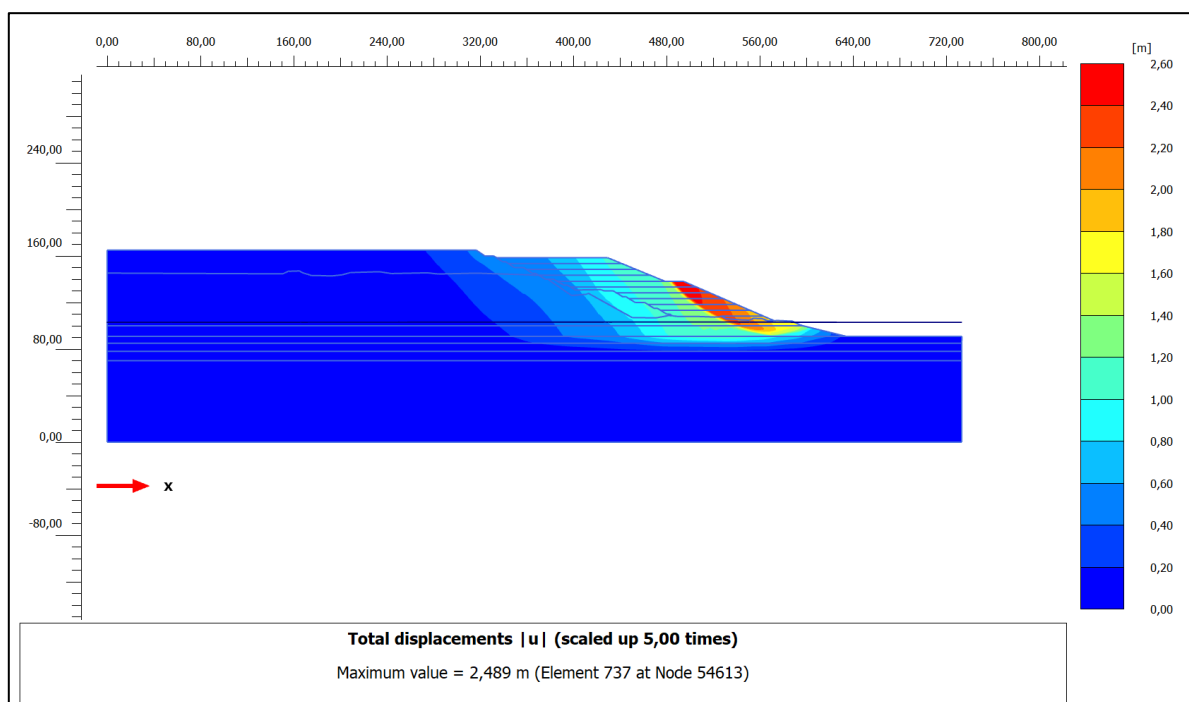


Figure N° 22 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 11^{ème} couche
(FS = 1.79)

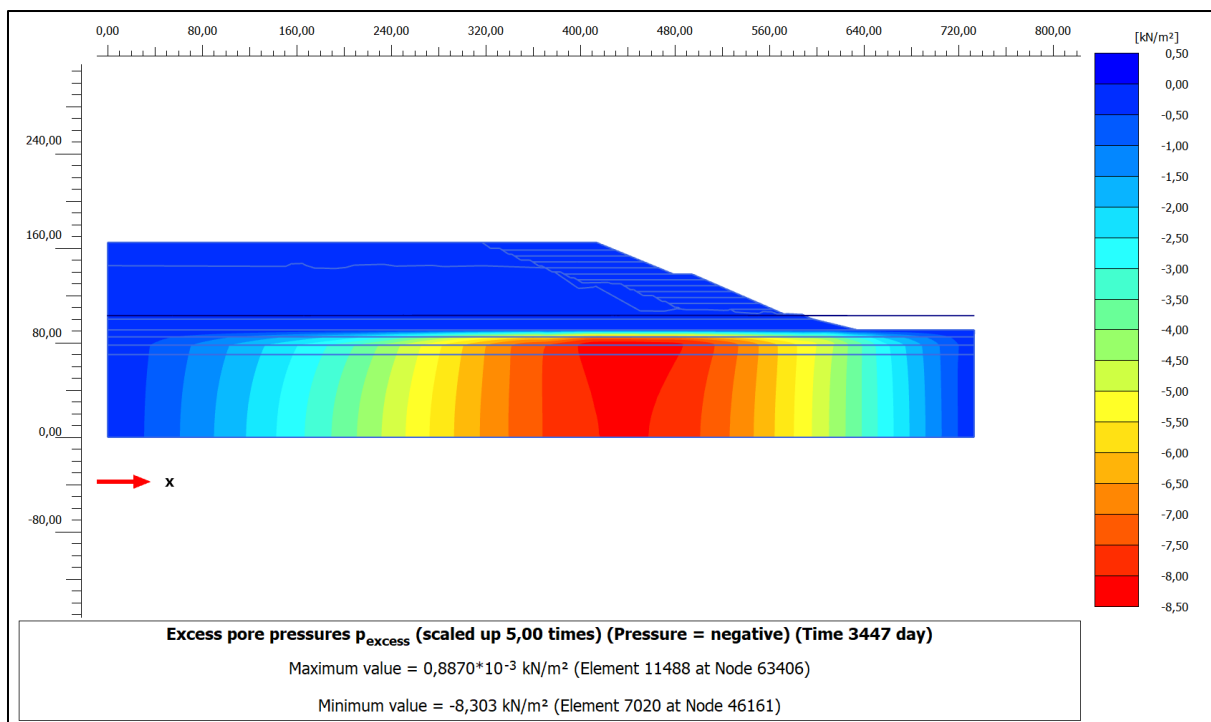


Figure N° 23. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 12^{ème} couche
(Surpressions max= 8,303 kPa)

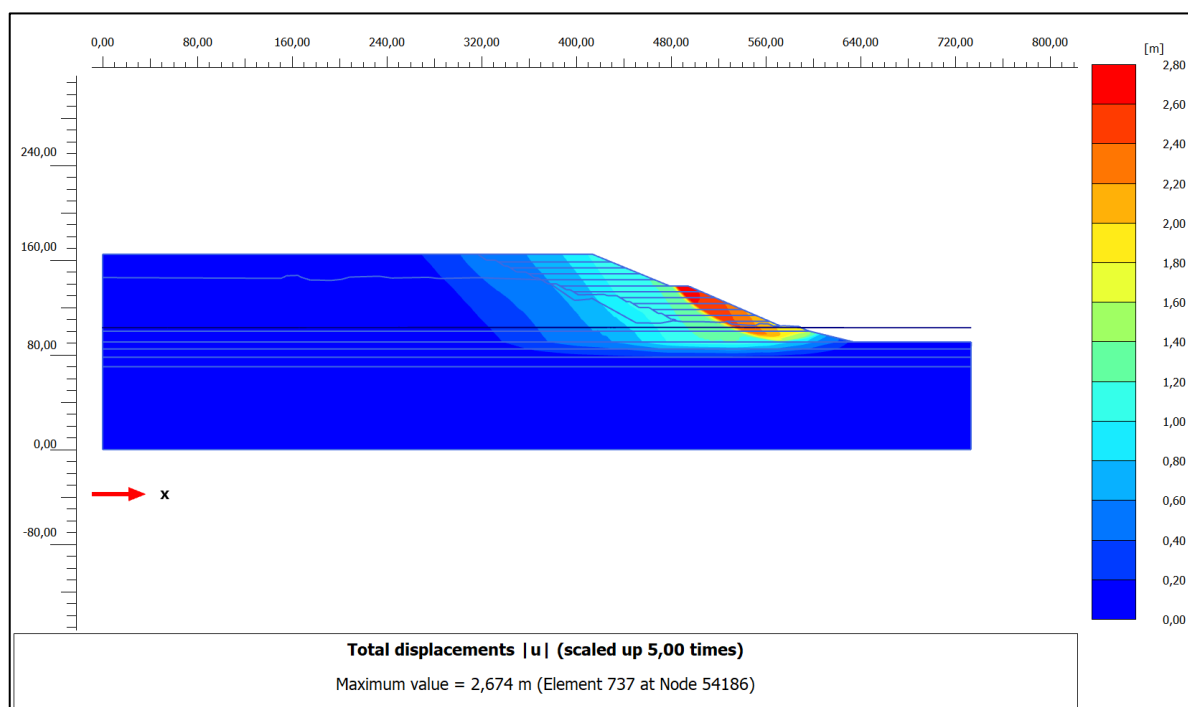


Figure N° 24. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 12^{ème} couche
(FS = 1.80)

**ANNEXE N°3 : SORTIES PLAXIS – CALCUL EN COURS DE
CONSTRUCTION DE LA PHASE 1 – Variante 2**

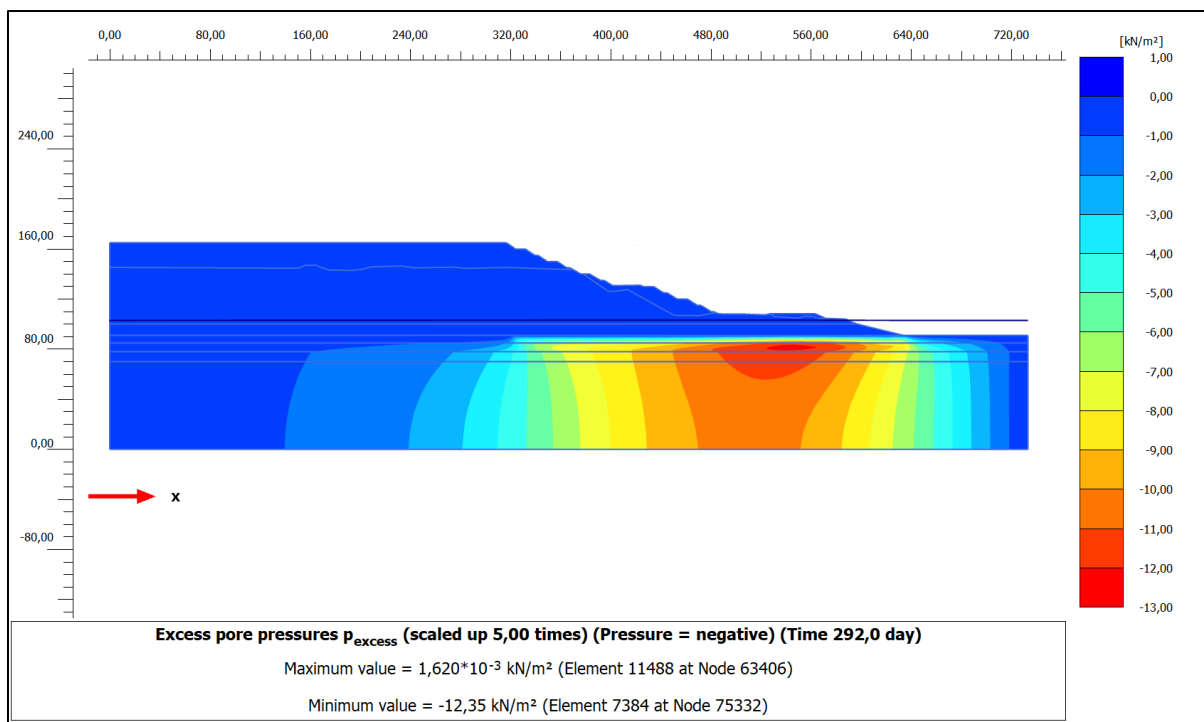


Figure N° 25 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 1^{ère} couche
(Surpressions max= 12,35 kPa)

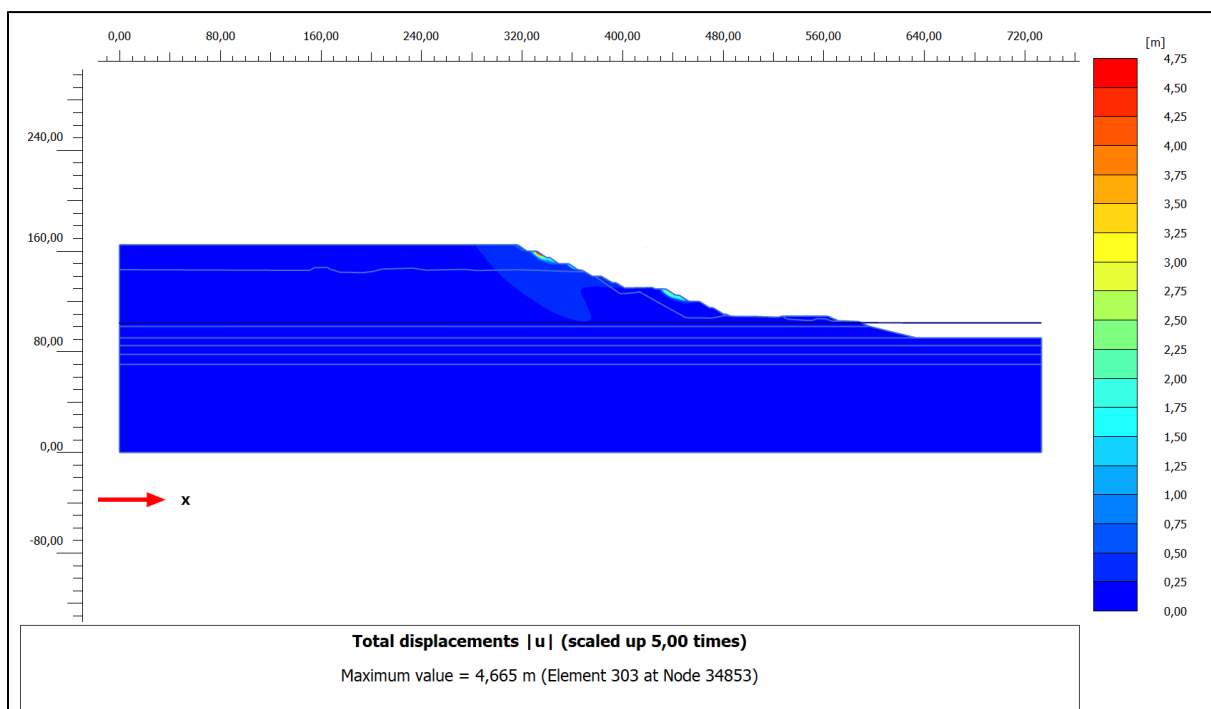


Figure N° 26 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 1^{ère} couche
(FS = 2,01)

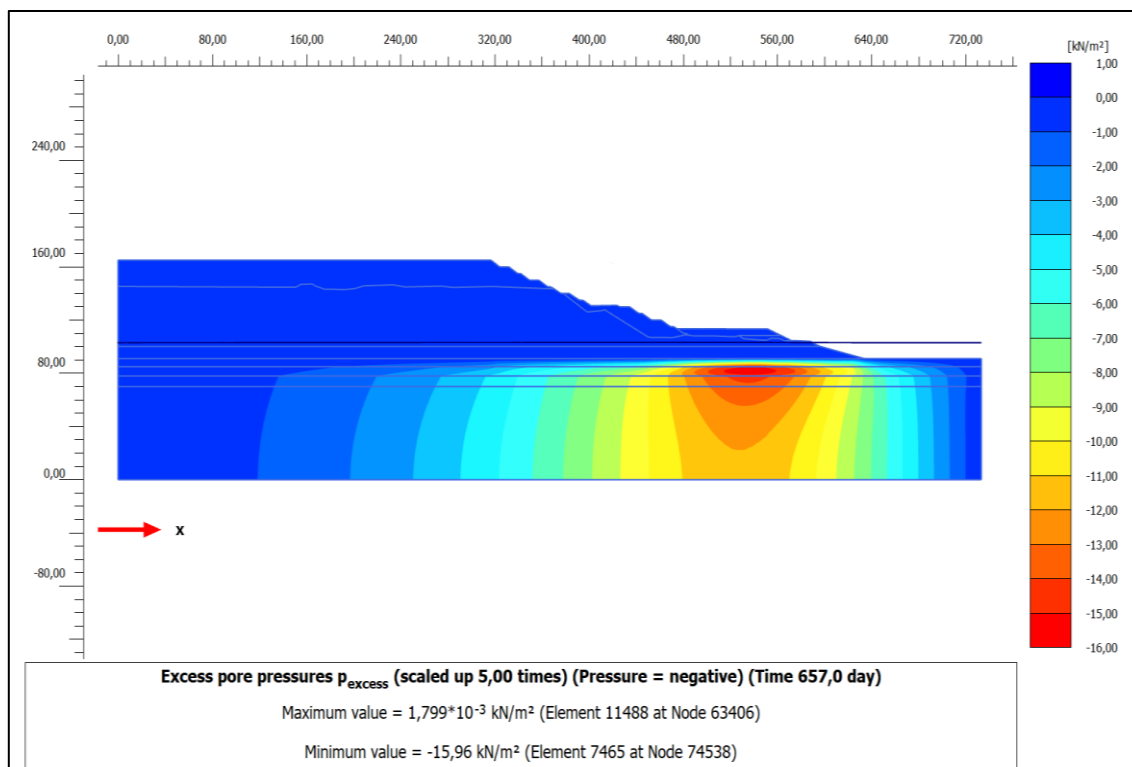


Figure N° 27 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 2^{ème} couche
(Surpressions max= 15,96 kPa)

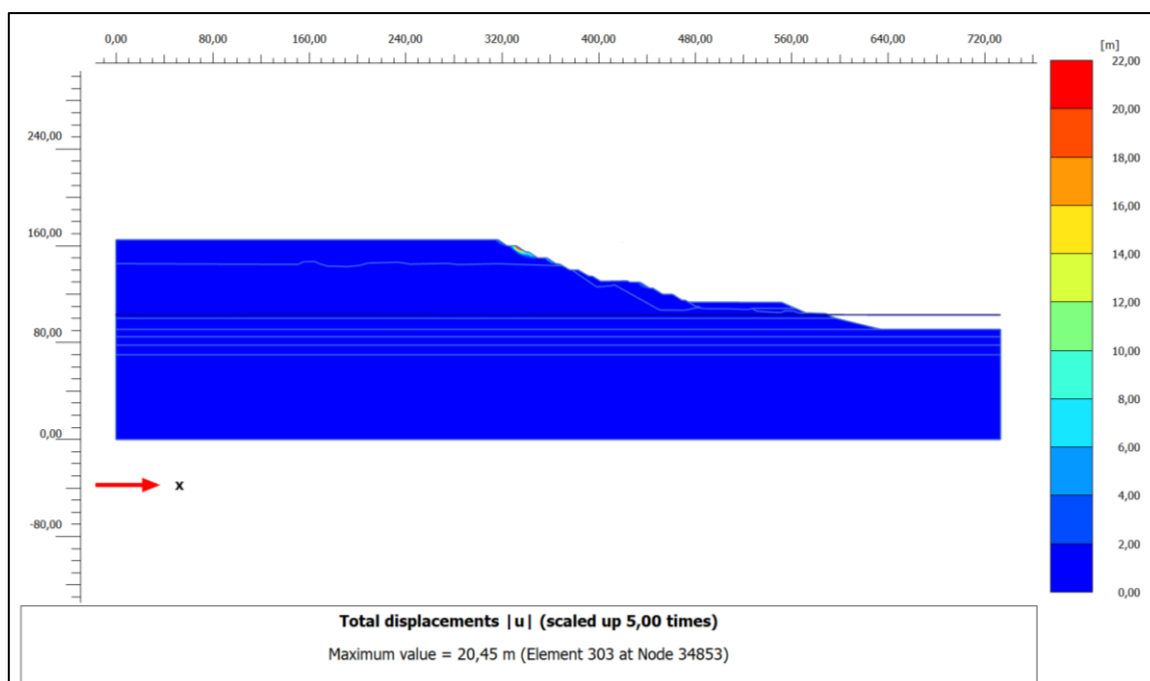


Figure N° 28 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 2^{ème} couche
(FS = 2,02)

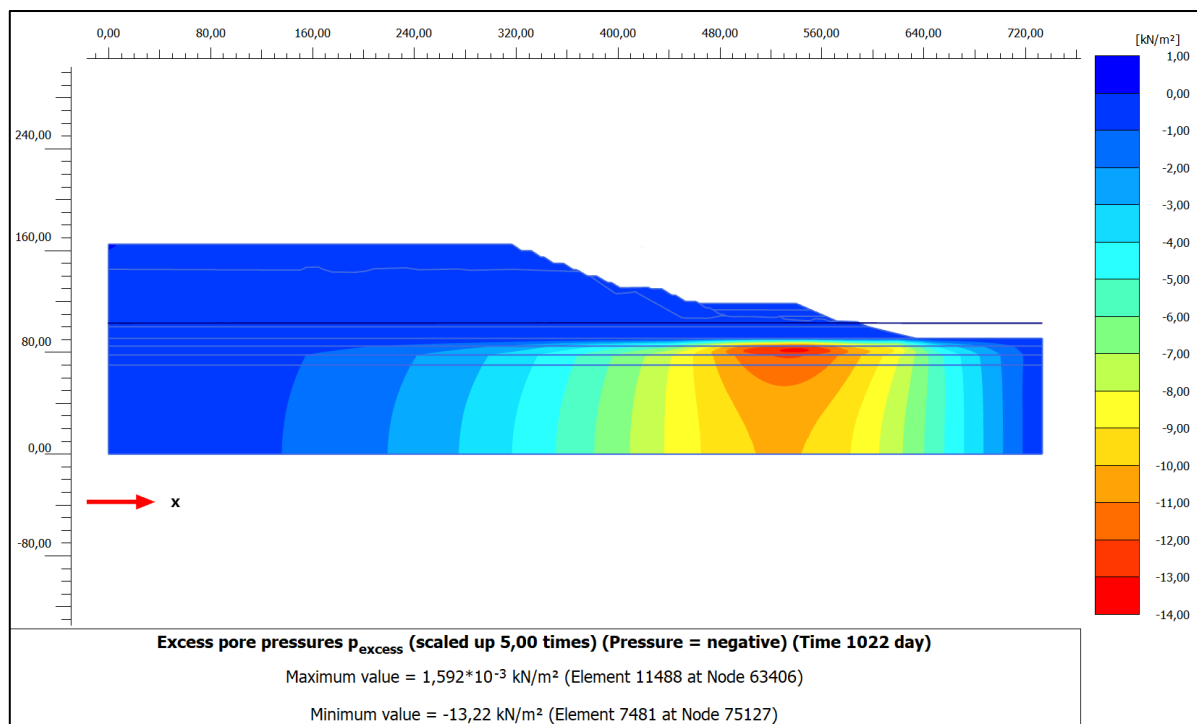


Figure N° 29 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 3^{ème} couche
(Surpressions max= 13,22 kPa)

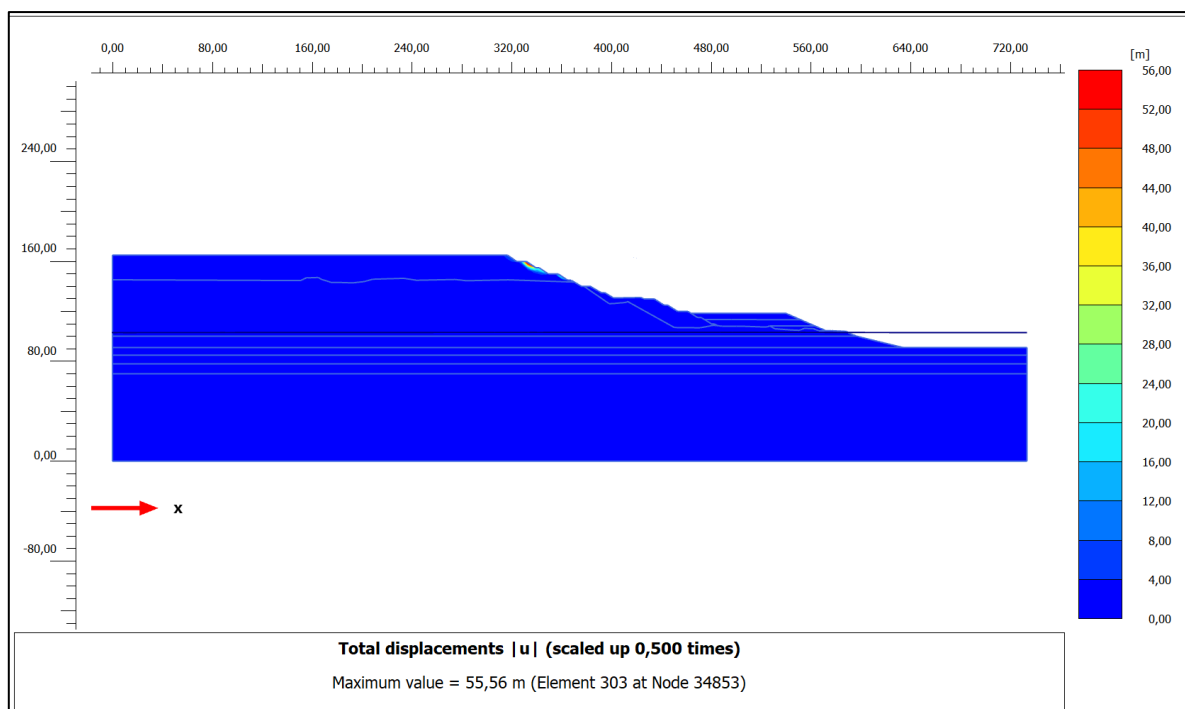


Figure N° 30 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 3^{ème} couche (FS = 2,02)

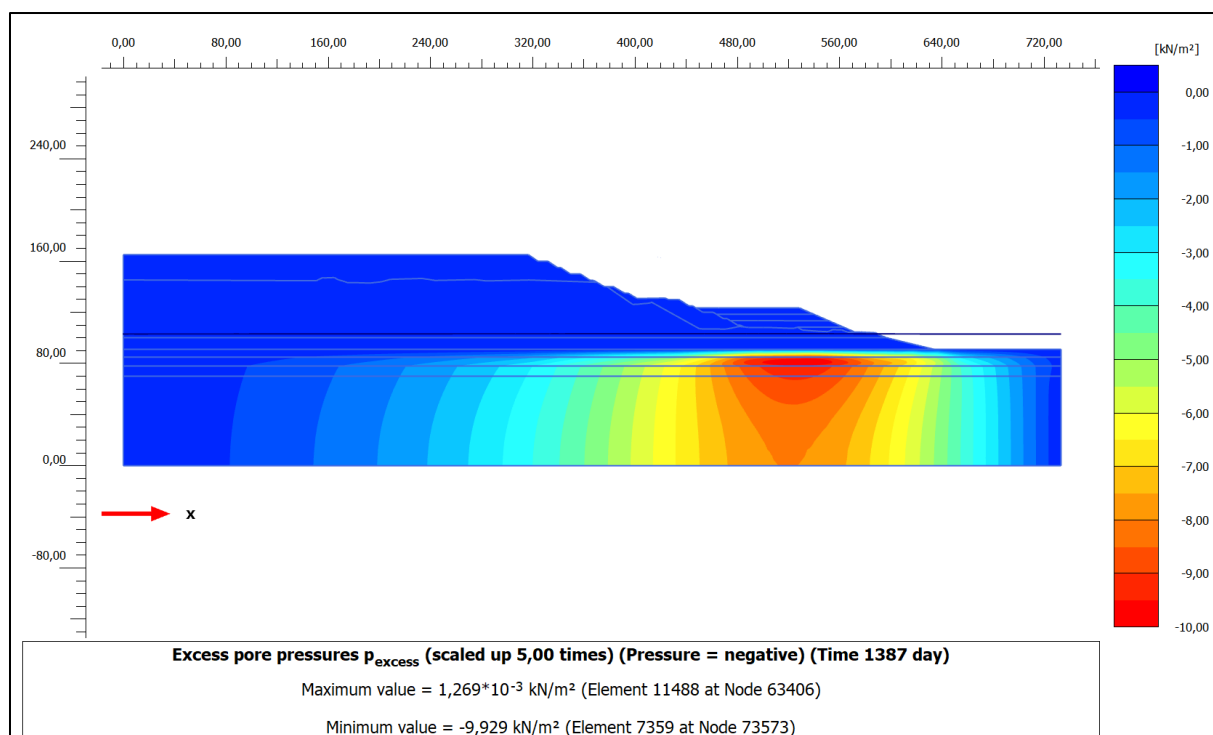


Figure N° 31 :. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 4^{ème} couche
(Surpressions max= 9,929 kPa)

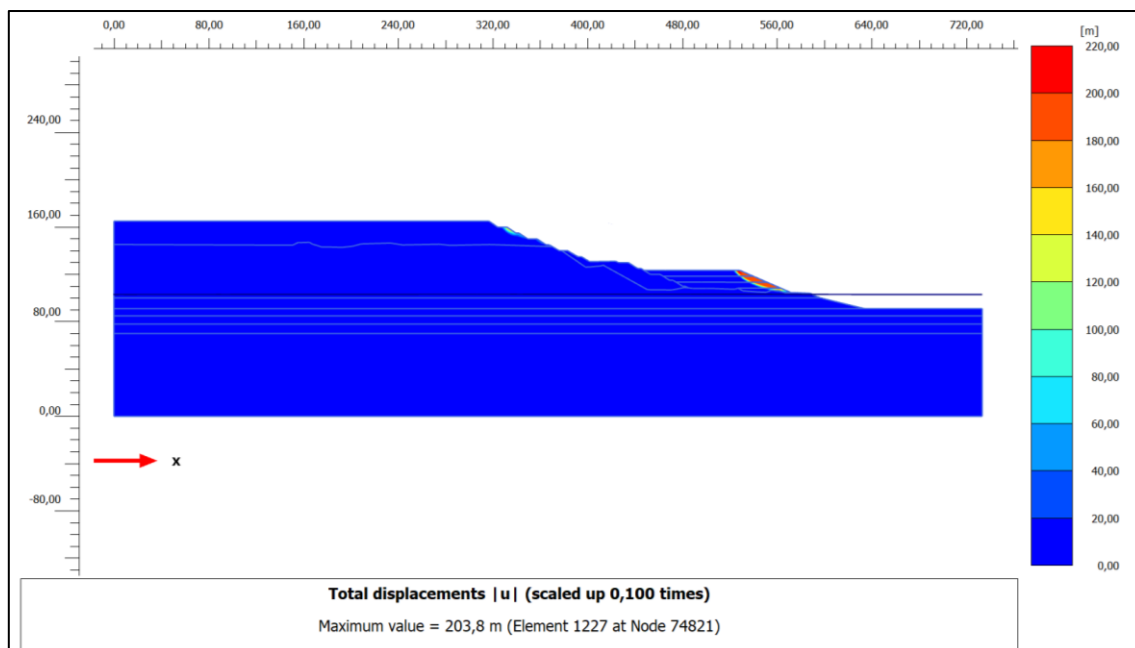


Figure N° 32 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 4^{ème} couche (FS = 1,98)

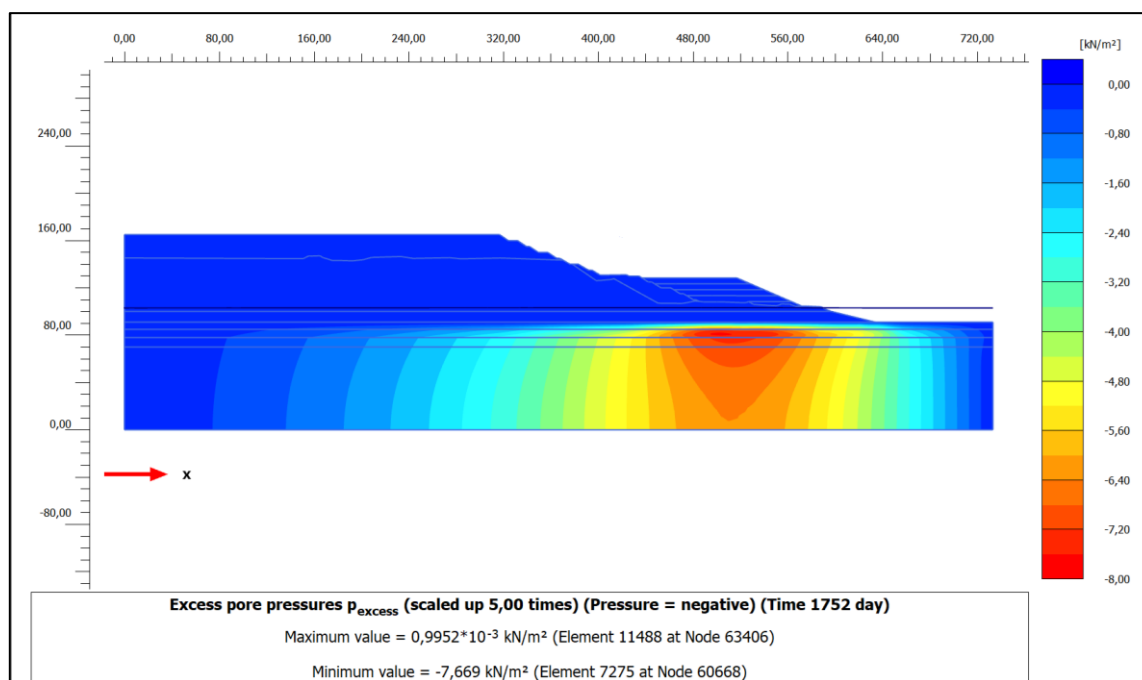


Figure N° 33 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 5^{ème} couche (Surpressions max = 7,669 kPa)

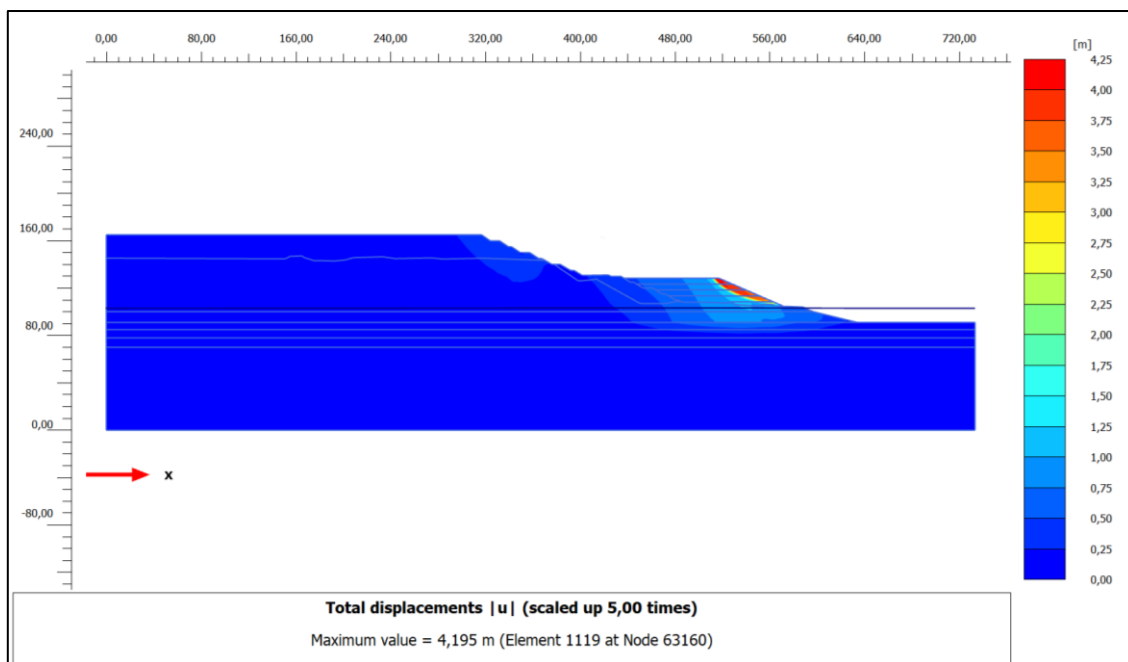


Figure N° 34 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 5^{ème} couche (FS = 1,91)

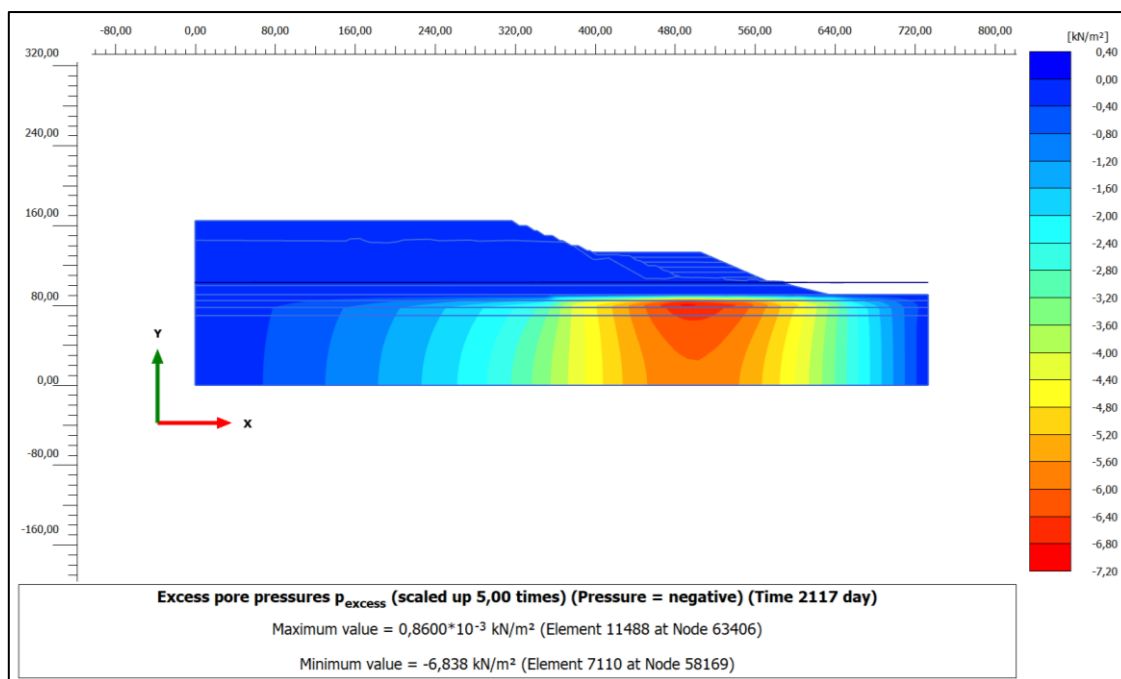


Figure N° 35 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 6^{ème} couche (Surpressions max= 6,838 kPa)

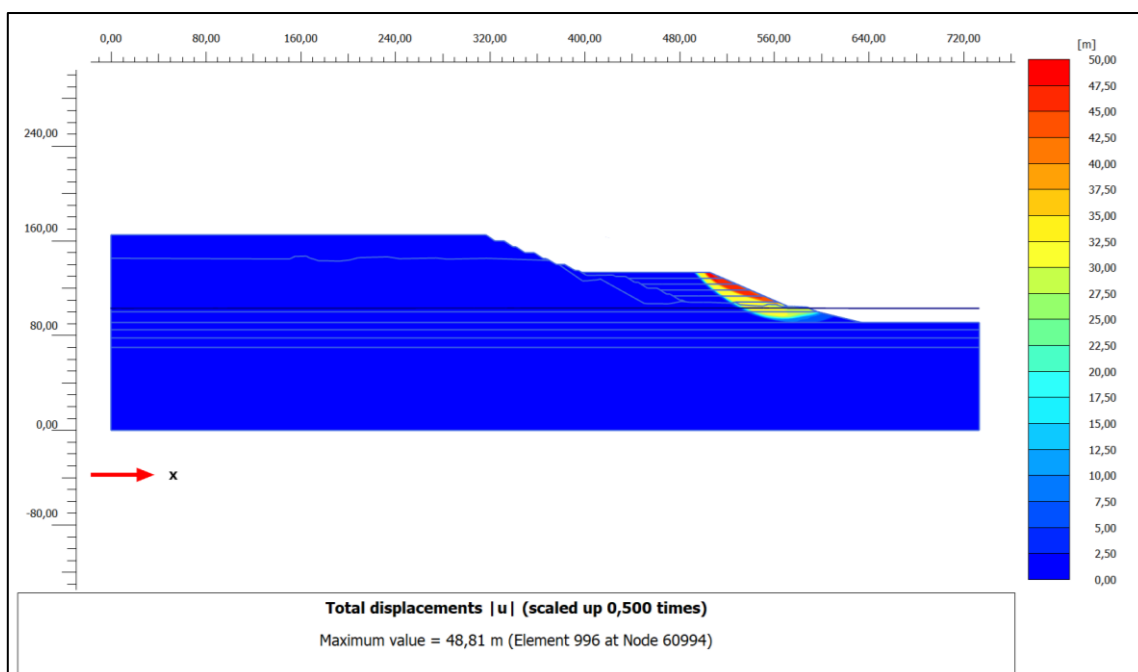


Figure N° 36 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 6^{ème} couche (FS = 1,85)

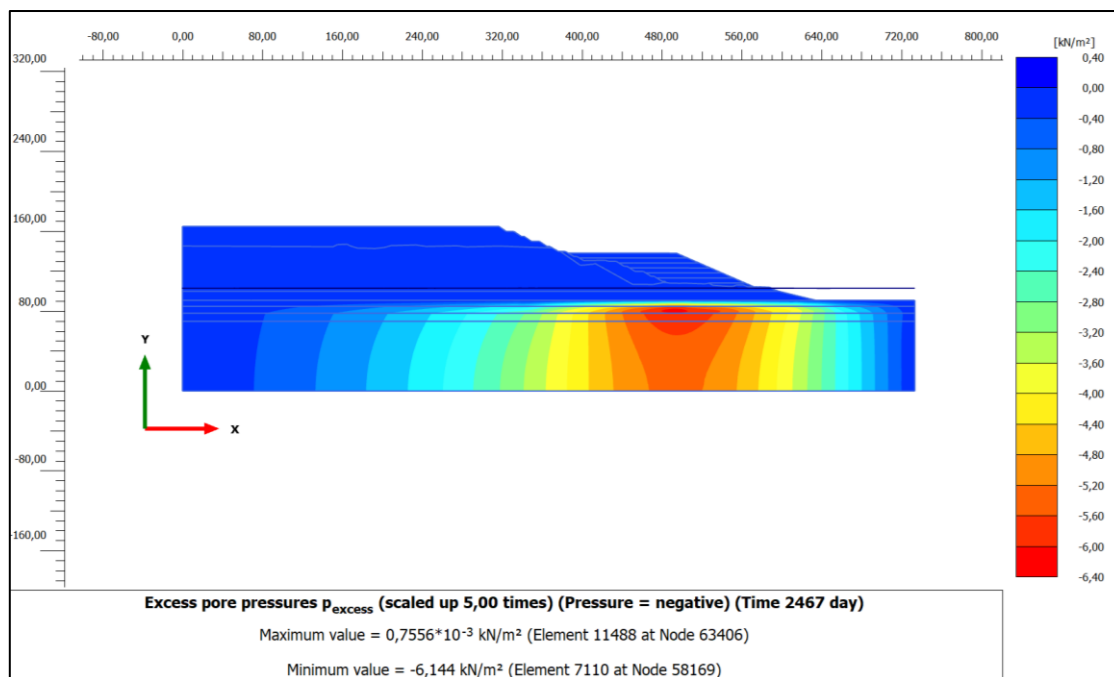


Figure N° 37 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 7^{ème} couche
(Surpressions max= 6,144 kPa)

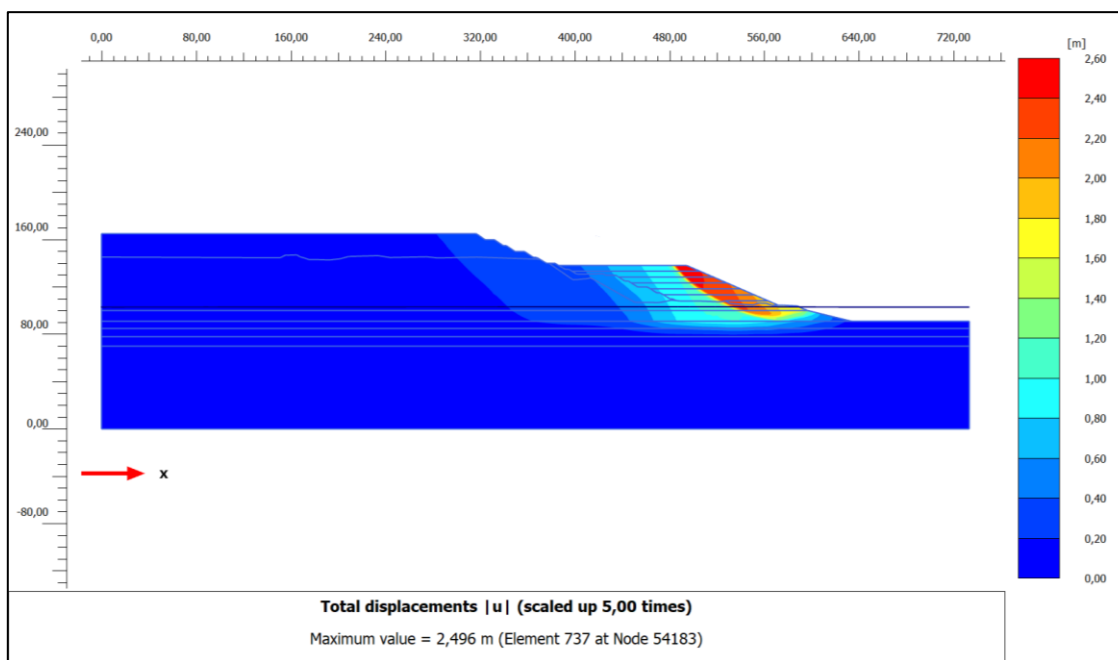


Figure N° 38 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 7^{ème} couche
(FS=1,81)

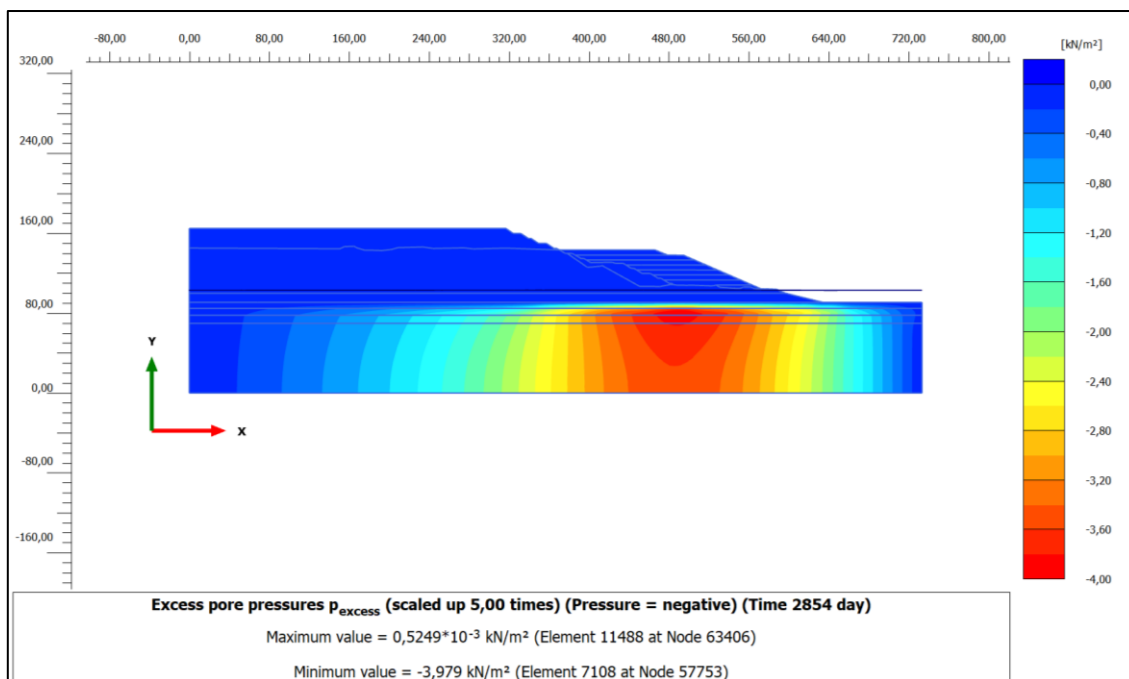


Figure N° 39 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 8^{ème} couche
(Surpressions max= 3,979 kPa)

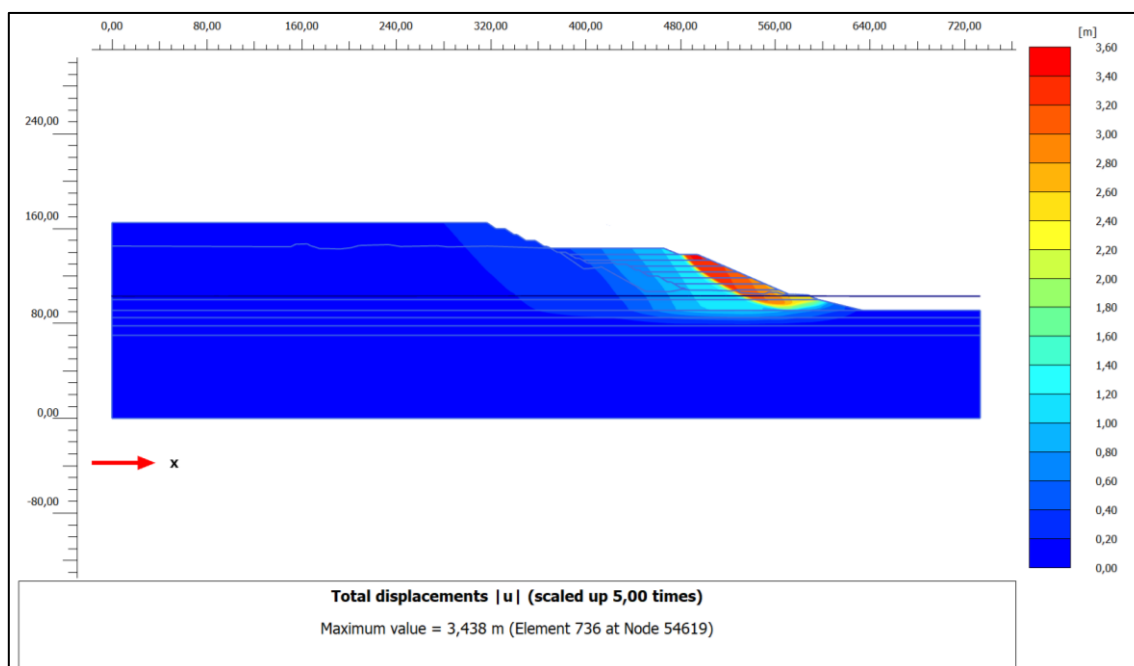


Figure N° 40 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 8^{ème} couche (FS = 1,81)

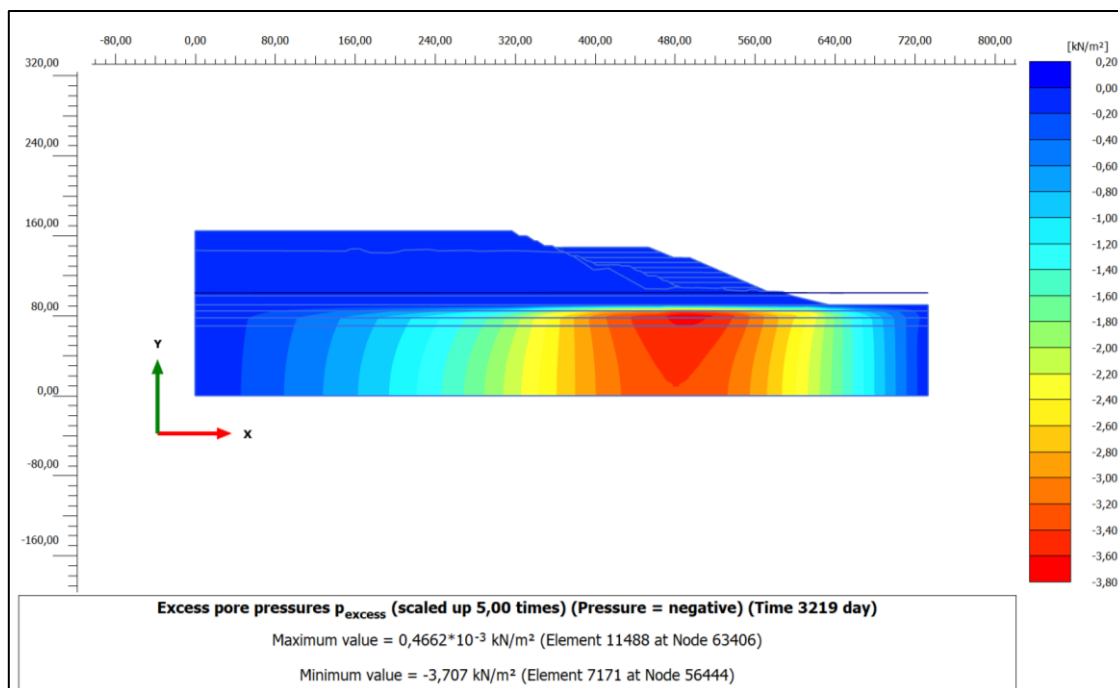


Figure N° 41 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 9^{ème} couche
(Surpressions max= 3,707 kPa)

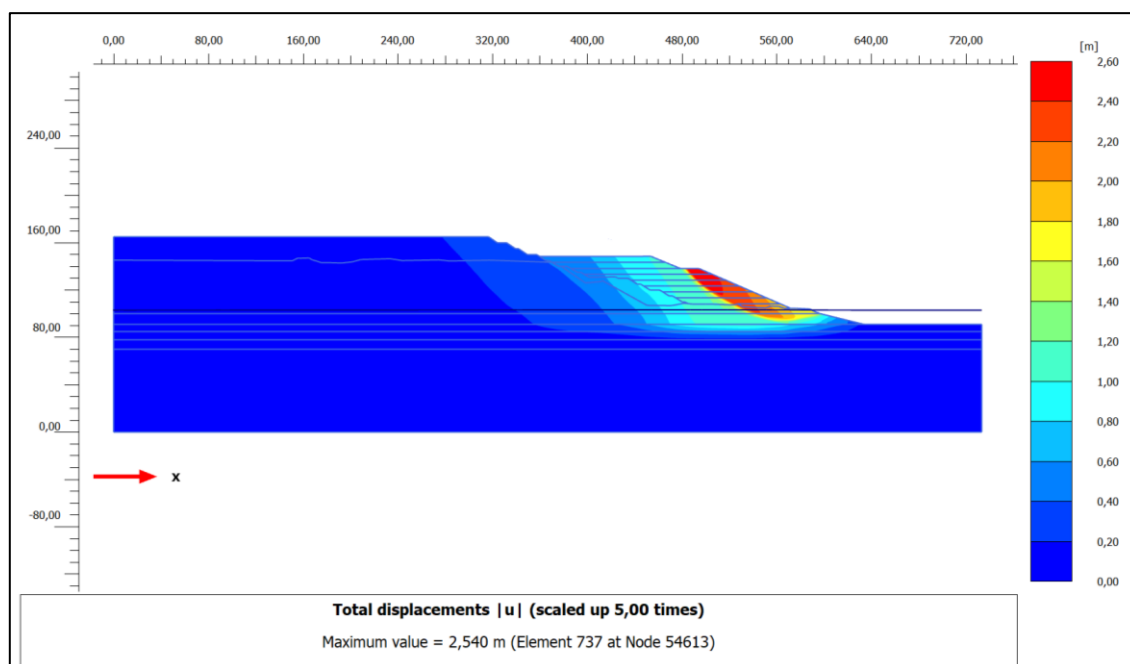


Figure N° 42 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 9^{ème} couche (FS = 1,80)

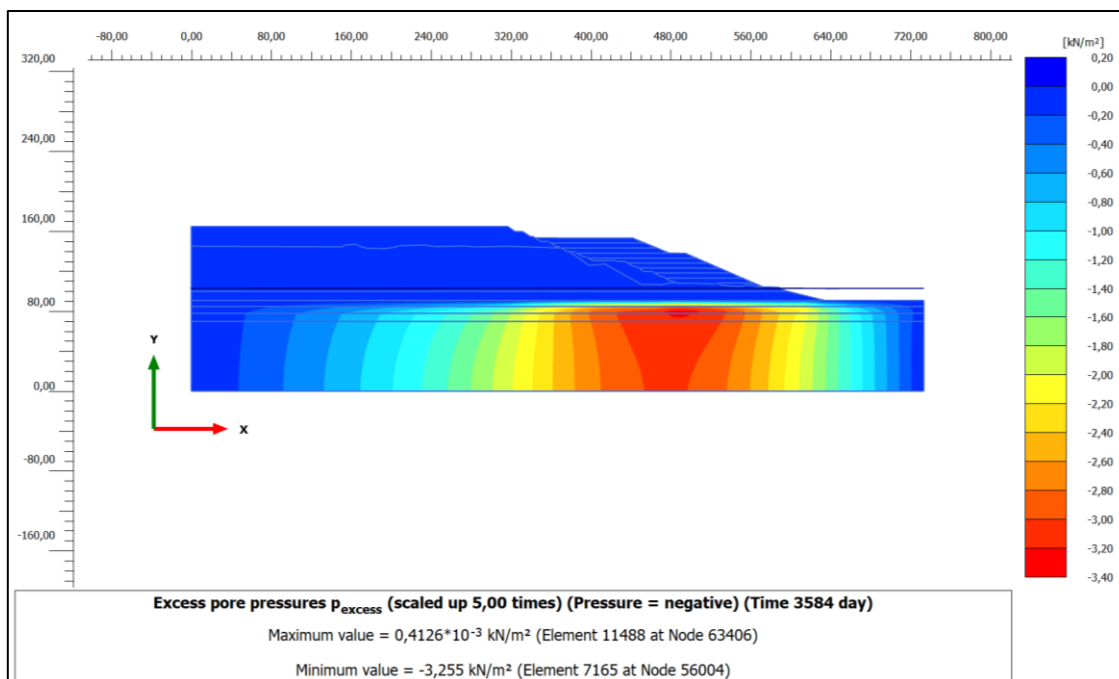


Figure N° 43 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 10^{ème} couche
(Surpressions max= 3,255 kPa)

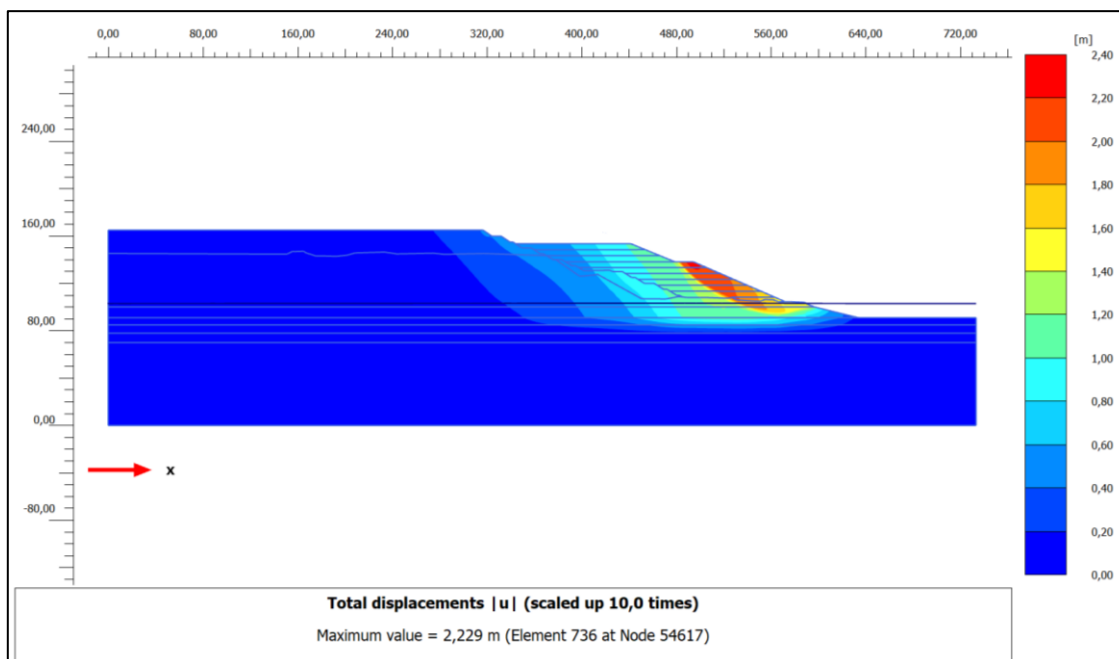


Figure N° 44 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 10^{ème} couche (FS = 1,81)

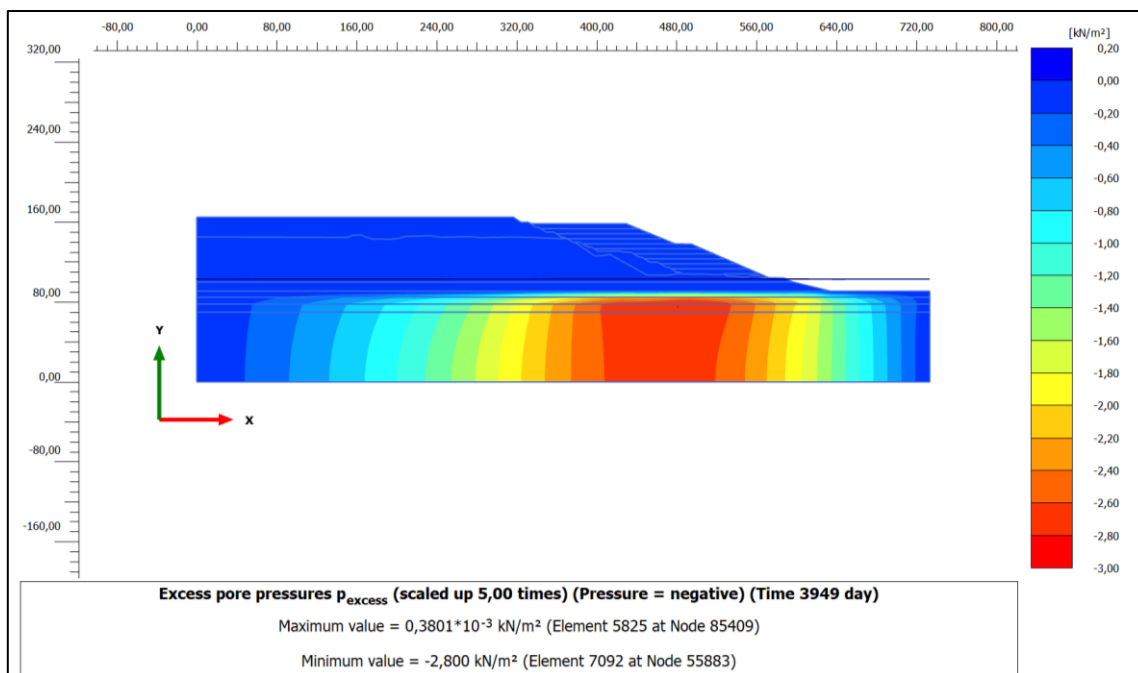


Figure N° 45 :. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 11^{ème} couche
(Surpressions max= 2,8 kPa)

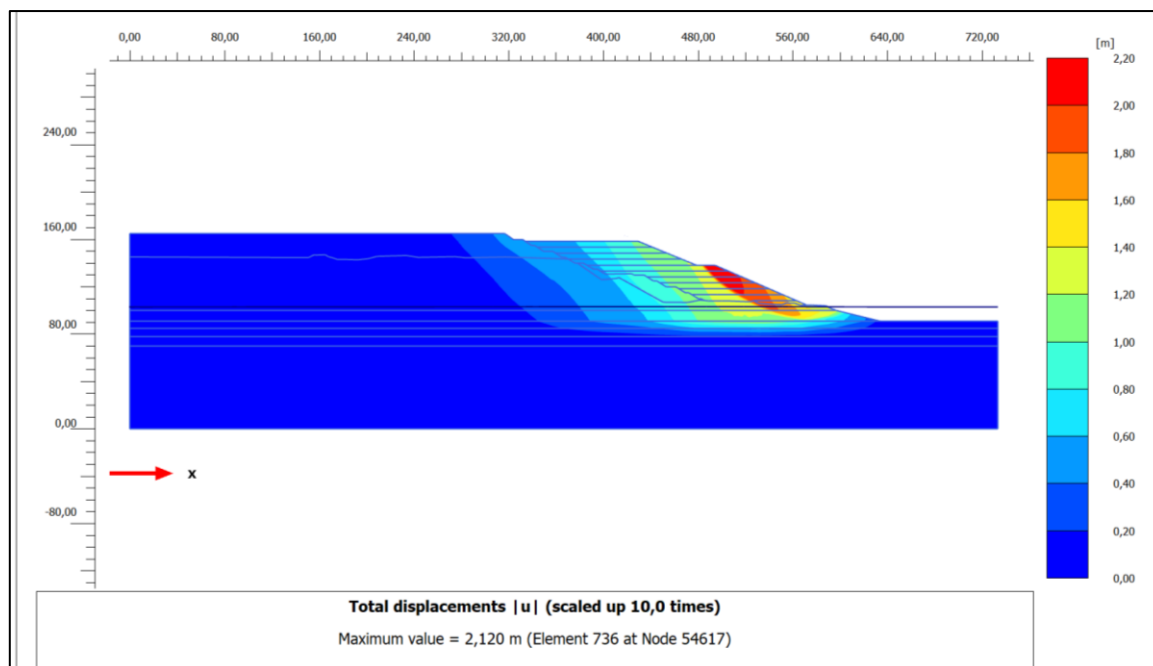


Figure N° 46 :. Surface de glissement préférentiel après la construction de la 11^{ème} couche (FS = 1,80)

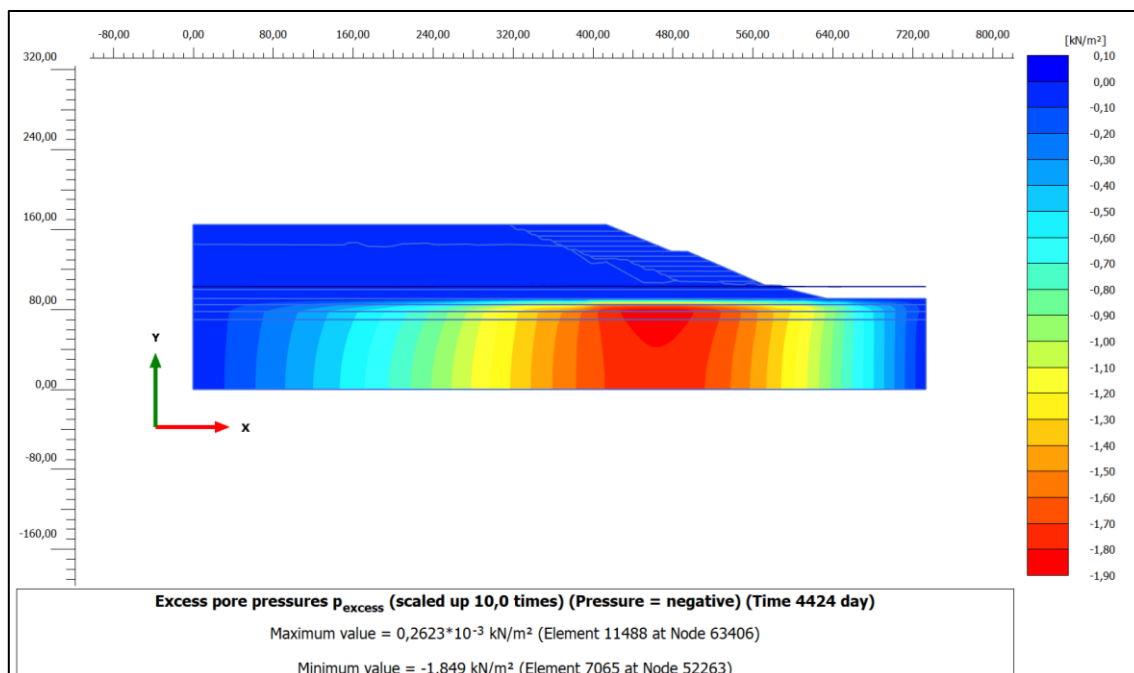


Figure N° 47 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 12^{ème} couche
(Surpressions max= 1,849 kPa)

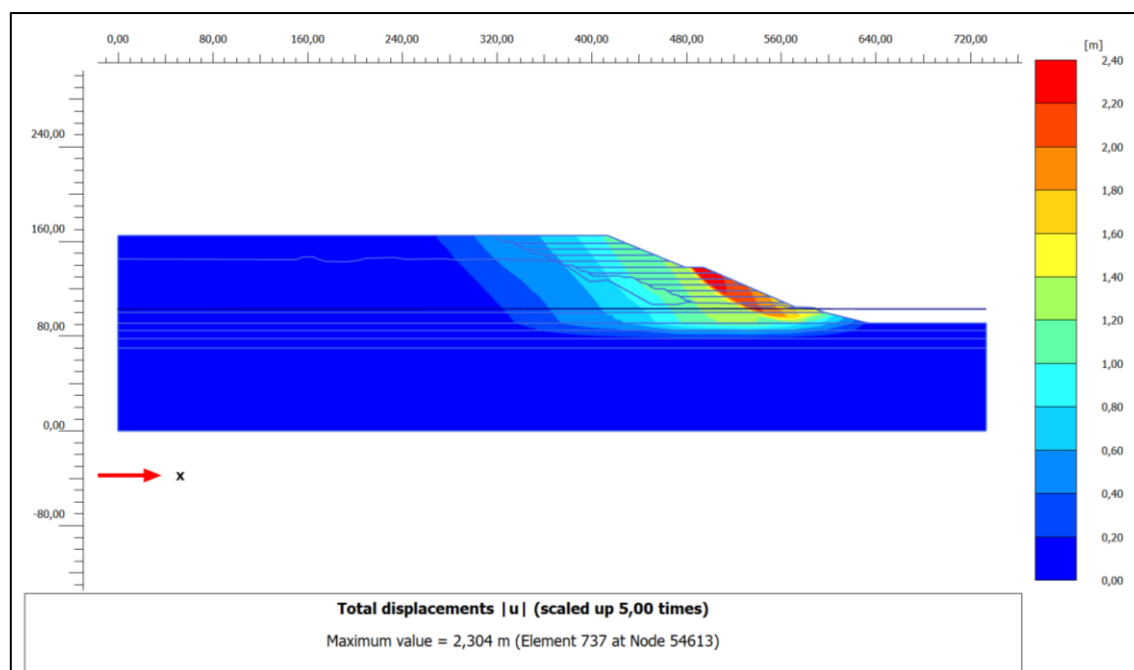


Figure N° 48 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 12^{ème} couche
(FS = 1,80)

**ANNEXE N°3 : SORTIES GEOSLOPE – CALCUL LONG TERME DE
LA PHASE 1**

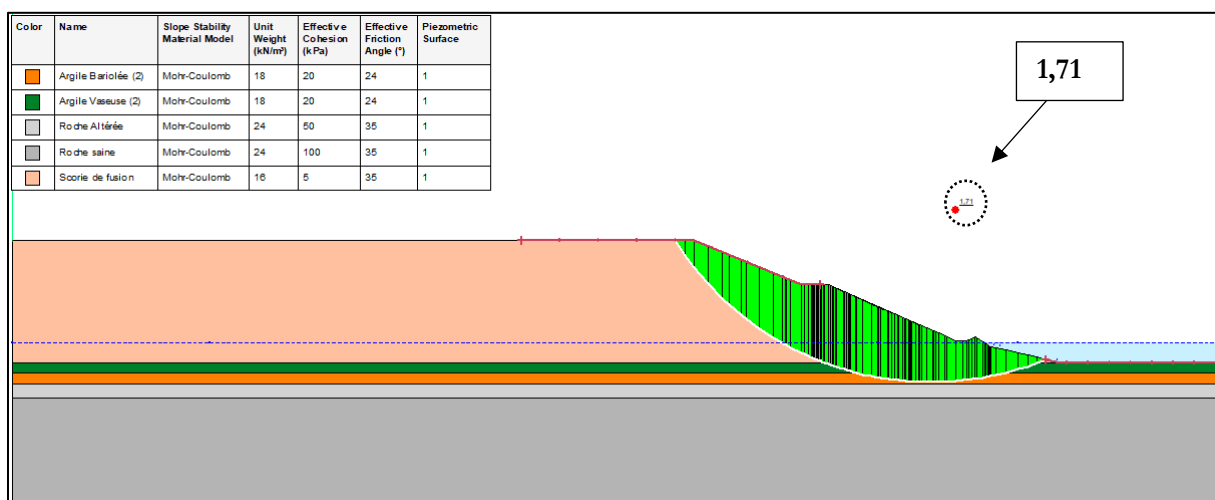


Figure N° 49. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées (Coupe 1, FS =1,71)

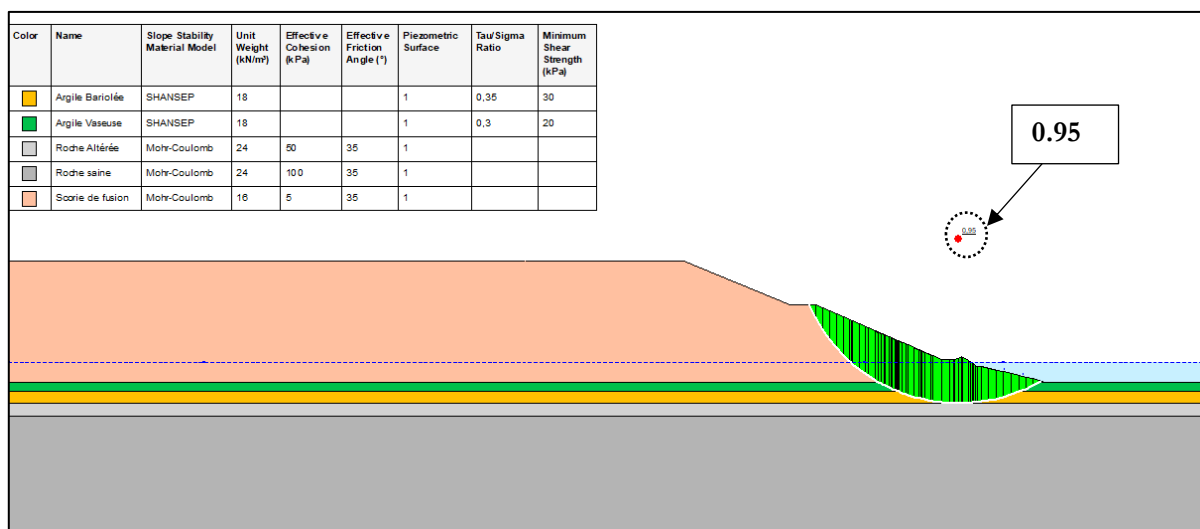


Figure N° 50. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme allégeant (Coupe 1, FS =0,95)

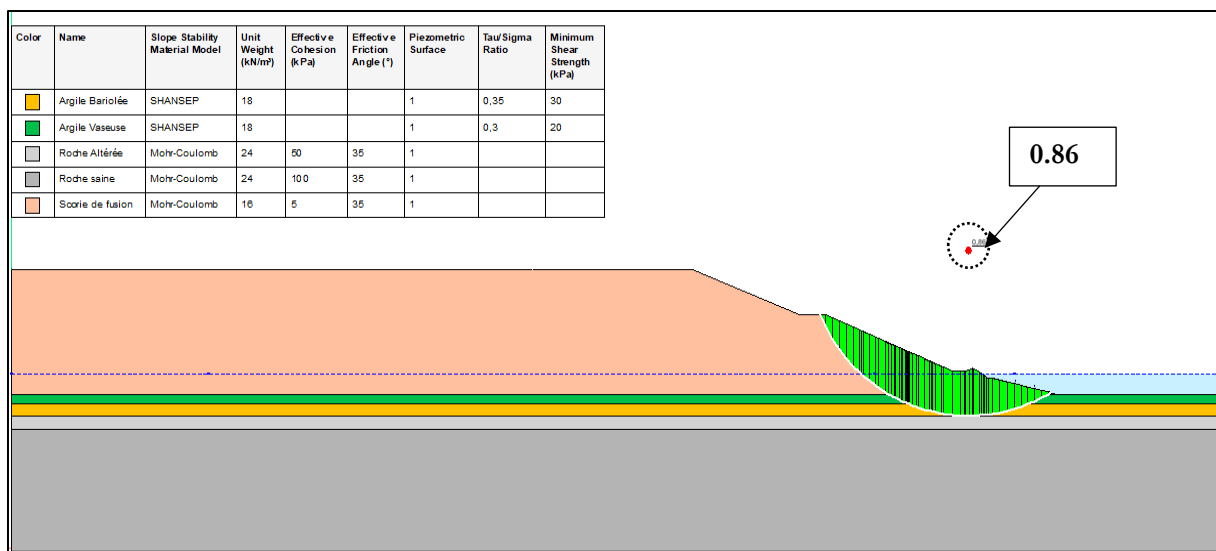


Figure N° 51. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme pesant (Coupe 1, FS =0,86)

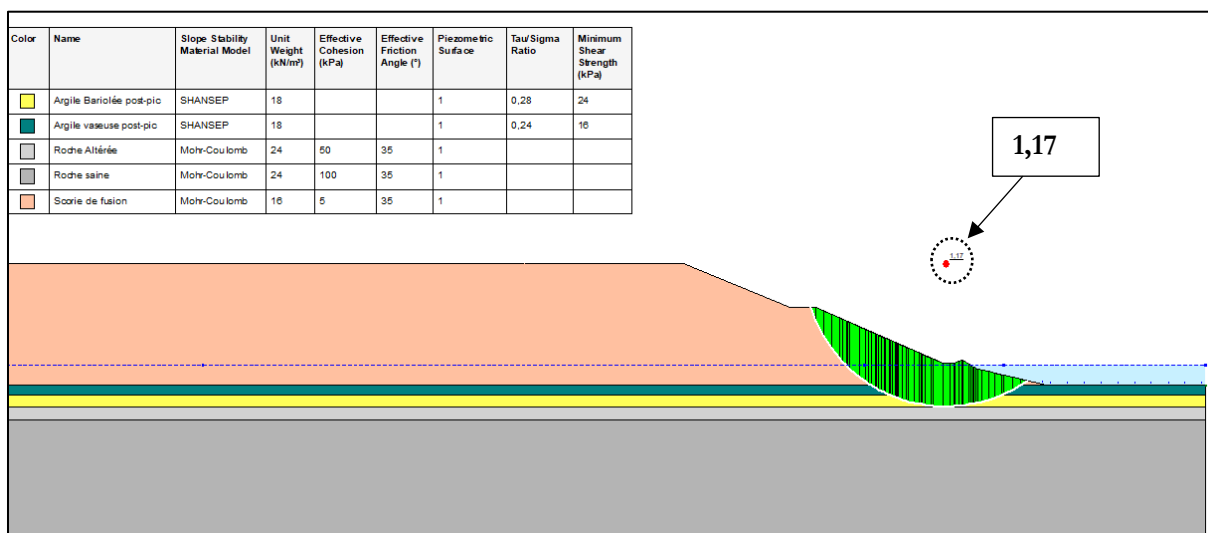


Figure N° 52. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation post-sismique (Coupe 1, FS =1,17)

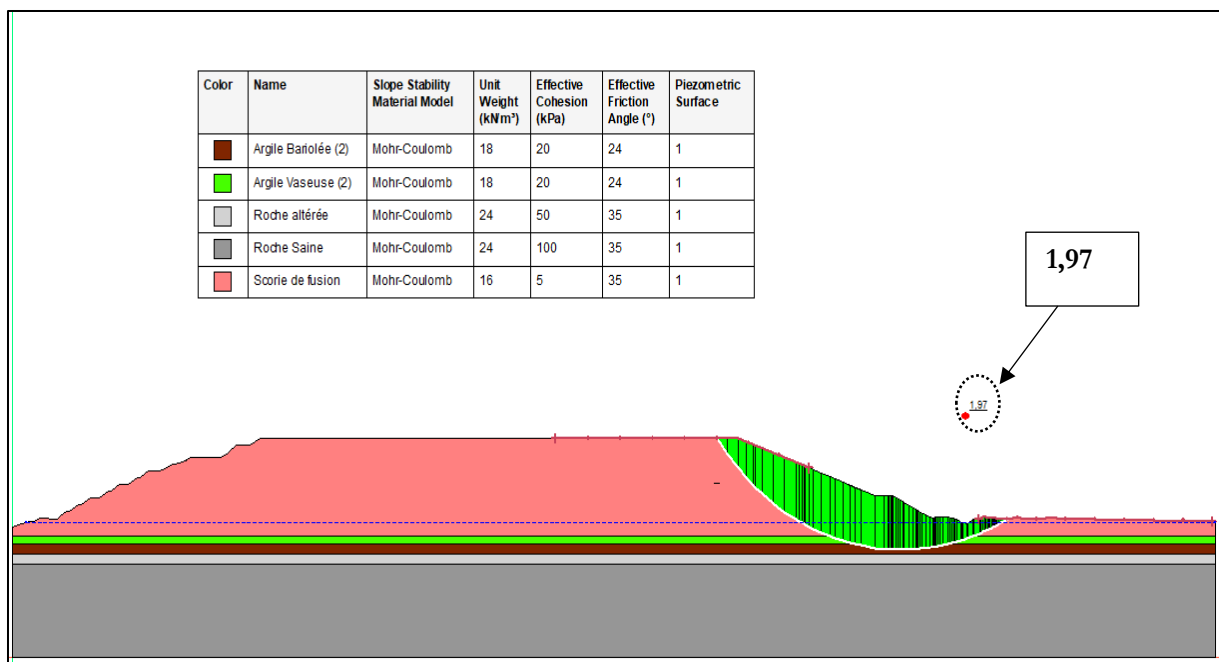


Figure N° 53. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées
(Coupe 2, FS =1,97)

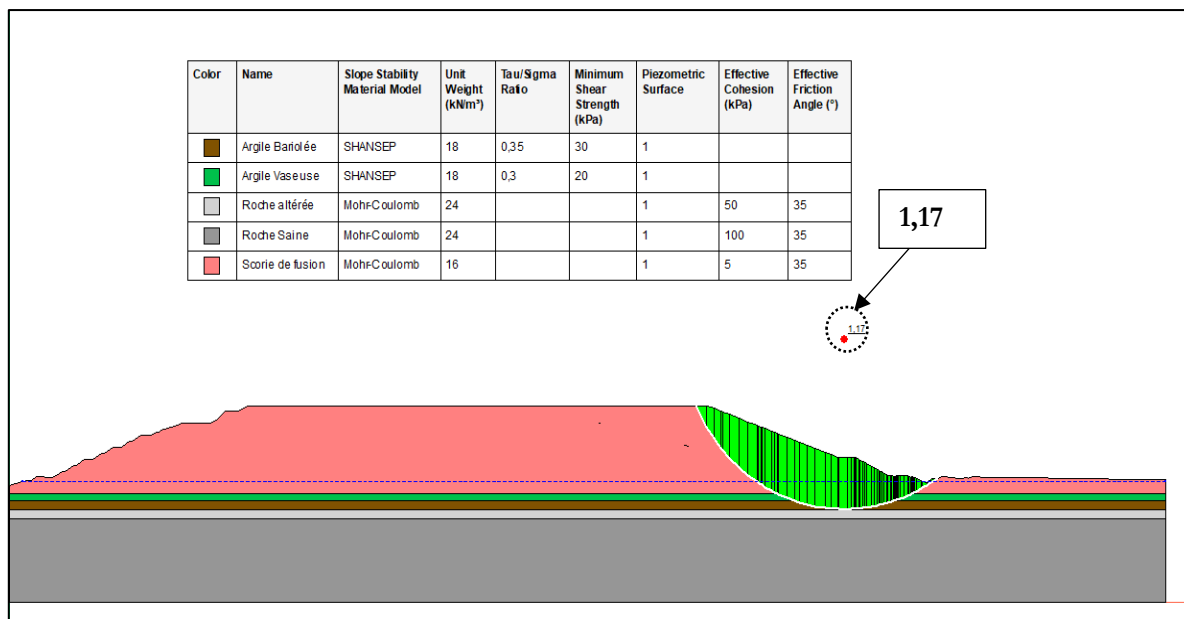


Figure N° 54 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme allégeant (Coupe 2, FS =1,17)

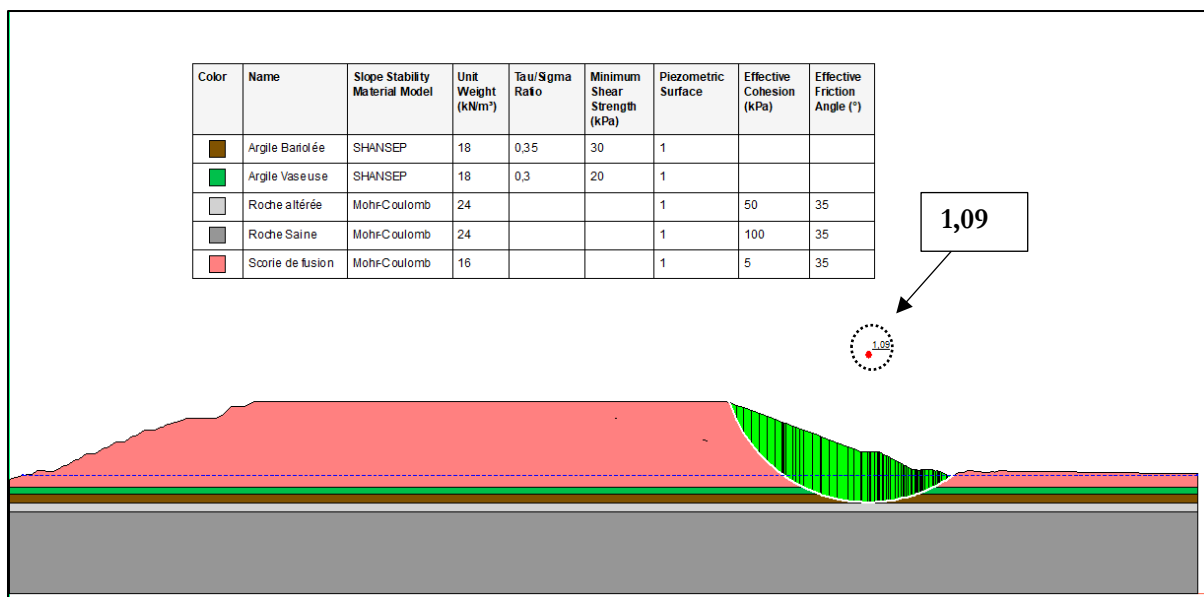


Figure N° 55 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme pesant (Coupe 2, FS =1,09)

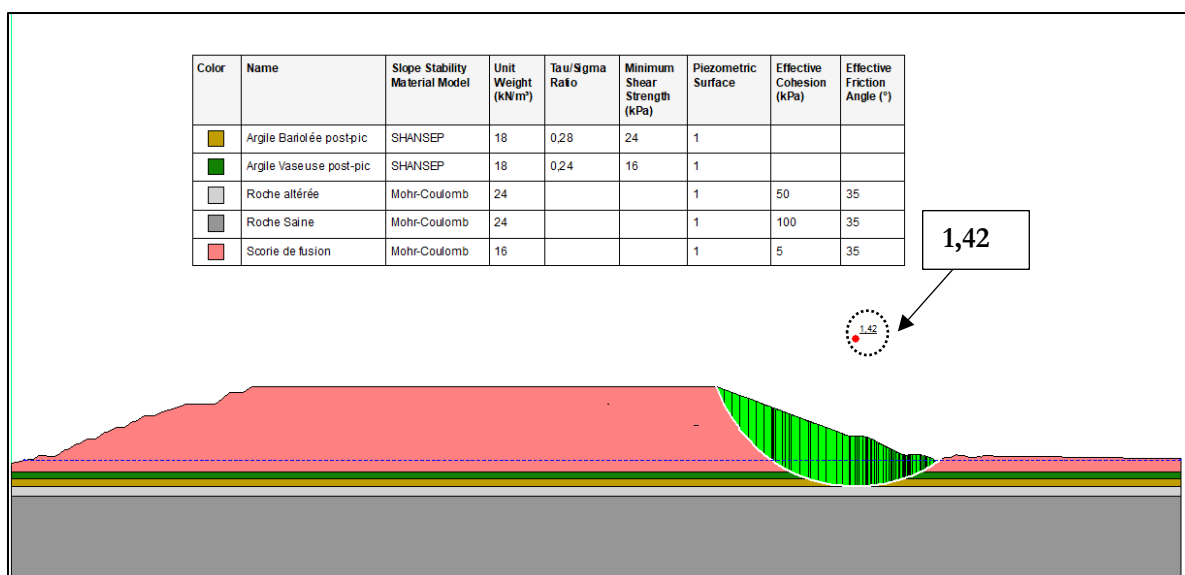


Figure N° 56 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation post-sismique (Coupe 2, FS =1,42)

**ANNEXE N°5 : : SORTIES PLAXIS – CALCUL EN COURS DE
CONSTRUCTION DE LA PHASE 2**

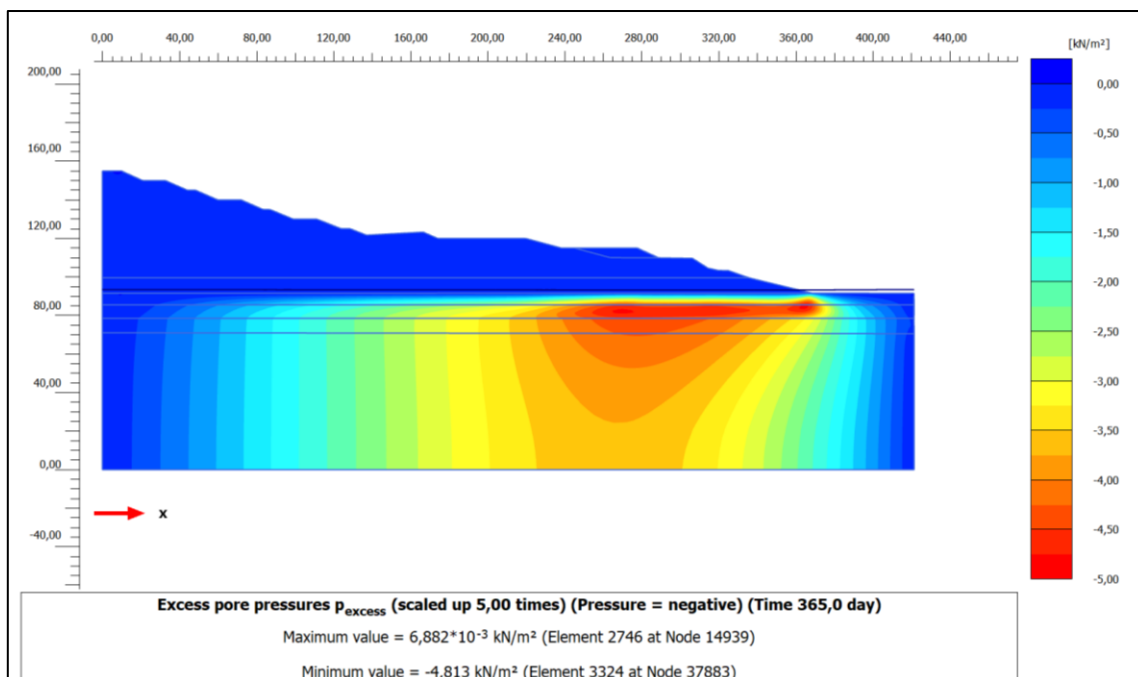


Figure N° 57 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 1^{ère} couche
(Surpressions max= 4,813 kPa)

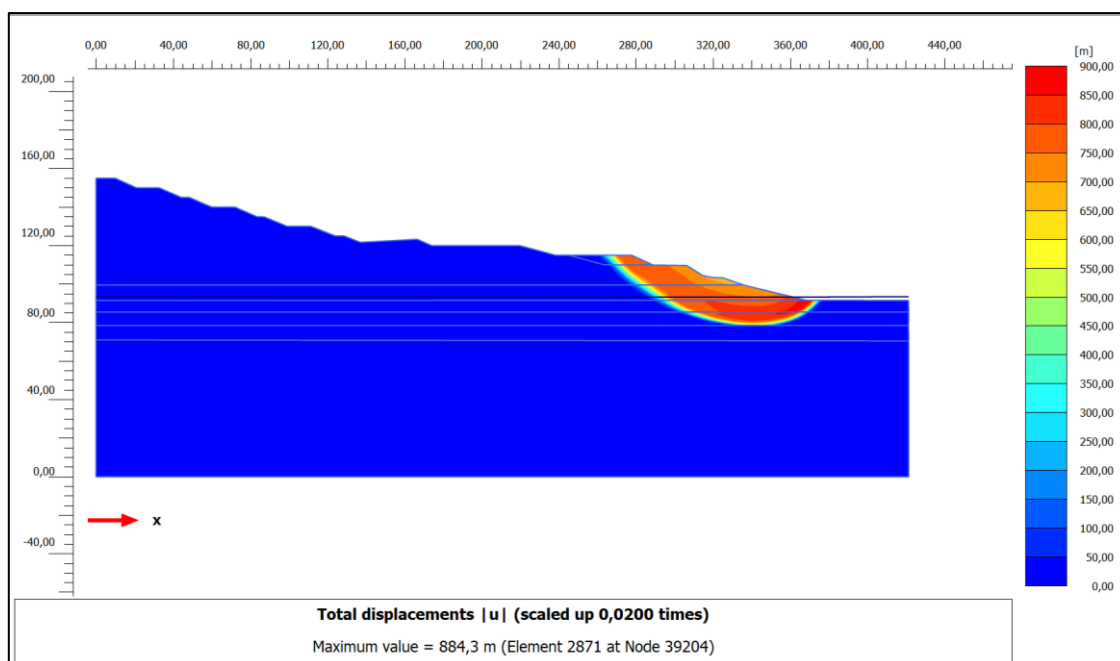


Figure N° 58 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 1^{ère} couche
(FS = 2,05)

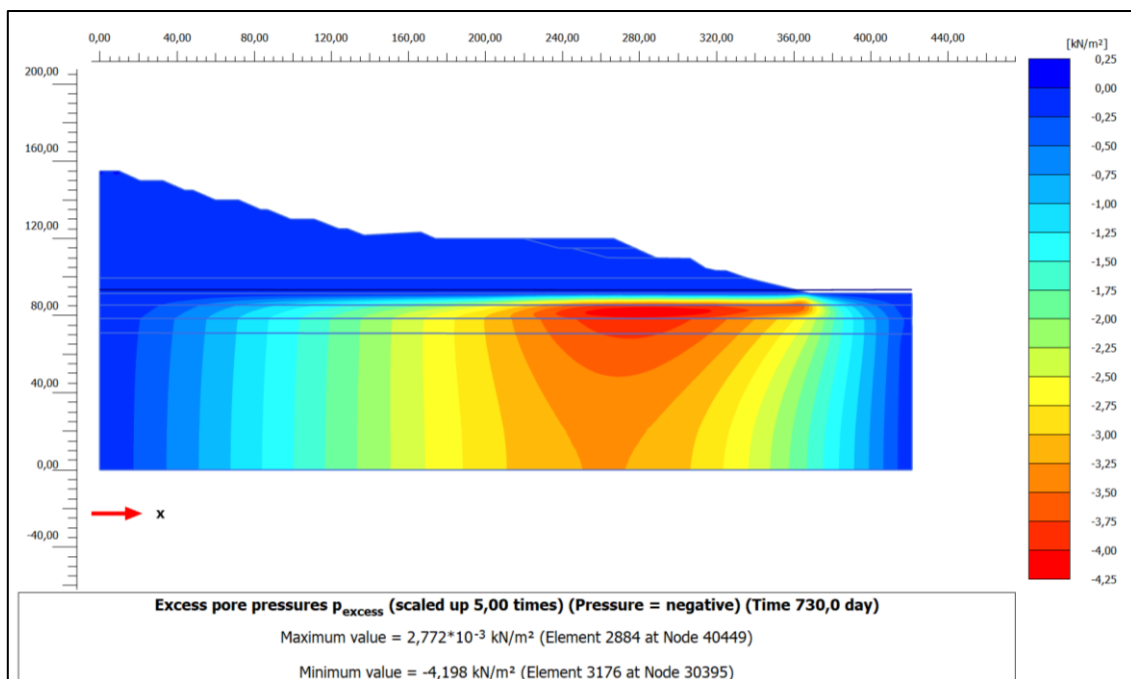


Figure N° 59 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 2^{ème} couche
(Surpressions max= 4,198 kPa)

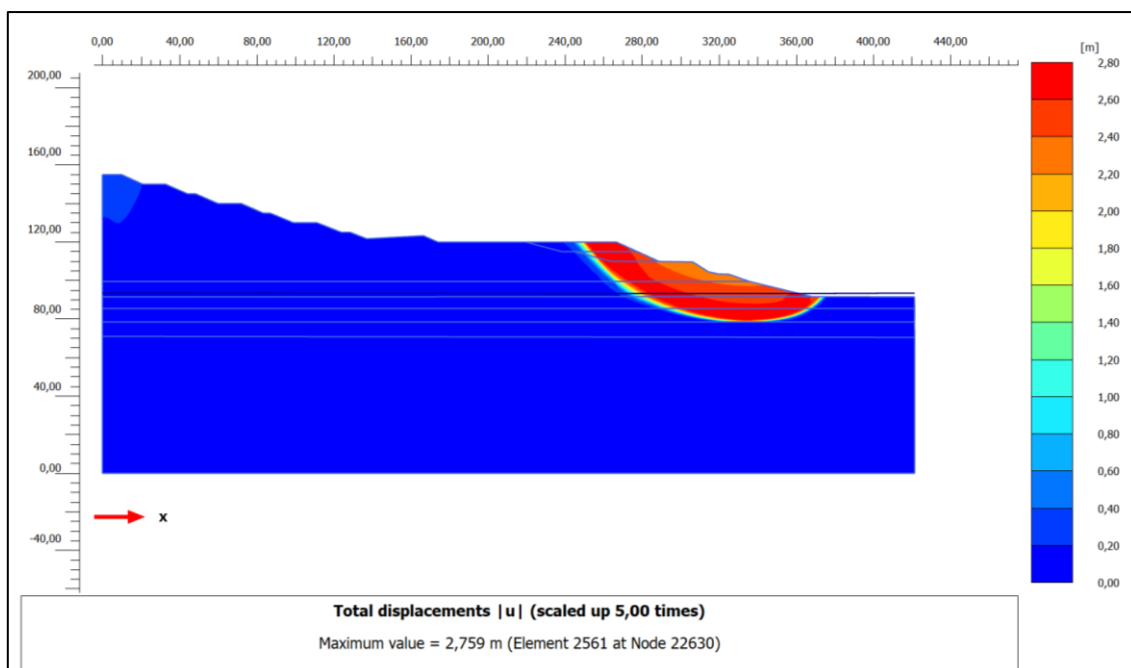


Figure N° 60 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 2^{ème} couche (FS = 1,95)

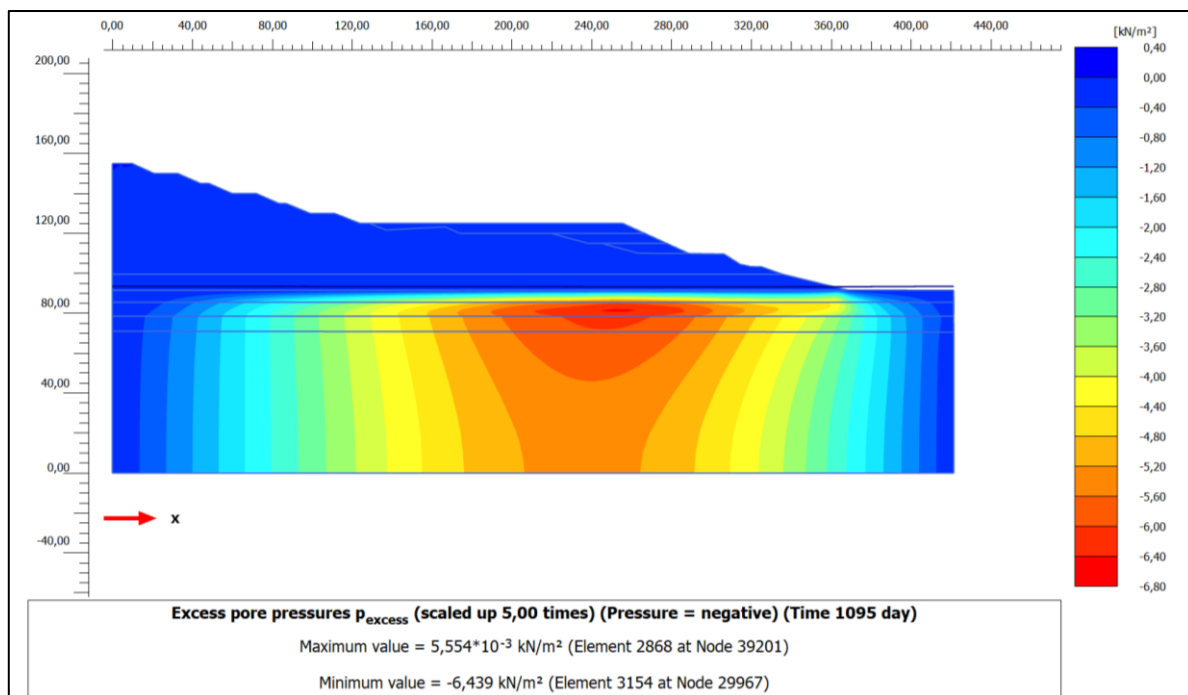


Figure N° 61 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 3^{ème} couche
(Surpressions max= 6,439 kPa)

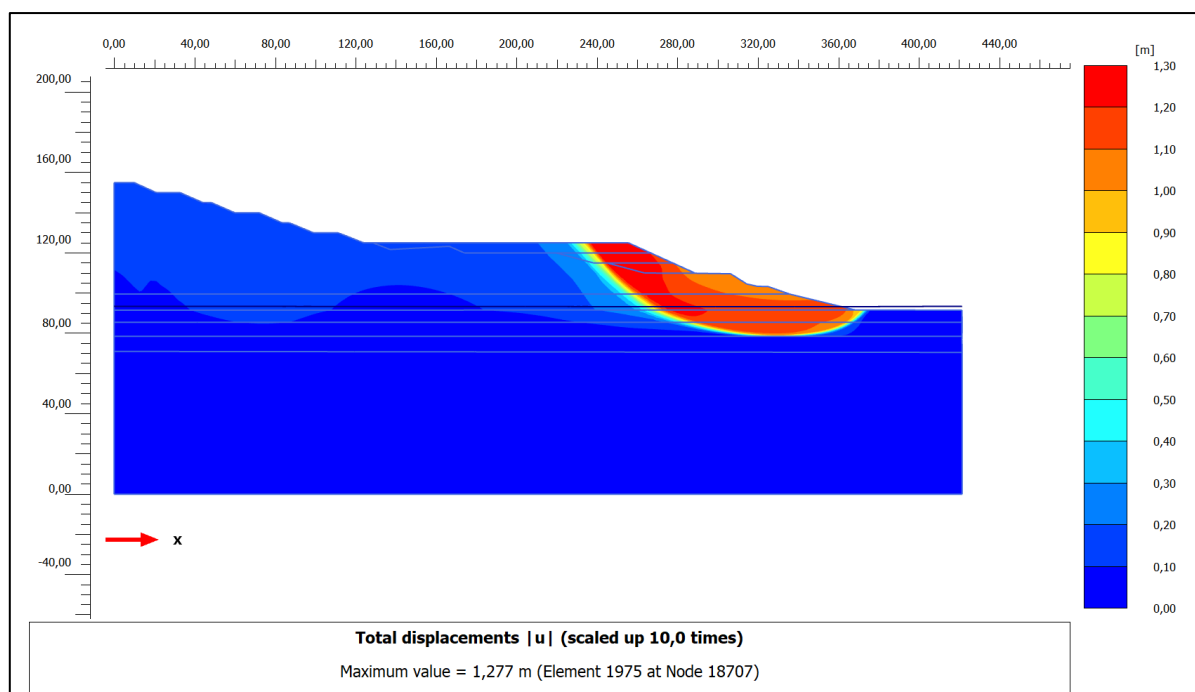


Figure N° 62 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 3^{ème} couche (FS = 1,84)

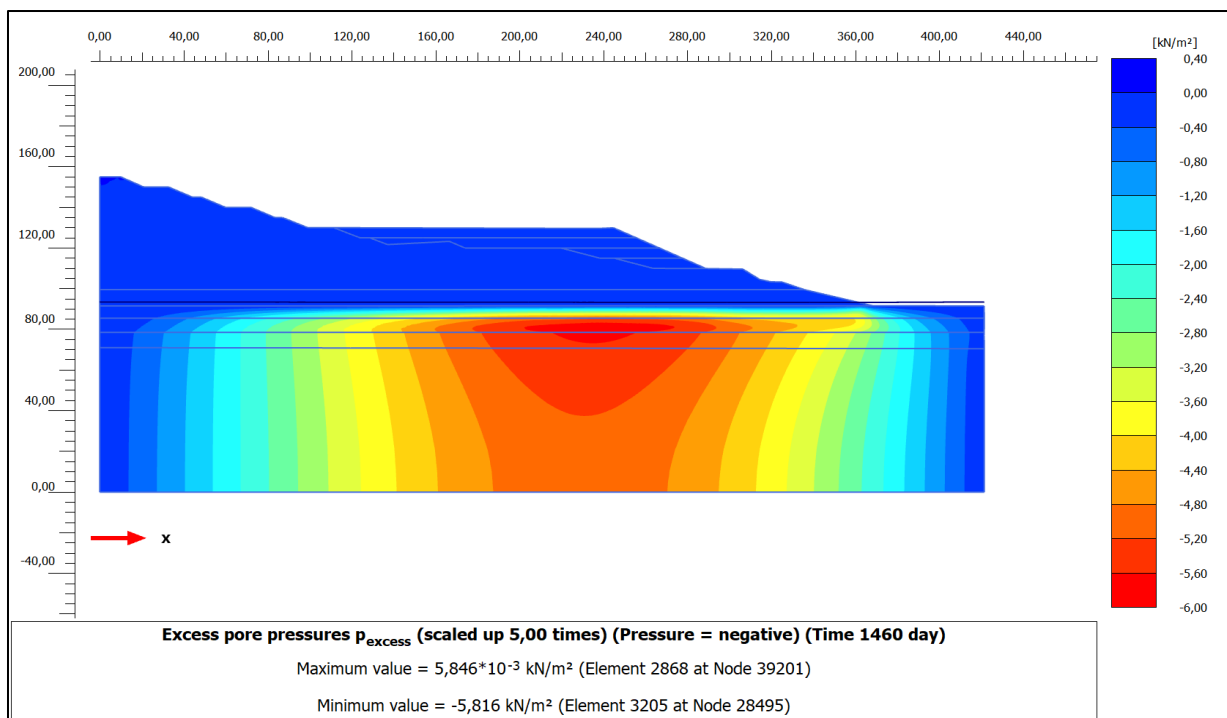


Figure N° 63 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 4^{ème} couche
Surpressions max= 5,816 kPa)

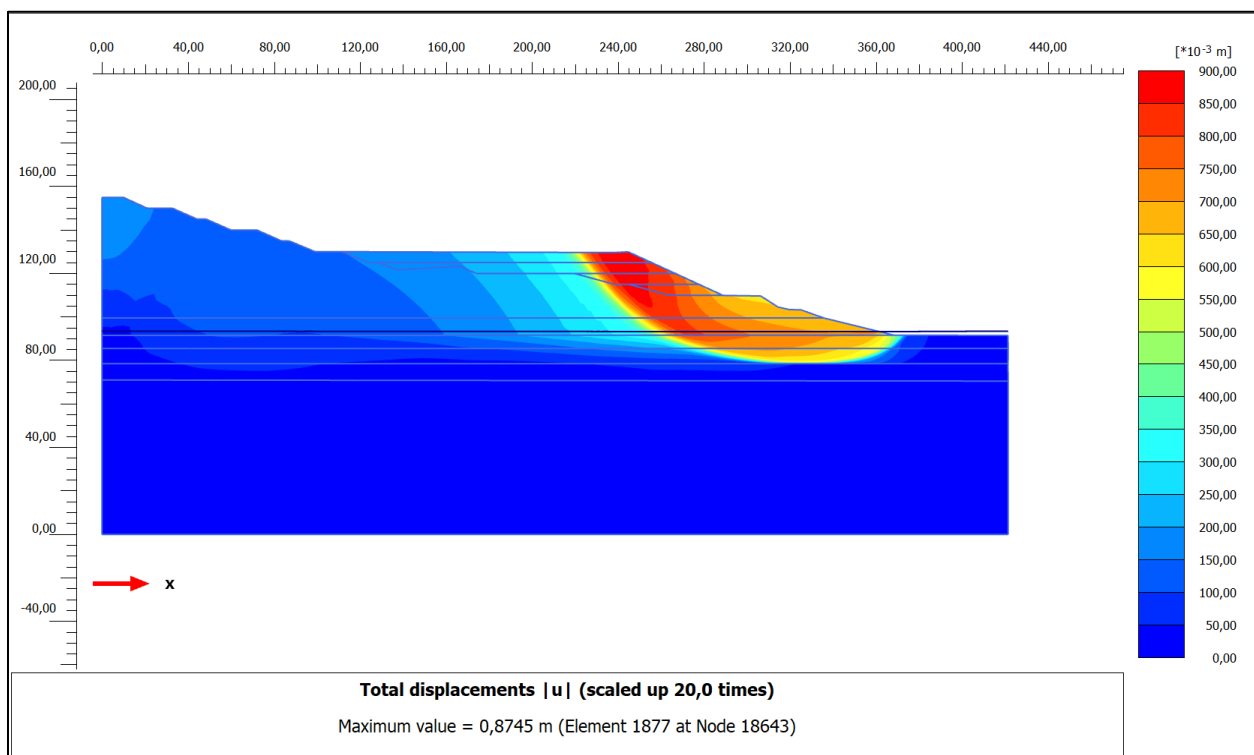


Figure N° 64 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 4^{ème} couche
(FS = 1,76)

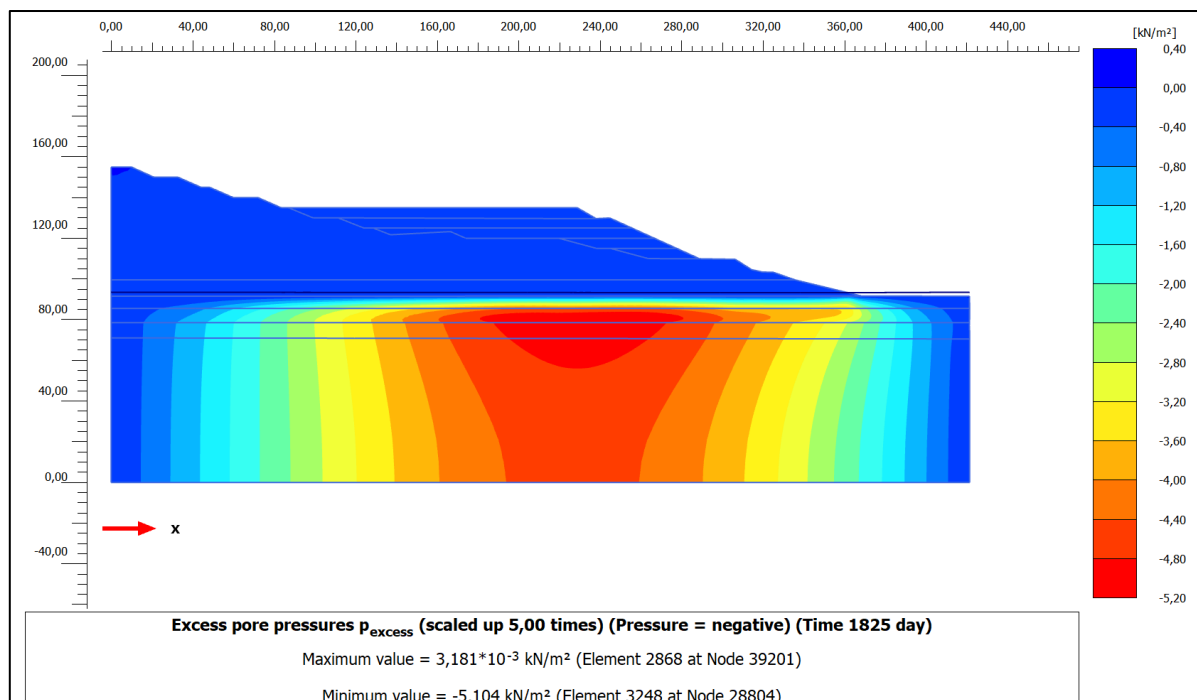


Figure N° 65 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 5^{ème} couche
(Surpressions max= 5,104 kPa)

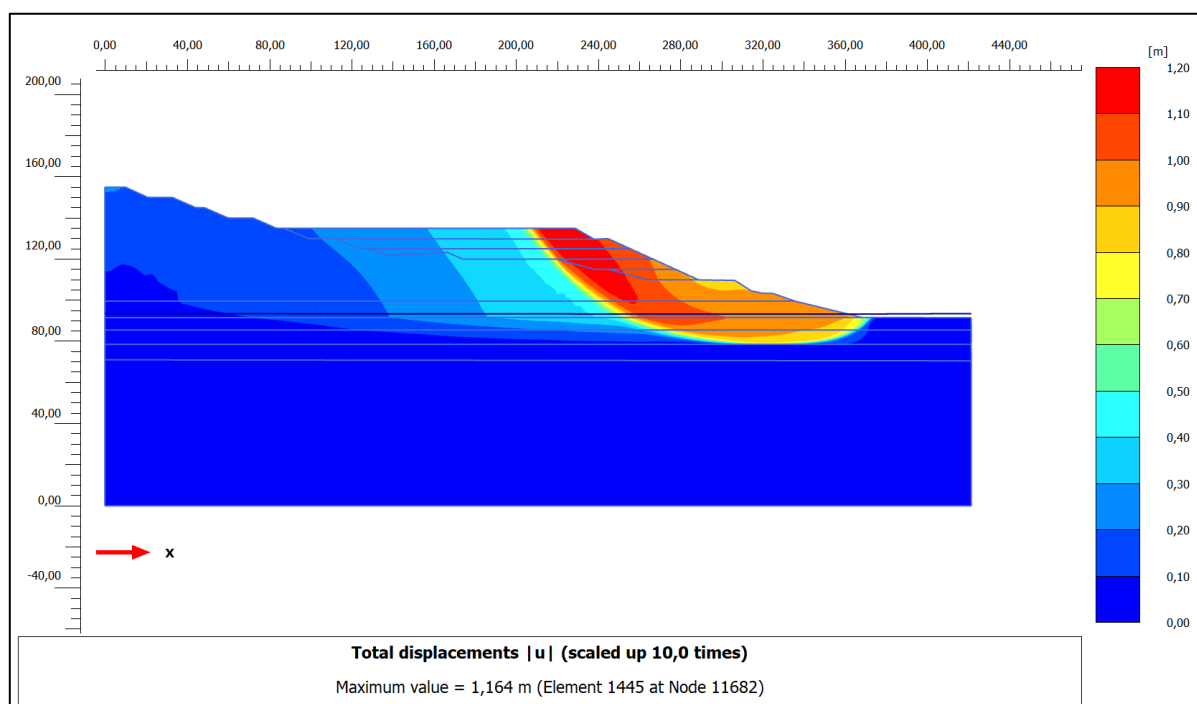


Figure N° 66 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 5^{ème} couche (FS = 1,73)

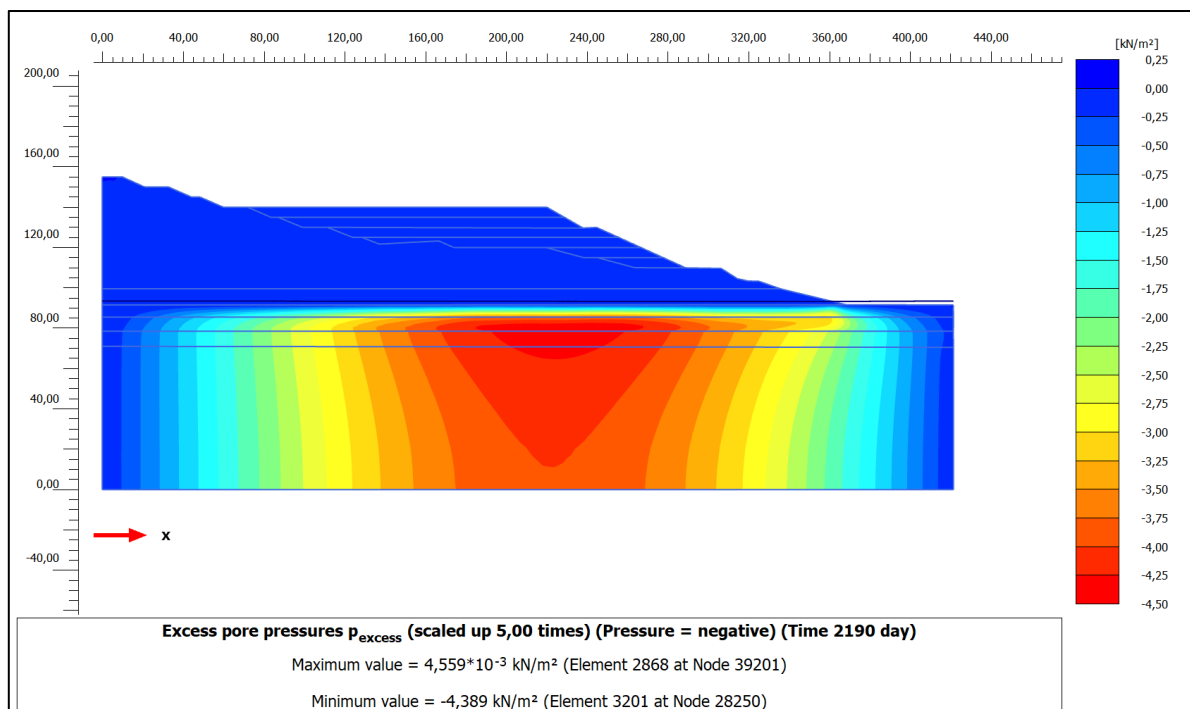


Figure N° 67 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 6ème couche
(Surpressions max= 4,389 kPa)

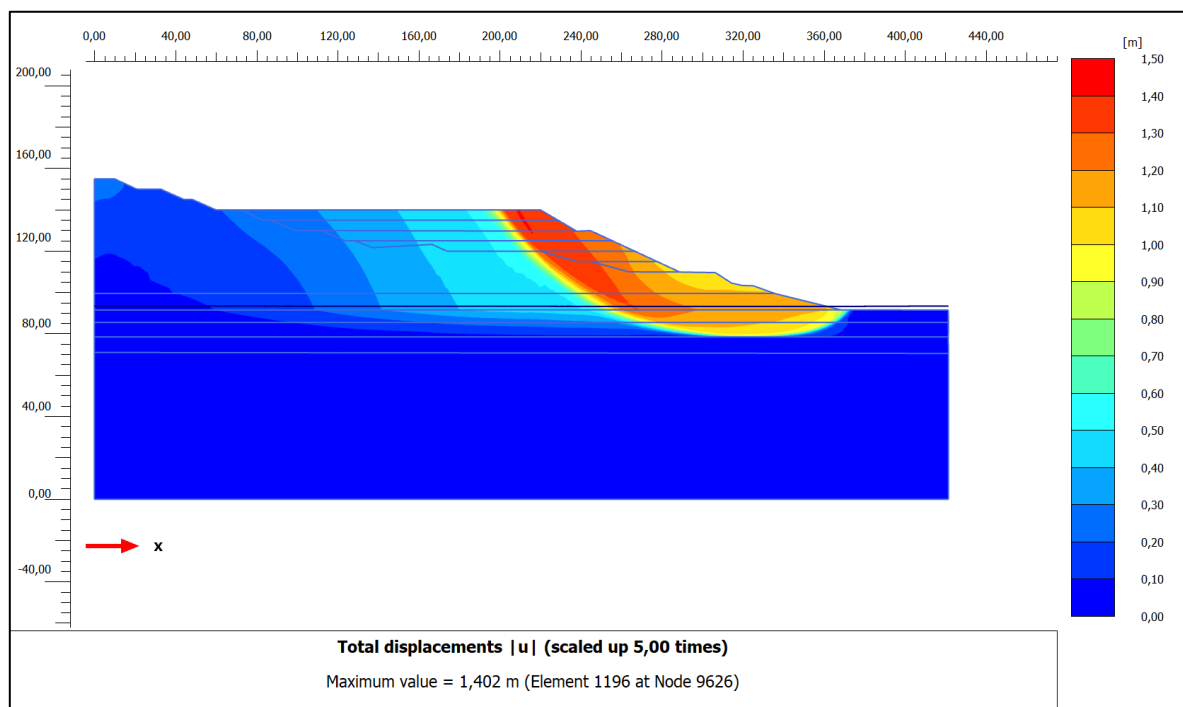


Figure N° 68 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 6ème couche
(FS = 1,68)

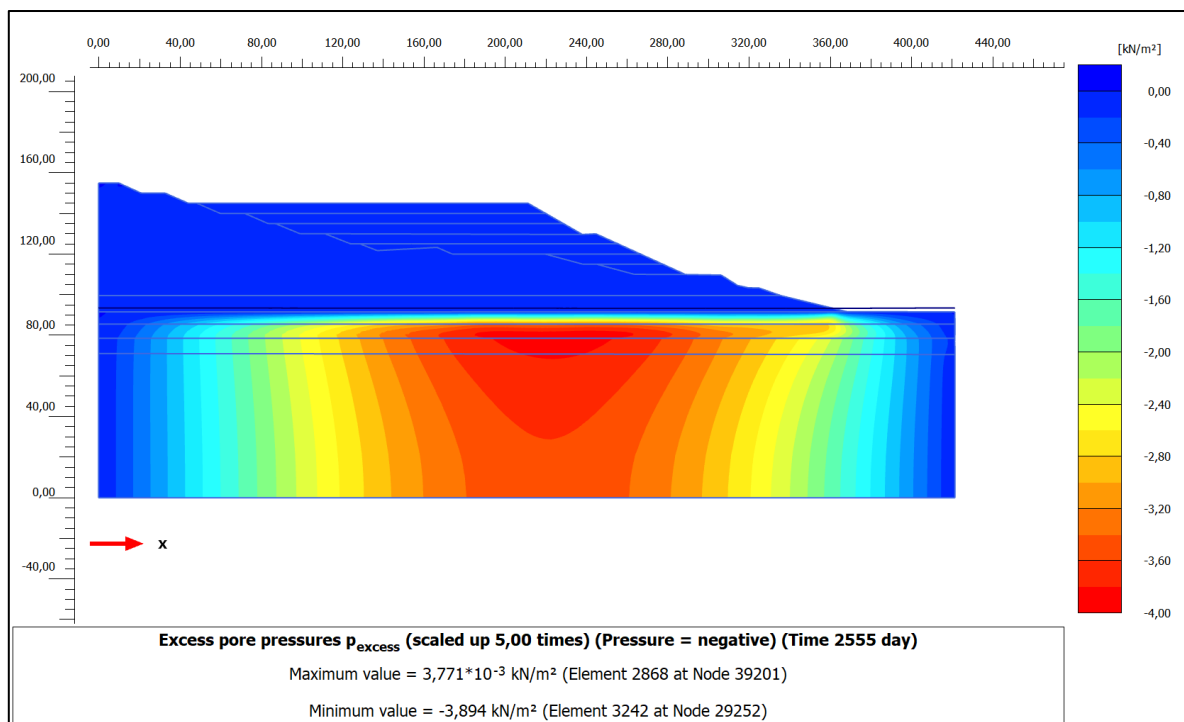


Figure N° 69 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 7^{ème} couche
(Surpressions max= 3,894 kPa)

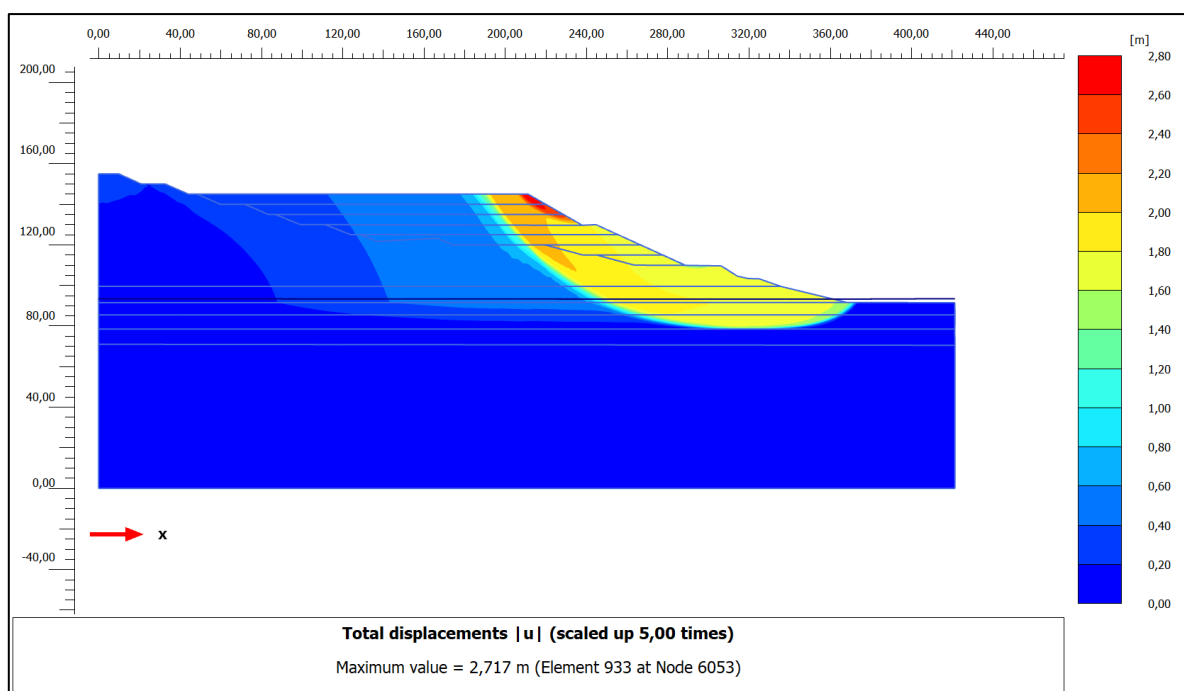


Figure N° 70 : Surface de glissement préférentielle après la construction de la 7^{ème} couche (FS = 1,64)

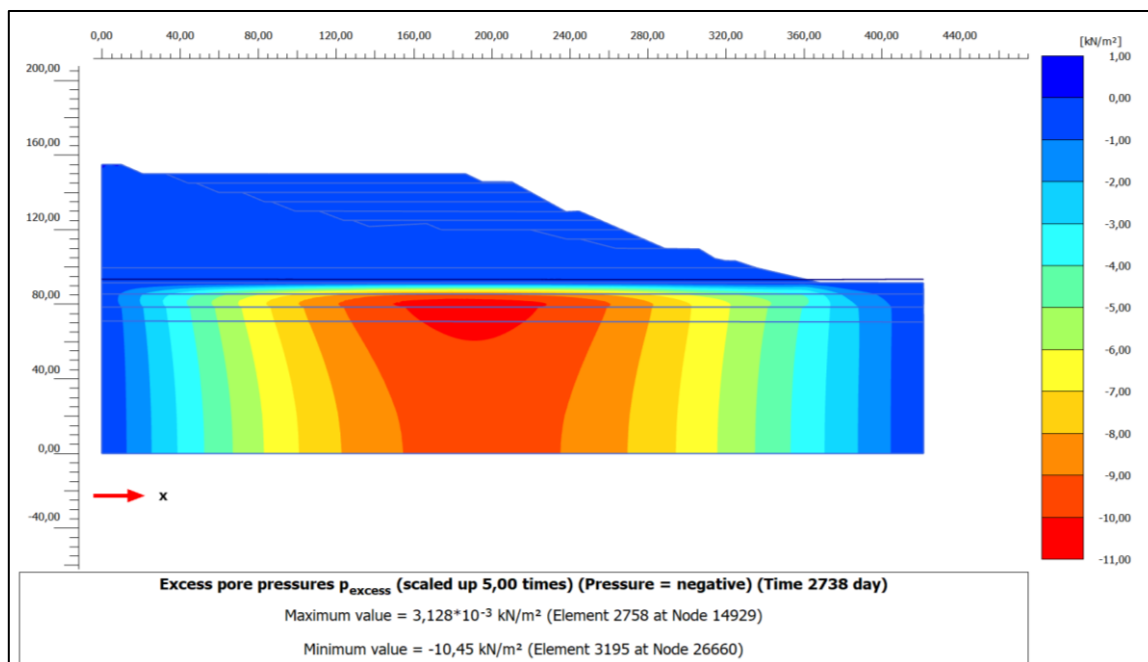


Figure N° 71 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 8^{ème} couche
(Surpressions max= 10,45 kPa)

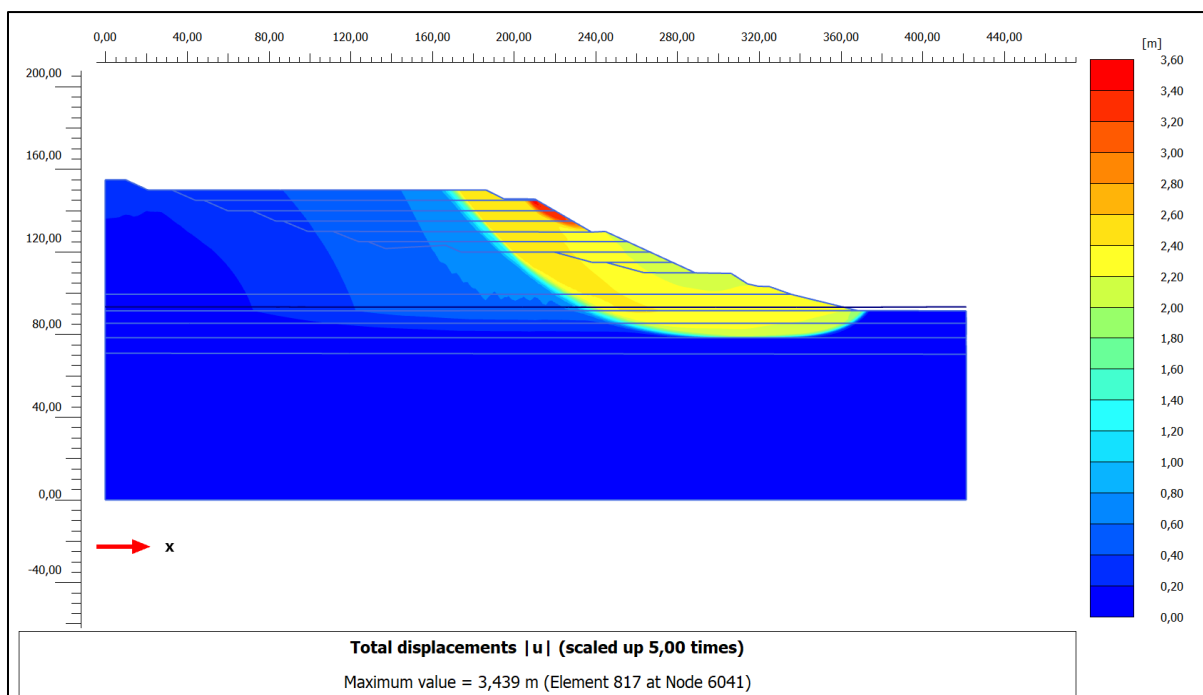


Figure N° 72 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 8^{ème} couche
(FS = 1,64)

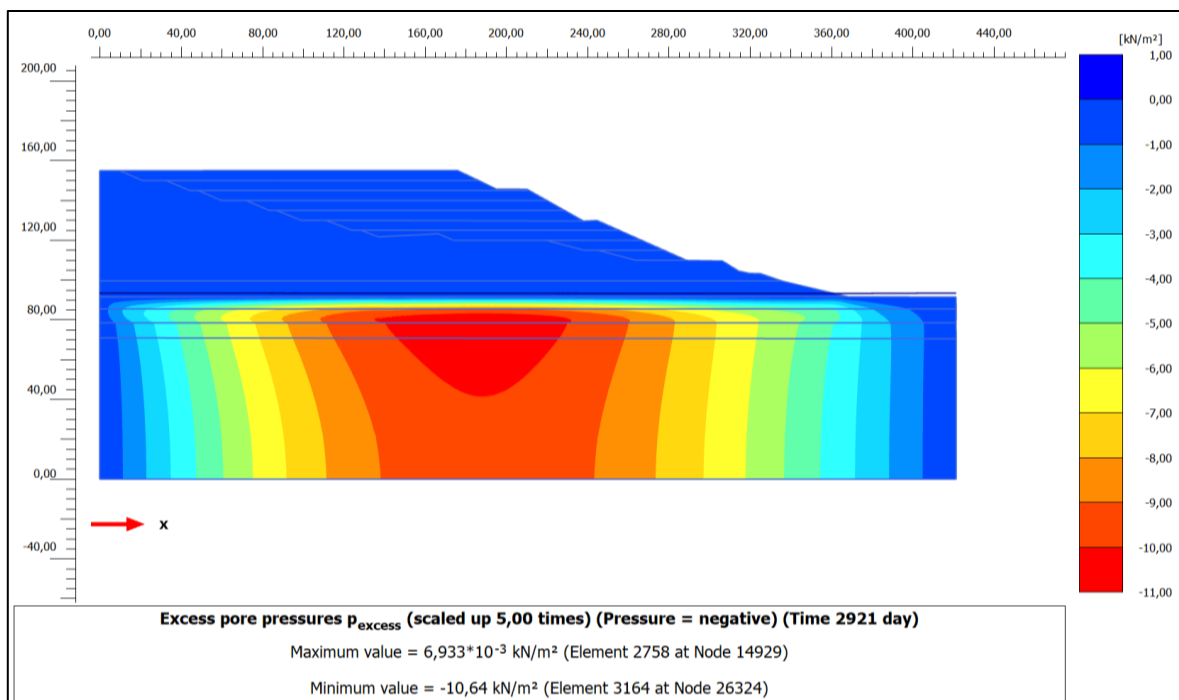


Figure N° 73 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 9^{ème} couche
(Surpressions max= 10,64 kPa)

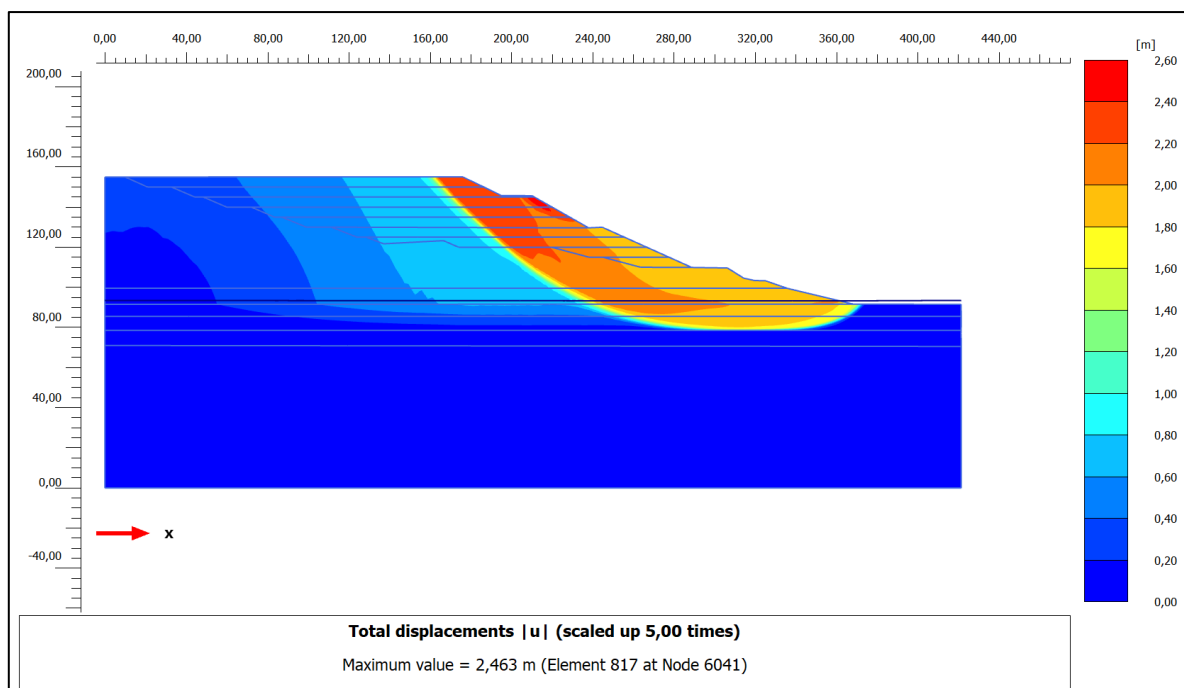


Figure N° 74 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 9^{ème} couche (FS = 1,61)

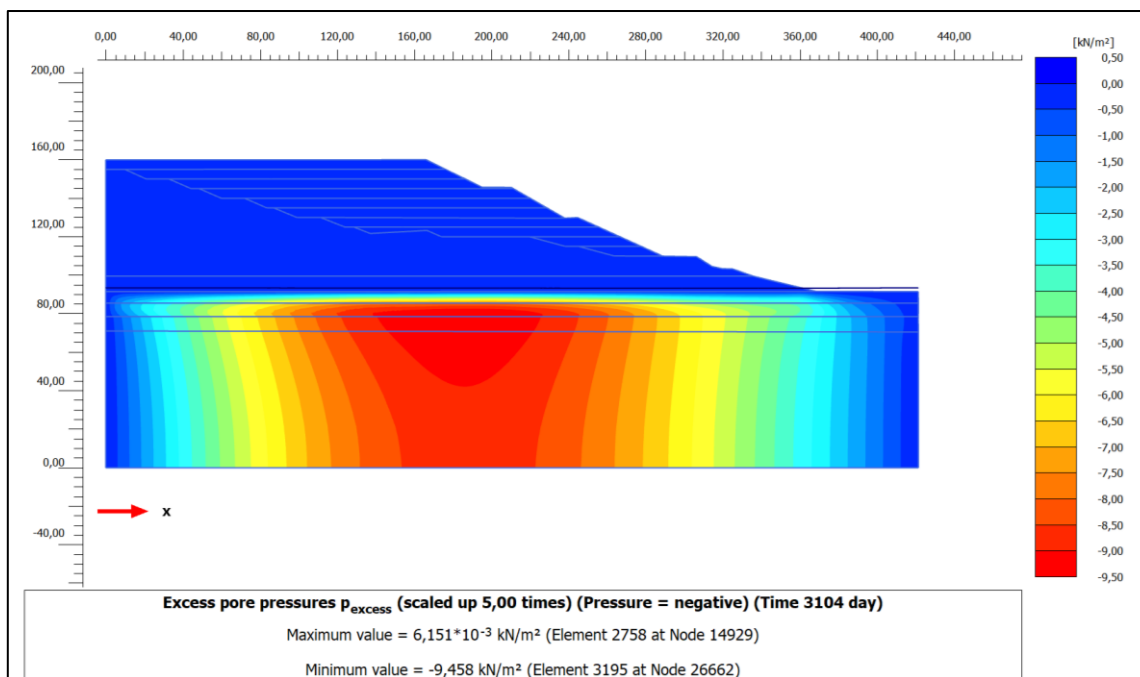


Figure N° 75 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 10^{ème} couche
(Surpressions max= 9,458 kPa)

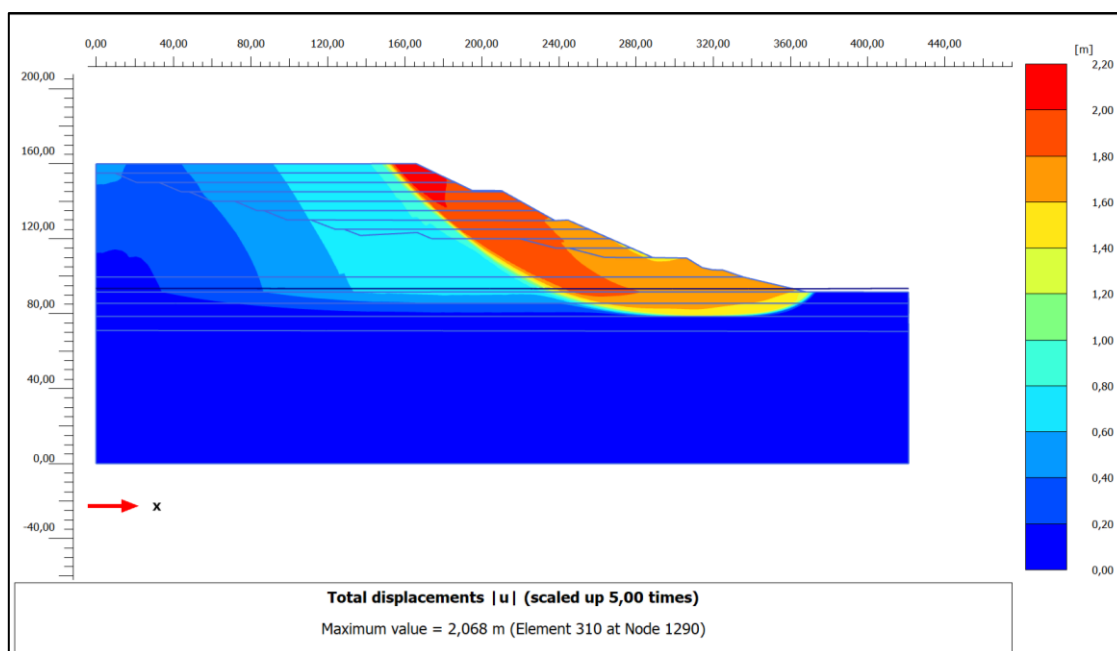


Figure N° 76 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 10^{ème} couche
(FS = 1,59)

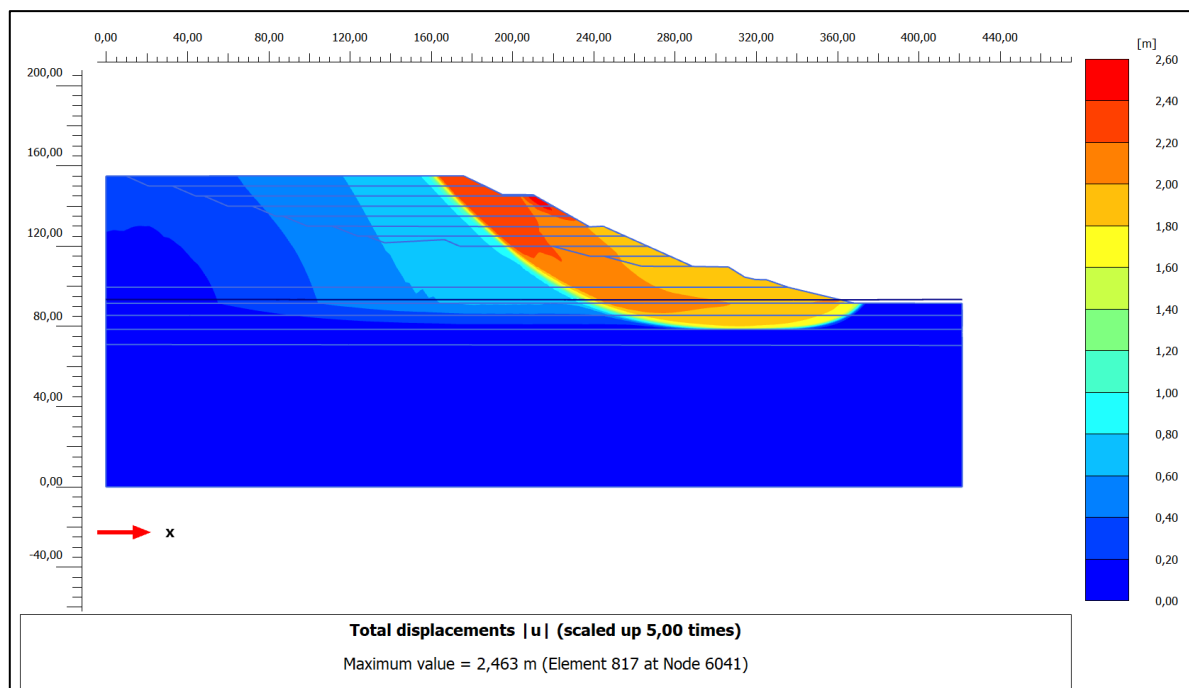


Figure N° 77 Surface de glissement préférentiel après la construction de la 9^{ème} couche
(FS = 1,61)

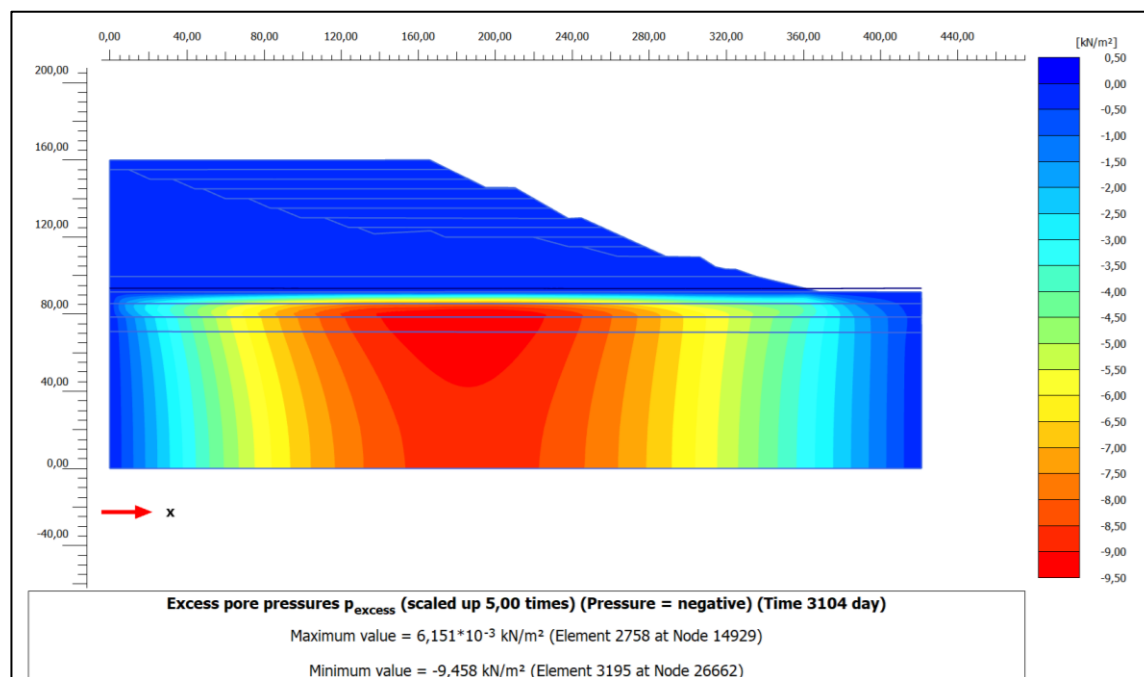


Figure N° 78 Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 10^{ème} couche
(Surpressions max= 9,458 kPa)

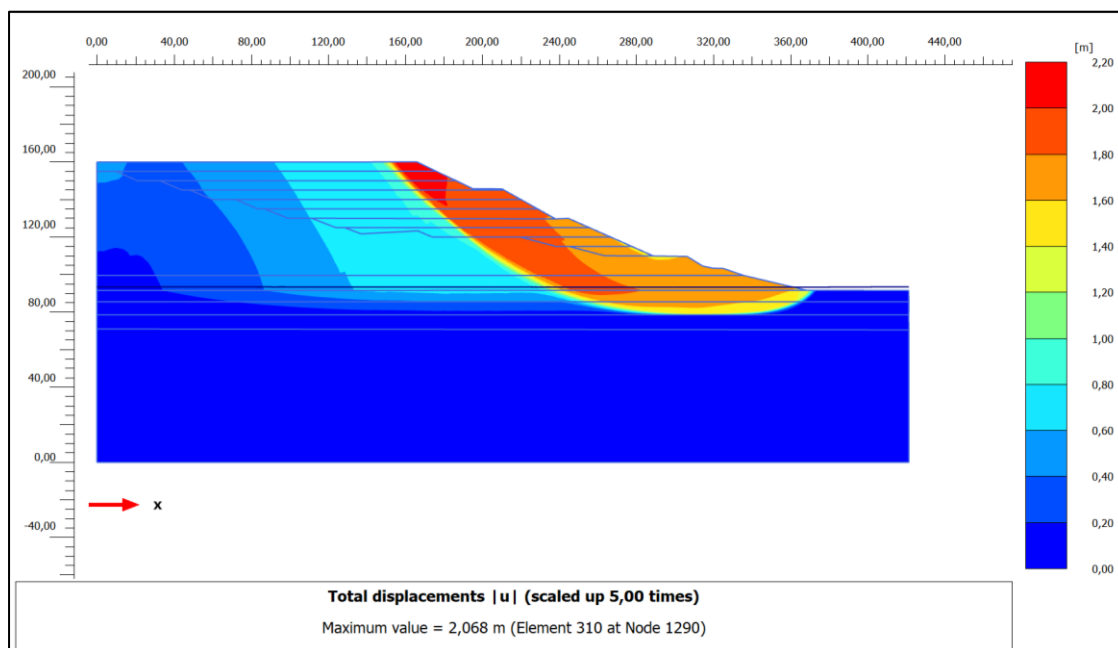


Figure N° 79 Surface de glissement préférentiel après la construction de la 10^{ème} couche
(FS = 1,59)

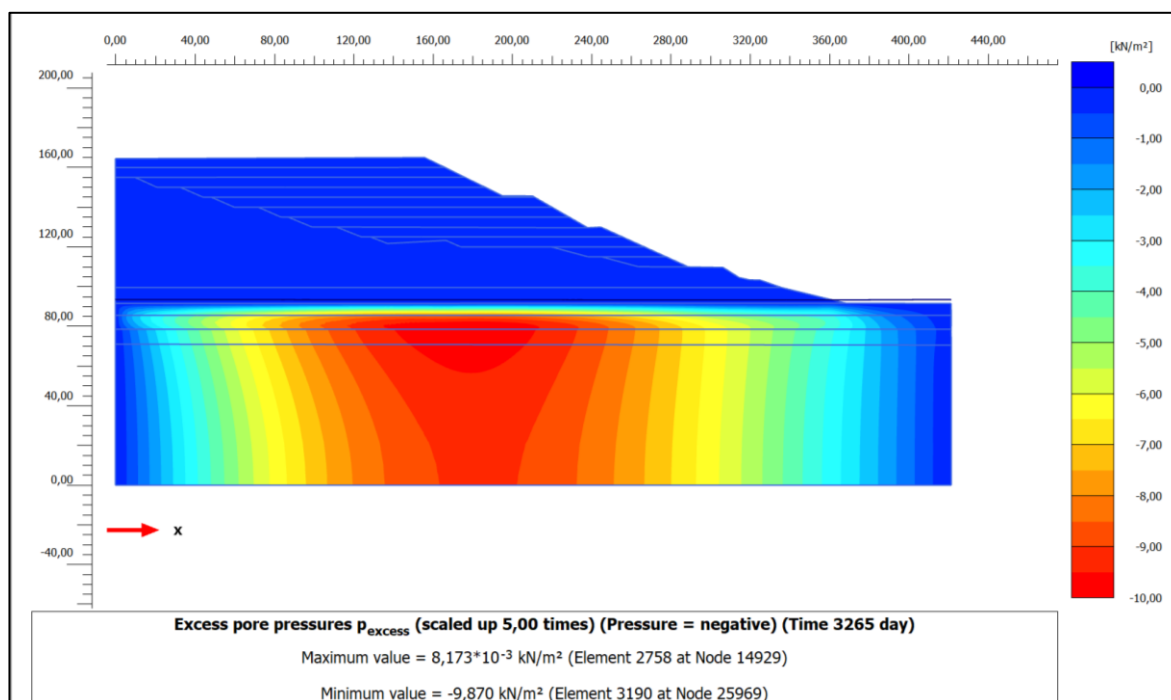


Figure N° 80. Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 11^{ème} couche
(Surpressions max= 9,870 kPa)

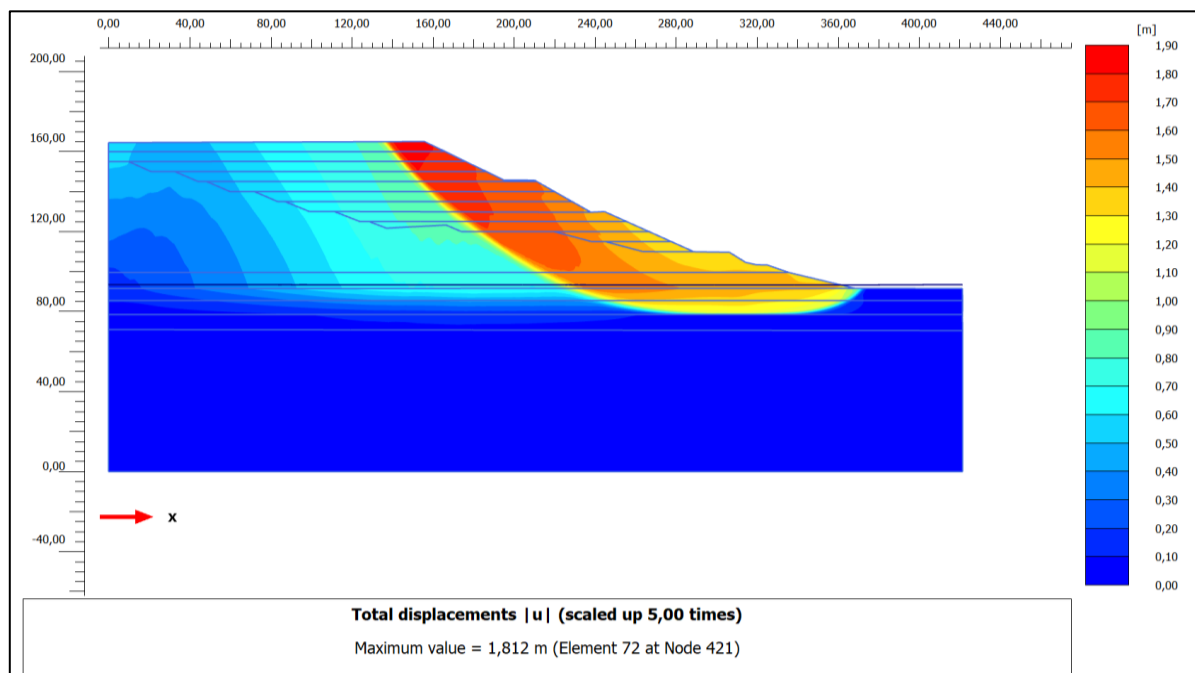


Figure N° 81 Surface de glissement préférentiel après la construction de la 11^{ème} couche
(FS = 1,59)

**ANNEXE N°6 : : SORTIES GEOSLOPE – CALCUL LONG TERME DE
LA PHASE 2**

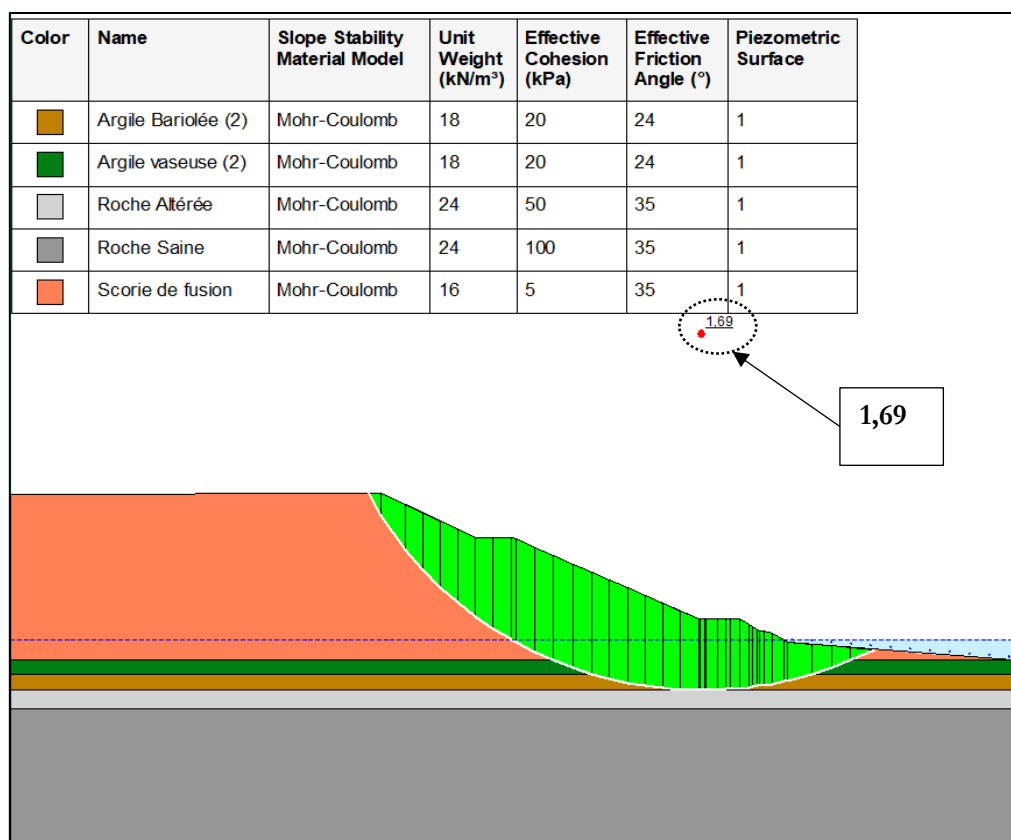


Figure N° 82 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées
(Coupe 1, FS =1,69)

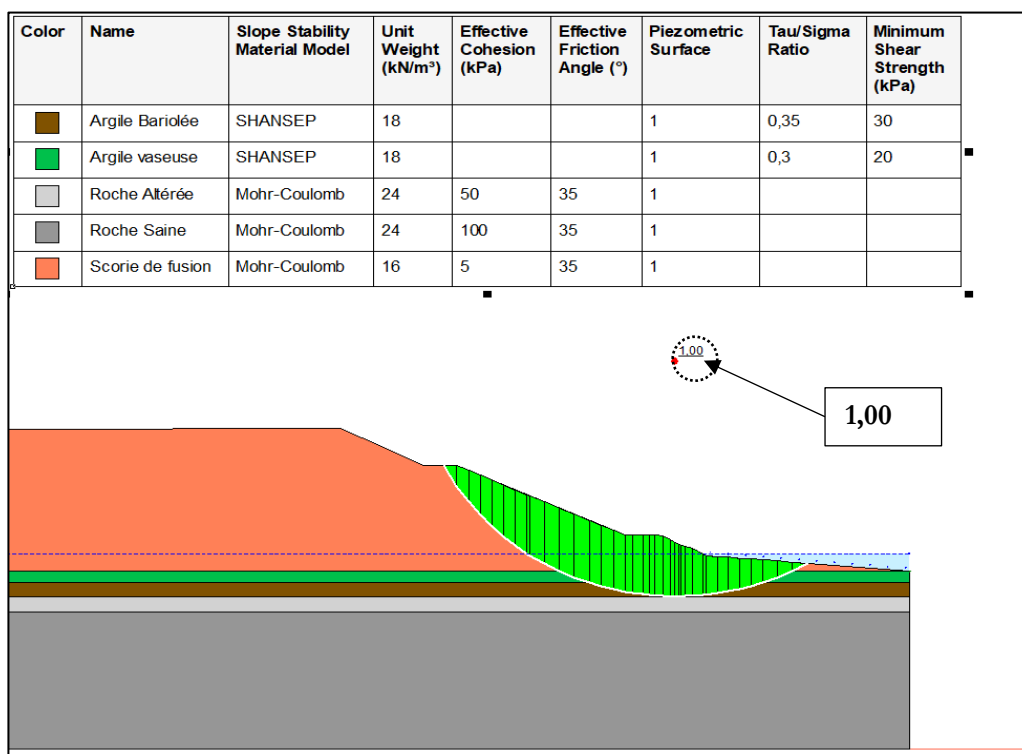


Figure N° 83 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme allégeant (Coupe 1, FS =1,00)

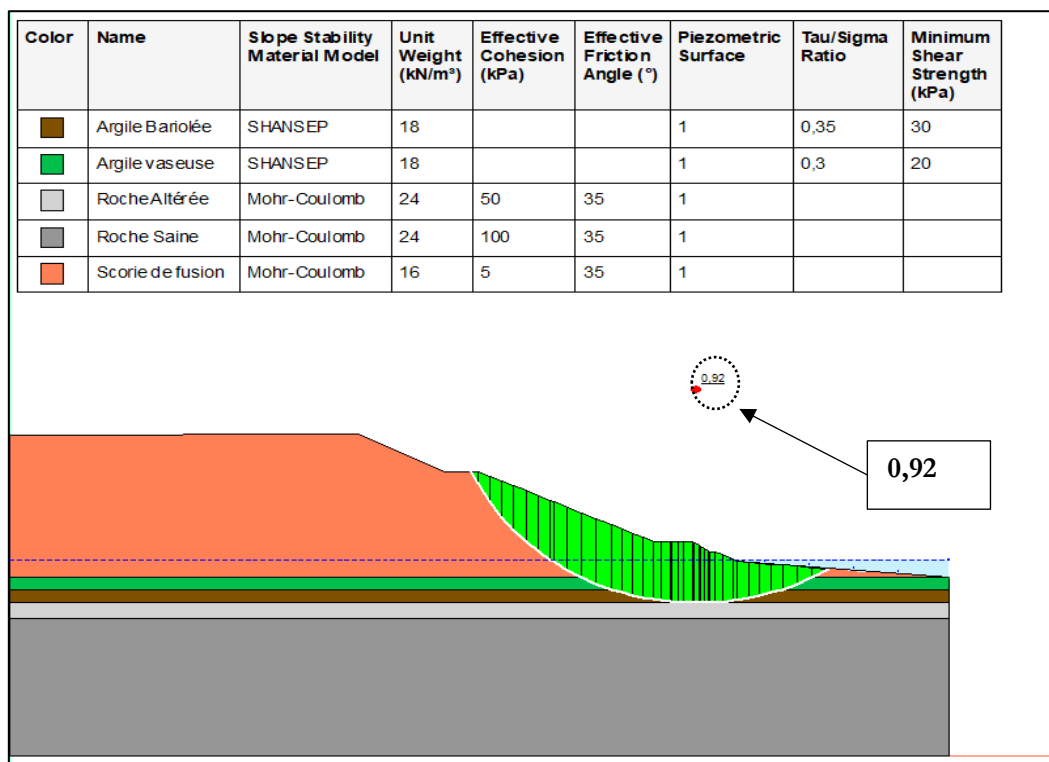


Figure N° 84 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme pesant (Coupe 1, FS =0,92)

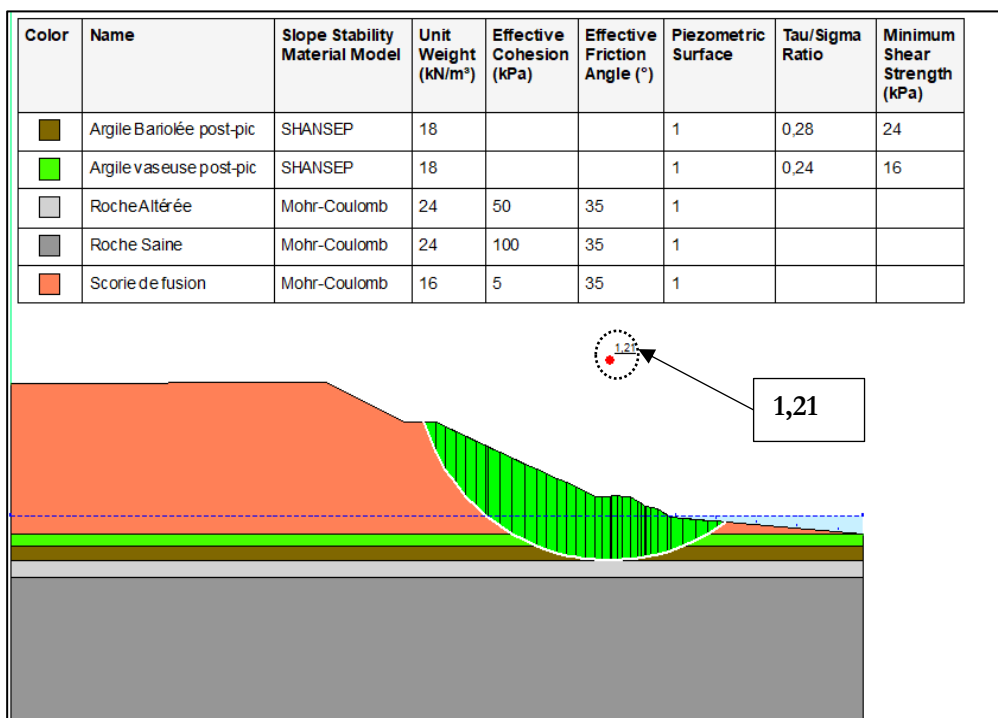


Figure N° 85 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation post-sismique
(Coupe 1, FS =1,21)

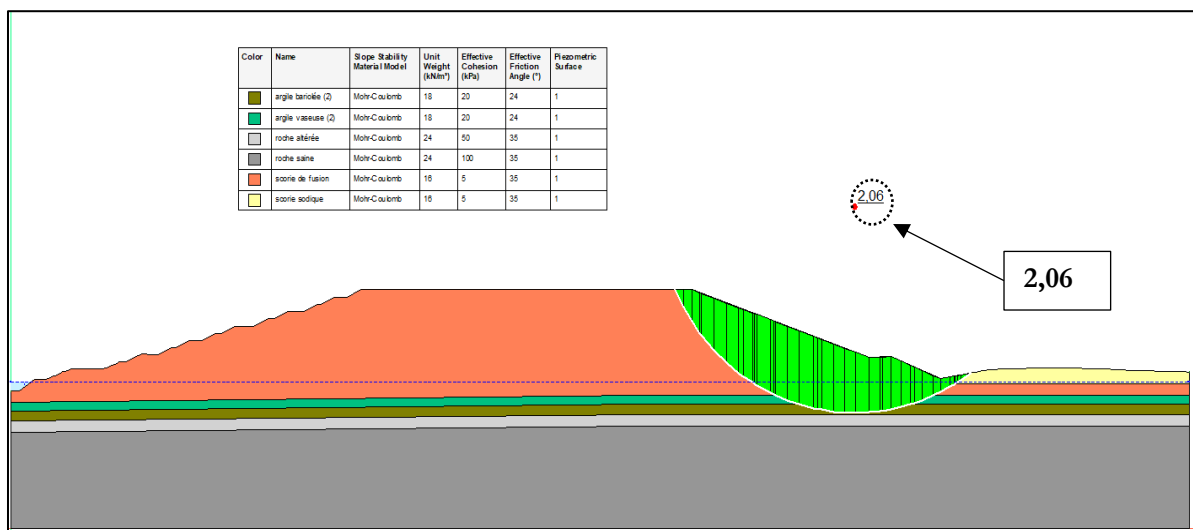


Figure N° 86 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées
(Coupe 2, FS =2,06)

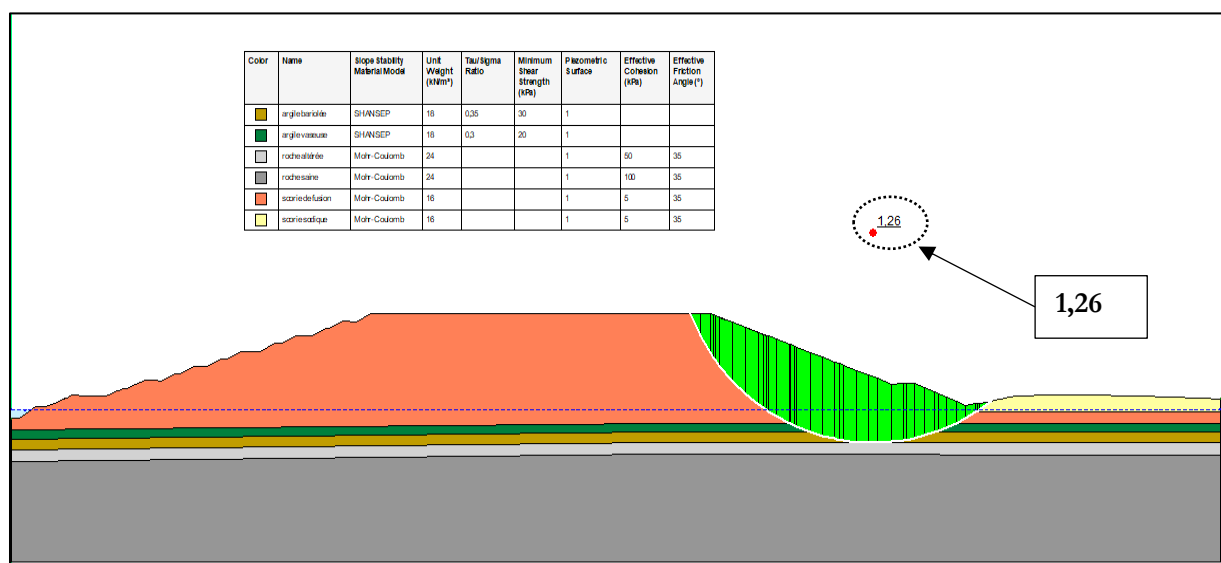


Figure N° 87 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme allégeant (Coupe 2, FS =1,26)

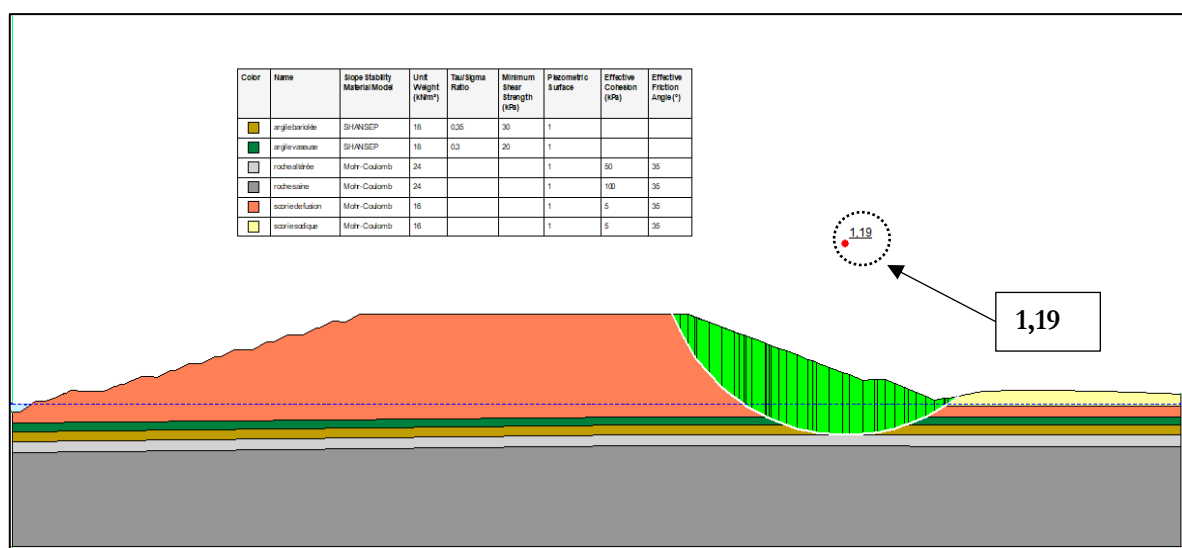


Figure N° 88 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme pesant (Coupe 2, FS =1,19)

**ANNEXE N°7 : SORTIES PLAXIS – CALCUL EN COURS DE
CONSTRUCTION DE LA PHASE 3**

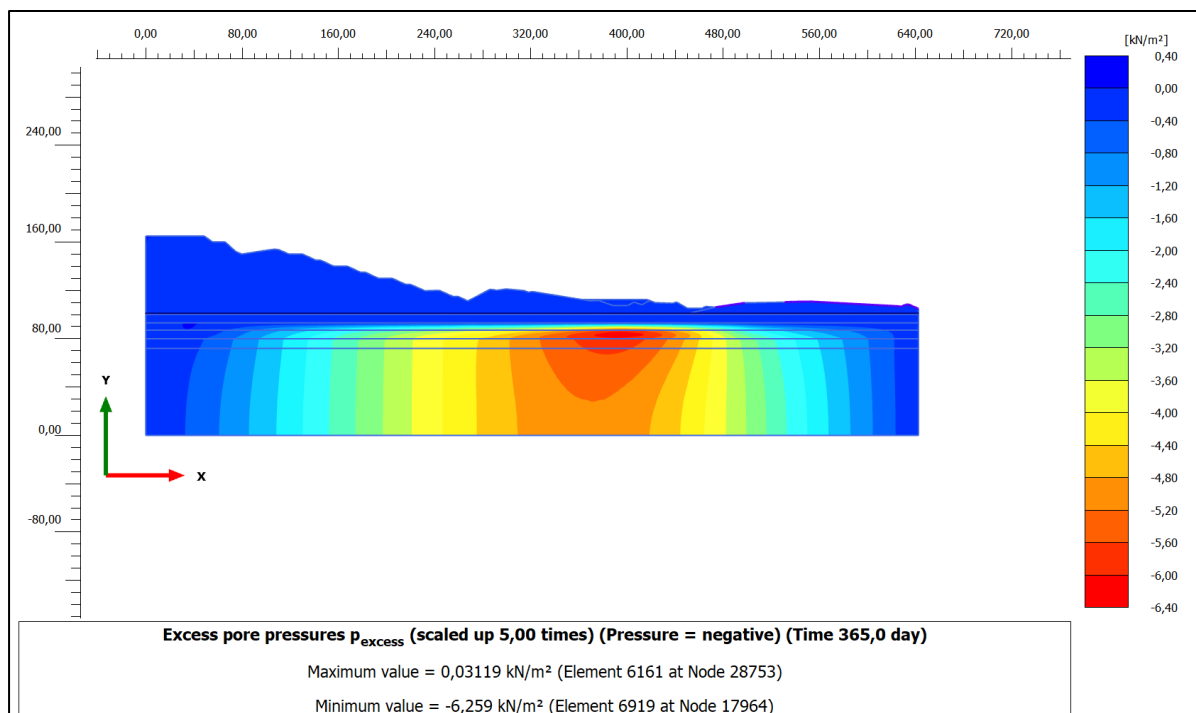


Figure N° 89 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 1^{ère} couche
(Surpressions max= 6,259 kPa)

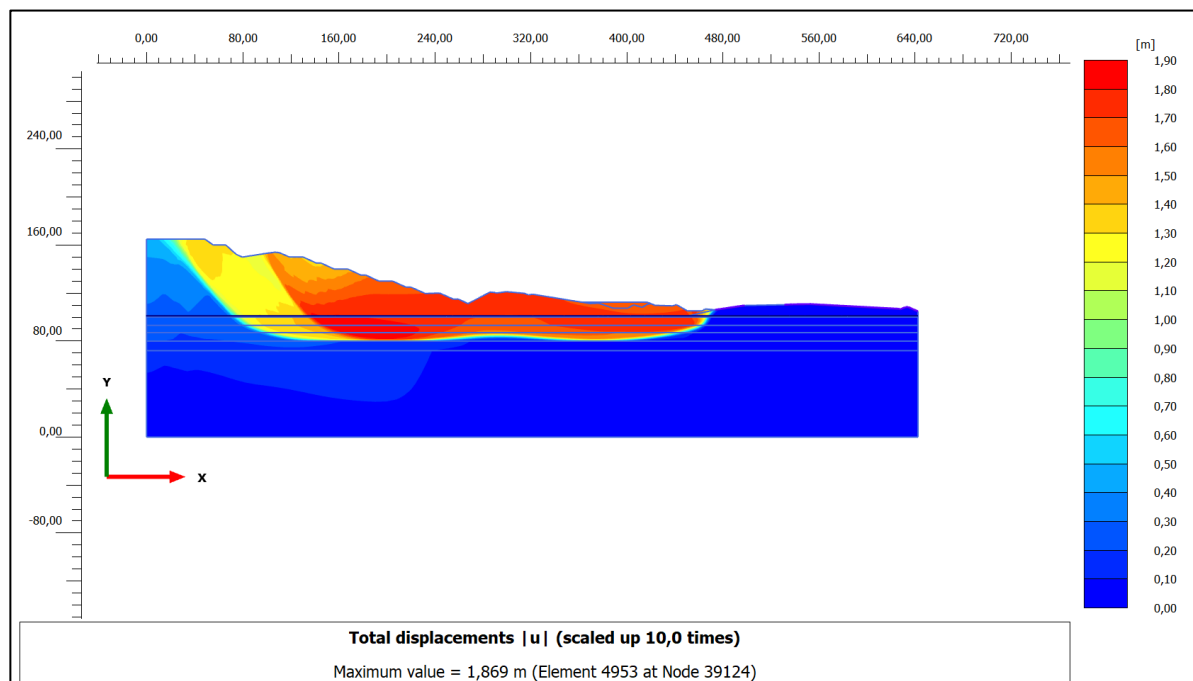


Figure N° 90 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 1^{ère} couche
(FS = 4,17)

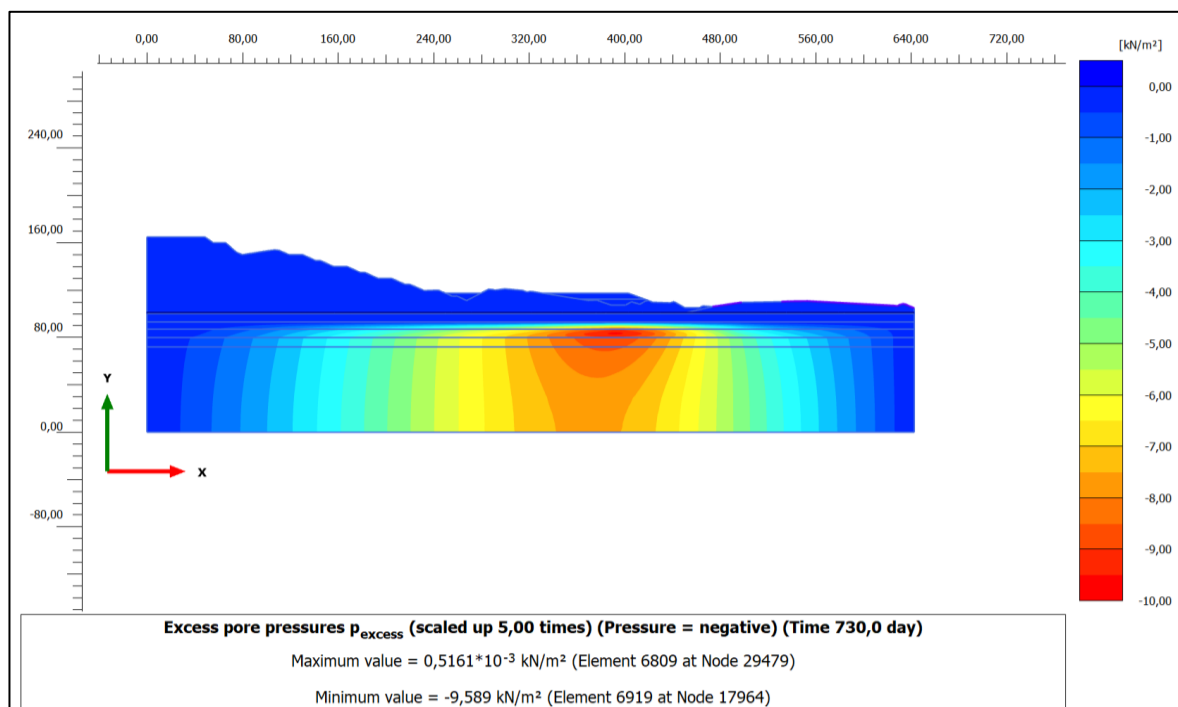


Figure N° 91 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 2^{ème} couche
(Surpressions max= 9,589 kPa)

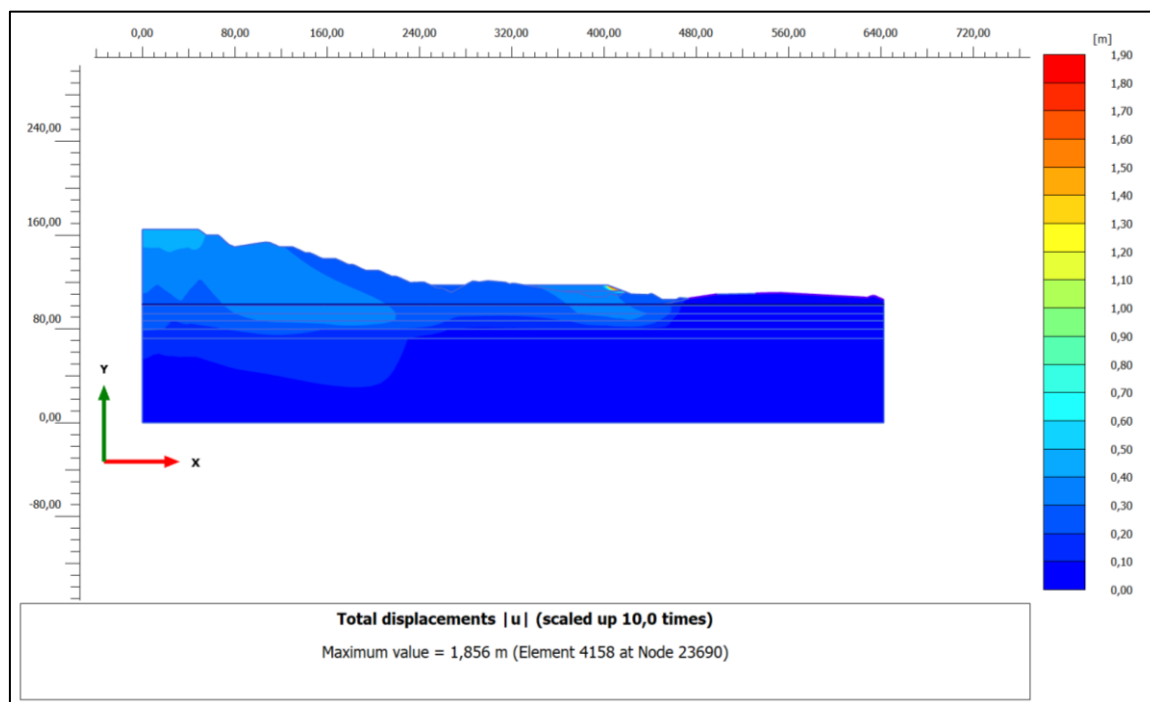


Figure N° 92 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 2^{ème} couche
(FS = 2,95)

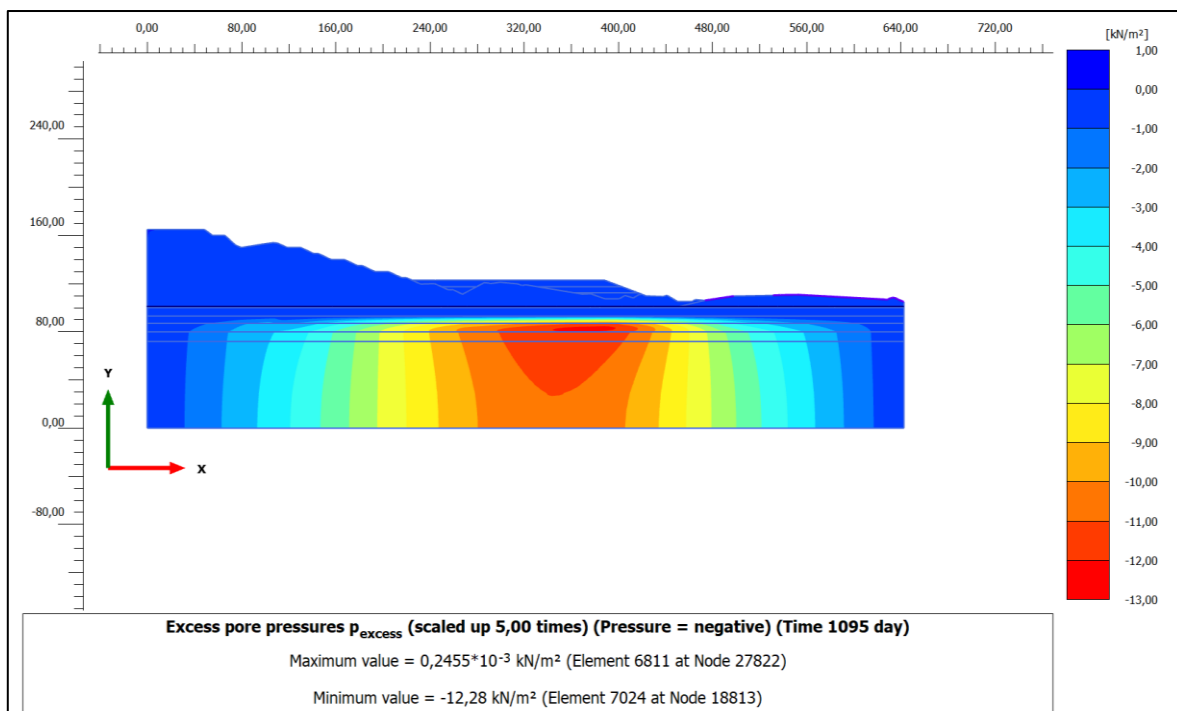


Figure N° 93 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 3^{ème} couche
(Surpressions max= 12,28 kPa)

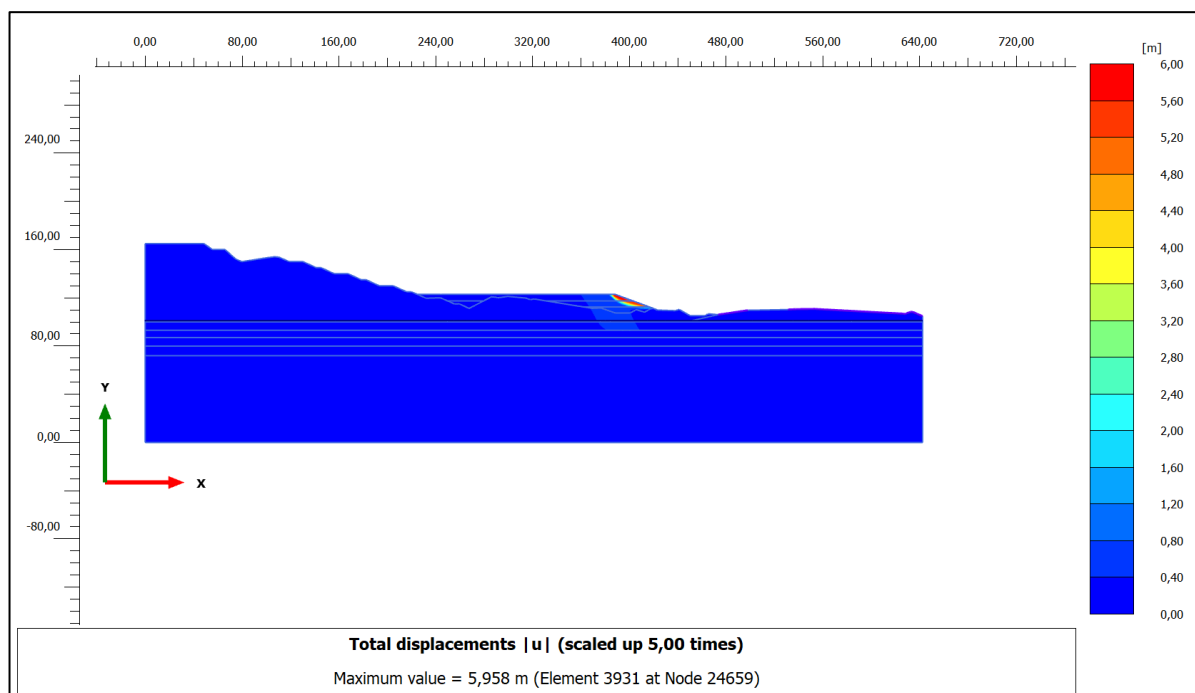


Figure N° 94 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 3^{ème} couche
(FS = 2,52)

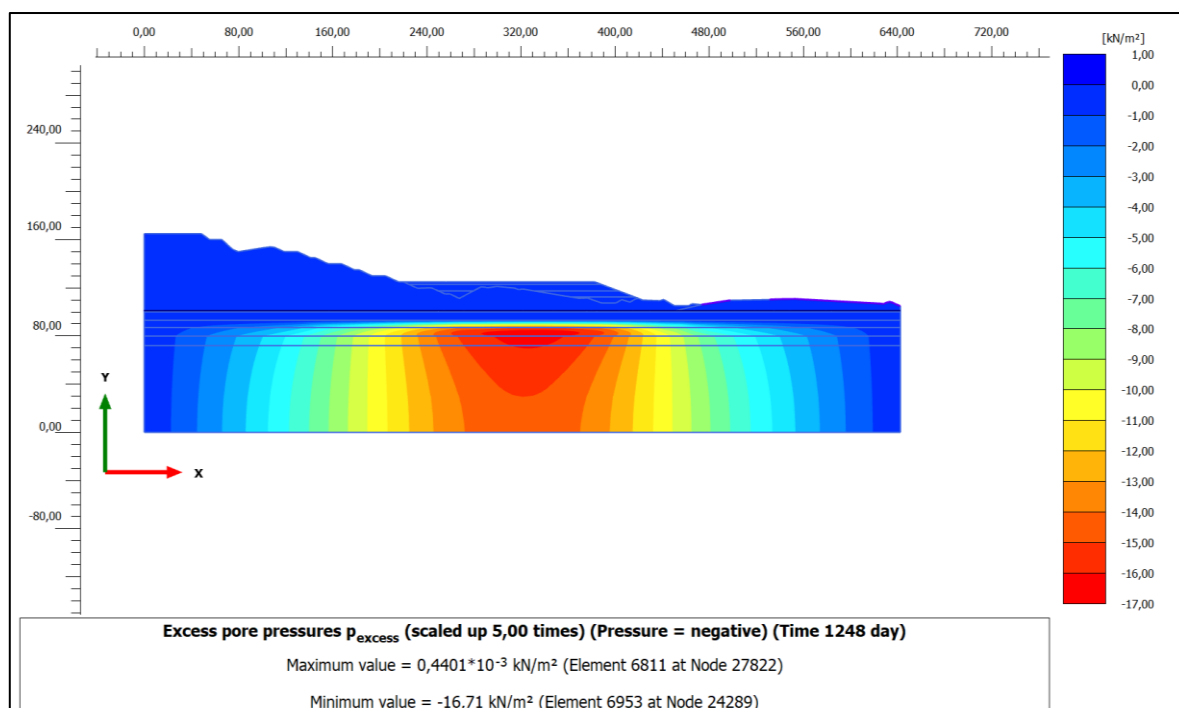


Figure N° 95 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 4^{ème} couche
(Surpressions max= 16,71 kPa)

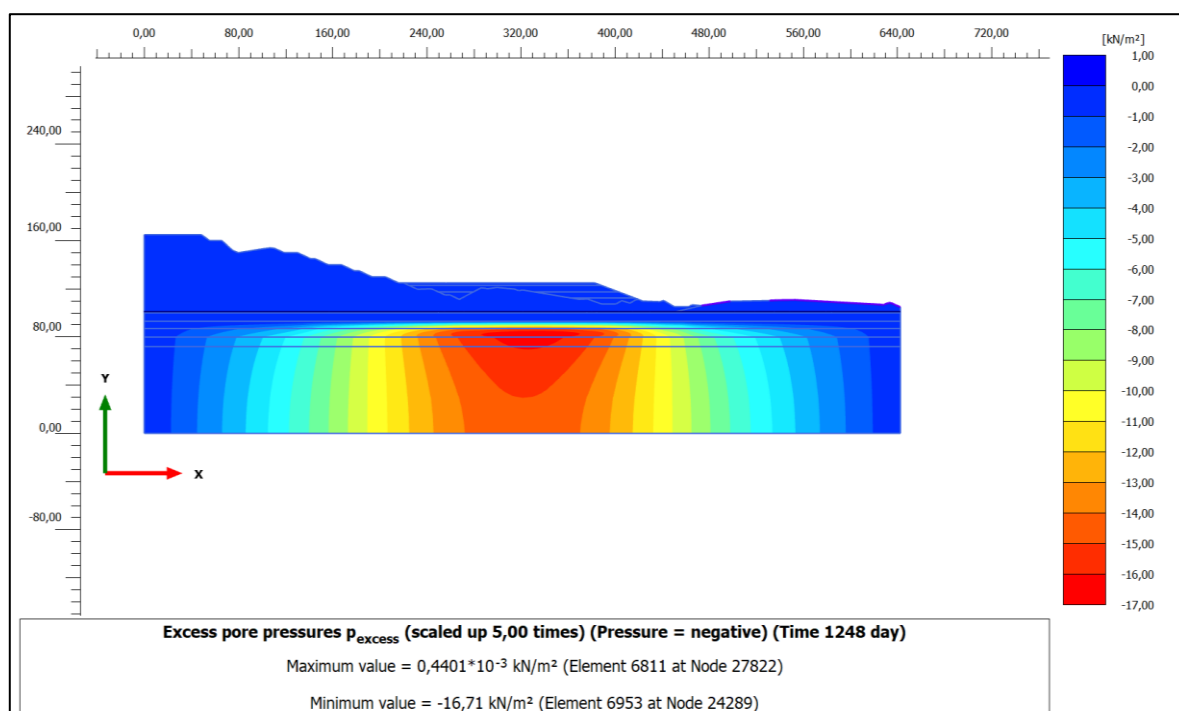


Figure N° 96 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 4^{ème} couche
(FS = 2,44)

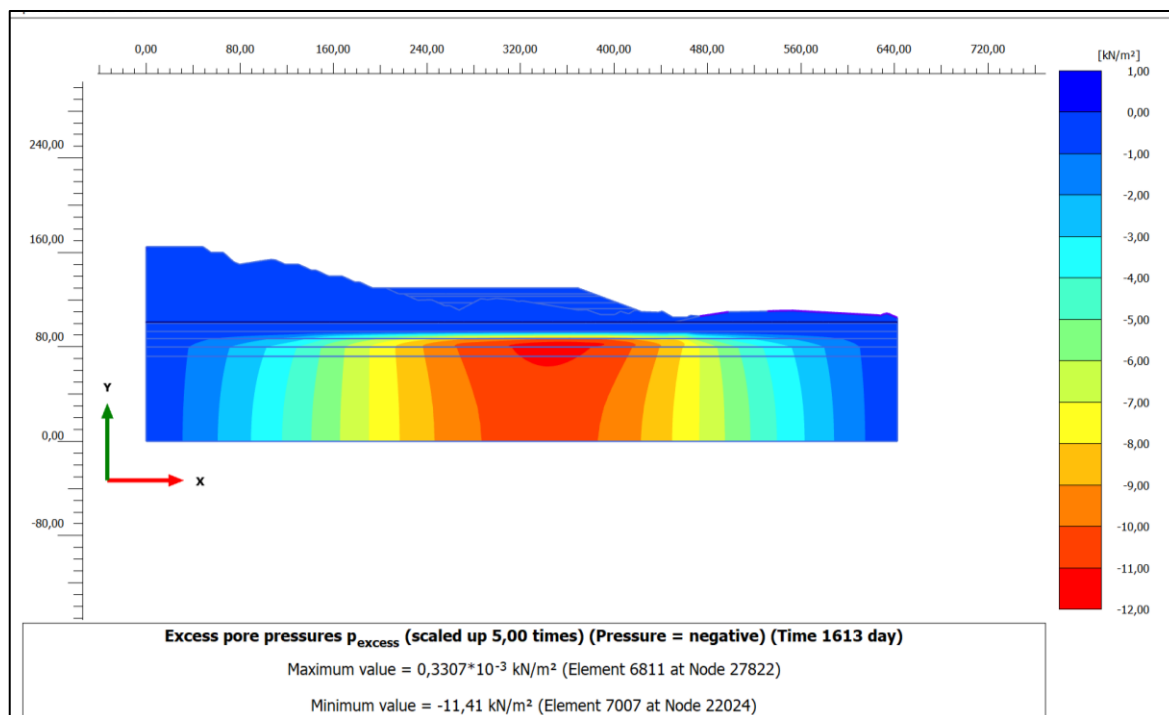


Figure N° 97 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 5^{ème} couche
(Surpressions max= 11.41 kPa)

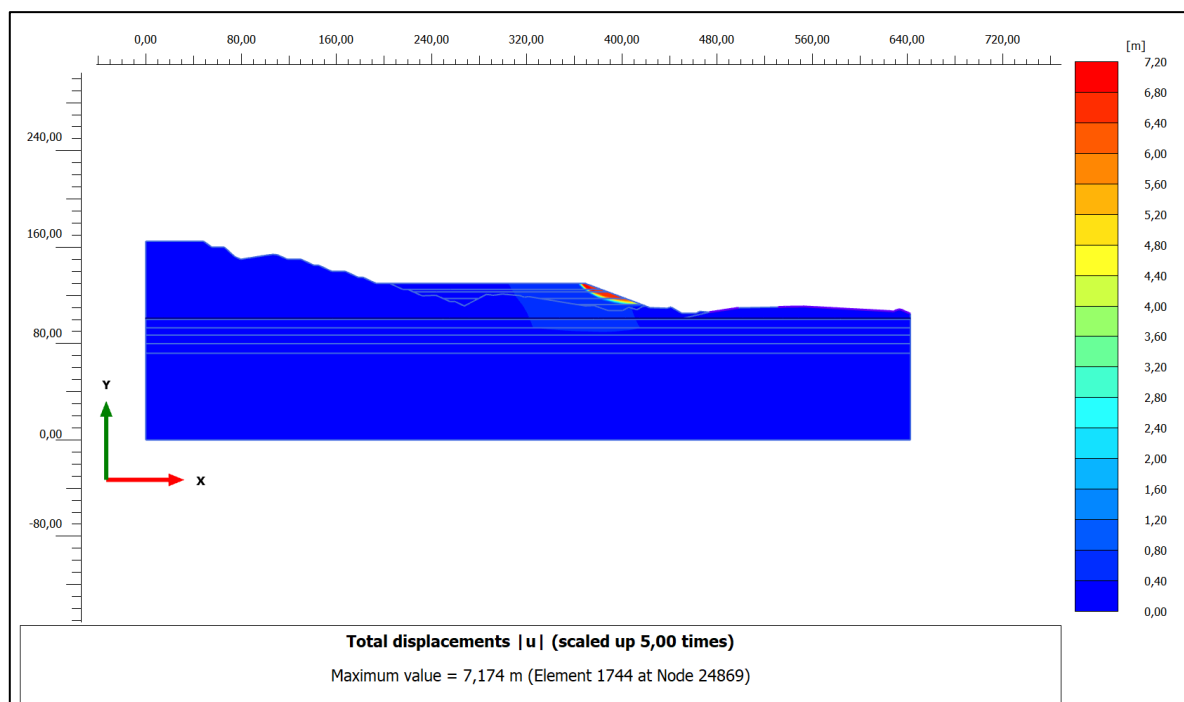


Figure N° 98 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 5^{ème} couche
(FS =2,3)

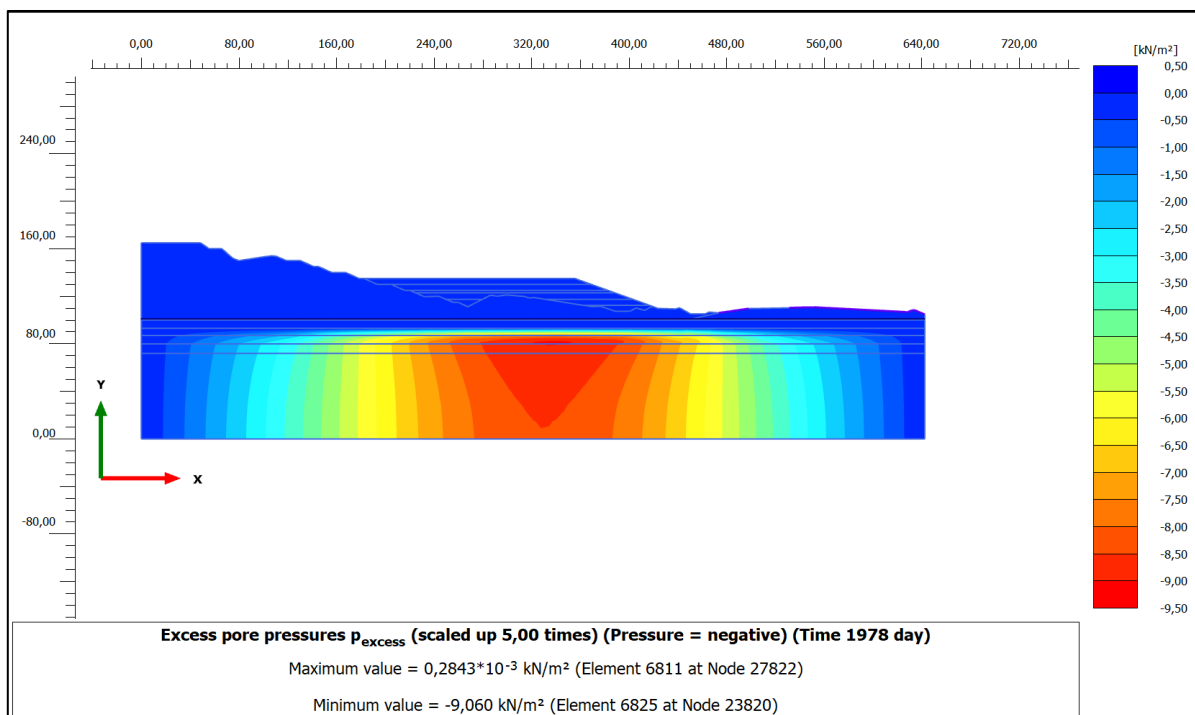


Figure N° 99 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 6^{ème} couche
(Surpressions max= 9,060 kPa)

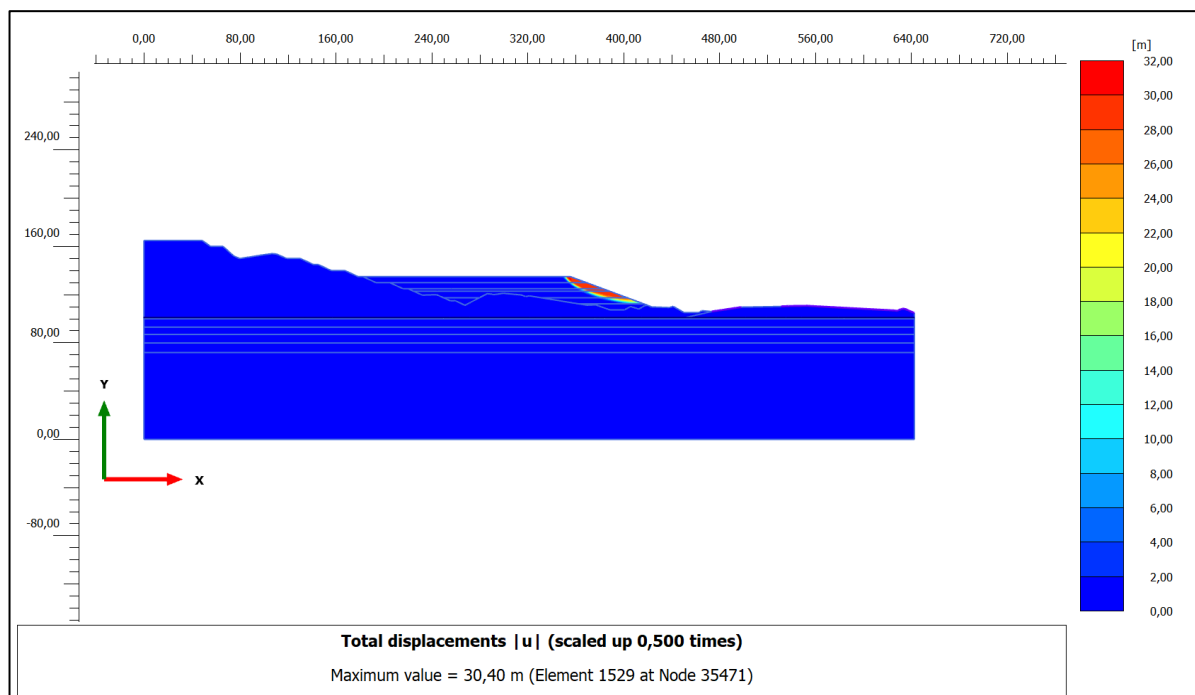


Figure N° 100 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 6^{ème} couche
(FS = 2,23)

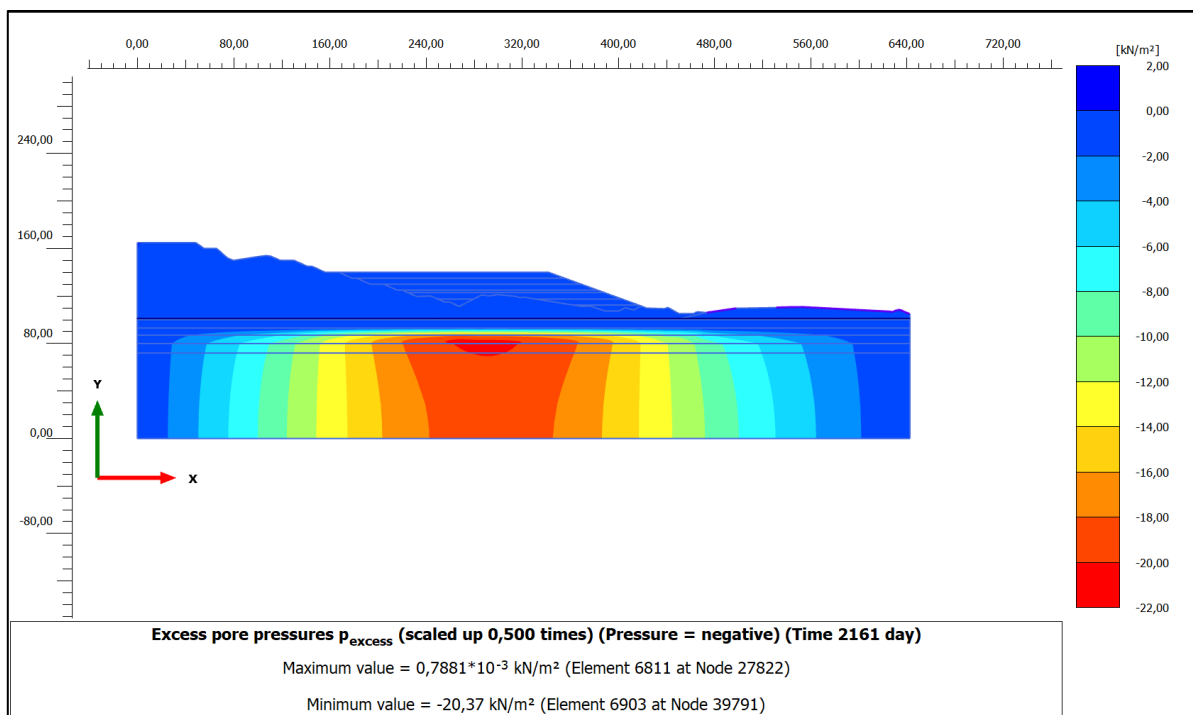


Figure N° 101 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 7^{ème} couche
(Surpressions max= 20,37 kPa)

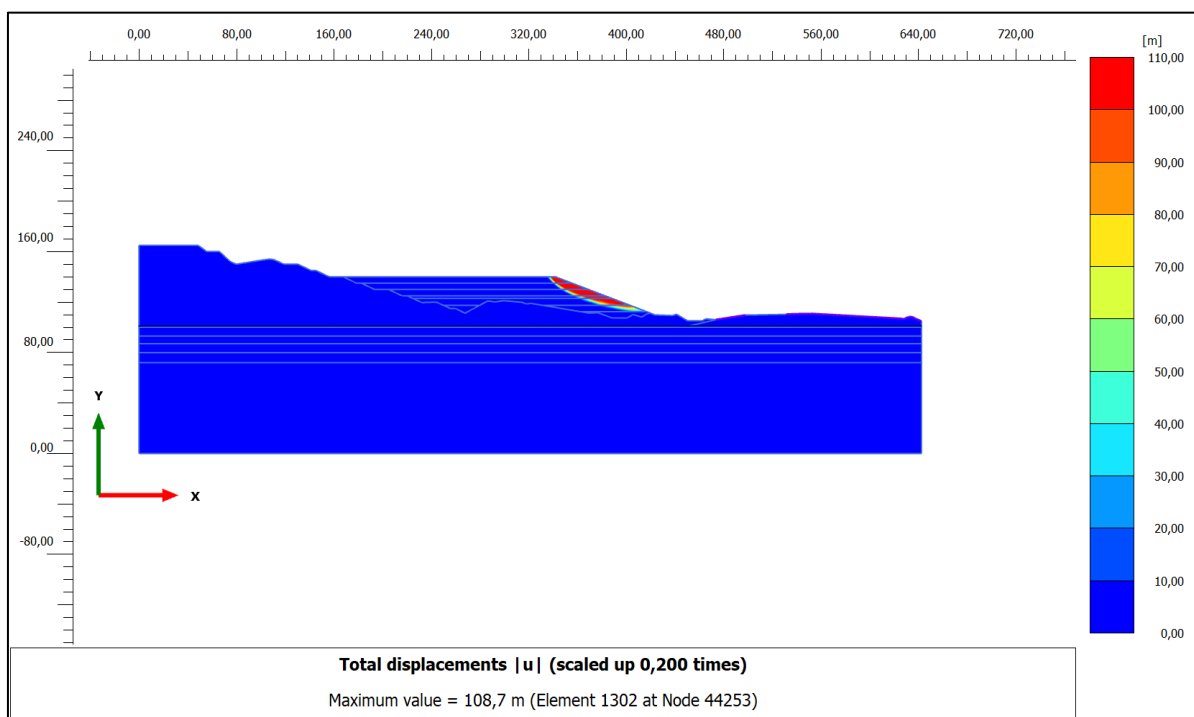


Figure N° 102 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 7^{ème} couche
(FS = 2,17)

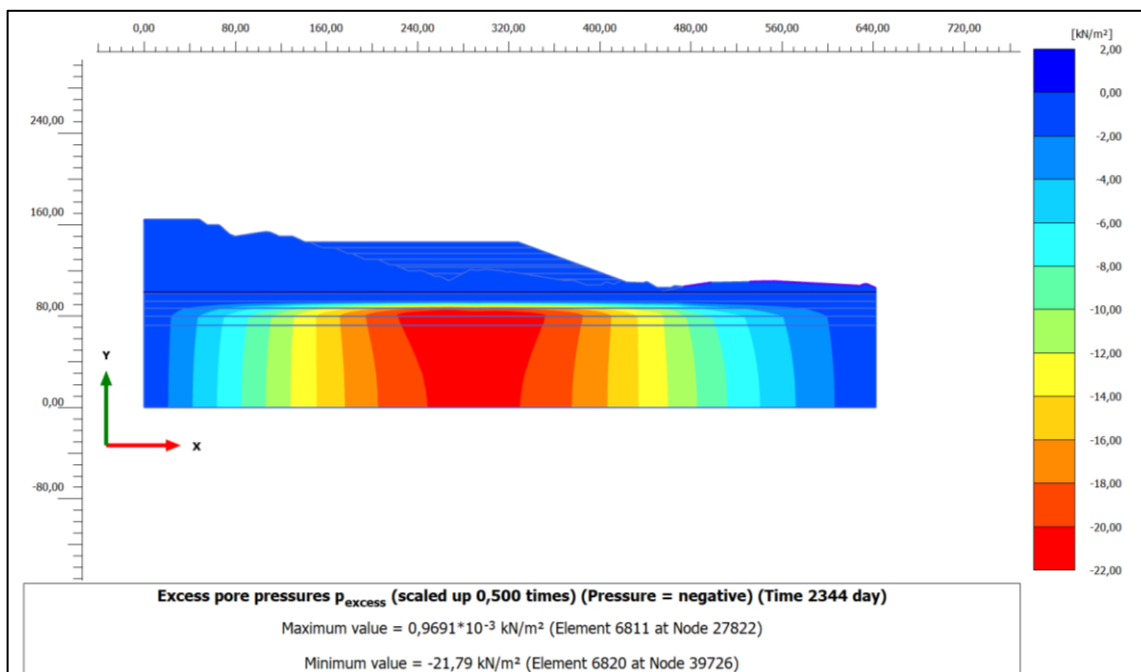


Figure N° 103 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 8^{ème} couche (Surpressions max= 21,79 kPa)

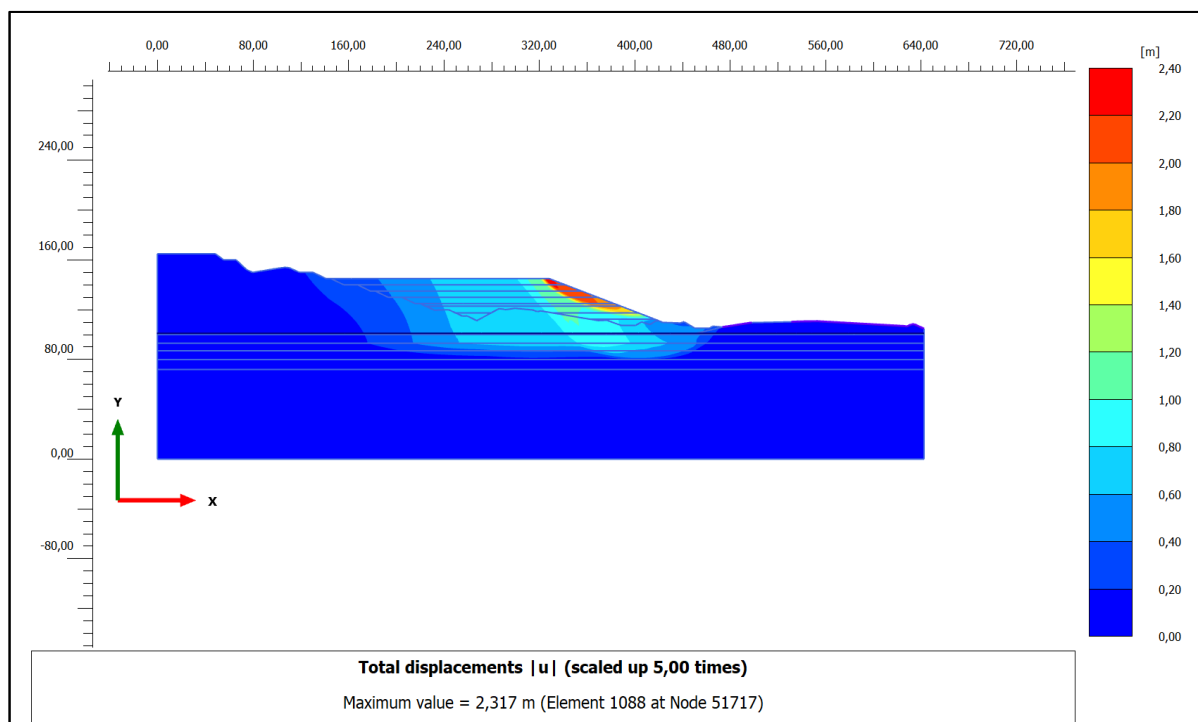


Figure N° 104 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 8^{ème} couche (FS = 2,14)

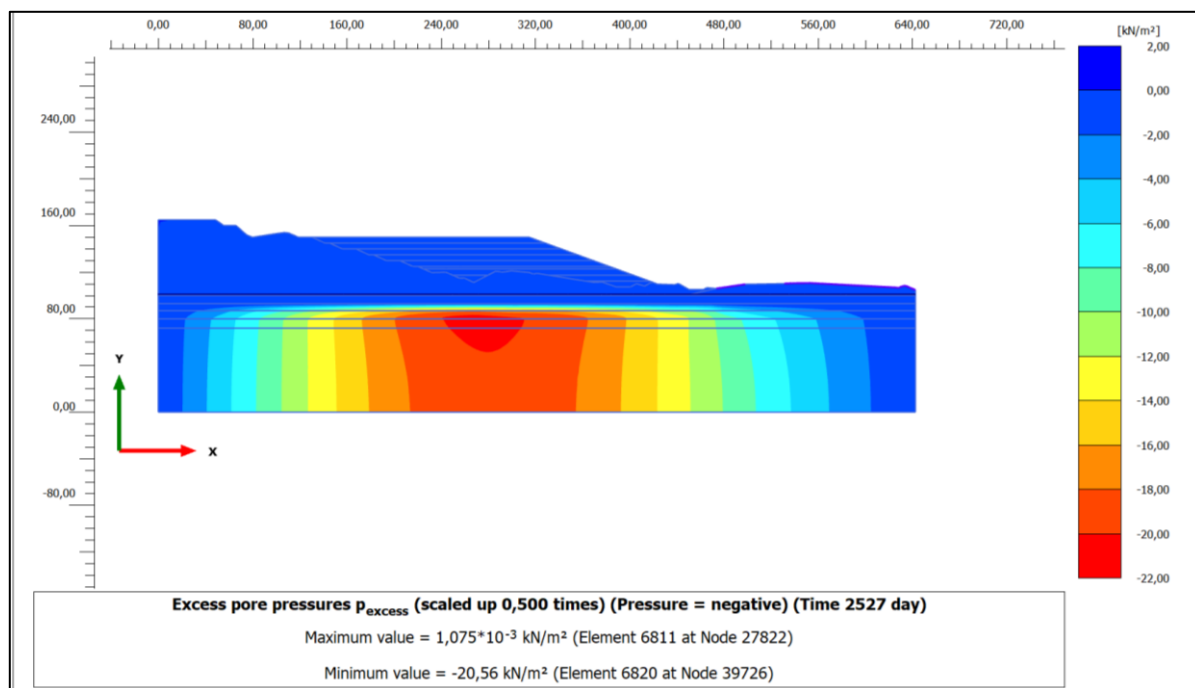


Figure N° 105 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 9^{ème} couche
(Surpressions max= 20,56 kPa)

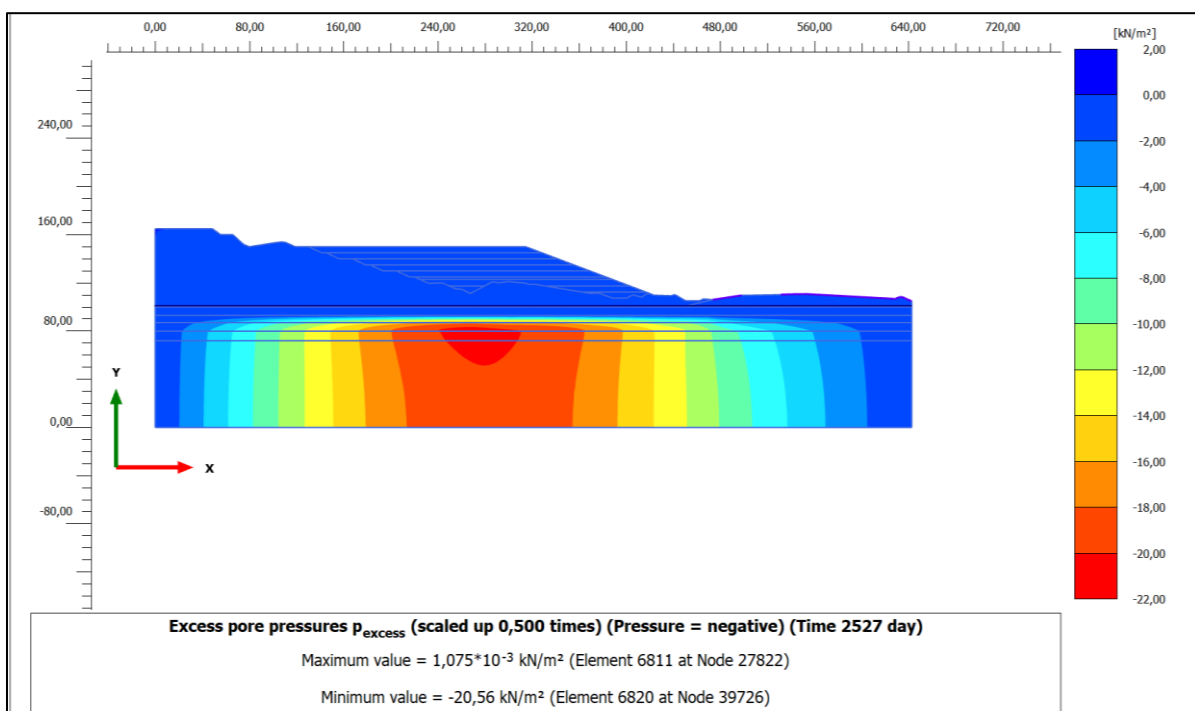


Figure N° 106 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 9^{ème} couche
(FS = 2,11)

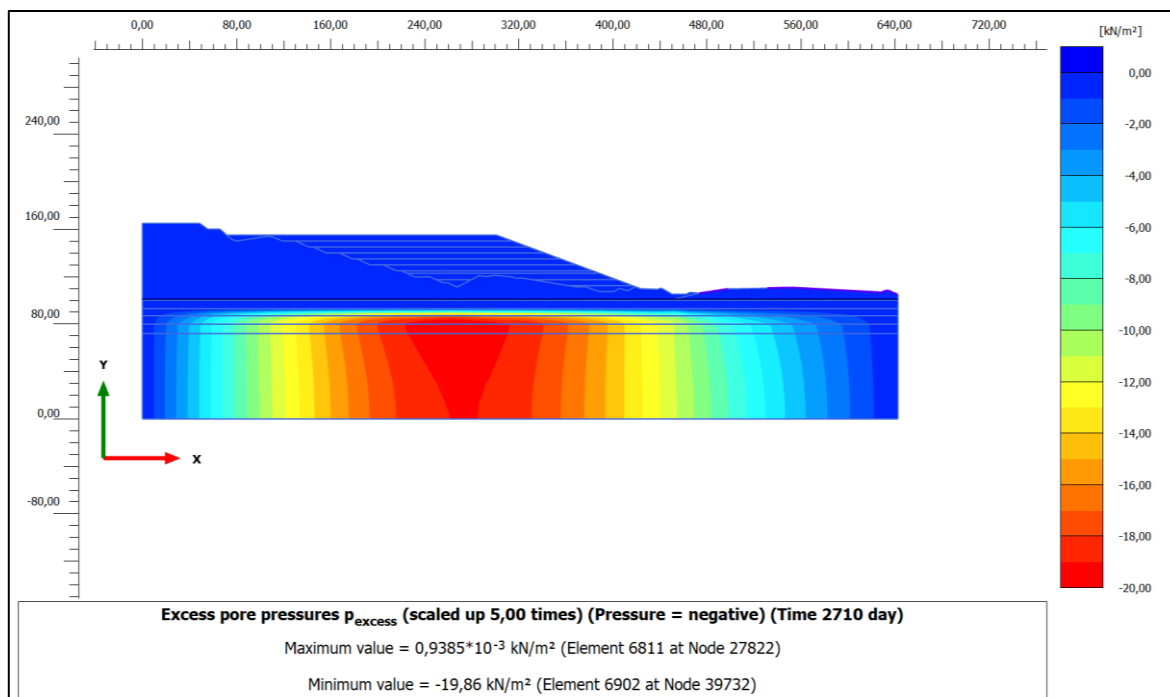


Figure N° 107 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 10^{ème} couche (Surpressions max= 19,86 kPa)

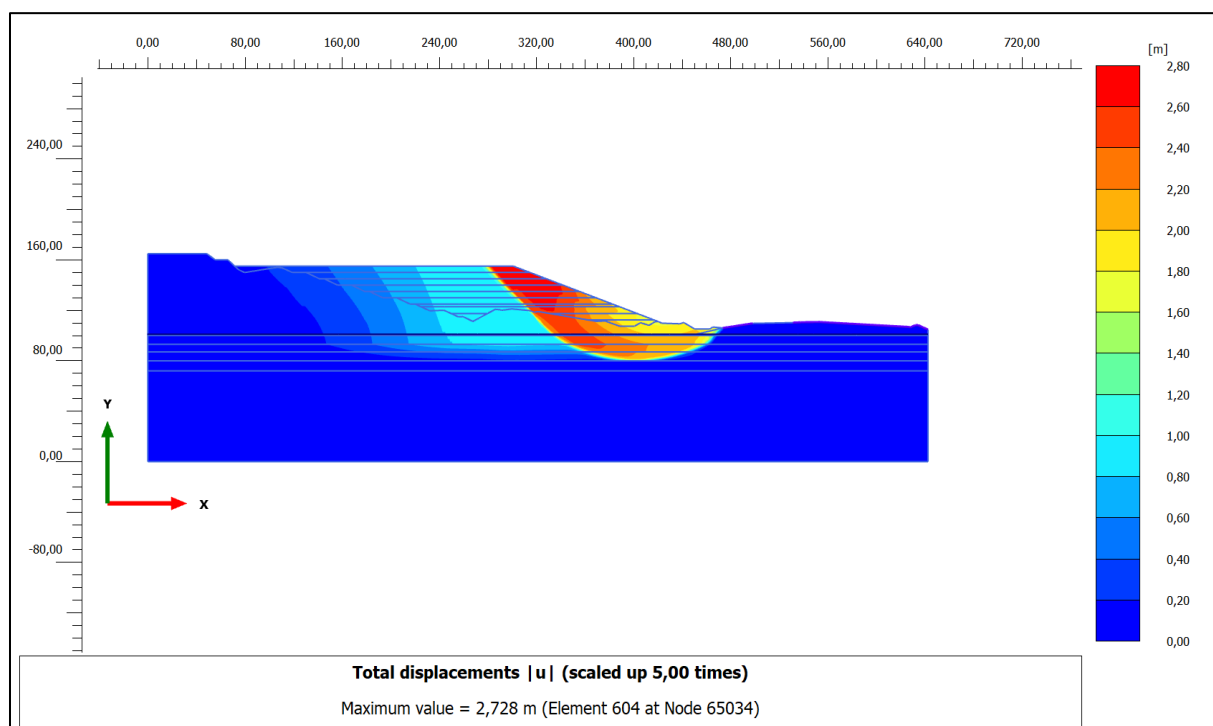


Figure N° 108 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 10^{ème} couche (FS = 2,05)

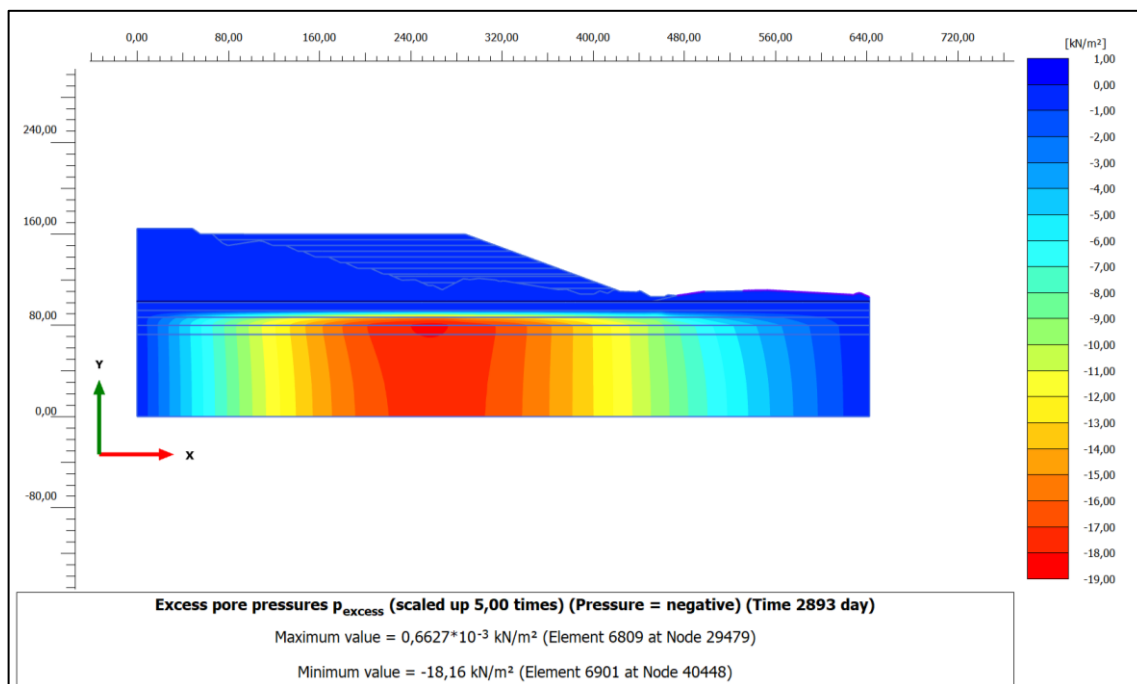


Figure N° 109 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 11^{ème} couche
(Surpressions max= 18,16 kPa)

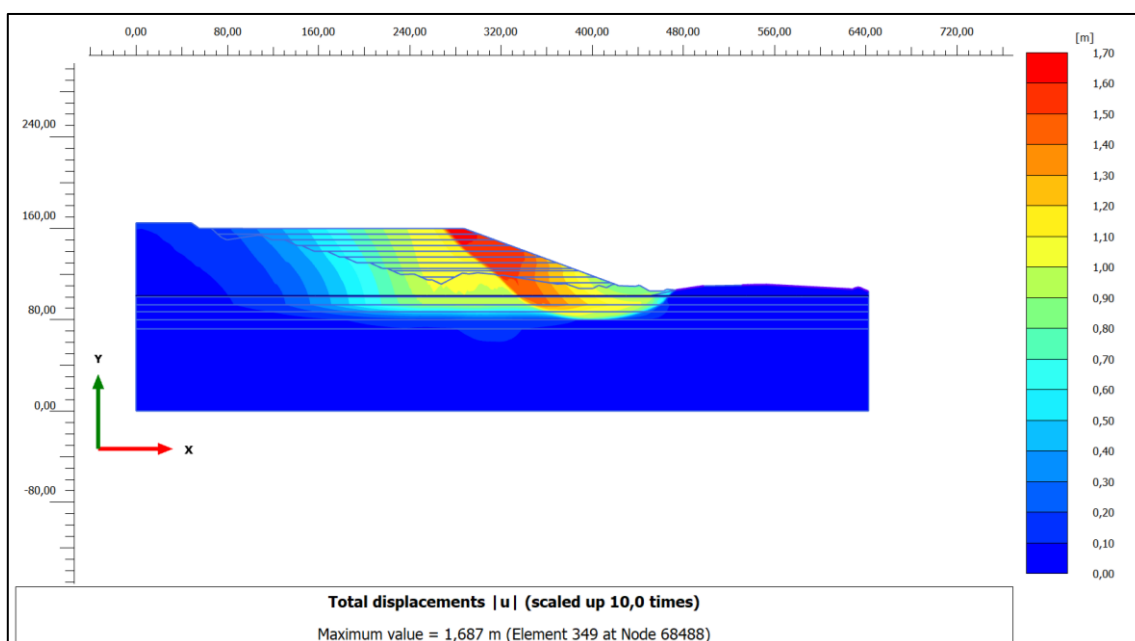


Figure N° 110 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 11^{ème} couche
(FS = 1,99)

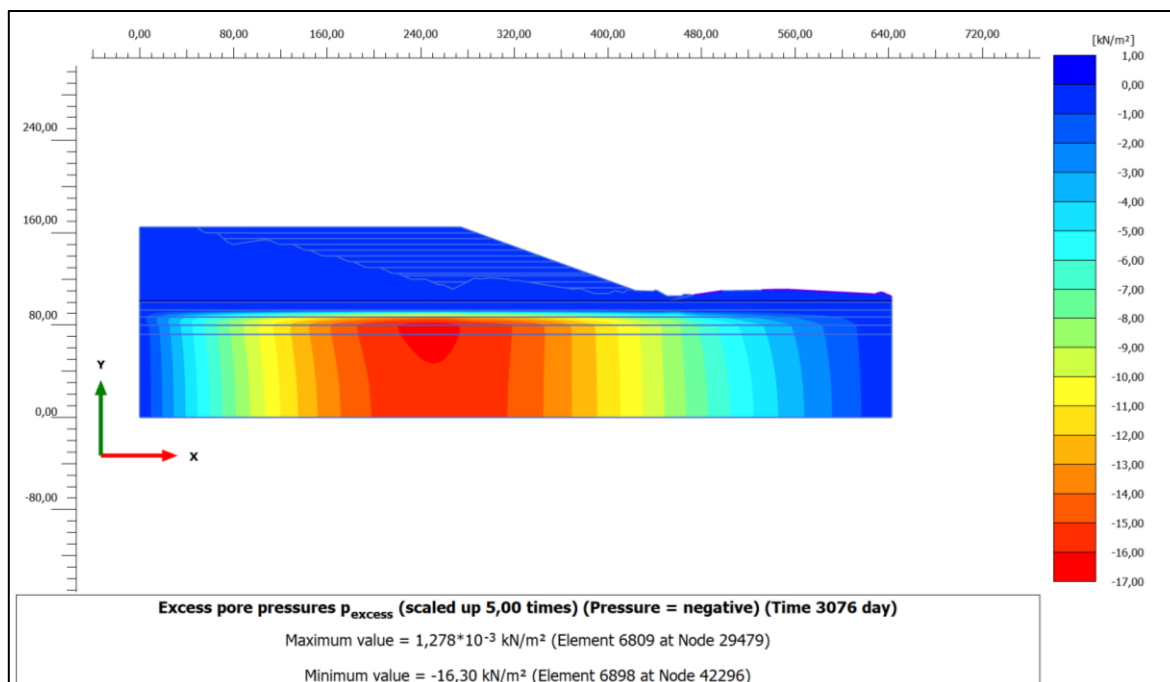


Figure N° 111 : Répartition des surpressions interstitielles après la construction de la 12^{ème} couche (Surpressions max= 16,30 kPa)

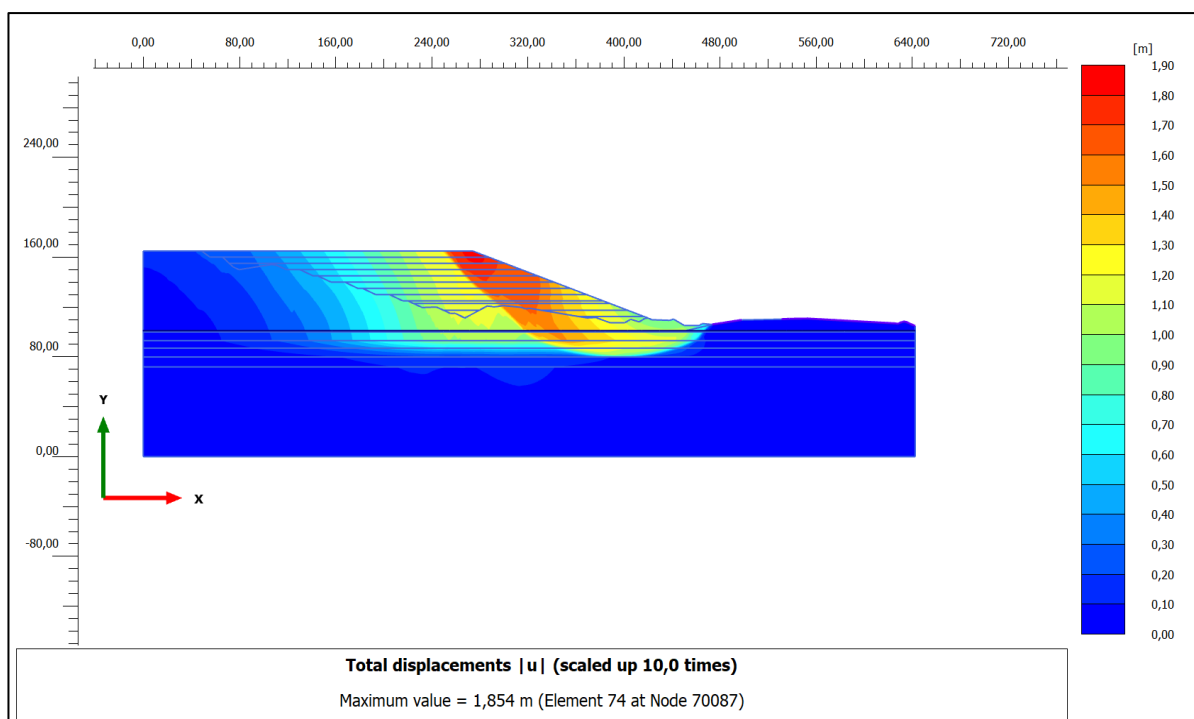


Figure N° 112 : Surface de glissement préférentiel après la construction de la 12^{ème} couche (FS = 1,95)

ANNEXE N°8 :: SORTIES GEOSLOPE – CALCUL LONG TERME DE LA PHASE 3

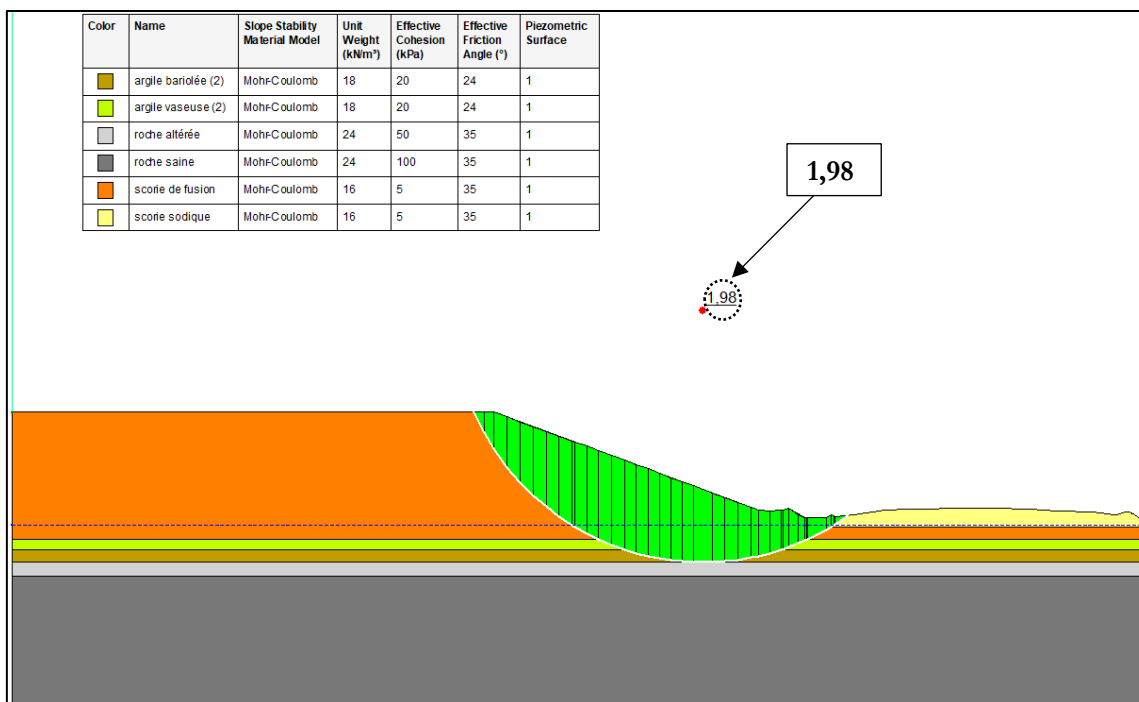


Figure N° 113 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées
(Coupe 1, FS =1,98)

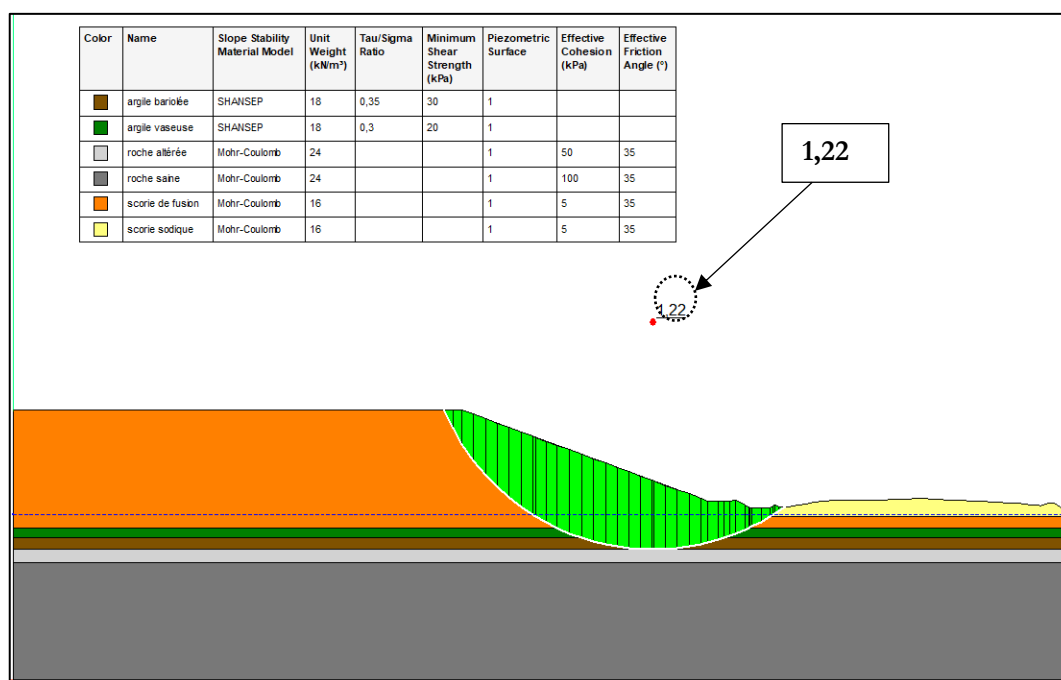


Figure N° 114 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique –
séisme allégeant
(Coupe 1, FS =1,22)

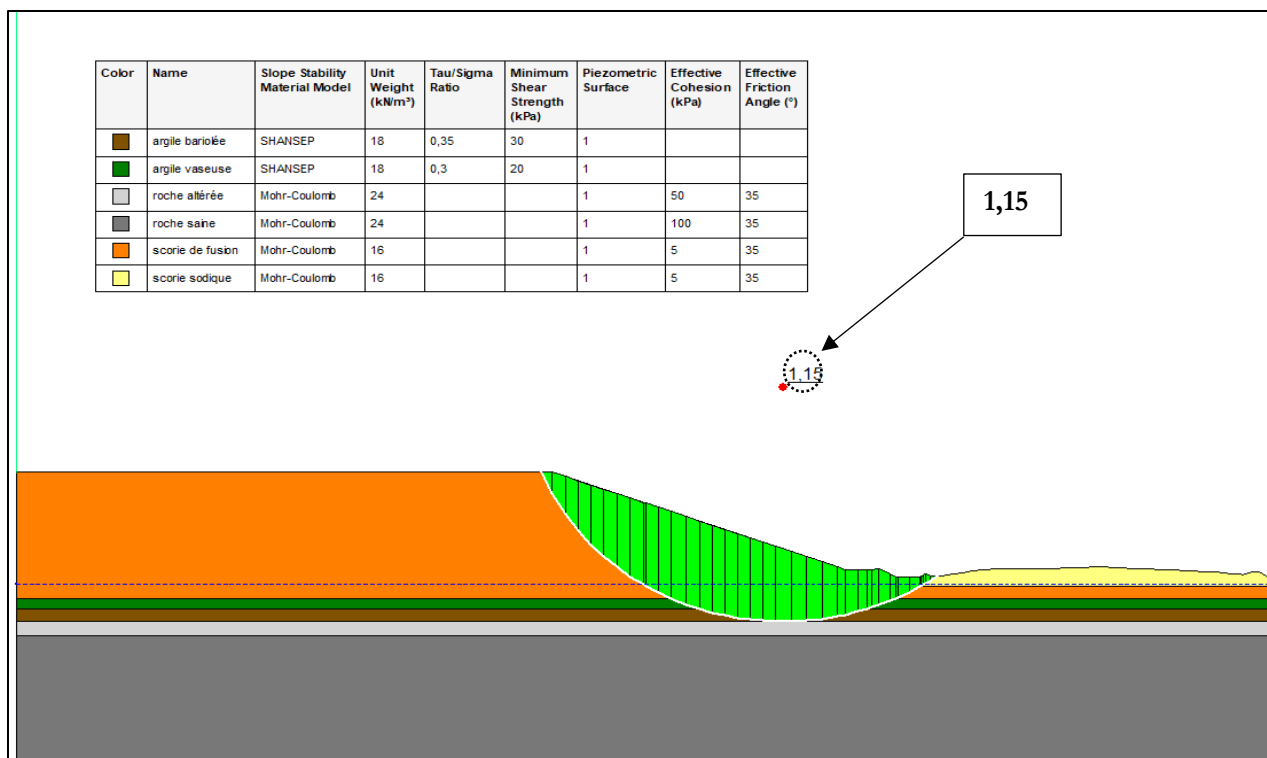


Figure N° 115 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique –
séisme pesant
(Coupe 1, FS =1,15)

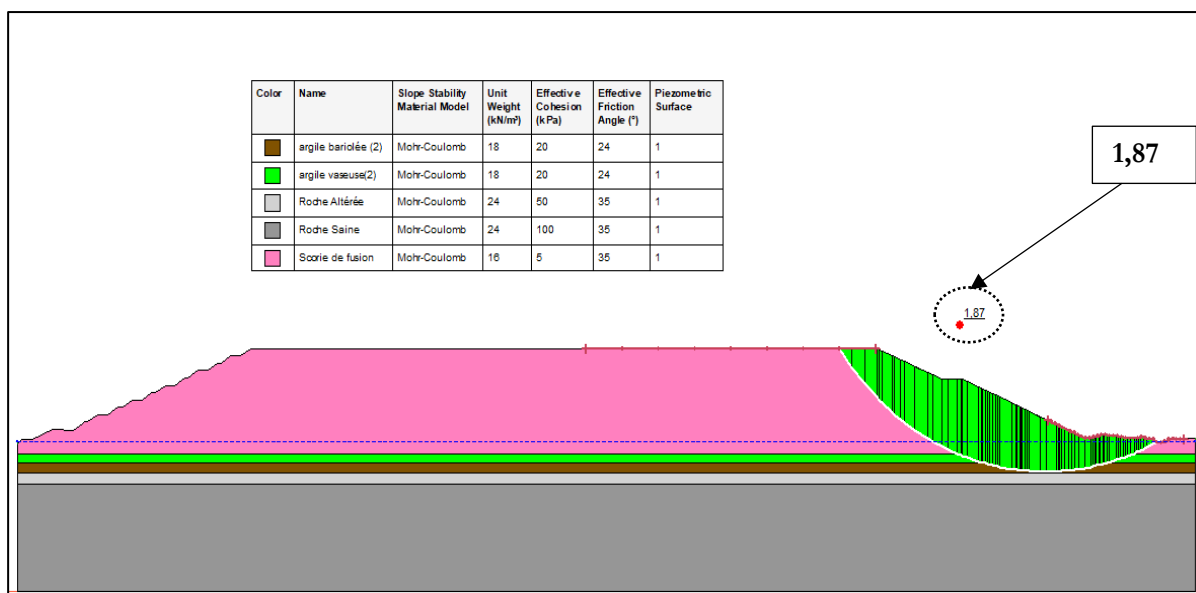


Figure N° 116 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées
(Coupe 2, FS =1,87)

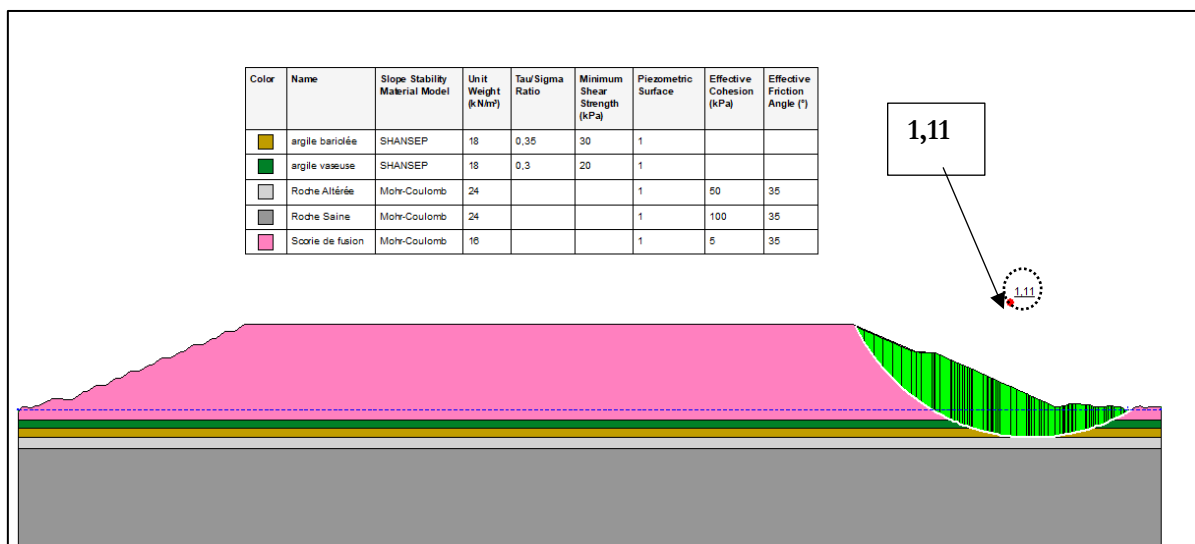


Figure N° 117 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme allégeant (Coupe 2, FS =1,11)

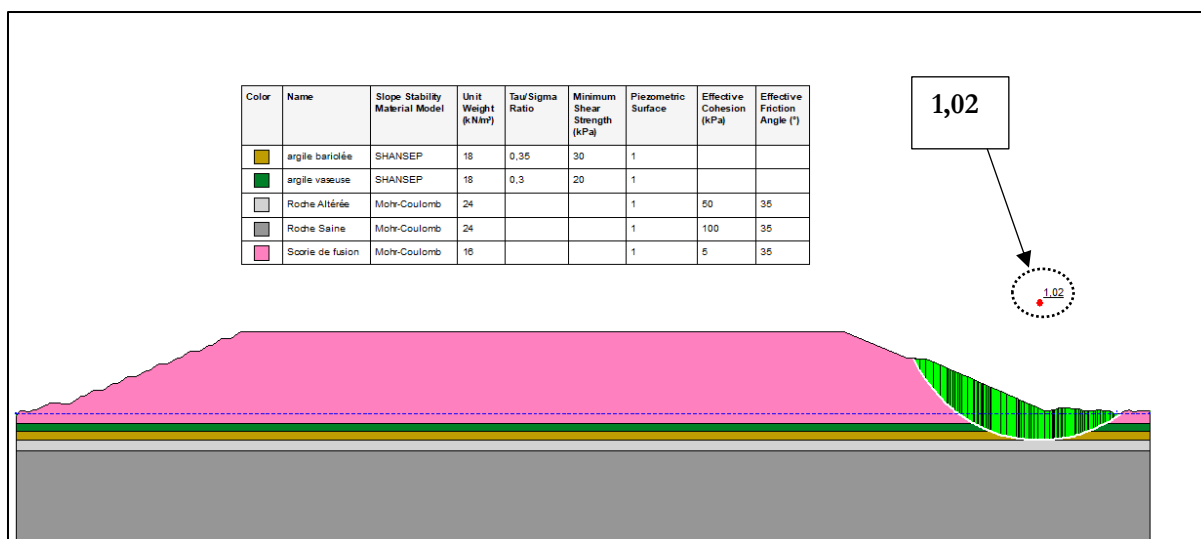


Figure N° 118 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique – séisme pesant (Coupe 2, FS =1,02)

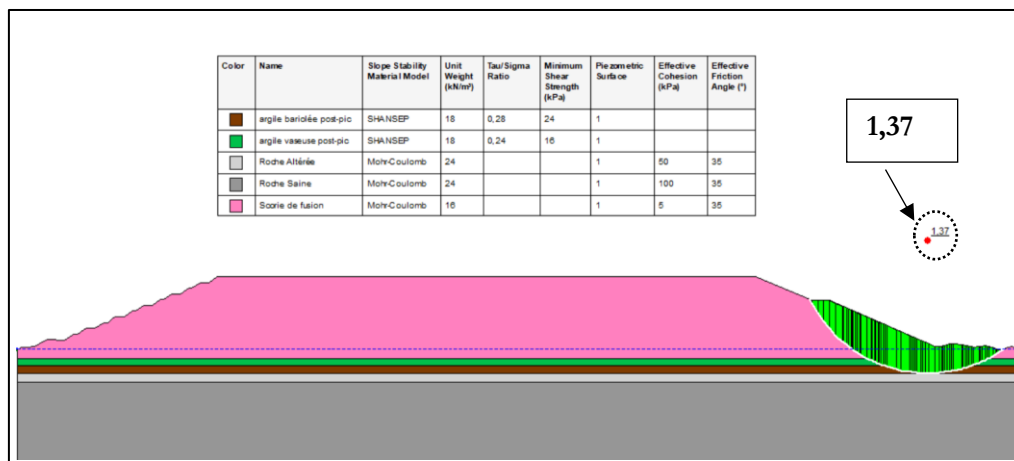


Figure N° 119 : Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation post-sismique
(Coupe 2, FS =1,37)

ANNEXE N°9 : DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS

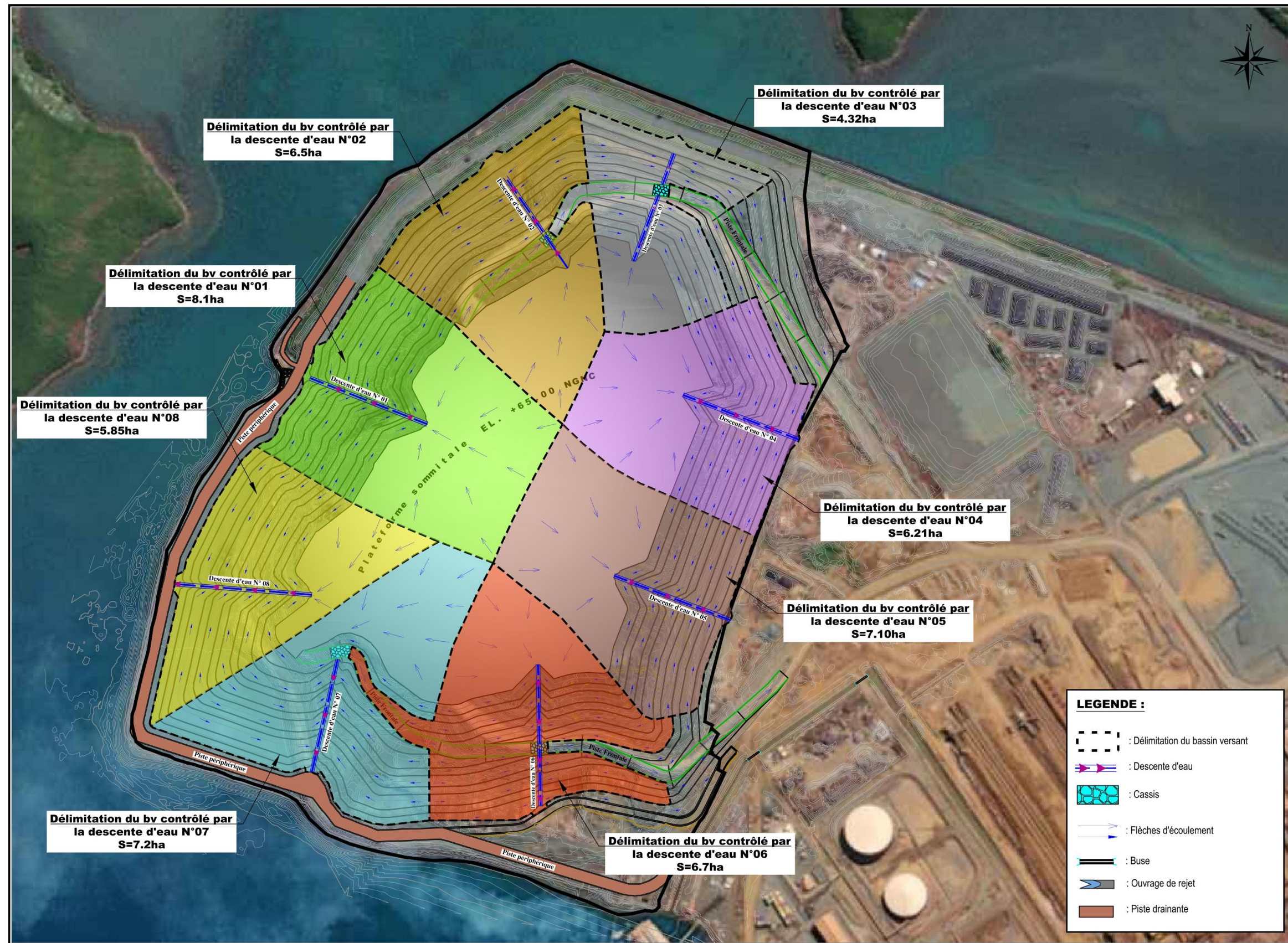


Figure N° 120 :. Délimitation des bassins versants contrôlés par les descentes d'eau de la verse autorisée

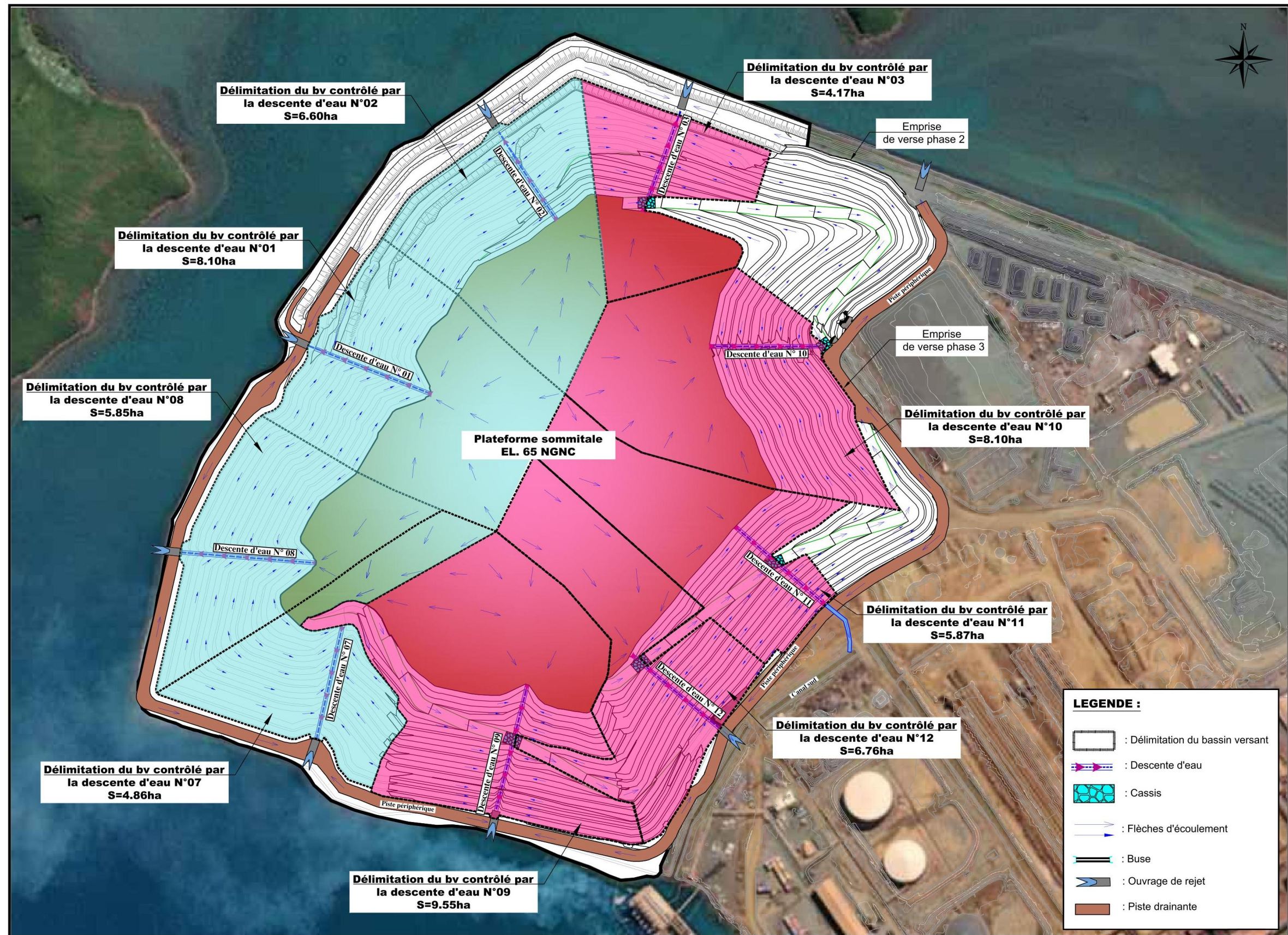
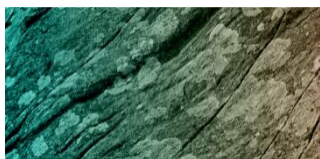


Figure N° 121 : Délimitation des bassins versants contrôlés par les descentes d'eau projetées

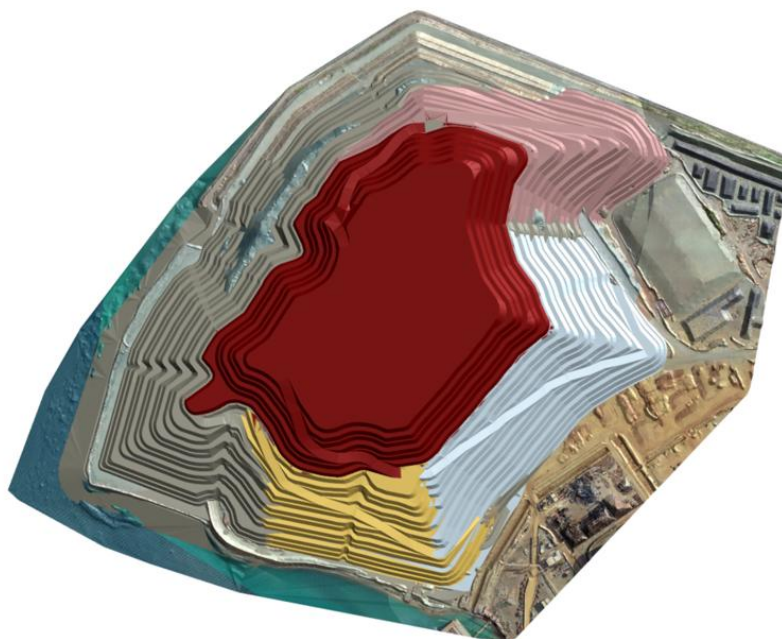


MINE DE DONIAMBO

ETUDE DE FAISABILITE DE REHAUSSE DES TROIS PREMIERES PHASES D'EXTENSION DE LA VERSE A SCORIES

Justification géotechnique et hydraulique

Client : SLN



Réf : MC-25-156-SLN-22-R02

B	24/03/2026	MAJ		
A	05/02/2026	Création		
Révision	Date	Objet de la modification		
		Rédacteurs	Vérificateurs	Approbateur
Nom et prénom		Meriem BEN HAMIDA Mariem BEL MABROUK	Seif ASKRI Rihem JABNOUN	Samir ENNOUR
Fonction		Ingénieurs d'études	Ingénieurs spécialiste	Expert géotechnique

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	1
1.1.	Contexte général	1
1.2.	Consistance de l'étude Avant-Projet Sommaire	1
2	DOCUMENT DE REFERENCES	2
3	DESCRIPTION GENERALE DU PROJET	2
4	DONNEES DE BASES ET CRITERES DE DESIGN	6
4.1	Contexte géologique et caractérisation mécanique des matériaux	6
4.2	Données bathymétriques	9
4.3	Données piézométriques	11
4.4	Contexte sismique	12
4.5	Démarche de l'analyse de stabilité de l'extension de la verse	14
4.5.1	Modèle de calcul	14
4.5.2	Analyse de la stabilité en fin de construction - Court terme	15
4.5.3	Analyse de la stabilité de l'extension de la verse à long terme	16
4.5.4	Analyse de la stabilité de la verse vis-à-vis de l'aléa sismique	16
4.6	Critères de design des ouvrages hydrauliques	17
5	JUSTIFICATION GEOTECHNIQUE DE LA REHAUSSE	18
5.1	Modèle de calcul	18
5.2	Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en phase ultime de rehausse en condition non drainée	20
5.3	Analyse de la stabilité de verse à long terme	21
6	JUSTIFICATION HYDRAULIQUE	22
7	SURVEILLANCE ET DISPOSITIFS D'AUSCULTATION	23
8	DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES PARTICULIERES	25
9	CONCLUSION	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 1	3
Figure 2 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 2.....	3
Figure 3 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 3.....	4
Figure 4. Vue 3D de la rehausse de la verse à scories	5
Figure 5. Plan d'implantation des sondages	7
Figure 6. Log synthétiques des sondages carottés (Réf : 1639 B – Rapport n° R. 81 363 A)	8
Figure 7. Données bathymétriques.....	10
Figure 8. Plan d'implantation du dispositif d'auscultation - piézomètres.....	11
Figure 9. Zonage et classement de l'aléa sismique – Nouvelle Calédonie.....	13
Figure 10- BRGM 2021. Valeurs du PGA-Nouvelle Calédonie.....	13
Figure 11. Classification du sol au sens de l'Eurocode 8	14
Figure 12. Implantation des coupes étudiées.....	19
Figure 13. Géométrie du modèle de calcul - Coupe 1	19
Figure 14. Géométrie du modèle de calcul - Coupe 2.....	20
Figure 15. Géométrie du modèle de calcul - Coupe 3.....	20
Figure 16. Descente d'eau en enrochements	23
Figure 17. Coupe type de la descente d'eau en enrochements.....	23
Figure 18. Implantations du dispositif d'auscultation et de surveillance de la VAS	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données géométriques du talus final.....	4
Tableau 2. Récapitulatif de l'ensemble des données hydromécaniques des campagnes géotechniques menées (Réf : 1639 B – Rapport n° R. 81 363 A).....	7
Tableau 3. Caractéristiques mécaniques du sol adoptées pour le calcul Plaxis.....	15
Tableau 4. Caractéristiques mécaniques du sol adoptées pour le calcul Geo Slope	16
Tableau 5. Paramètres géotechniques retenus pour les calculs long terme Geo-slope	17
Tableau 6. Bases du design	17
Tableau 7. Méthodes de design adoptées pour les justifications hydrauliques du projet.....	18
Tableau 8. Résultats des calculs de stabilité en phase ultime en condition non drainée.....	21
Tableau 9. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel.....	21

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE N°1 : COUPES DE CALCUL ET PLAN DE SITUATION	- 1 -
ANNEXE N°2 : SORTIES GEOSLOPE	- 6 -

1 INTRODUCTION

1.1. Contexte général

Les scories de fusion de l'usine de Doniambo, sont actuellement, stockées dans une verse à scories, reposant sur le fond marin à moins de 10 m de profondeur et située à proximité de l'usine.

Dans le cadre des réflexions menées par la SLN sur les capacités futures de stockage des scories, MECATER a été sollicitée pour réaliser les justifications géotechniques et hydrauliques des projets d'extension de la verse actuelle. Au total, 6 phases d'extension ont été étudiés et justifiées avec une capacité de stockage supplémentaire de 25 925 000 m³.

De plus des projets d'extensions, la SLN a mandaté MECATER pour réaliser une étude de faisabilité sommaire pour une rehausse de la verse de 30 m au-dessus de la cote autorisée à +65 m NGNC. Cette rehausse s'étendra seulement sur les trois premières phases d'extension.

Dans ce rapport, nous présentons l'ensemble des justifications géotechnique et hydraulique relatives au projet de rehausse de la verse à scories.

1.2. Consistance de l'étude Avant-Projet Sommaire

Le projet de la rehausse de la verse à scories vise à concevoir et justifier techniquement les aménagements nécessaires à la rehausse de la verse jusqu'à la cote +95 NGNC, tout en garantissant la stabilité géotechnique de l'ouvrage et la maîtrise des impacts environnementaux.

Dans ce rapport nous présentons :

- L'évaluation de la stabilité mécanique des talus libres de la verse en phase ultime à court terme ;
- L'évaluation de la stabilité mécanique des talus libres de la verse à long terme et vis-à-vis des sollicitations sismiques ;
- La gestion des eaux de la verse durant la construction et en phase ultime de la rehausse
- Les dispositifs d'auscultation et de surveillance de la verse ;
- Les dispositions constructives à mettre en œuvre.

2 DOCUMENT DE REFERENCES

[1] Etude APD de stockage des scories de fusion réalisée par TEC-INGENIERIE en 2003 : (Réf: *Rapport 1639 B – n° 81 369 B.pdf*) ;

[2] Synthèse géotechnique réalisée par TEC-INGENIERIE dans le cadre de l'étude APD de stockage des scories de fusion : (Réf: *1639 B – Rapport n° R. 81 363 A.pdf*) ;

[3] Projet de construction de verse à scorie à Doniambo-APS-Etude du comportement hydrodynamique de la verse réalisé par MECATER en 2003 : (Réf: *Synthèse étude hydro scorie.pdf*) ;

[4] Evaluation probabiliste de l'aléa sismique de la Nouvelle-Calédonie-brgm-2022 : (Réf: *BRGM/RC-71577-FR Version 1 du 22 mars 2022.pdf*) ;

[5] Etude d'exécution de la verse à scorie de Doniambo réalisée par MECATER en 2008 – (Réf: *Mecater/SLN/14/SG/D/2008*) ;

[6] Justification de l'augmentation de cadence de stockage au niveau de la VAS, réalisée par MECATER en 2024 : (Réf: *MC-24-116-SLN-05*) ;

[7] Design de l'extension de la verse à scories phase 1 (Réf: *projet_ext1_vas_v4_cut.dxf*) ;

[8] Design de l'extension de la verse à scories phase 2 (Réf: *projet_ext2_vas_v2_sr_cut.dxf*) ;

[9] Design de l'extension de la verse à scories phase 3 (Réf: *projet_ext3_vas_v3_sr_v2_cut.dxf*) ;

[10] Levé topographique du 31/12/2025 (Réf: *20251231_extrait_topo_dbo_vas.dwg*) ;

[11] Drains zone maritime tel que construit : (Réf: *20240826_SLN_45B10-PDE-T-0002_A_recolement_drain_zone_maritime.dwg*) ;

[12] Optimisation de la section des descentes d'eau de la verse à scories (Réf: *MC-23-140-SLN-20-R01*).

3 DESCRIPTION GENERALE DU PROJET

Selon l'arrêté d'exploitation actuel de la VAS à Doniambo, la cote ultime actuellement autorisée est +65 m NGNC et ce principalement pour des contraintes d'intégration paysagères. Le présent rapport a pour objet d'évaluer l'impact de la rehausse à la cote +95 NGNC sur la stabilité globale de la verse.

Le projet de rehausse s'étendra sur la plateforme résultant des extensions appelées phases 1 à 3 suivantes :

- **Phase 1 :** Zone gazière : Cette extension consiste au comblement de l'ancienne zone « Menaouer ». Elle s'étendra sur une emprise de 8,30 ha et offre une capacité de stockage de 1,06 Mm³ ;

- **Phase 2 :** Cette phase consiste à stocker les scories de fusion au niveau de la zone de Casse-fonte située au Nord de la verse actuelle sur une emprise de 8,65 ha. Cette extension offre une capacité de stockage supplémentaire de 1,14 Mm³;
- **Phase 3 :** Zone 5 S et parc à boues : Cette phase consiste à stocker les scories de fusion au niveau de la zone dédiée actuellement au stockage des boues. L'extension couvre une emprise de 13,95 ha et permet d'apporter un volume supplémentaire de l'ordre de 2,5 Mm³.

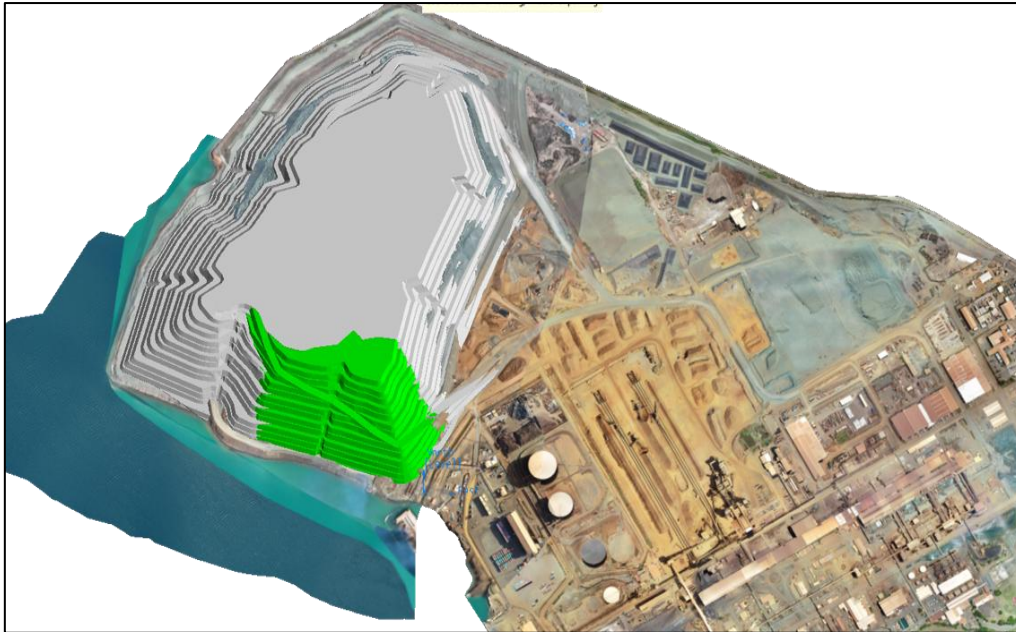


Figure 1 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 1

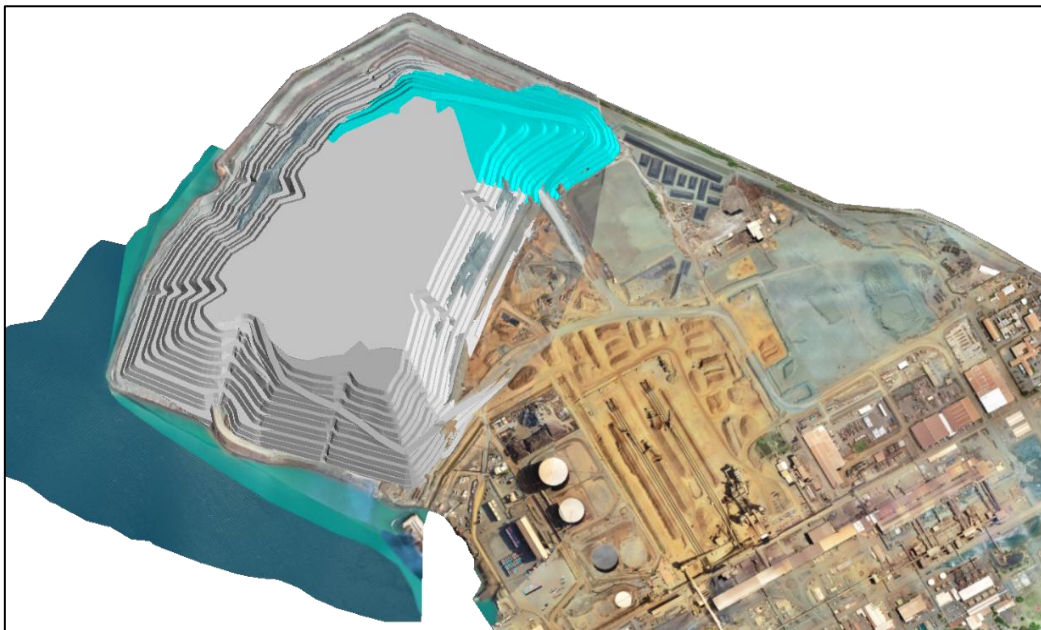


Figure 2 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 2

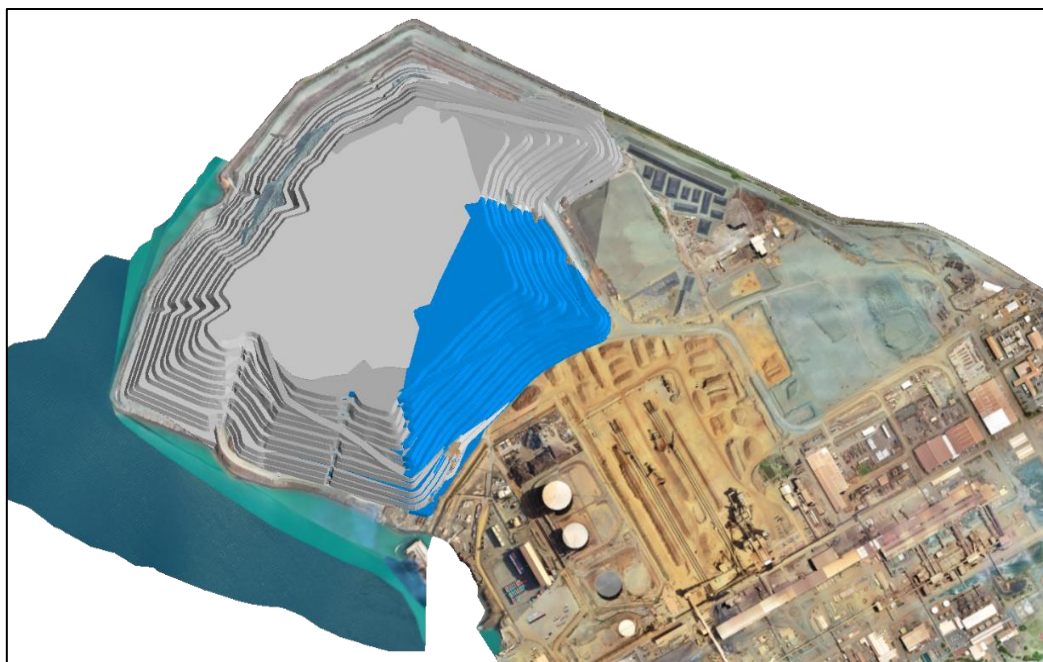


Figure 3 : Vue 3D de l'extension de la verse à scorie -Phase 3

La rehausse sera réalisée à la fin des trois phases d'extension sur une emprise d'environ 26 ha et permet d'apporter une capacité de stockage supplémentaire proche de 2,450 Mm³.

Les critères géométriques de la rehausse sont similaires au projet autorisé, à savoir :

- Étalement par sous niveaux de 5 m d'épaisseur avec un retrait de 2,6 m entre deux sous niveaux.
- Aménagement d'une banquette de 10 m de largeur entre deux niveaux successifs de 10 m.
- La pente intégratrice du talus libre est de 25°. Elle sera limitée à 23° pour les talus interceptés par la piste d'accès.

Les caractéristiques géométriques du projet sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Données géométriques du talus final

Largeur Pistes	Pente piste	Pente Intégratrice	Pente locale	H. du niveau	Banquettes	
					Larg.	Devers
18 m	<10%	23°/25°	35°	5 m	2,6 m 7,5 m	4% 5% (tous les 10 m)

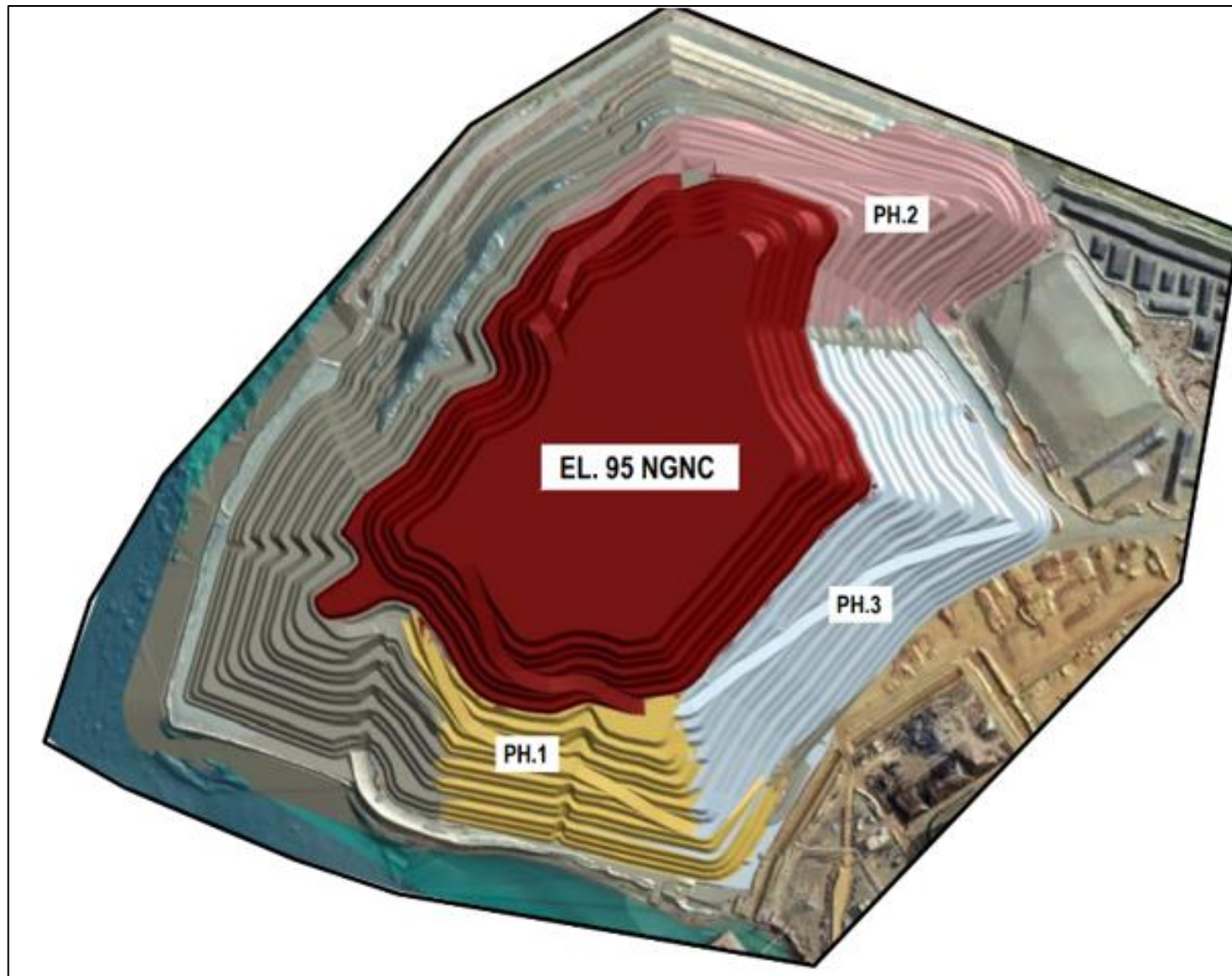


Figure 4. Vue 3D de la rehausse de la verse à scories

4 DONNEES DE BASES ET CRITERES DE DESIGN

4.1 Contexte géologique et caractérisation mécanique des matériaux

La plateforme de la verse à scories a été construite par remblaiement avec de la scorie, en site maritime sur des horizons vasards de fond de baie. Le stockage des scories de fusion repose sur les formations quaternaires superficielles de type colluvions.

Des campagnes de reconnaissance géotechnique réalisées en 1993 et 2001, ont été complétées par un programme de reconnaissance en 2003, pour les besoins de l'étude de l'extension de la capacité de stockage de la verse. La campagne de reconnaissance complémentaire a été réalisée par LBTP entre mai et août 2003 et comporte :

- **2 sondages carottés** en PQ, référencés SC4 et SC5, de profondeur respective 30 et 45 m, avec prélèvements d'échantillons intacts dans les niveaux sous-jacents à la scorie ;
- **2 sondages destructifs** en NQ, référencés SD1 et SD2, de profondeur respective 18 et 10 m, avec réalisation dans la scorie de 9 essais de perméabilité type Lefranc par injection ;
- **6 essais de cisaillement au phicomètre** dans la scorie (3 dans SD1 et 3 dans SC5), aucun échantillon intact n'ayant pu être prélevé dans cet horizon.

Les prélèvements d'échantillons intacts ont permis la réalisation des essais de laboratoire suivants :

- 10 identifications complètes (teneur en eau, poids spécifique des grains, poids spécifique apparent, limites d'Atterberg, analyse granulométrique) ;
- 7 essais triaxiaux de type consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU+u) ;
- 6 essais œdométriques.

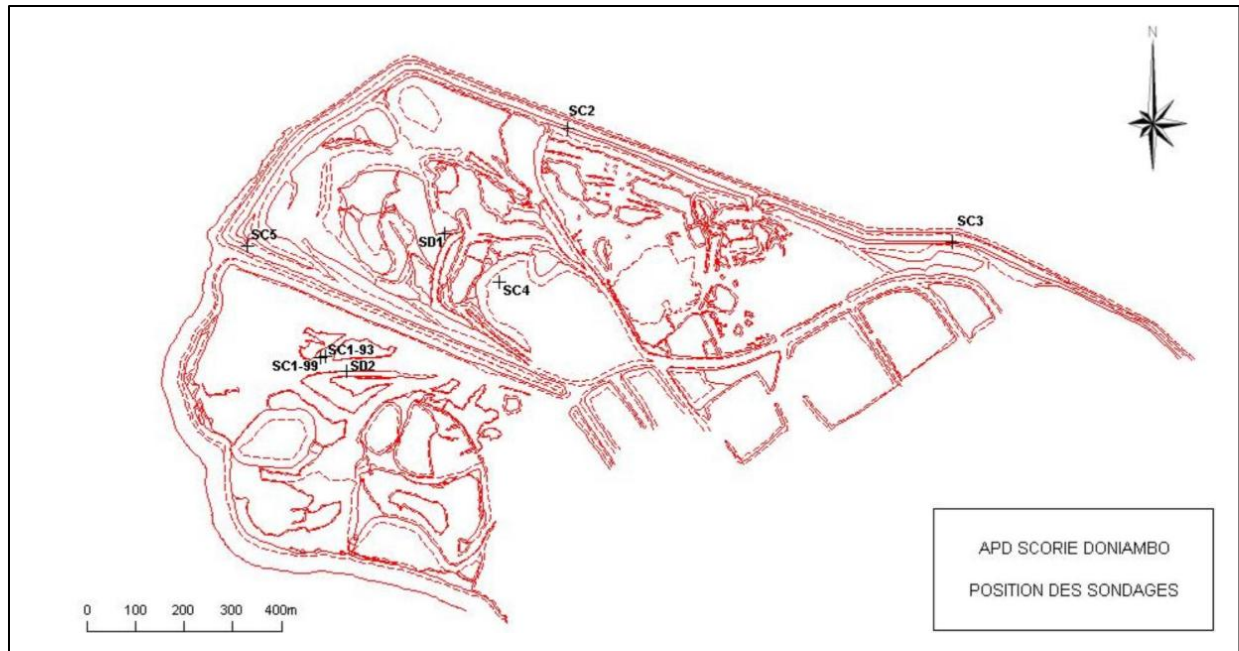


Figure 5. Plan d'implantation des sondages

Ci-dessous tableau récapitulatif de l'ensemble des données hydromécaniques acquises au cours des trois campagnes géotechniques réalisées sur le site.

Tableau 2. Récapitulatif de l'ensemble des données hydromécaniques des campagnes géotechniques menées (Réf : 1639 B – Rapport n° R. 81 363 A)

Lithologie			Propriétés physiques					Propriétés mécaniques												Hydro géologie
Horizon	Description	Puissance (m)	γ kN/m ³	w %	<80 μ %	w _L %	I _p	c _{UU} kPa	ϕ_{UU} (°)	c _i kPa	ϕ_i (°)	c' kPa	ϕ' (°)	e ₀	C _c	σ'_p kPa	R _c MPa	E _m MPa	PI MPa	K _L m/s
Remblai	Scorie de fusion	11,8 à 21,3								2 à 8	32 à 42							1,4 à 2	0,3 à 0,5	1,1.10 ⁻⁶ à 1,4.10 ⁻⁵
Argile vaseuse		3,5 à 7	17 à 19	33 à 56	42 à 99	40 à 92	20 à 68	46	0	35	0	0 à 65	10 à 30	0,93 à 1,87	0,26 à 0,69	44 à 75		2 à 7	0,5 à 0,6	
Argile grise		1 à 9	17 à 20	24 à 61	45 à 97	67 à 81	47 à 57	10	24			0	20	0,92 à 1,85	0,11 à 0,65	59 à 63		5 à 15	0,5 à 1,4	
Roche altérée		SC4 : 9 SC5 : >9	26,5														13,3 à 25,3	50 à 77	4,8 à 5,2	
Roche saine		SC4 : >3																		

Valeurs en italique : une seule mesure réalisée
 γ : poids volumique apparent (humide)
w : teneur en eau
<80 μ : passant à 80 microns
w_L : limite de liquidité
I_p : indice de plasticité
c_{UU} : cohésion apparente mesurée à l'appareil triaxial
 ϕ_{UU} : angle de frottement apparent mesuré à l'appareil triaxial
c_i : cohésion apparente mesurée au phicomètre
 ϕ_i : angle de frottement apparent mesuré au phicomètre
c' : cohésion effective (long terme)
 ϕ' : angle de frottement effectif (long terme)
e₀ : indice des vides en place
C_c : indice de compression
 σ'_p : pression de préconsolidation
R_c : résistance à la compression simple
E_m : module pressiométrique
PI : pression limite
K_L : perméabilité Lefranc

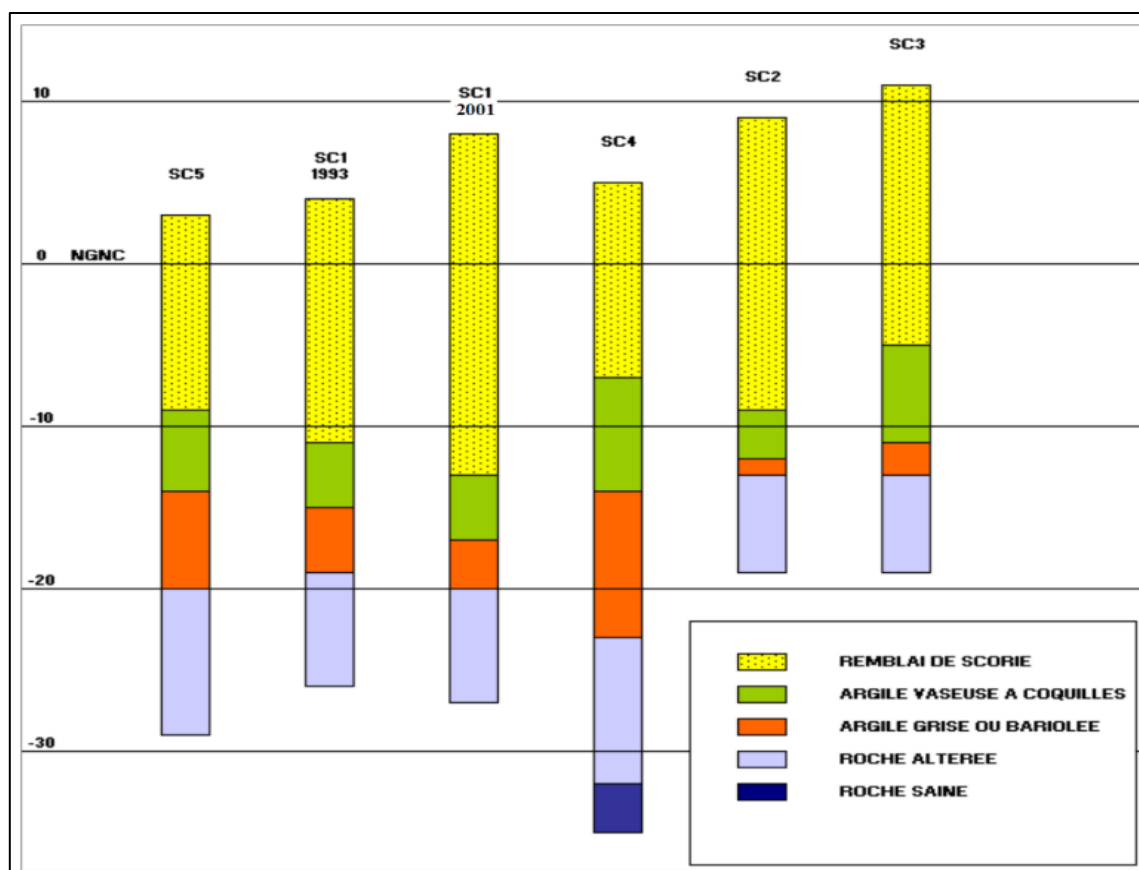


Figure 6. Log synthétiques des sondages carottés (Réf : 1639 B – Rapport n° R. 81 363 A)

L'interprétation des sondages carottés et les différents essais en laboratoire ont mis en évidence la succession des formations géologiques suivantes :

- **Remblai de scorie** : reconnue sur des épaisseurs allant de **11,8 à 21,3 m** au droit des sondages carottés. La scorie de Nickel est un sable de type 0/5 mm, mal gradué, très propre (pas de fines) et peu dégradable. Il s'agit d'un **matériau frottant à cohésion nulle** ;
- **Couche de transition composée d'un mélange de scorie et d'argile vaseuse**, sur une épaisseur variable de **1 à 2 m** ;
- **Argile vaseuse avec débris de coquilles** : reconnue sur des épaisseurs allant de **3,5 à 7 m** au droit des sondages carottés. Il s'agit d'une argile **plastique à très plastique**, grise verdâtre, contenant des débris de coquilles et à **teneur en eau très élevée**. L'argile vaseuse a une consistance ferme à très molle. C'est un horizon **sous-consolidé, moyennement compressible à très compressible**. La résistance au cisaillement à long terme de l'argile vaseuse est très variable : la cohésion varie de **0 à 65 kPa (24 kPa en moyenne)**, l'angle de frottement interne varie de **10 à 30 degrés** ;
- **Argile grise ou bariolée « soupe de sorail »** : reconnue sur des épaisseurs allant de **1 à 9 m** au droit des sondages carottés. Il s'agit d'une **argile plastique à très**

plastique, de consistance ferme à très ferme, moyennement compressible en général et **à teneur en eau très variable**. Il existe des passages sableux et graveleux au sein de cet horizon. Cet horizon présente des caractéristiques pressiométriques variables mais assez élevées dans l'ensemble. Les rapports E/Pl correspondent à une **argile normalement consolidée**. **Les caractéristiques de cisaillement à long terme disponibles à ce jour sont faibles ;**

- **La roche altérée** : reconnue sur des épaisseurs allant **de 5,9 à 9,2 m** au droit des sondages carottés. Il s'agit d'un faciès de transition entre l'argile grise ou bariolée et la roche saine (grès tufacé). Le toit de ce niveau de transition est généralement représenté par une argile graveleuse très ferme avec des caractéristiques pressiométriques élevées. La base est représentée par un grès plus ou moins désagrégré avec une fracturation très dense ;
- Le toit de **la roche saine** se trouve à la cote **-32 NGNC**. L'horizon sain a été reconnu sur 3 m d'épaisseur au droit de ce sondage. Il s'agit de grès tufacés de l'Eocène III.

Du point de vue structural, le substratum rocheux est probablement affecté par les structures géologiques majeures identifiées au niveau du presqu'île de Nouméa qui correspondent sensiblement à l'orientation générale de fracturation de la Grande Terre (Nord-Ouest/Sud-Est).

Il est à noter que l'extension de la verse est constituée de scories de fusion qui seront mise en œuvre par couche de 5 m maximum de hauteur. L'extension repose sur des scories de fusion d'épaisseur variable, mises en place sur le fond marin pour la création de plateforme de stockage.

4.2 Données bathymétriques

La zone de levé bathymétrique est représentée en vert claire. Le reste de la zone a été extrapolée.

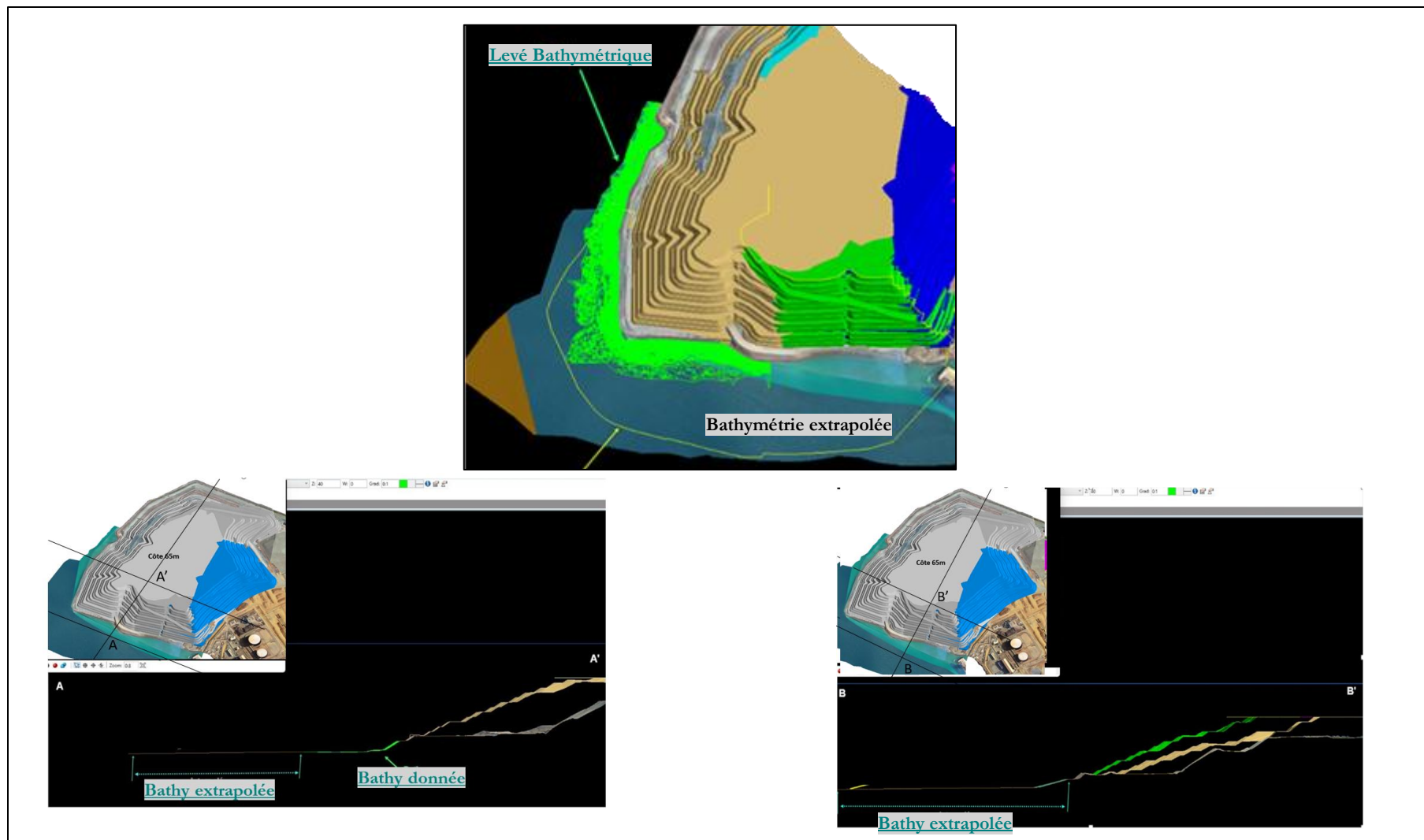


Figure 7. Données bathymétriques

4.3 Données piézométriques

Le dispositif d'instrumentation installé au niveau de la verse à scories comporte 6 piézomètres.



Figure 8. Plan d'implantation du dispositif d'auscultation - piézomètres

Les relevés piézométriques réalisés montrent que le niveau de la nappe est quasi constant (selon le dernier levé 2024) :

- **PZ11** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de +0,26 et +0,61 NGNC ;
- **PZ21** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de +0,43 et +1,23 NGNC ;
- **PZ31** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de -0,16 et +0,62 NGNC ;
- **PZ41** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de -0,09 et +0,65 NGNC ;
- **PZ51** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de -0,04 et +0,68 NGNC ;
- **PZ61** : Le niveau piézométrique se situe à des cotes variant de -0,19 et +0,54 NGNC.

Le niveau piézométrique serait proche du niveau de la mer et fluctue entre la côte -0,15 NGNC et +1,2 NGNC. Le niveau hydrostatique retenu pour l'analyse sera à **+ 1 m NGNC**.

4.4 Contexte sismique

D'après le zonage proposé par l'étude BRGM-2007 et mis à jour en 2022, la verse à scorie de Doniambo serait située dans une zone où l'activité superficielle est faible (**R2-Bombement Externe diffus**), de profondeur 20 km, avec une accélération horizontale maximale du sol de l'ordre de **0,99 m/s²**.

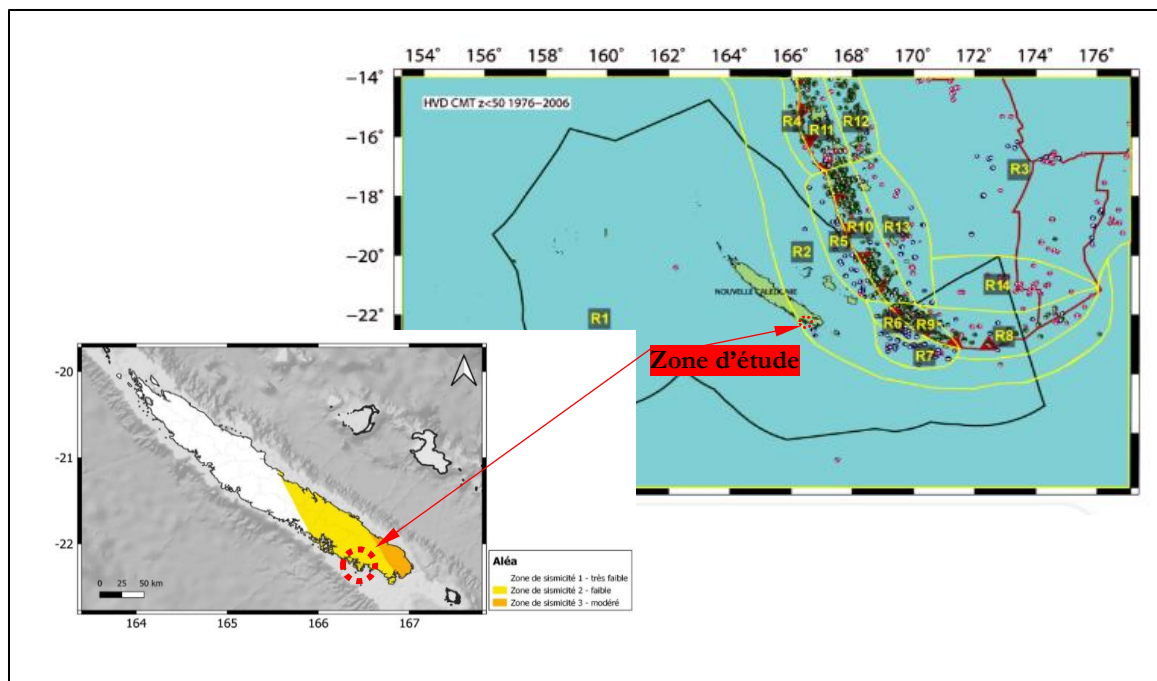


Figure 9. Zonage et classement de l'aléa sismique – Nouvelle Calédonie

Période de retour	475 ans	2 000 ans	5 000 ans	10 000 ans
Moyenne (cm/s ²)	99.1	181.3	254	321.5
P15% (cm/s ²)	69.1	130.5	176	214.2
Médiane (p50%) (cm/s ²)	99.2	176.2	244.5	309.1
P85% (cm/s ²)	121.2	223	308.8	384.9

Figure 10- BRGM 2021. Valeurs du PGA-Nouvelle Calédonie

Cette zone de sismicité (R2) correspond à un aléa faible à très faible. Le sol de fondation est considéré comme sol de catégorie E ou S1 au sens de l'Eurocode 8 : « Sols meubles / très compressibles ».

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (coups/30 cm)	c_u (kPa)
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de v_s de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $v_s > 800$ m/s			
S_1	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ($PI > 40$) et une teneur en eau importante.	< 100 (valeur indicative)	—	10 – 20
S_2	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S_1 .			

Figure 11. Classification du sol au sens de l'Eurocode 8

4.5 Démarche de l'analyse de stabilité de l'extension de la verse

Pour la justification de la stabilité mécanique des talus de la verses à scories après rehausse jusqu'à la cote +95 m NGNC, nous adoptons la démarche décrite ci-après :

4.5.1 Modèle de calcul

Le choix des coupes a été établi de manière à pouvoir évaluer l'impact de la rehausse sur la stabilité des talus libres de la verse et en particulier du côté de l'extension par endigage de la zone maritime. Ce choix permet aussi d'analyser l'impact de la rehausse dans la continuité des justifications de stabilité établies pour les phases 1 à 3.

En l'absence de données bathymétriques couvrant l'ensemble de la zone d'étude, la morphologie des fonds marins a été déduites par extrapolation des données des sondages carottés des campagnes géotechniques réalisées sur le site depuis 1993.

Nous considérons la lithologie suivante pour les calculs :

- **Niveau 1 :** Scories de fusion en place (ép. Variable)
- **Niveau 2 :** Argile vaseuse (ép. 6 m)
- **Niveau 3 :** Argile bariolée (ép. 7 m)
- **Niveau 4 :** Roche altérée (ép. 8 m)
- **Niveau 5 :** Roche saine (substratum)

Le niveau de la nappe sera pris à +1 m NGNC.

Ci-dessous un tableau récapitulatif des géométries prise en compte :

**Le niveau des fonds marin a été déduit des logs synthétiques des sondages carottés des campagnes géotechnique 1993, 2001 et 2003.*

Les caractéristiques hydromécaniques de l'ensemble des matériaux constitutifs de l'extension de la verse et de l'assise qui seront utilisées dans la modélisation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3. Caractéristiques mécaniques du sol adoptées pour le calcul Plaxis

	ép (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	Modèle de calcul	C' (kPa)	φ' (°)	ν	K
Scorie de fusion	-	16	M.Coulomb	5	35	0,3	1E-05
Argile vaseuse	6	18	Soft-soil	20	24	0,35	5E-09
Argile bariolée	7	18	Soft-soil	20	24	0,35	1E-08
Roche altérée	-	24	M.Coulomb	50	35	0,25	1E-07
Roche saine	-	24	M.Coulomb	100	35	0,25	1E-07

Densité saturée (γ_{sat} en kN/m³), Angle de frottement (φ' en °), Cohésion (C' en kPa), Coefficient de Poisson (ν), Perméabilités (K en m / s).

4.5.2 Analyse de la stabilité en fin de construction - Court terme

Il s'agit de la vérification de la stabilité de la verse **en phase ultime** et en **condition non drainées**. L'étude comprend la stabilité globale du talus (passage par la couche compressible) et/ou la stabilité interne du talus (passage par le pied du talus).

Ces calculs seront menés à l'aide du logiciel Slope/W par la méthode de l'équilibre limite Morgenstern-Price. Nous adoptons comme critère de stabilité en conditions normales, **un coefficient de sécurité compris entre 1,3 à 1,5 selon l'occurrence des événements initiateurs**.

Les caractéristiques adoptées pour les différents matériaux sont récapitulées ci-dessous :

Matériau	Modèle de calcul	γ_{unsat} (kN/m ³)	Stabilité court/long terme			
			C' (kPa)	φ' (°)	$(S_u/\sigma'_v)^1$	$S_{u,min}$ (kPa)
Scorie de fusion	<i>Mobr Coulomb</i>	16	5	35	-	-
Argile vaseuse	<i>Shansep</i>	18	20	24	0,3	20
Argile Bariolée	<i>Shansep</i>	18	20	24	0,35	30
Roche altérée	<i>Mobr Coulomb</i>	24	50	35	-	-
Roche saine	<i>Mobr Coulomb</i>	24	100	35	-	-

¹ Ce sont des valeurs estimées selon le retour d'expérience sur des matériaux similaires

4.5.3 Analyse de la stabilité de l'extension de la verse à long terme

Il s'agit de la vérification de la stabilité de la verse **en phase ultime** et en **condition drainées** (après dissipation des pressions interstitielles dans l'assise). Les caractéristiques intrinsèques des différents matériaux de l'assise et des scories stockés en verse seront en condition **drainée** (C' , φ'). L'étude de la stabilité long terme concerne :

- La stabilité globale du talus (passage par la couche compressible) ;
- La stabilité interne du talus (passage par le pied du talus).

Ces calculs seront menés à l'aide du logiciel Slope/W par la méthode de l'équilibre limite Morgenstern-Price. Nous adoptons comme critère de stabilité en conditions normales, **un coefficient de sécurité proche de 1,5**. Les caractéristiques hydromécaniques de l'ensemble des matériaux constitutifs de l'extension de la verse et de l'assise qui seront utilisées dans la modélisation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4. Caractéristiques mécaniques du sol adoptées pour le calcul Geo Slope

	ép (m)	Modèle de calcul	Y (kN/m³)	C' (kPa)	φ' (°)
Scorie de fusion	-	Mohr Coulomb	16	5	35
Argile vaseuse	6		18	20	24
Argile bariolée	7		18	20	24
Roche altérée	8		24	50	35
Roche saine	-		24	100	35
*Le niveau de la nappe sera pris à +1m					

4.5.4 Analyse de la stabilité de la verse vis-à-vis de l'aléa sismique

Les calculs de stabilité en conditions **sismiques** est réalisée en considérant la verse dans sa phase **ultime**, en condition **non drainée de l'assise** (couche compressible).

Les calculs sont menés en contraintes totales en tenant compte de l'augmentation de la cohésion non drainée sous l'effet de la consolidation au fur et à mesure de la rehausse.

L'effet du séisme est modélisé par une accélération pseudo-statique horizontale k_h et verticale k_v (dans le sens pesant et allégeant) dépendant de l'accélération de référence du site prise égale à **0,99 m/s²**, pour une période de retour de 475 ans ;

Les calculs de stabilité en situation **post-sismique** est la vérification de la stabilité de la verse après passage du séisme et en considérant des caractéristiques mécaniques résiduelles réduites des différents matériaux.

Ces calculs seront menés à l'aide du logiciel Geo-Slope. Nous adoptons comme critère de stabilité **un coefficient de sécurité de 1,1** en conditions sismique et post-sismique.

Les caractéristiques hydromécaniques de l'ensemble des matériaux constitutifs de l'extension de la verse et de l'assise qui seront utilisées dans la modélisation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5. Paramètres géotechniques retenus pour les calculs long terme Geo-slope

Matériau	Modèle de calcul	γ_{unsat} (kN/m ³)	Stabilité court/long terme				Stabilité post-pic ²	
			C' (kPa)	Φ' (°)	$(S_u/\sigma'_v)^3$	$S_u \text{ min}$ (kPa)	(S_u/σ'_v)	$S_u \text{ min}$ (kPa)
Scorie de fusion	<i>Mohr Coulomb</i>	16	5	35	-	-	-	-
Argile vaseuse	<i>Shansep</i>	18	20	24	0,3	20	0,24	16
Argile Bariolée	<i>Shansep</i>	18	20	24	0,35	30	0,28	24
Roche altérée	<i>Mohr Coulomb</i>	24	50	35	-	-	-	-
Roche saine	<i>Mohr Coulomb</i>	24	100	35	-	-	-	-

4.6 Critères de design des ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques sont dimensionnés en se basant sur les courbes IDF de la station météo de **Tomo** située à environ 46 Km de Nouméa.

Tableau 6. Bases du design

Description	Unité	Valeur
Station météorologique	-	Tomo
Période de retour pour le design des descentes d'eau de drainage de la verse	an	100
Diamètre des enrochements	m	V ² /45

La mise en œuvre des critères de design présentés dans le tableau N°7 sera réalisée suivant les méthodes de calcul détaillées dans le tableau ci-dessous :

² Les valeurs résiduelles post-pic de la cohésion non drainée sont déduits par réduction des caractéristiques de cisaillement de 20%.

³ Ce sont des valeurs estimées selon le retour d'expérience sur des matériaux similaires

Tableau 7. Méthodes de design adoptées pour les justifications hydrauliques du projet

Description	Méthode de calcul		Code de calcul
Calcul des débits			
Temps de concentration	Temps de concentration t_c du bassin versant donné par la formule de Giandoti (heures) : $t_c = \frac{1,5L + 4\sqrt{S}}{0,8\sqrt{H}}$ Avec : L : Longueur de l'écoulement (km) ; S : Surface du bassin versant en km^2 ; H : dénivelée moyenne en m		Analytique
Débit de pointe	Le débit maximum Q (m^3/s) relative à une récurrence donnée est donné par la méthode CIA : $Q = \frac{C \times I \times S}{3.6}$ Avec : C : Coefficient de ruissellement ; I : Intensité de la pluie mm/h ; S : superficie du bassin versant (km^2).		Analytique
Dimensionnement des ouvrages hydrauliques			
Ouvrages trapézoïdaux	0.5 m à la base	Dimensionnés pour une récurrence de 100 ans Formule de Manning-Strickler : $Q = V.S = S.K.R_H^{2/3}.i^{1/2}$ K : Coefficient de Manning-Strickler Rh : Rayon hydraulique I : Pente moyenne de l'ouvrage (%)	Analytique

5 JUSTIFICATION GEOTECHNIQUE DE LA REHAUSSE

5.1 Modèle de calcul

Les coupes de calcul retenues intègrent l'influence de la proximité de la zone maritime sur la stabilité du talus de la verse et représentent les configurations géométriques les plus critiques (**Coupe 1 à 3**). Ces coupes ont été choisies de manière à permettre une comparaison avec les études de stabilité réalisées pour les projets d'extension phase 1,2 et 3.

Par ailleurs, en se basant sur les sondages géotechniques, le fond marin a été estimé comme suit :

Zone évaluée	Coupe 1	Coupe 2	Coupe 3
Coupe de calcul	Côté marin	Tas historique-SCS	Tas historique-SCS
Fond marin*	-9 m NGNC	-7 m NGNC	-7 m NGNC

Le modèle de calcul est présenté ci-dessous :

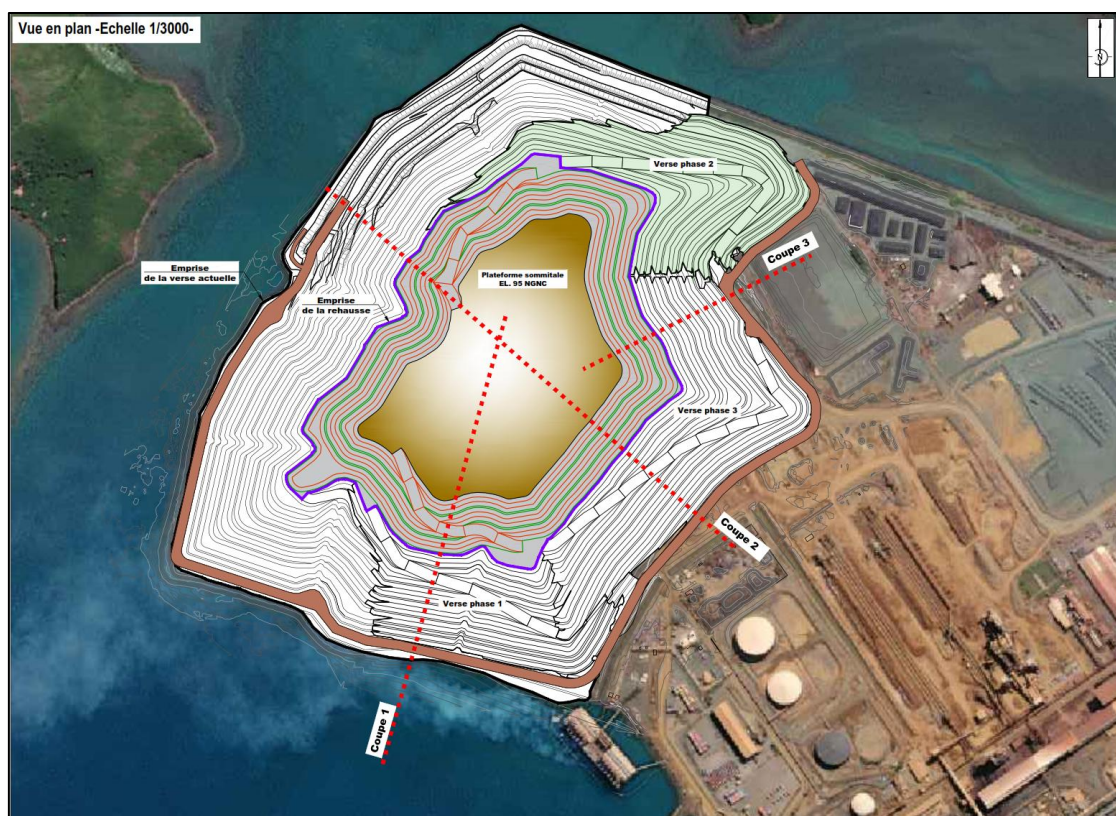


Figure 12. Implantation des coupes étudiées

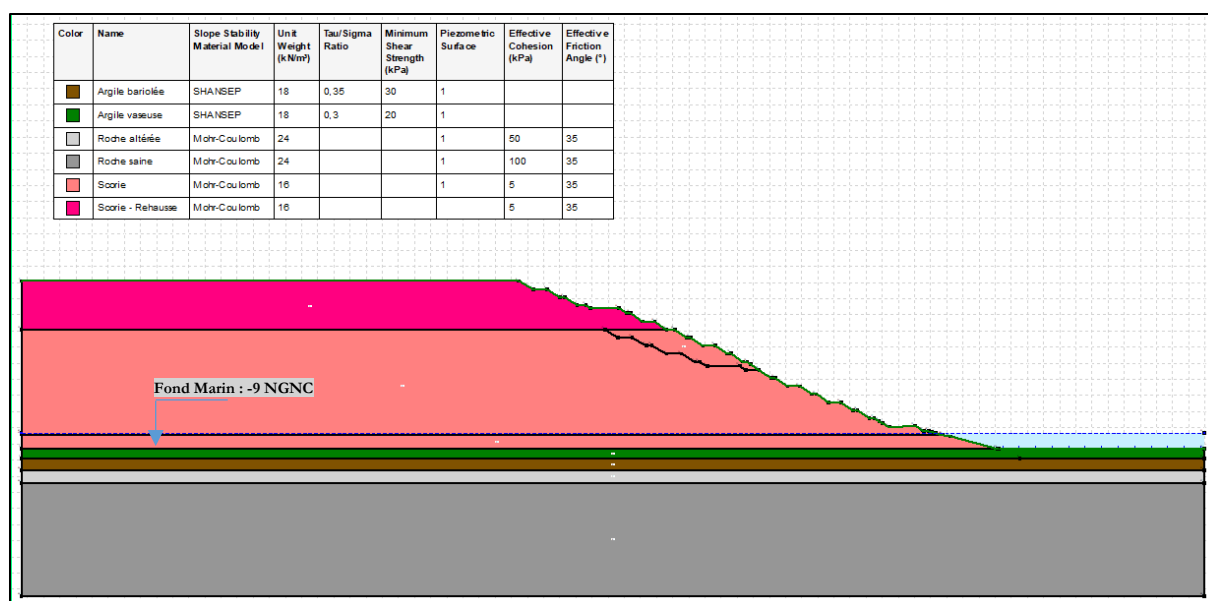


Figure 13. Géométrie du modèle de calcul - Coupe 1

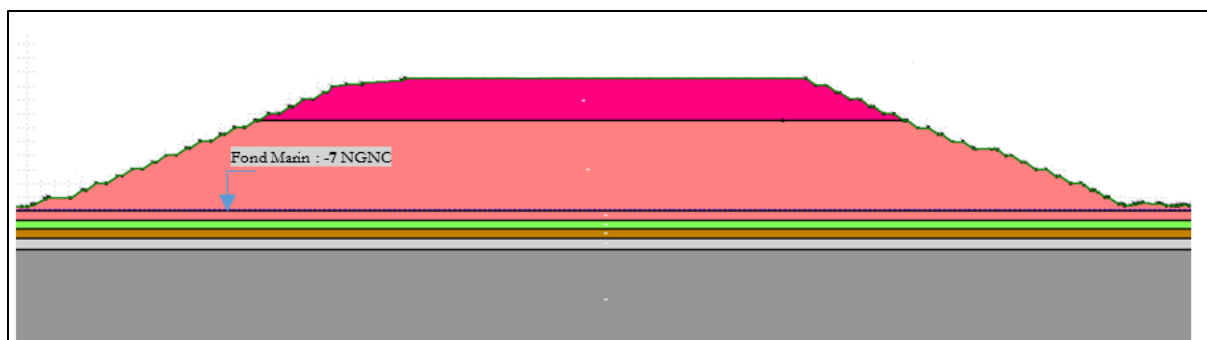


Figure 14. Géométrie du modèle de calcul - Coupe 2

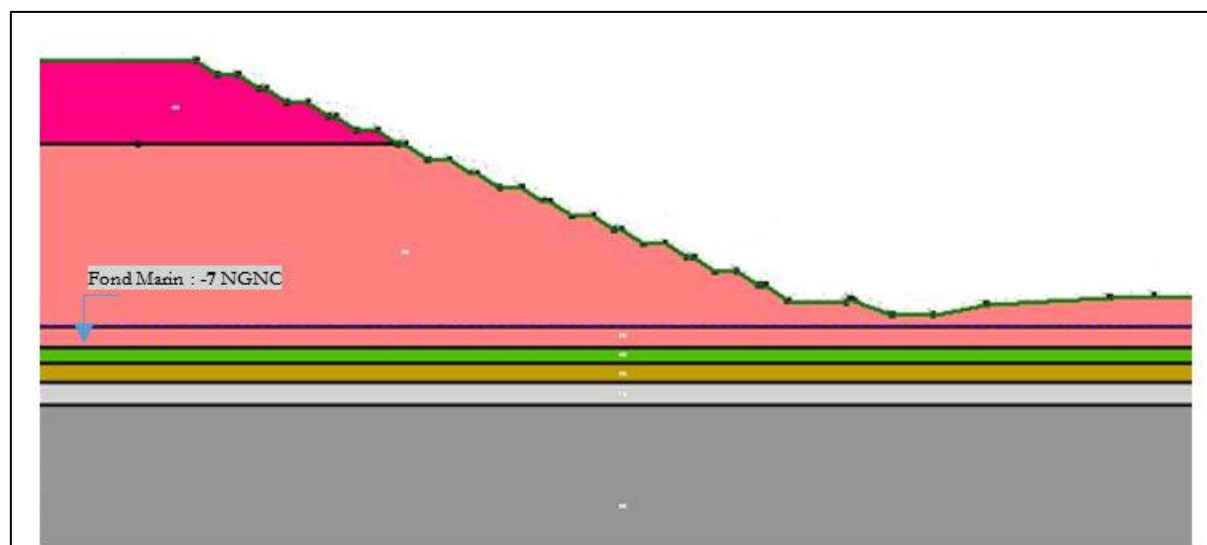


Figure 15. Géométrie du modèle de calcul - Coupe 3

5.2 Analyse de la stabilité de l'extension de la zone gazière en phase ultime de rehausse en condition non drainée

Il s'agit de la vérification de la stabilité du talus en phase ultime après rehausse à la cote +95 NGNC sous l'effet d'une sollicitation rapide : **Les événement accidentels redoutés sont, une remontée exceptionnelle du niveau hydrostatique ou excavation touchant le pied de la verse au contact des argiles vaseuses, ou une érosion régressive sous l'effet de la houle.**

Les calculs sont réalisés avec la méthode à l'équilibre limite moyennant le logiciel GeoSlope et en utilisant les caractéristiques mécaniques non drainées (cohésion non drainée des argiles vaseuses après la fin de la consolidation).

Les résultats des calculs sont récapitulés dans le Tableau 8 et les sorties des calculs sont présentées en annexe N°2.

Les coefficients de sécurité donnent une valeur minimale de 1,28 (proche de 1,3). Compte tenu de la faible occurrence des évènements initiateur prédéfinis plus haut, nous estimons que le facteur de sécurité est acceptable et ce en tenant compte de la piste périphérique de largeur de 20 m projetée au pied des talus de la verse durant les trois phases d'extension.

Tableau 8. Résultats des calculs de stabilité en phase ultime en condition non drainée

Numéro de la coupe		FS
Coupe 1		1,28
Coupe 2	Nord-Ouest (Côté maritime)	1,46
	Sud (Côté terrestre)	1,49
Coupe 3		1,5

5.3 Analyse de la stabilité de verse à long terme

Dans cette analyse, nous analysons la stabilité de la verse deux conditions :

- Calcul Statique : Il vise à évaluer la stabilité du talus de l'extension en phase ultime après la consolidation des argiles vaseuses et sous l'effet de sollicitations lentes (rehausse importante, redressement du talus de la verse, ...). Dans cette analyse nous considérons les caractéristiques drainées des matériaux de la verse et l'assise ;
- Calcul pseudo-statique : Il permet d'évaluer la stabilité sous l'effet d'un sismique qui surviendrait plusieurs années après la fin de construction de la verse. Dans ces conditions nous supposons que les scories resteront toujours drainées mais les argiles vaseuses seront non drainées puisque la sollicitation sismique provoque des cisaillements cycliques est très rapides.

Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 9. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité et surface de glissement préférentiel

		Coupe 1	Coupe 2		Coupe 3
			Sud-Ouest	Sud	
Stabilité globale – Condition drainées		1,57	1,56	1,76	1,79
Stabilité en condition sismique	Allégeant	0,96	1,12	1,1	1,14
	Pesant	0,88	1,06	1,01	1,08
Stabilité post sismique		1,16	1,34	1,38	1,39

Ces calculs montrent que la stabilité à long terme en conditions drainées est satisfaisante avec un coefficient de sécurité minimal égal à 1,56 supérieur au coefficient de sécurité requis de 1,5 ;

Cependant le coefficient de sécurité évalué avec la méthode pseudo-statique est légèrement inférieur à 1. Sachant que cette méthode simpliste est très pessimiste, nous avons procédé à une vérification de la stabilité de la verse en condition post-sismique et ceux conformément au standard international GISTM (stabilité après le passage du séisme).

Dans cette analyse on considère que les cisaillements cycliques induits par le séisme provoquent un ramollissement des argiles vaseuses et une réduction de la cohésion non drainée de 20%.

Dans ces conditions, les calculs sont réalisés en statique sans accélération sismique et en conditions non drainées. Le coefficient de sécurité requis est de **1,1**.

Les résultats des calculs en conditions post sismiques sont présentés dans Tableau 9, ils montrent que le coefficient de sécurité est supérieur à la valeur requise fixée à 1,1. Ceci permet de conclure que **les critères de stabilité de la rehausse vis-à-vis des sollicitations sismiques sont globalement vérifiées pour une cote ultime à +95 m NGNC.**

Nous tenons à préciser que le résultat de l'analyse du comportement de la verse vis-à-vis du risque sismique est très sensible à la valeur de la cohésion non drainée des argiles vaseuses.

Compte tenu de la hauteur importante de la verse après rehausse et afin de consolider les résultats de l'analyse, il est indispensable de réaliser des essais au pénétromètre statique in-situ (CPTu) sur les argiles vaseuses.

6 JUSTIFICATION HYDRAULIQUE

La perméabilité de la scorie de fusion est importante (comprise entre 10^{-4} et 10^{-5} m/s) et permet d'évacuer les éventuelles résurgences captées par les drains en scories bessemer. Ainsi, au cours des travaux de rehausse, le drainage de la plateforme sommitale de la verse se fera par infiltration.

En phase ultime, après couverture de la verse par de la terre végétale souvent argileuses, les infiltrations seront réduites et la gestion des eaux de ruissellement sur la plateforme sommitale du projet de rehausse se fera moyennant les descentes d'eau, dénommées N°1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11 et 12, aménagées durant les différentes phases de construction de la verse à scories.

La verse sera rehaussée en dôme. Ainsi, la superficie de la plateforme sommitale sera plus réduite au fur et à mesure de la rehausse. Ainsi, la section des descentes d'eau dimensionnée lors de l'étude APD relative à l'extension de la verse à scories (phases 1,2 et 3) reste suffisante pour drainer les plateformes sommitales de la rehausse ; (**Réf: MC-25-156-SLN-22-R01**).

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P10-A** » présente le dispositif de drainage en phase ultime de la verse réhaussée.

Les descentes d'eau aménagées au niveau des flancs libres de la verse feront 2 m de largeur à la base sur 1 m de profondeur et seront revêtues par des enrochements de diamètre 1 000 mm sur 2 m d'épaisseur posés sur du géotextile séparateur.



Figure 16. Descente d'eau en enrochements

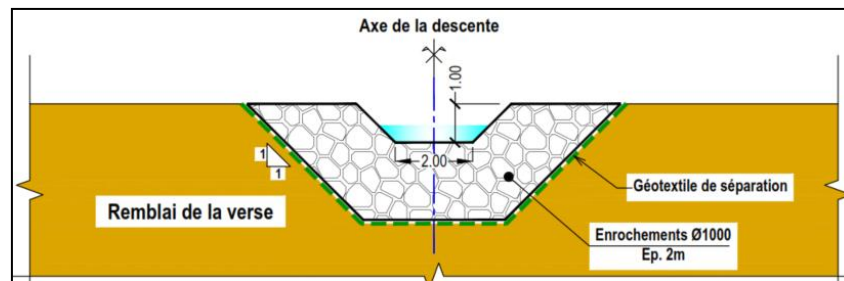


Figure 17. Coupe type de la descente d'eau en enrochements

7 SURVEILLANCE ET DISPOSITIFS D'AUSCULTATION

Afin d'assurer le suivi géotechnique et la maîtrise des risques associés à la construction des extensions de la verse à scories, il est recommandé de mettre en place un **dispositif d'auscultation géotechnique** adapté. Celui-ci consistera en l'implantation de **couples inclinomètre / piézomètre**, positionnés **au pied de chaque talus** ainsi qu'**à mi-hauteur des talus**, à la cote **+30 m NGNC**.

Nous recommandons ainsi de garder le même système d'auscultation proposé durant l'étude d'extensions de trois premières phases de la verse à scories.

Ce dispositif sera composé de :

Phase 1 :

- Au pied du talus : conservation du dispositif en place **INC21B/PZ21**
- A mi-hauteur du talus (à la cote +30 m NGNC) : Installation de nouveaux instruments : **INC1-ph1/PZ1-ph1**

Phase 2 :

- Au pied du talus : conservation du dispositif en place **INC51B/PZ51**

- A mi-hauteur du talus (à la cote +30 m NGNC) : Installation de nouveaux instruments : **INC2-ph2/PZ2-ph2**

Phase 3 :

- Au pied du talus : conservation du dispositif en place **INC11B/PZ11**
- A mi-hauteur du talus (à la cote +30 m NGNC) : Installation de nouveaux instruments : **INC3-ph3/PZ3-ph3**

Le plan portant la référence « **MC-25-156-SLN-22-P11-A** » présente l'ensemble des instruments d'auscultation actuels installés au niveau de la verse à scories.

Par ailleurs, il est fortement recommandé d'installer des capteurs de mesure de pressions interstitielles dans les argiles vaseuses au centre de la verse.

Ce dispositif permettra :

- Le suivi de l'évolution des pressions interstitielles et des fluctuations du niveau de la nappe,
- Le contrôle des déplacements horizontaux au sein du massif,
- La surveillance de la stabilité des talus, afin d'anticiper toute déformation ou mécanisme d'instabilité susceptible d'affecter l'ouvrage.

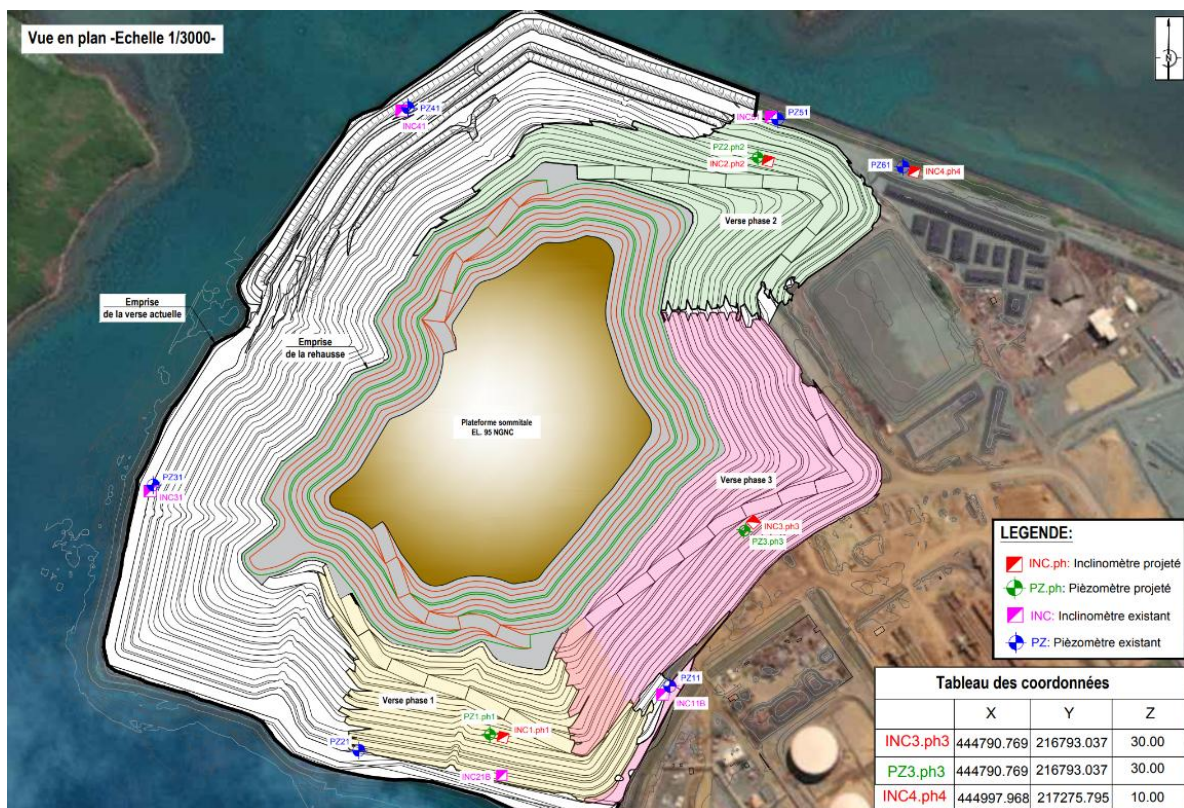


Figure 18. Implantations du dispositif d'auscultation et de surveillance de la VAS

8 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES PARTICULIERES

D1 : Pour assurer l'écoulement, les banquettes drainantes seront aménagées avec un devers amont de 4% à 5% et une pente longitudinale de 1,25% orientée vers les descentes d'eau principales qui seront aménagées sur les flancs de la verse ;

D2 : La banquette comportera une tranchée ouverte au pied du niveau amont et un merlon de protection en scorie de fusion en crête du niveau aval.

D3 : Afin de stabiliser sa surface, la plateforme de la banquette doit être compactée par rouleau ;

D4 : Dès la fin de ces aménagements les niveaux doivent être revégétalisés par semis hydraulique et des plantations d'arbustes ;

D5 : Les descentes d'eau seront aménagées en escaliers avec des replats au niveau des banquettes drainantes ;

D6 : Compacter la surface de descente d'eau avant mise en place du revêtement contre l'érosion ;

D7 : Mettre en place une nappe de géotextile avant mise en place du revêtement ;

D8 : Au droit de l'emprise des descentes d'eau, il faut reprofiler le talus libre de la verse conformément au design initial, à savoir des niveaux de 35° et des banquettes ayant un dévers aval de 4%.

9 CONCLUSION

Les trois premières phases d'extension de la verse à scories seront réalisées sur une ancienne plateforme de scories située globalement à la cote +10 m NGNC. Les trois phases d'extension ne dépassent pas la zone d'endigage existante.

Le projet de rehausse prévoit une élévation de la crête de la verse autorisée jusqu'à la cote +95 m NGNC, soit 30 m au-dessus de la cote autorisée.

Les calculs de stabilité montrent que le projet de rehausse est faisable et offre les garanties de stabilité requises. En effet, ces calculs permettent de conclure ce qui suit :

- La stabilité du talus en phase ultime de rehausse en condition non drainée, déterminé par les méthodes d'équilibre limite, est globalement acceptable et ce en tenant compte de la piste périphérique de largeur de 20 m projetée au pied des talus de la verse durant les trois phases d'extension.

Toutefois, il est fortement recommandé de protéger le pied de l'endigage par des enrochements et ce dans le but d'empêcher une érosion régressive qui peut compromettre la stabilité de la verse à long terme.

Par ailleurs, à défaut d'enrochements disponibles sur site, il est envisageable de conforter le talus de la verse exposé aux fortes houles par la mise en place d'une

carapace en scories BESSMER. Un entretien par recharge serait à prévoir en cas de dégradation ;

- La stabilité à long terme de la verse en conditions drainées, évaluée par les méthodes d'équilibre limite, est satisfaisante.
- Les coefficients de sécurité évalués avec la méthode pseudo-statique sont légèrement inférieurs aux facteurs de sécurité requis. Cependant, la vérification de la stabilité de la verse en condition post-sismique, réalisée conformément au standard international GISTM), montre que la stabilité de la verse vis-à-vis des sollicitations sismiques est satisfaisante.

Ainsi, nous estimons que le projet de la rehausse de la plateforme sommitale jusqu'à la cote +95 m NGNC satisfait les critères de stabilité requis dans le standard GISTM.

Compte tenu de la hauteur importante de la verse après rehausse et afin de consolider les résultats de l'analyse, il est indispensable de réaliser des essais au pénétromètre statique in-situ (CPTu) sur les argiles vaseuses.

De plus, dans le but d'assurer une construction dans des conditions sécuritaires, nous recommandons de mettre en place le dispositif d'auscultation géotechnique proposés au niveau de l'étude APD d'extension des trois premières phases (**Réf: MC-25-156-SLN-22-R01**).

Celui-ci consistera en l'implantation de **couples inclinomètre / piézomètre**, positionnés **au pied de chaque talus** ainsi qu'**à mi-hauteur des talus**, soit à la cote **+30 m NGNC**.

Compte tenu de la forte perméabilité de la scorie de fusion (comprise entre 10^{-4} et 10^{-5} m/s) le drainage de la plateforme sommitale de la verse se fera par infiltration au cours des travaux de stockage. En phase ultime la gestion des eaux de la plateforme sommitale du projet de rehausse se fera moyennant les descentes d'eau, dénommées N°1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11 et 12, aménagées durant les différentes phases de construction de la verse à scories.

ANNEXE N°1 : COUPES DE CALCUL ET PLAN DE SITUATION

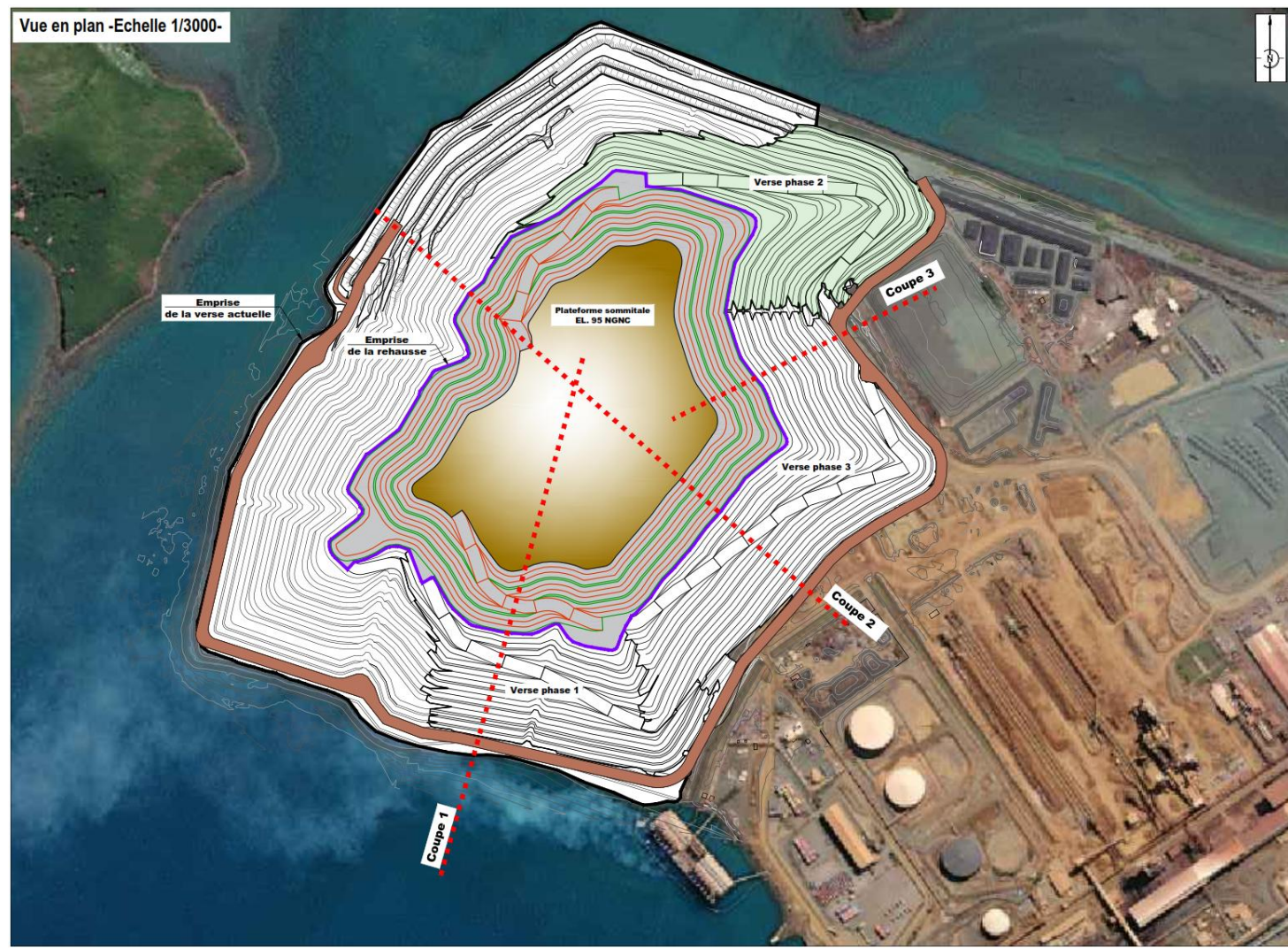


Figure N° 1. Vue en plan et plan d'implantation des coupes de calcul

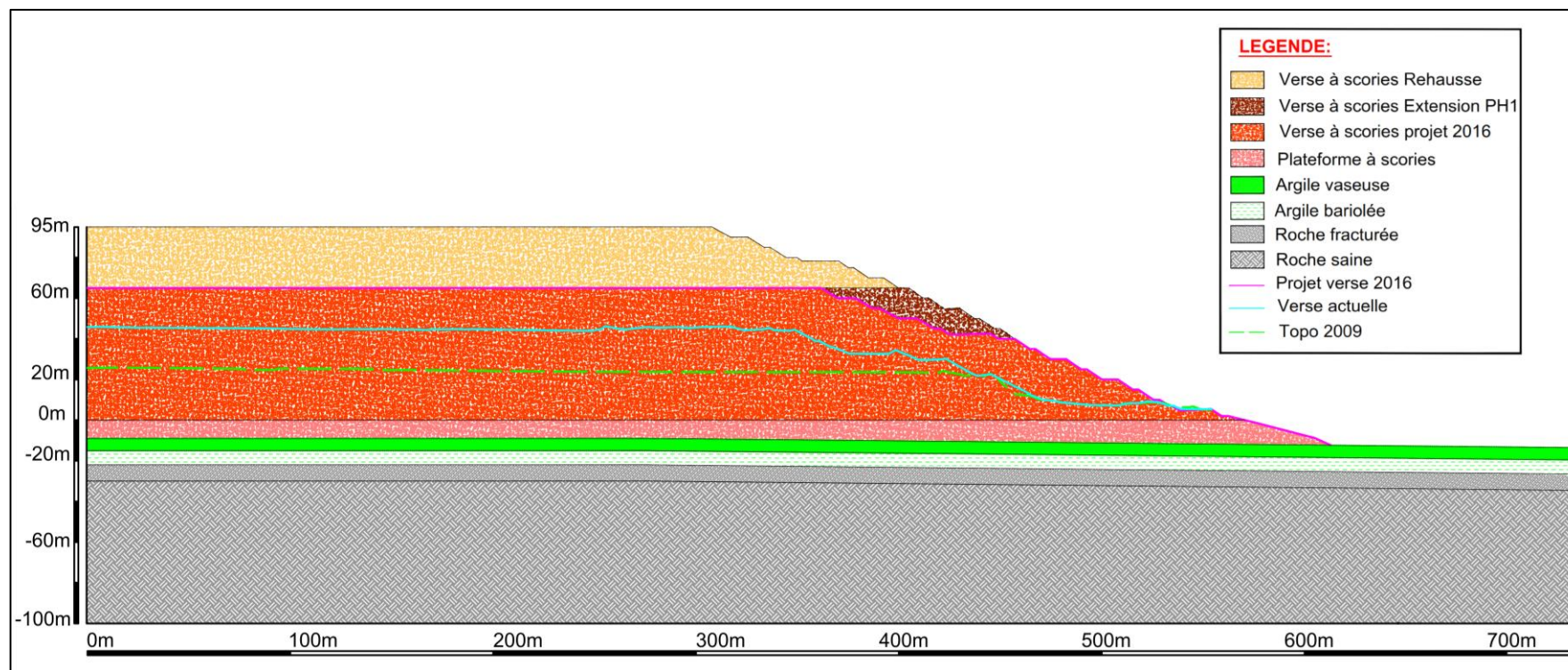


Figure N° 2 . Coupe 1

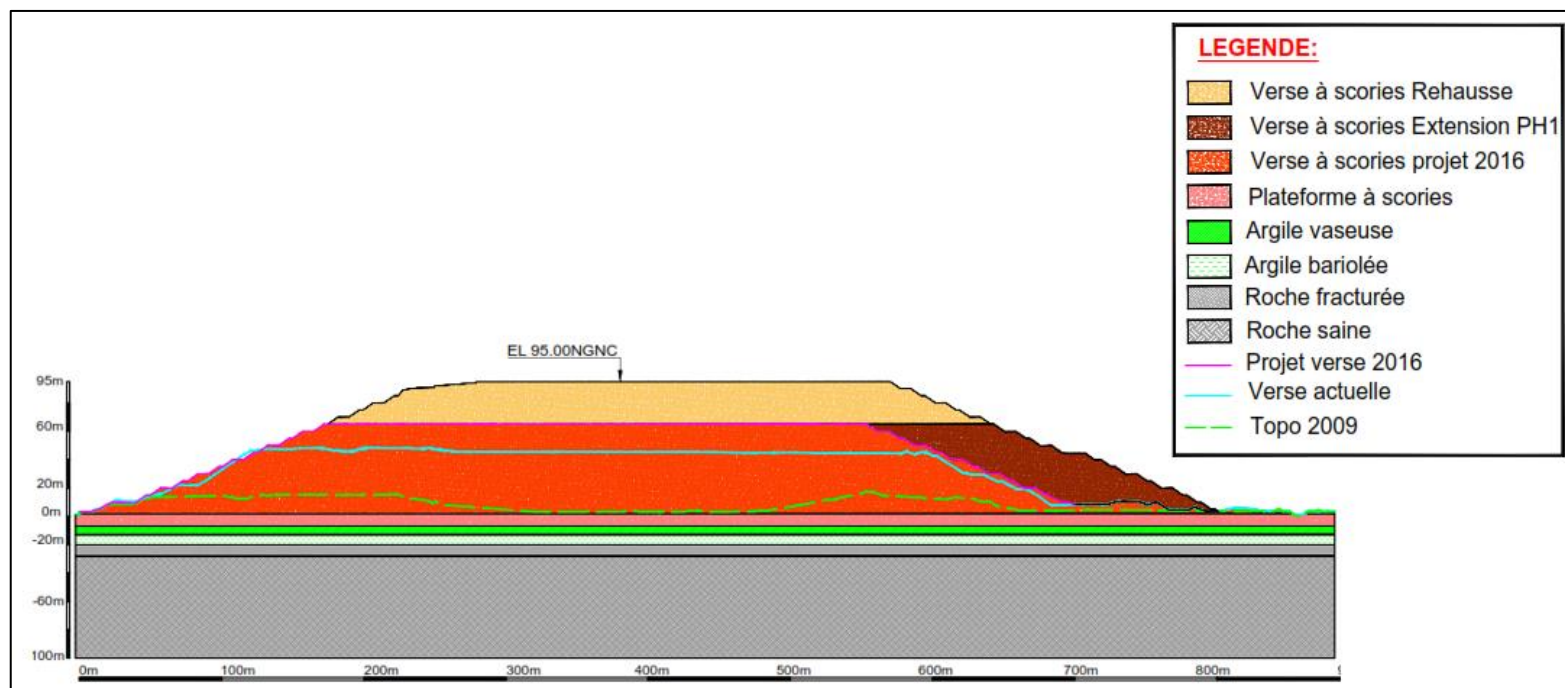


Figure N° 3. Coupe 2

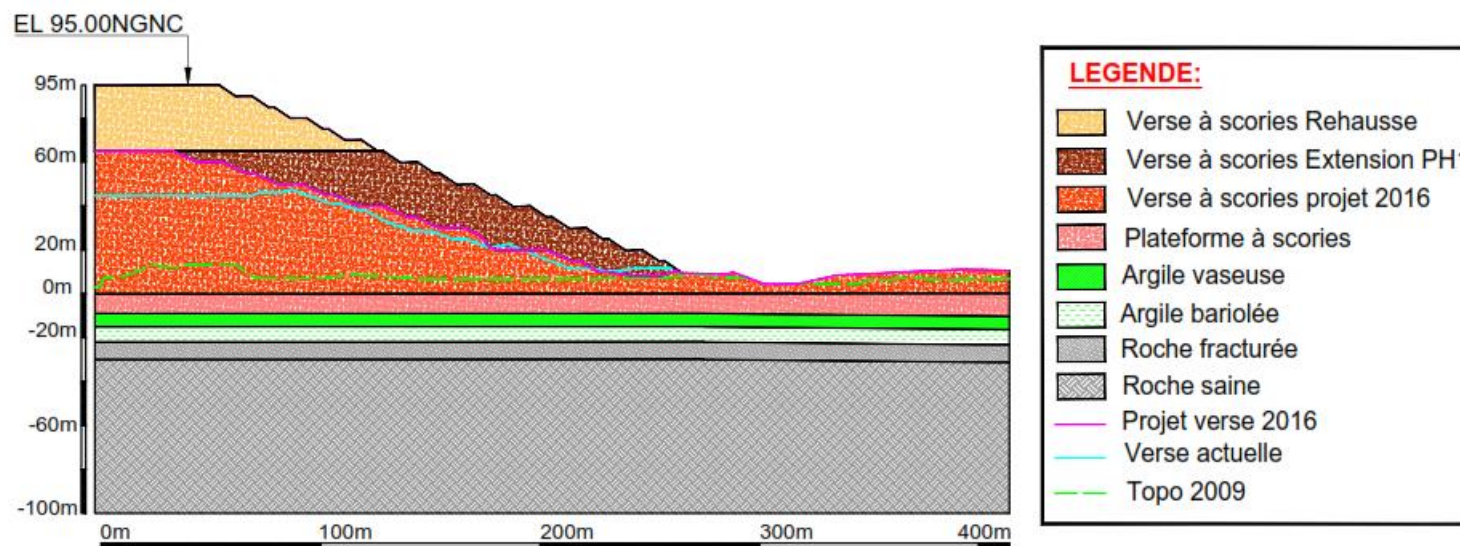


Figure N° 4. Coupe 3

ANNEXE N°2 : SORTIES GEOSLOPE

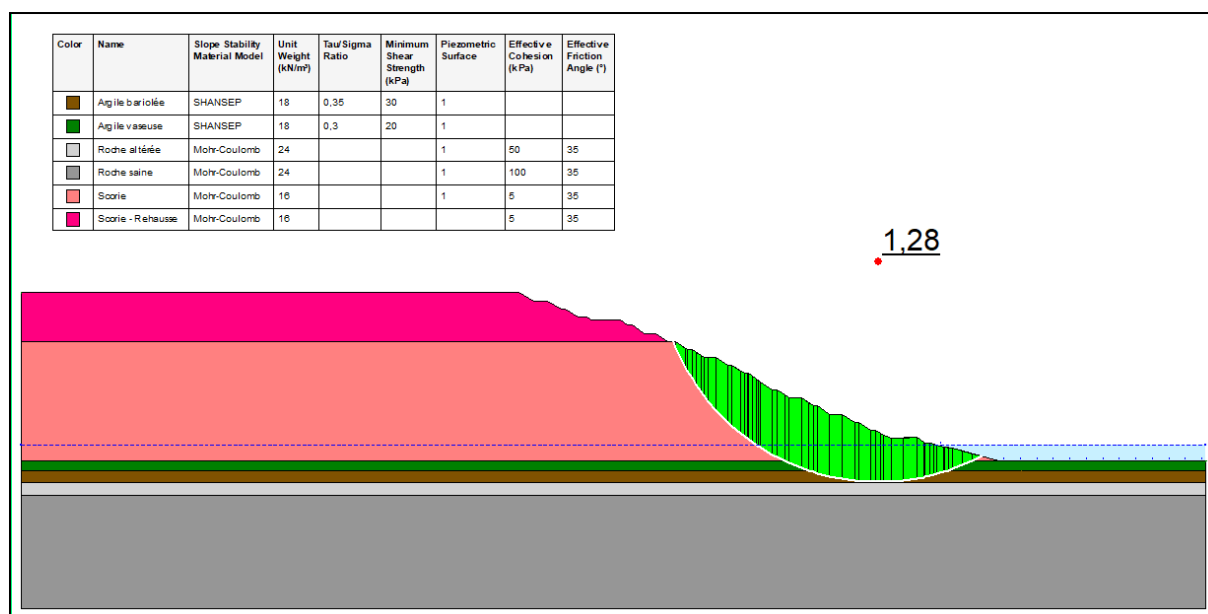


Figure N° 5. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition non drainées
(Coupe 1, FS =1,28)

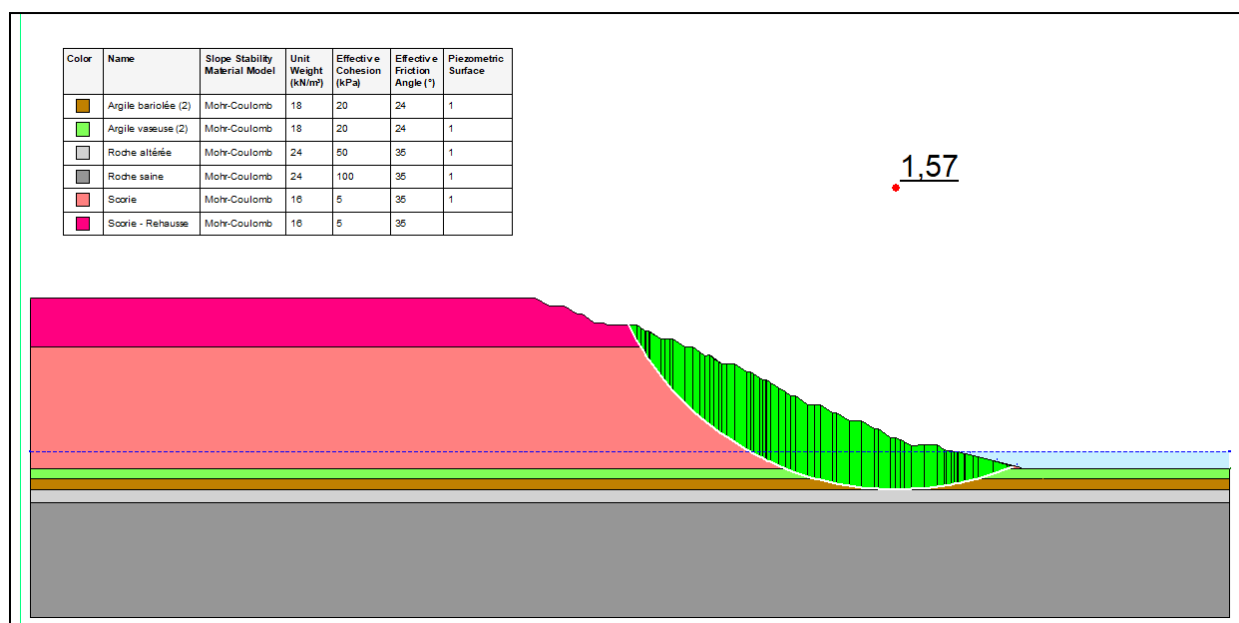


Figure N° 6. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées
(Coupe 1, FS =1,57)

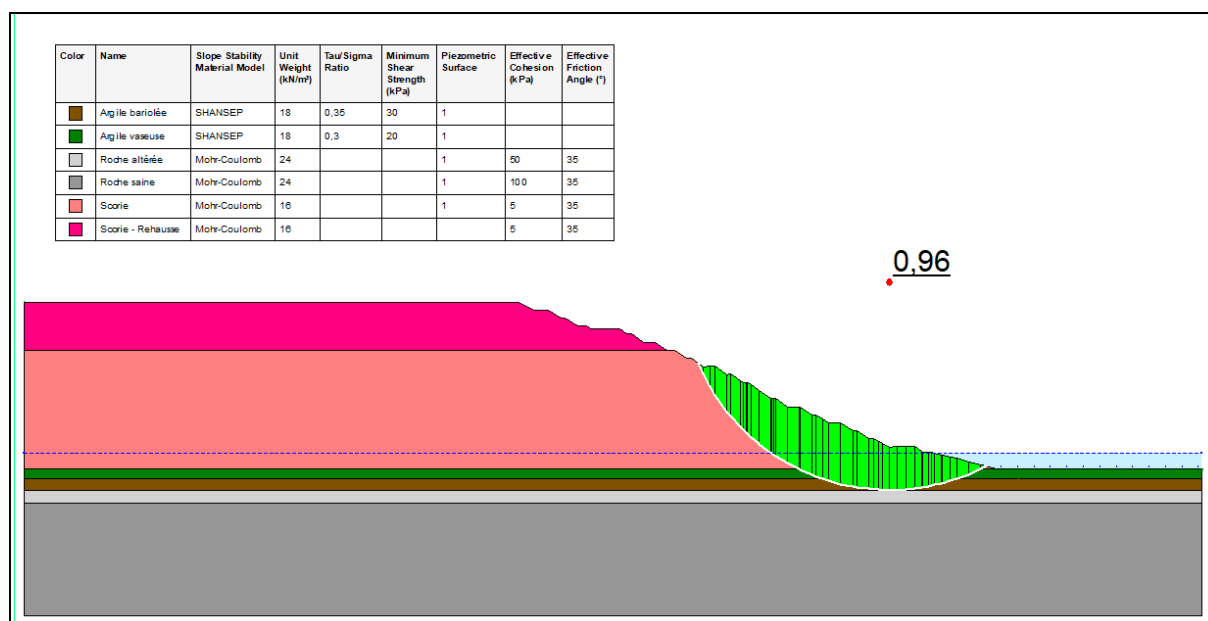


Figure N° 7. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique- séisme allégeant (Coupe 1, FS =0,96)

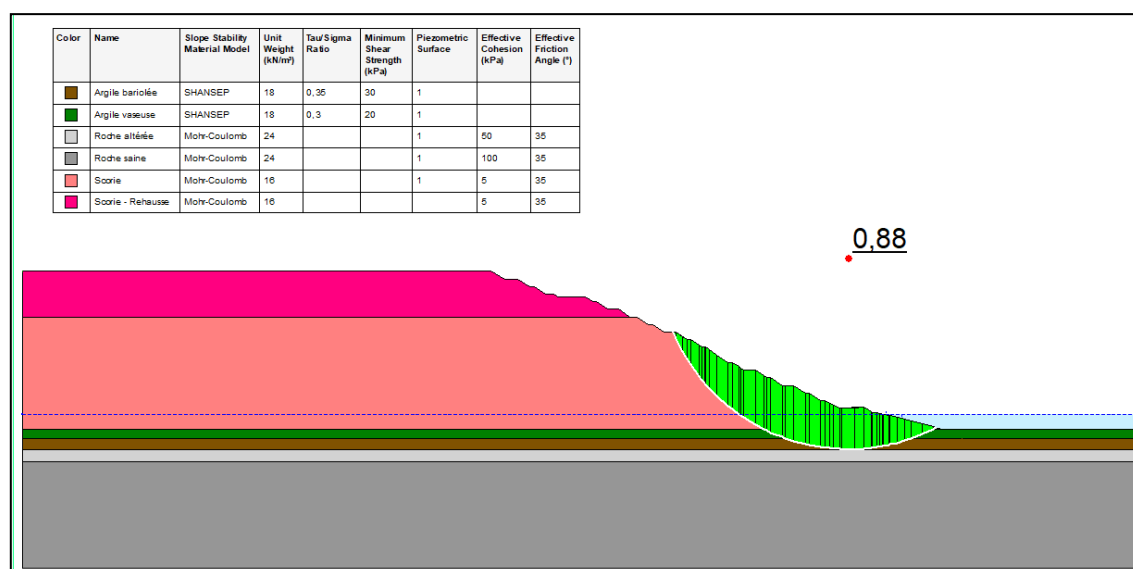


Figure N° 8. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique- séisme pesant (Coupe 1, FS =0,88)

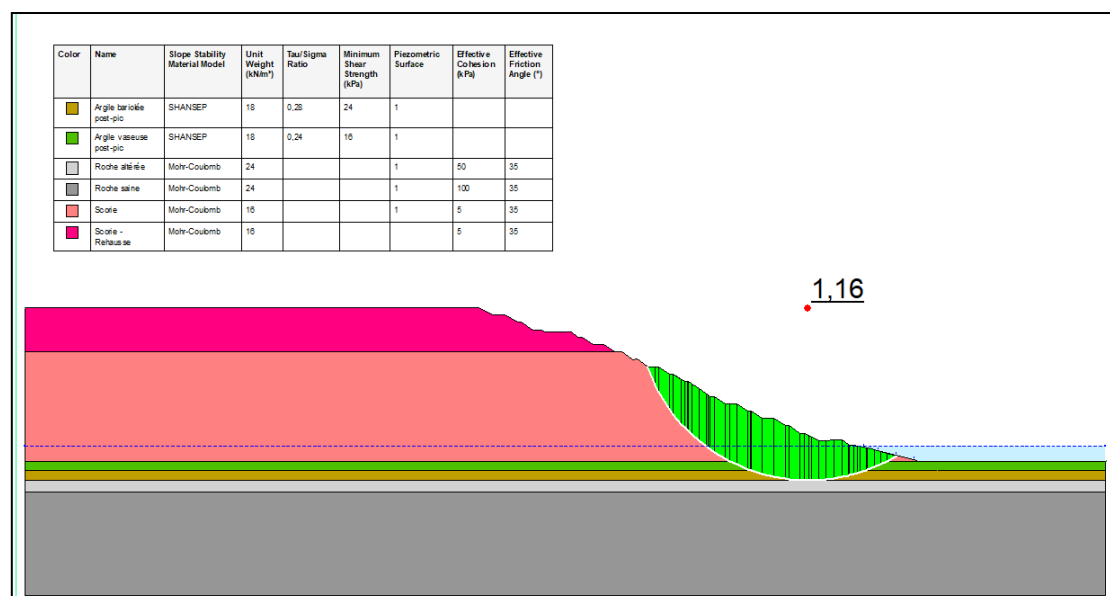


Figure N° 9. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation post-sismique (Coupe 1, FS =1,16)

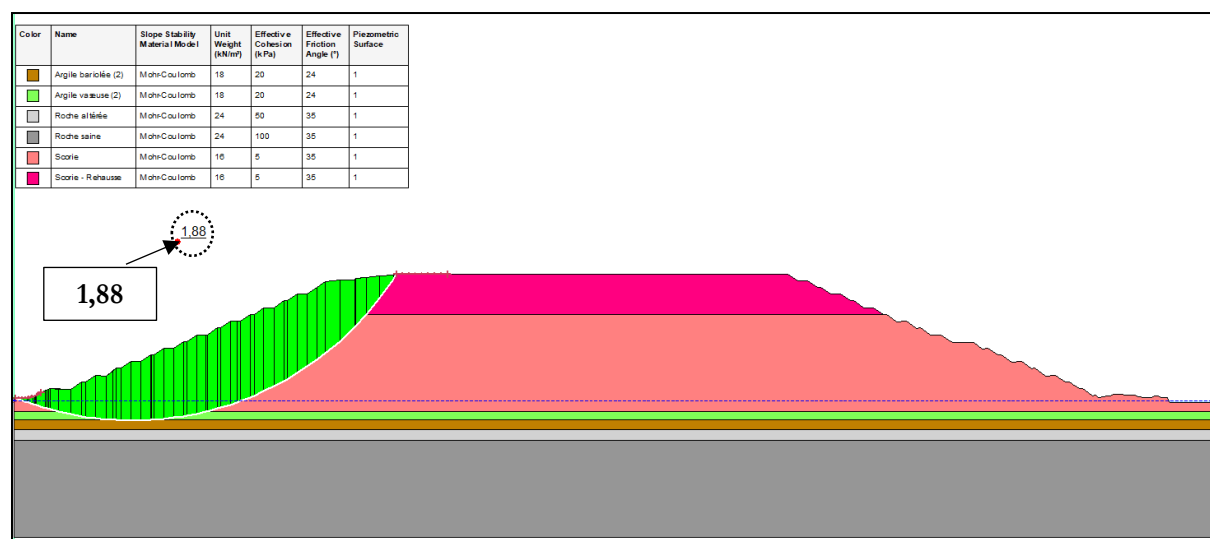


Figure N° 10. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées - côté amant (Coupe 2, FS =1,88)

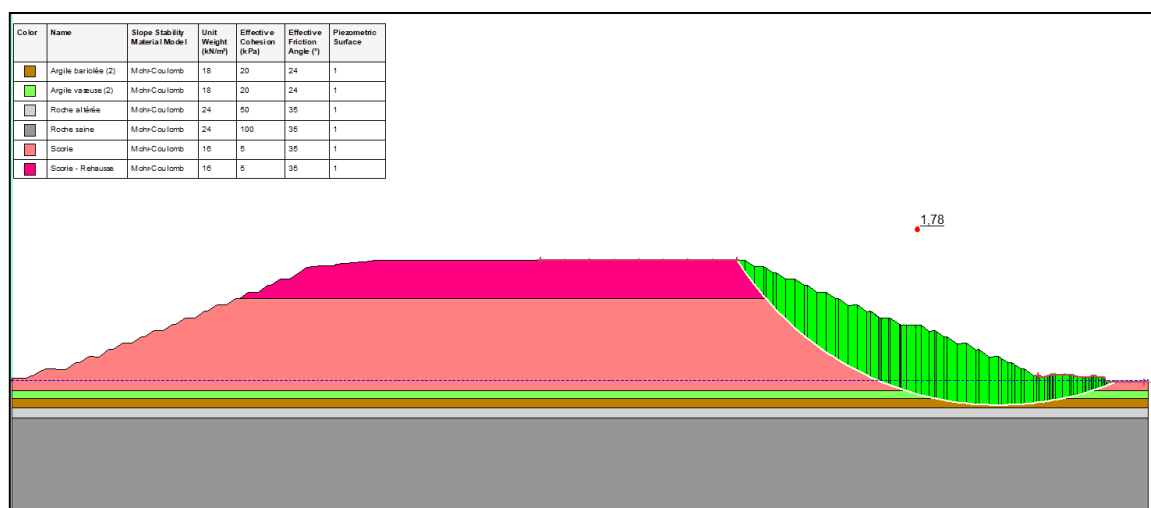


Figure N° 11. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées - côté aval (Coupe 2, FS =1,78)

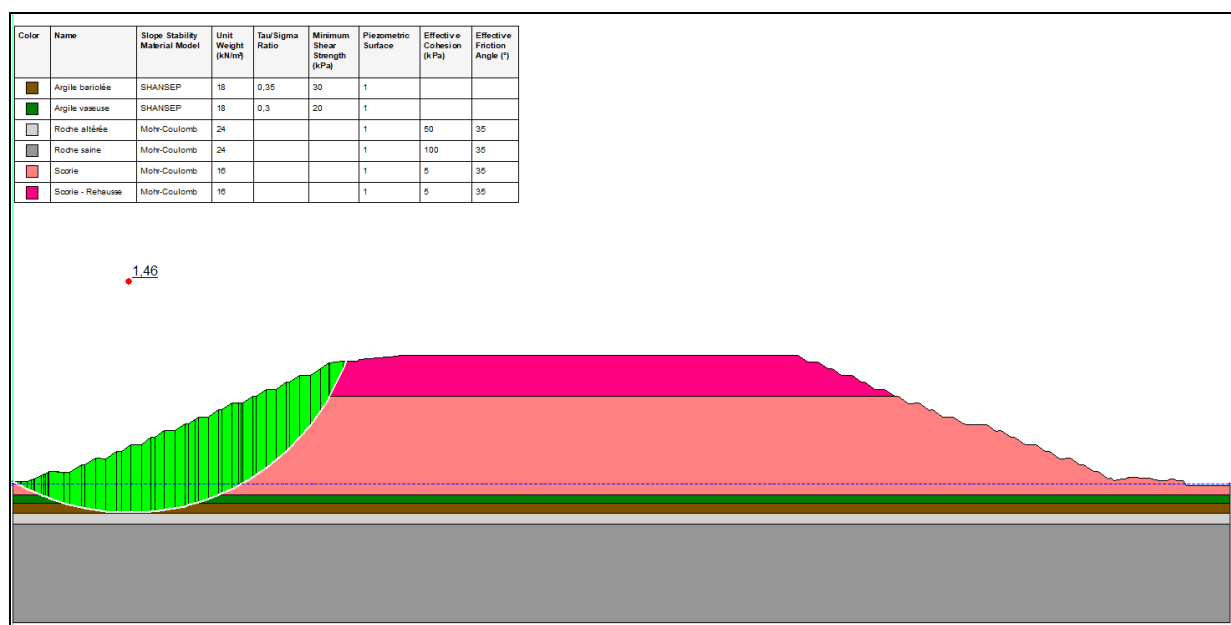


Figure N° 12. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition non drainées - côté amont (Coupe 2, FS =1,46)

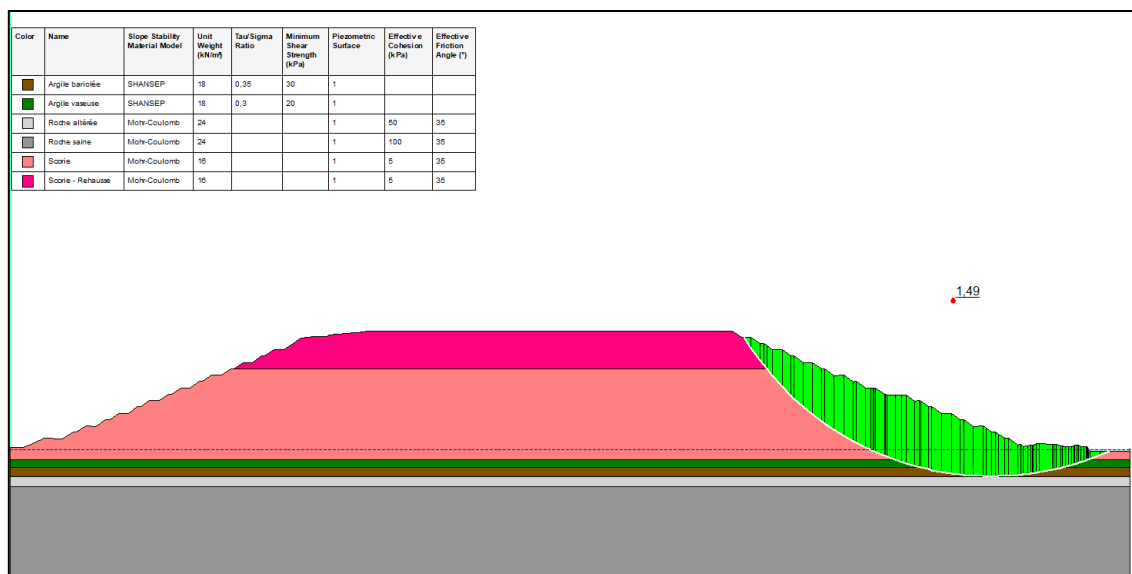


Figure N° 13. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition non drainées - côté aval (Coupe 2, FS =1,49)

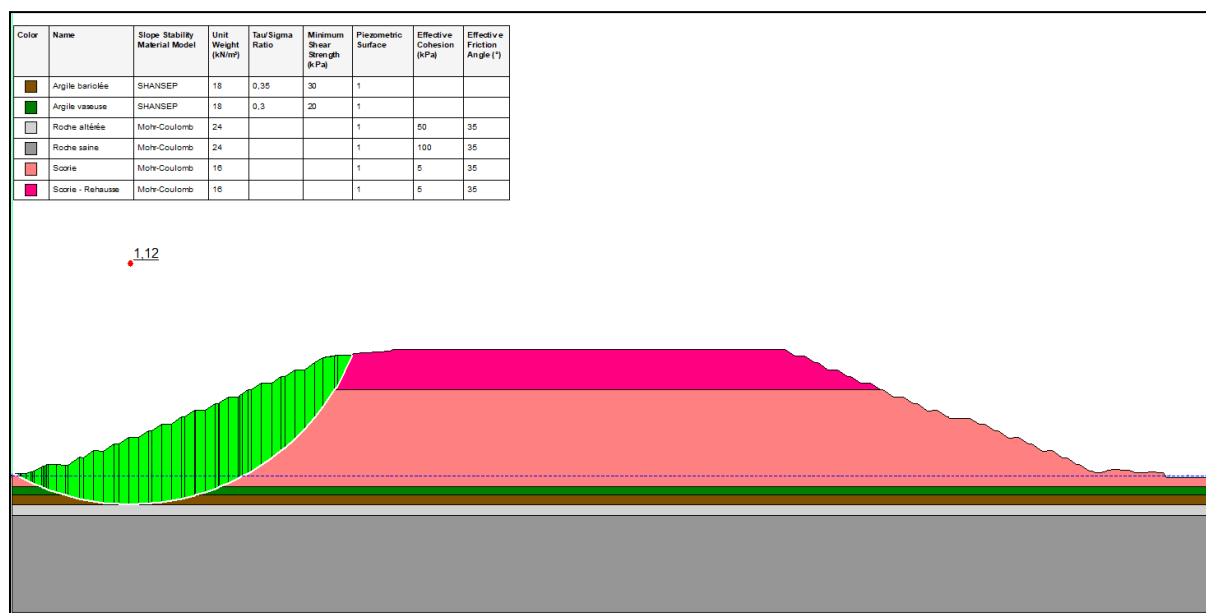


Figure N° 14. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique - séisme allégeant - côté amont (Coupe 2, FS =1,12)

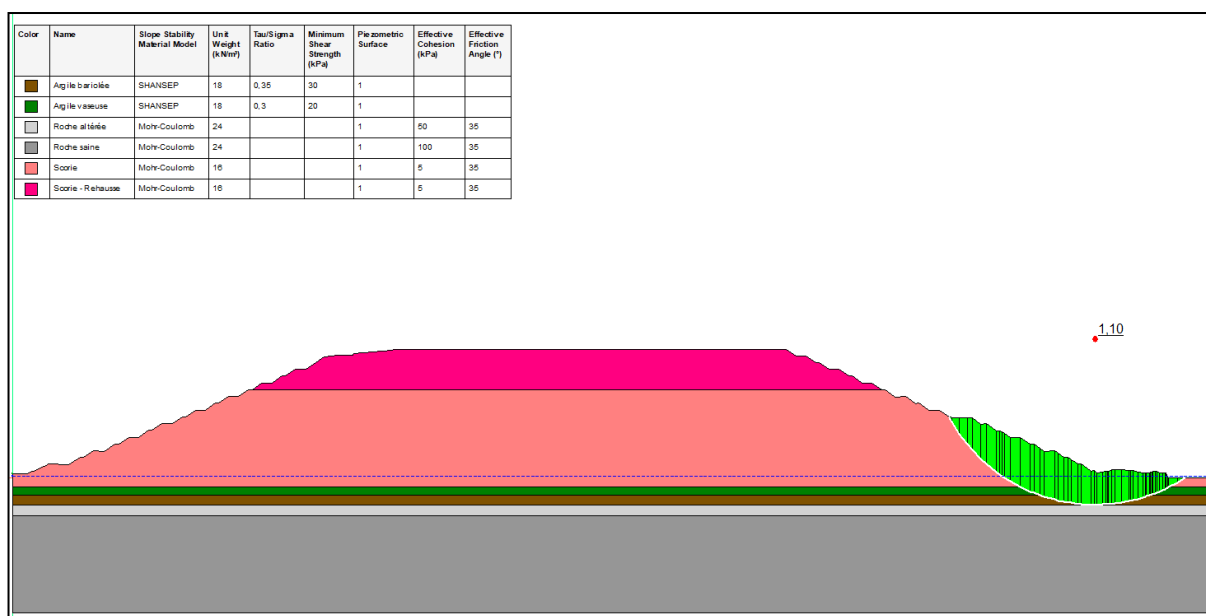


Figure N° 15. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique - séisme allégeant - côté aval (Coupe 2, FS =1,10)

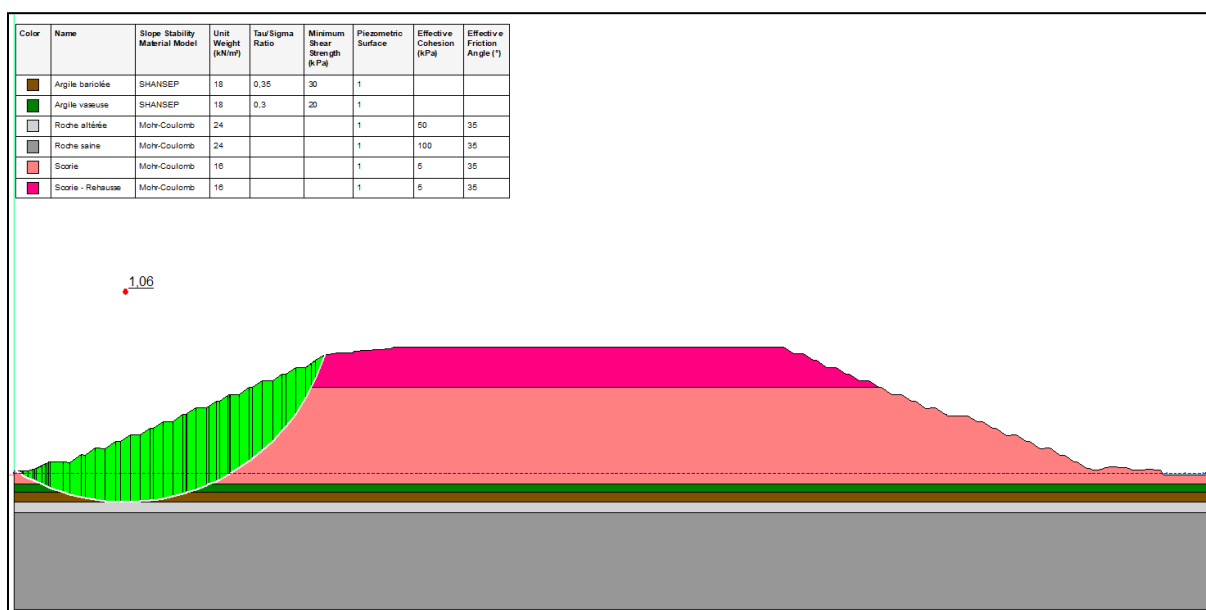


Figure N° 16. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique - séisme pesant - côté amont (Coupe 2, FS =1,06)

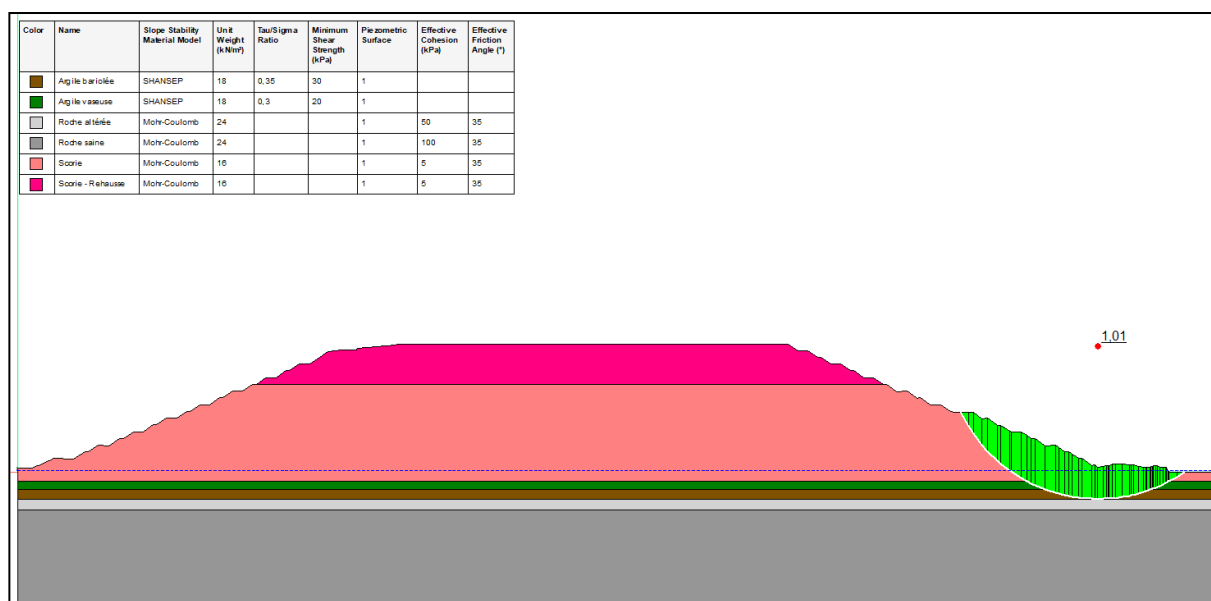


Figure N° 17. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique - séisme pesant - côté aval (Coupe 2, FS =1,01)

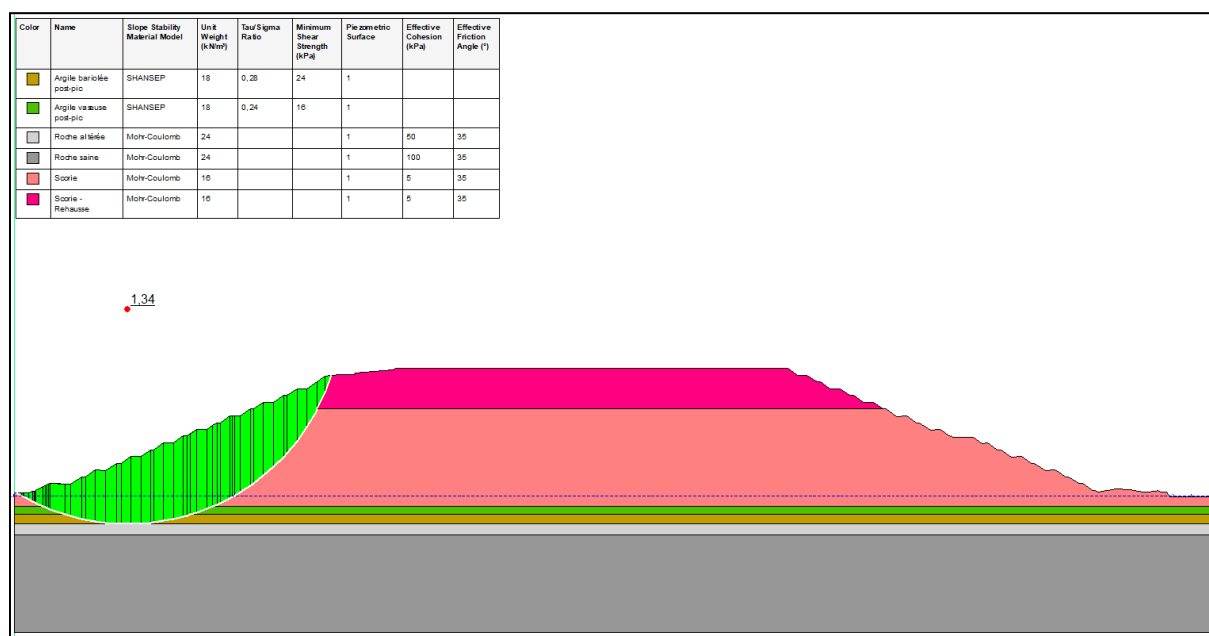


Figure N° 18. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation post-sismique- côté amont (Coupe 2, FS =1,34)

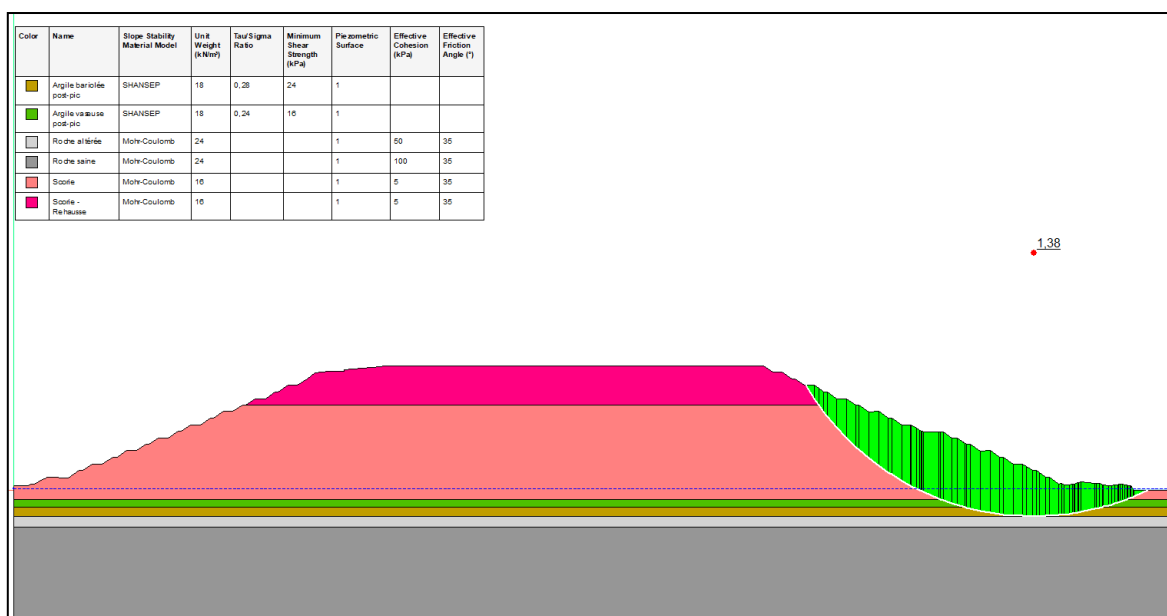


Figure N° 19. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation post-sismique-côté aval (Coupe 2, FS =1,38)

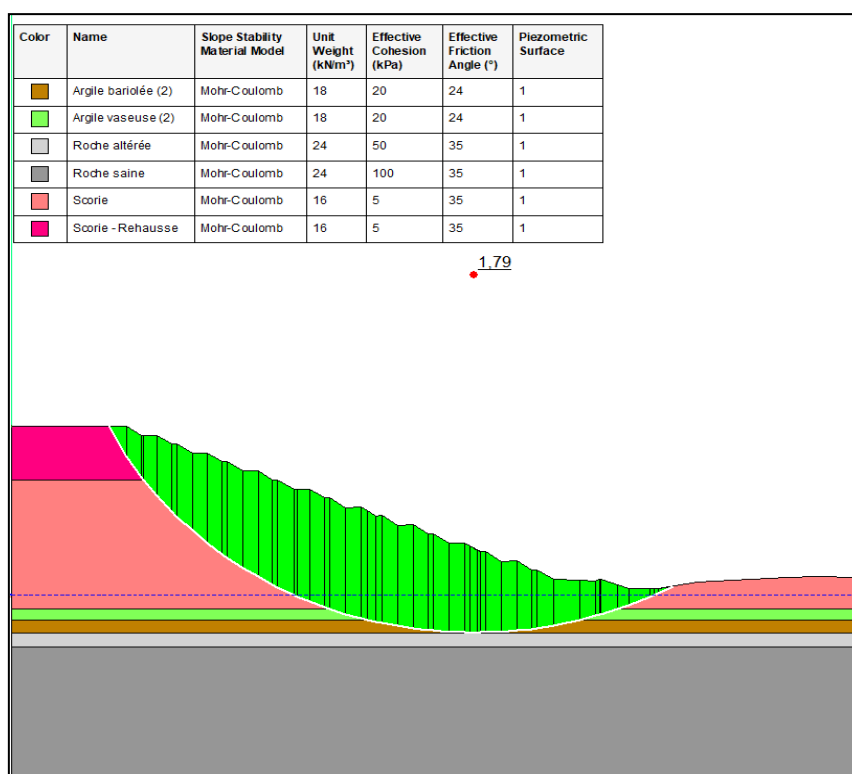


Figure N° 20. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition drainées (Coupe 3, FS =1,79)

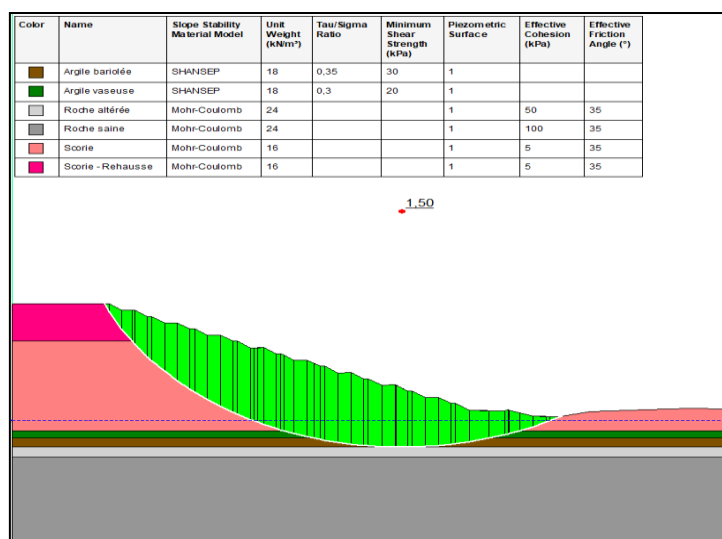


Figure N° 21. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture condition non drainées (Coupe 3, FS =1,50)

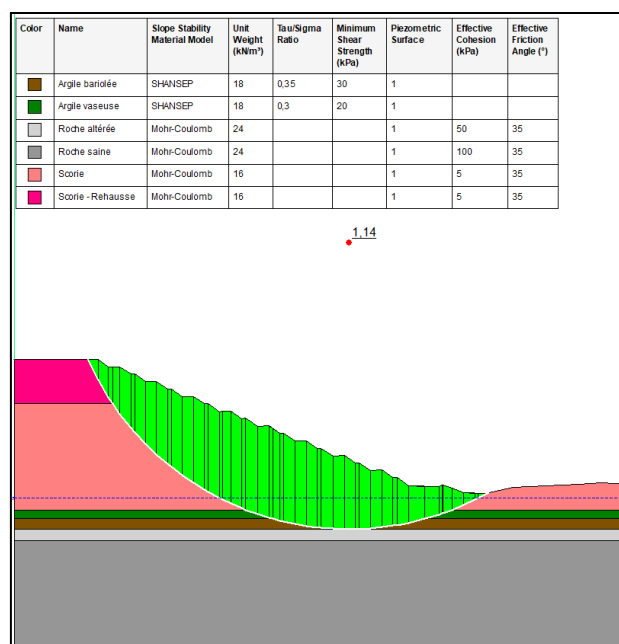


Figure N° 22. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique - séisme allégeant (Coupe 3, FS =1,14)

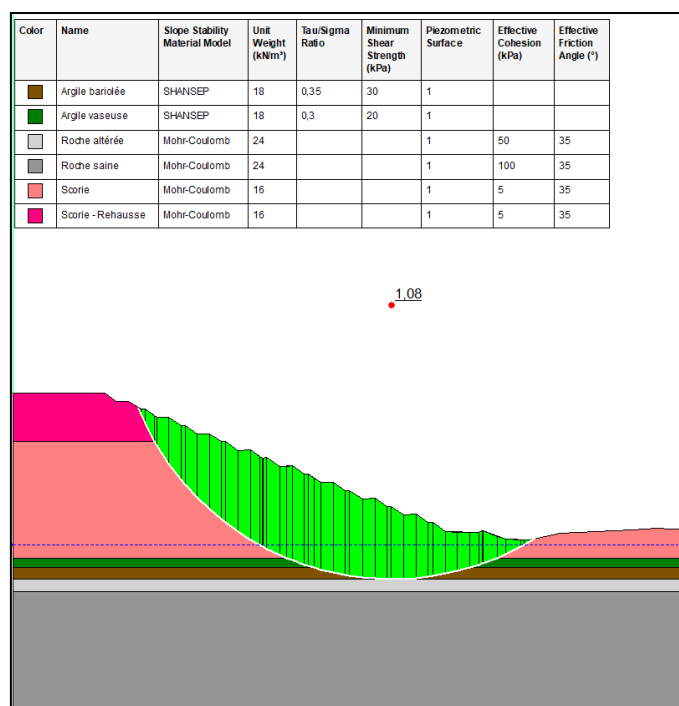


Figure N° 23. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation sismique - séisme pesant (Coupe 3, FS =1,08)

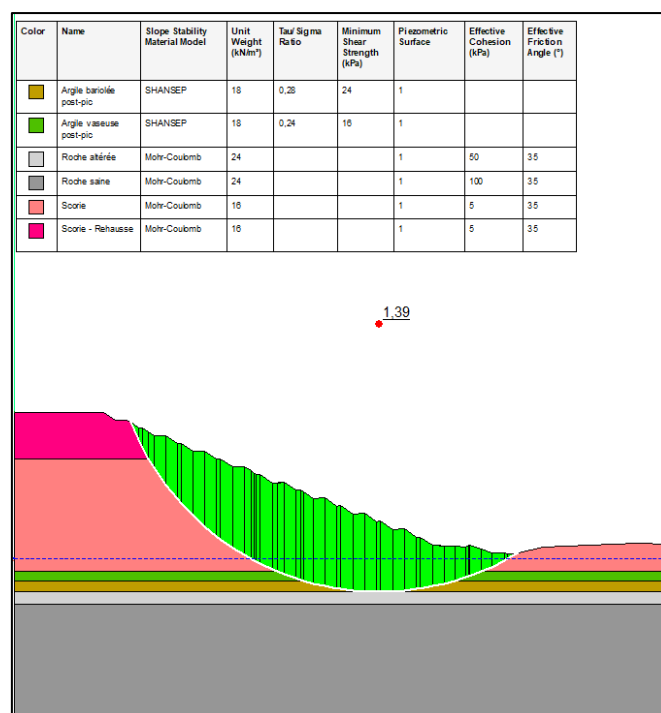


Figure N° 24. Surface de glissement relatif au mécanisme de rupture situation post-sismique (Coupe 3, FS =1,39)