

CISALB

Travaux de protection contre les inondations et  
restauration de la Leysse aval

LA MOTTE-SERVOLEX (73)

Dossier AF.15538

Etude géotechnique de conception - Phase  
Projet (G2 PRO)

NOTE DE CALCUL - Rive Gauche



CISALB

Travaux de protection contre les inondations et restauration de la Leysse aval

LA MOTTE-SERVOLEX (73)

Dossier AF.15538

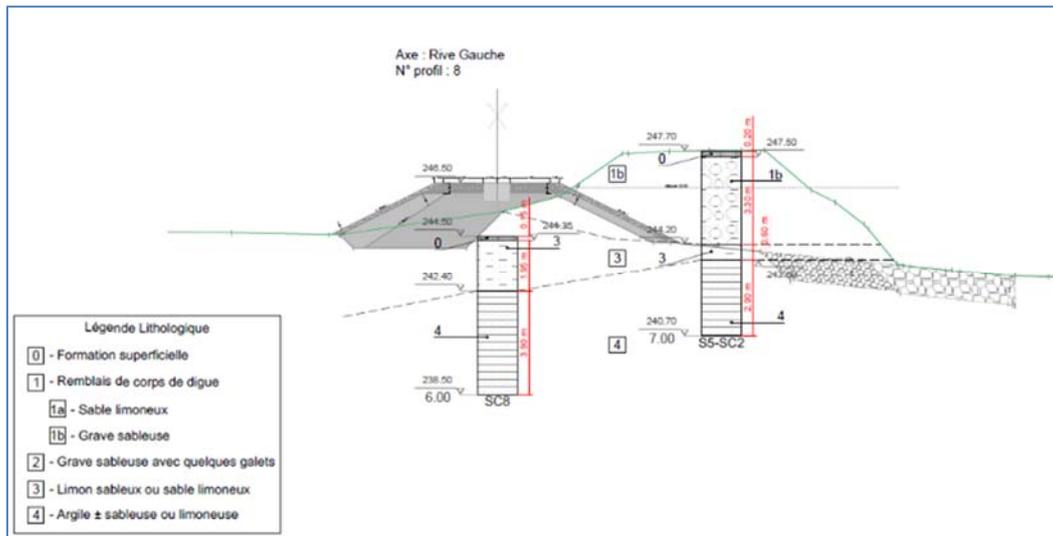
Date	Version	Ingénieur chargé du dossier	Contrôle externe	Objet de la version - Modification
22/12/2022	1	Isabelle CAVALLO	Pierre COSTE Jérémy Van Melle	Version initiale + calculs complémentaires

<b>Coupes de calcul retenues</b> .....	<b>1</b>
1. Coupes lithologiques retenues Rive Gauche .....	1
2. Caractéristiques géotechniques et géomécaniques retenues.....	4
<b>Stabilité des digues</b> .....	<b>5</b>
3. Calcul des écoulements .....	5
4. Vérification de la stabilité au glissement .....	15
5. Etudes des risques d'érosion interne .....	17
<b>Synthèse et aléas résiduels</b> .....	<b>26</b>

## 1. Coupes lithologiques retenues Rive Gauche

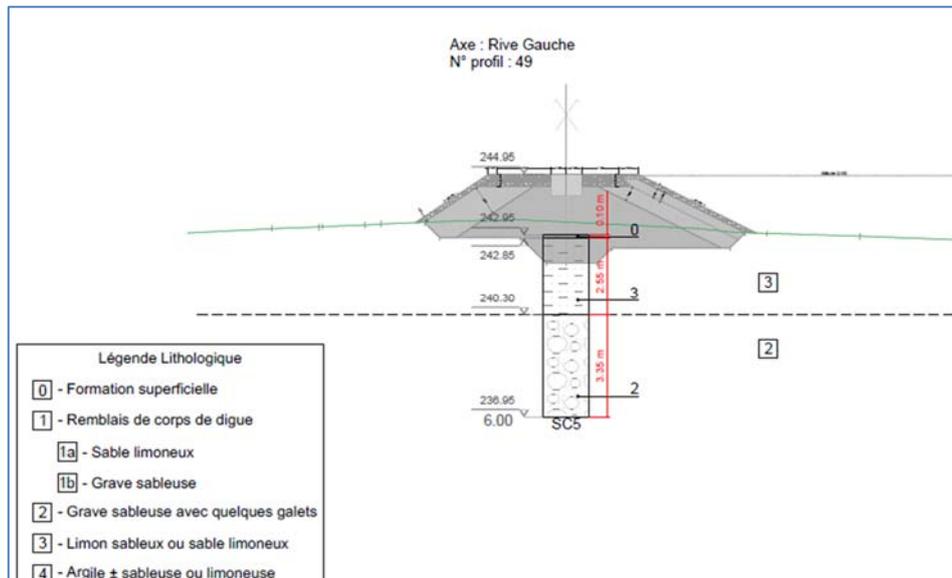
En rive gauche, 2 coupes lithologiques se détachent.

- Coupe « limon sableux surmontant les argiles sableuses »



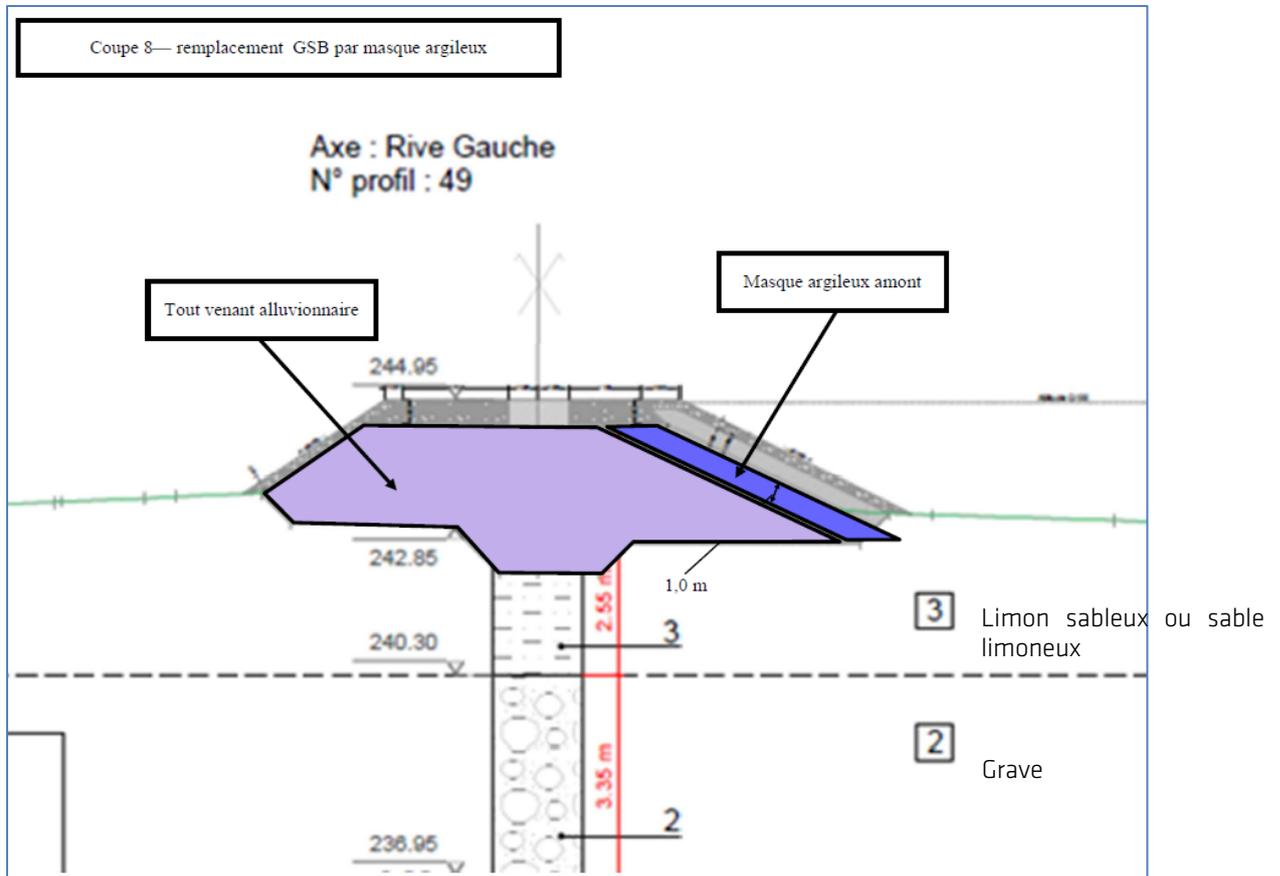
Hypothèse de niveau de nappe en situation courante : 243,5 m NGF

- Coupe « limon sableux surmontant les graves sableuses »

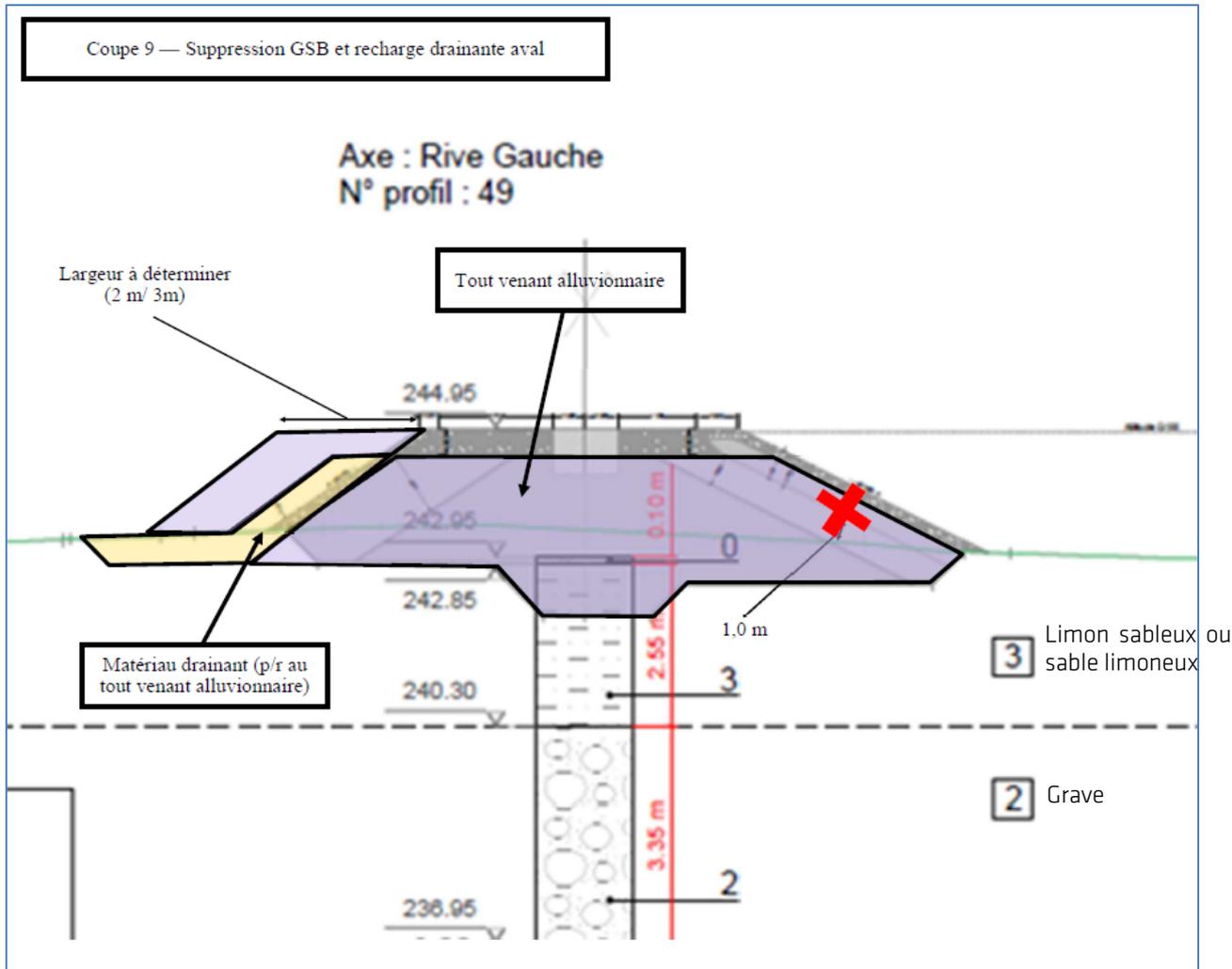


Hypothèse de niveau de nappe en situation courante : 241,5 m NGF

Pour ce profil, défavorable pour l'analyse des écoulements, il est étudié l'effet du remplacement du géotextile GSB par un masque en matériaux argileux et une configuration géométrique sans masque étanche amont mais avec charge drainante aval.



Profil « limons/Graves » avec substitution du GSB par masque en matériaux argileux



Profil « limons/Graves » avec configuration sans masque argileux en amont et recharge drainante en aval

## 2. Caractéristiques géotechniques et géomécaniques retenues

Les caractéristiques géotechniques et géomécaniques des différentes couches de sol, en place et d'apport, retenues pour les modélisations sont proposées dans le tableau en page suivante. Les valeurs proposées tiennent compte des résultats des différents essais et de notre expérience du site.

Ces valeurs sont valables pour chaque rive et quelques soient les coupes de calcul.

Faciès		Caractéristiques géotechniques		Caractéristiques géomécaniques	
N° horizon	Lithologie	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	K (m/s)	C' (kPa)	$\varphi'$ (°)
0	Formation de couverture	19.0	$1 \times 10^{-5}$	1.0	28.0
1a	Remblai de corps de digue Sable limoneux	20.0	$1 \times 10^{-5}$	2.0	33.0
1b	Remblai de corps de digue Grave sableuse	20.0	$1 \times 10^{-3}$	0.0	35.0
2	Grave avec quelques galets	22.0	$5 \times 10^{-4}$	0.0	35.0
3	Limon sableux ou sable limoneux	20.0	$1 \times 10^{-5}$	2.0	33.0
4	Argile plus ou moins sableuse ou limoneuse	20.0	$1 \times 10^{-6}$	5.0	26.0
Confinement GSB	Matériaux type C1bi ou B5	20	$1 \times 10^{-5}$	0	32
Support GSB	Matériaux type A1	20	$1 \times 10^{-6}$	2	30
Tout-venant alluvionnaire	Variée : essentiellement sable limono-graveleux	20	$1 \times 10^{-3}$	0	30
Clé- drainante	Graviers	22.5	$1 \times 10^{-2}$	0	37

## 3. Calcul des écoulements

### 3.1. Méthodologie de calcul

Afin d'étudier la stabilité au glissement des digues, il convient dans un premier temps de déterminer les champs des pressions interstitielles se développant dans le corps de digue et dans les terrains d'assise. Cette détermination est réalisée via une modélisation numérique en régime transitoire au moyen du logiciel Plaxis. Elle tient compte de la variation temporelle du niveau du cours d'eau en amont du système d'endiguement. Le détail des hypothèses retenues pour cette modélisation sont présentées dans la note d'hypothèse (ajouter référence).

Plusieurs coupes de calcul ont été étudiées afin de représenter les différentes configurations rencontrées sur le linéaire du système d'endiguement. Ces coupes sont présentées dans le tableau ci-dessous.

N° coupe	Tronçon	Coupe géométrique	Limnigramme	Commentaires
5	RG - nouvelle digue	PT39	ID152 = point17	Solution avec GSB - limon sableux surmontant les argiles sableuses
6	RG - nouvelle digue	PT39	ID152 = point17	Solution avec GSB - limon sableux surmontant les graves sableuses
8	RG - nouvelle digue	PT39	ID152 = point 17*	Coupe 6 GSB remplacé par masque argileux
9				Coupe 6 Suppression de GSB Recharge drainante aval

Ces 2 coupes présentent la même géométrie de digue qui correspond au PT avec la plus grande hauteur de digue (hypothèse enveloppe). La différence entre les 2 coupes porte sur le contexte géotechnique des terrains en place.

Une surcharge d'exploitation de 10 kPa a été prise en compte sur l'emprise de la piste cyclable en dehors des périodes de crue.

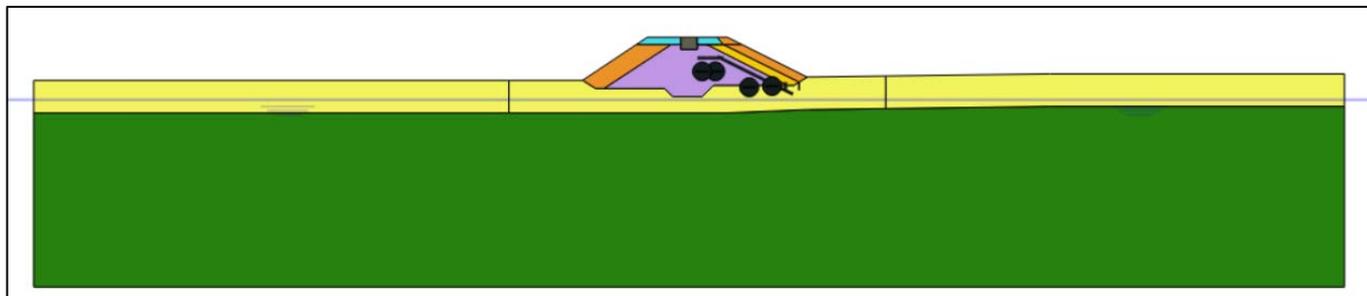
A noter, les optimisations proposées en coupe 8, avec le masque argileux sont justifiées d'un point de vue calculatoire conformément aux hypothèses arrêtées avec le MOE. Nous soulignons toutefois que la faible épaisseur modélisée (0,5 m) présente des risques en termes de mise en œuvre ou de défauts d'étanchéité notamment par dessiccation. Par conséquent, nous préconisons de prévoir une épaisseur minimale de masque argileux de 1,0 m et idéalement de retenir une épaisseur de 2 m conformément aux valeurs usuelles pour ce type d'ouvrages.

(\*) pour les coupes de calcul complémentaires (10 à 13), les limnigrammes pris en compte ont été modifié en tenant compte de la période de montée du niveau d'eau entre t=0h et t=15h, là où les premiers calculs tenaient compte d'un limnigramme commençant à t=15h. Cette modification permet de représenter plus finement les phénomènes réels et constitue une hypothèse plus favorable pour les calculs des écoulements.

## 3.2. Résultats des calculs

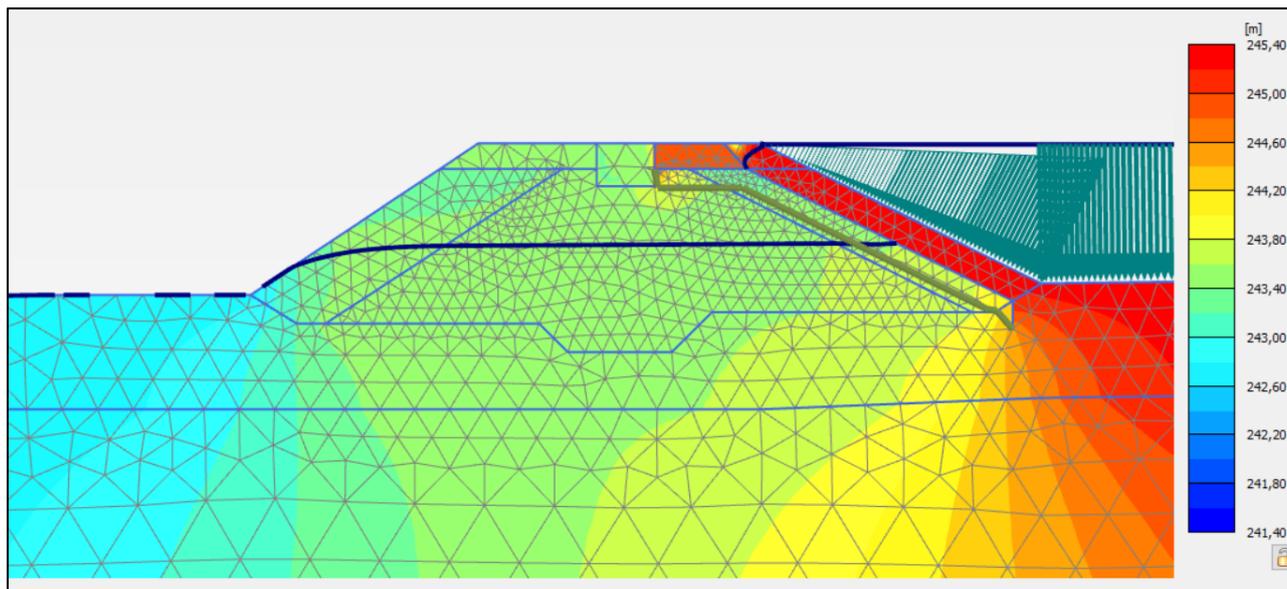
### 3.2.1. Coupe 5 - Limons sur Argiles

Cette coupe est basée sur le contexte géotechnique le plus fréquemment rencontré au niveau de la rive gauche, à savoir une couche limoneuse recouvrant une importante épaisseur d'argiles molles.



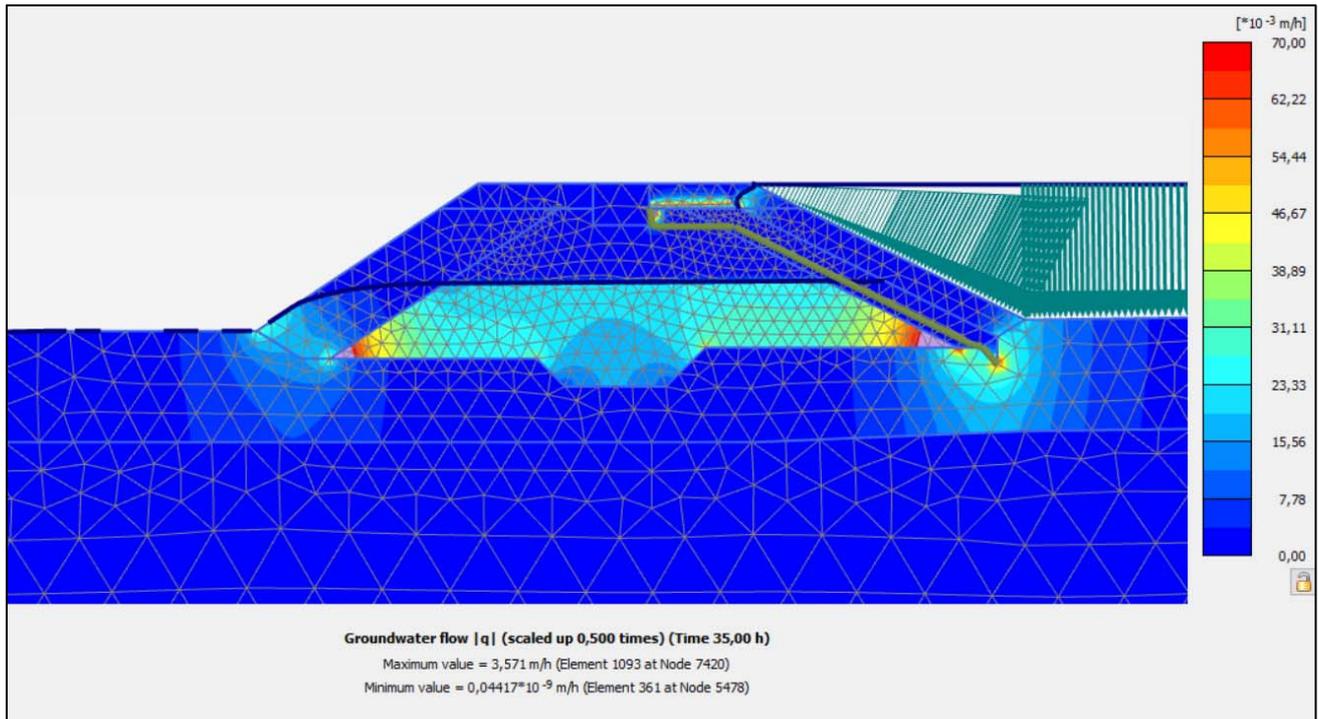
*Coupe 5 - Vue du modèle Plaxis*

Les calculs d'écoulement montrent que le corps de la digue est largement saturé en fin de montée de la crue. Les écoulements débouchent en pied de talus aval. Le GSB induit une perte de charge significative (environ 1,7 m) mais à l'arrière du GSB, le front de saturation diminue très lentement et débouche en pied du talus aval.



*Coupe 5 - Q100 - fin montée - Charge hydraulique*

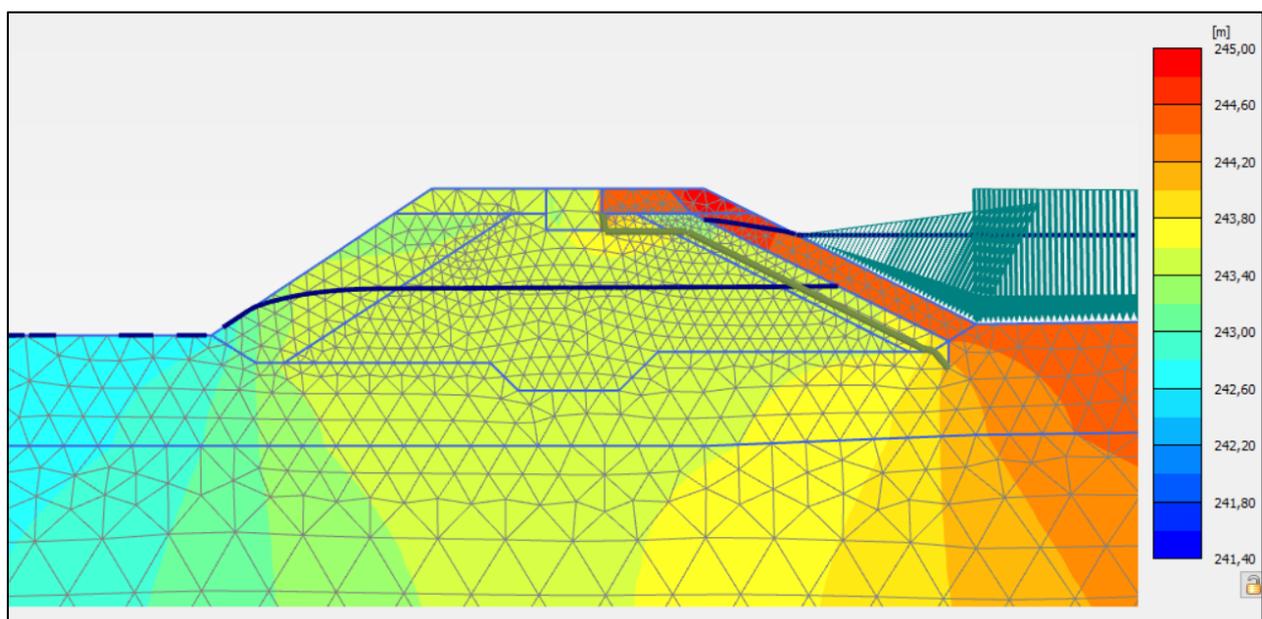
On constate également que les écoulements se développent essentiellement dans la partie centrale du corps de la digue (tout venant) saturée, ainsi qu'en amont et en aval de cette zone, notamment autour du pied du GSB.



*Coupe 5 - Q100 - fin montée - Champs de vitesse*

Lors de la décrue, on observe que les pressions interstitielles dans le corps de digue se dissipent mais avec un décalage par rapport au niveau de la Leyse notamment au niveau du talus amont, dans les matériaux de couverture du GSB. Ce comportement est cohérent avec la perméabilité relativement faible ( $1 \cdot 10^{-5}$  m/s) des matériaux de confinement du GSB.

On note également qu'en fin de crue, la digue reste significativement saturée et que les écoulements débouchent toujours au niveau du pied du talus aval.

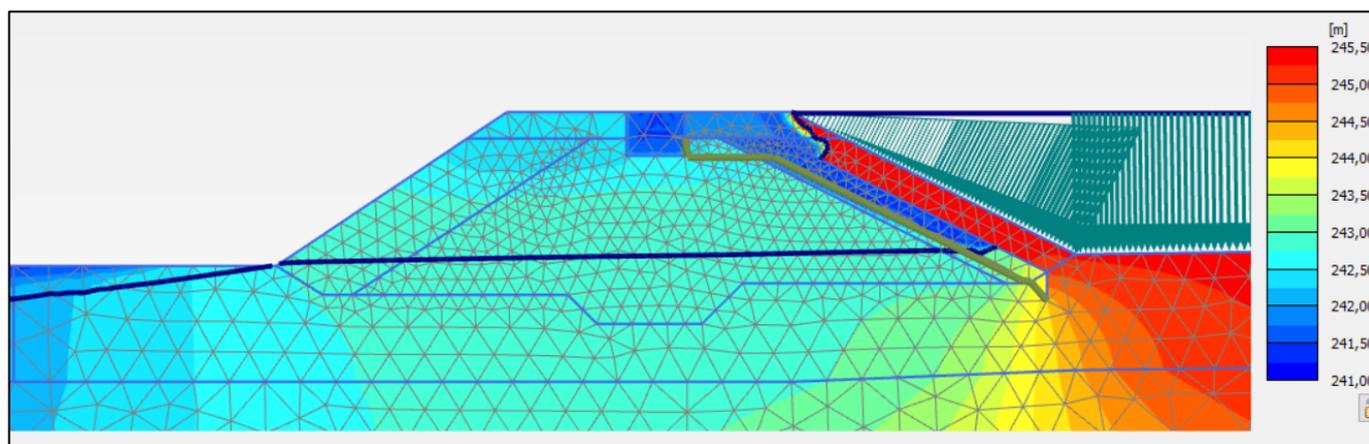


*Coupe 5 - Q100 - fin décrue - Charge hydraulique*

Les vérifications de stabilité (glissement et érosion interne) ont mis en avant des problèmes d'instabilité au glissement et des risques d'érosion au niveau du talus aval avec cette configuration. Ces problématiques sont liées à la présence d'un parement en matériaux C1Bi côté aval et amont. Côté aval, ces matériaux supposés moins perméables que le corps du remblai en tout venant alluvionnaire, engendrent une retenue des eaux à l'intérieur du corps du remblai au lieu de les drainer. Ce parement ayant uniquement une fonction de protection du GSB sur le talus amont, il a été remplacé sur le talus aval par des matériaux Tout venant identiques au cœur du remblai. Les calculs des écoulements avec cette configuration modifiée sont présentés ci-après.

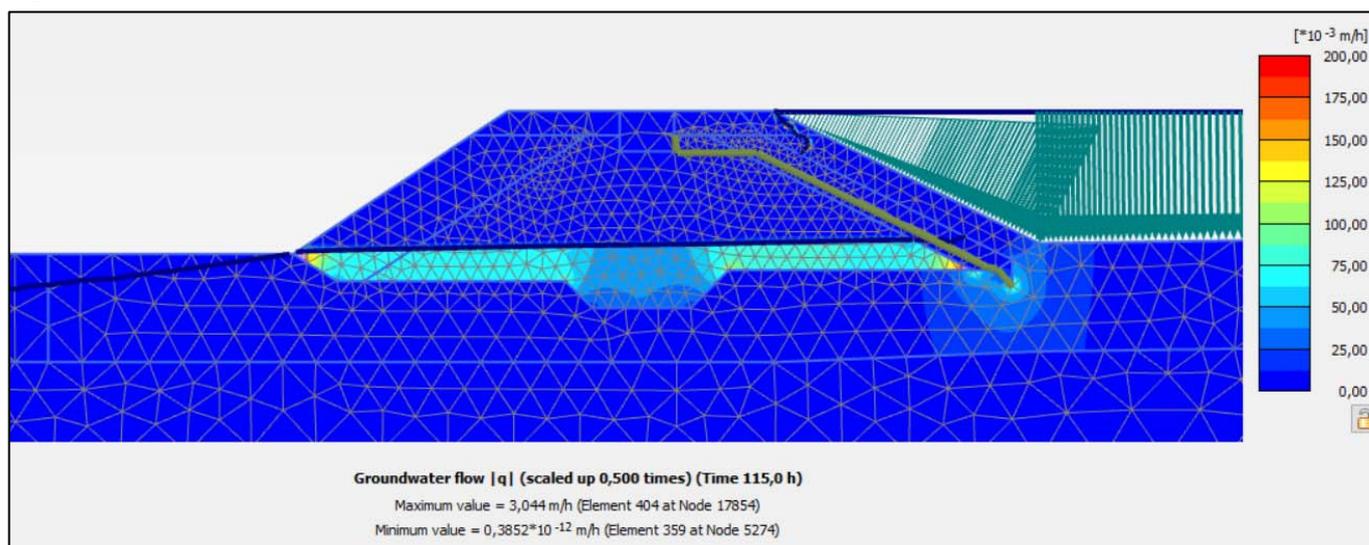
### 3.2.2. Coupe 5b – Limons sur Argiles / conception remblai modifiée

Les calculs d'écoulement montrent que le corps de la digue est faiblement saturé en fin de montée de la crue. Les écoulements débouchent en pied de talus aval mais très ponctuellement et le front de saturation est nettement abaissé par rapport à la coupe 5. Le GSB induit une perte de charge significative (environ 2,2 m).



Coupe 5b – Q100 - fin montée - Charge hydraulique

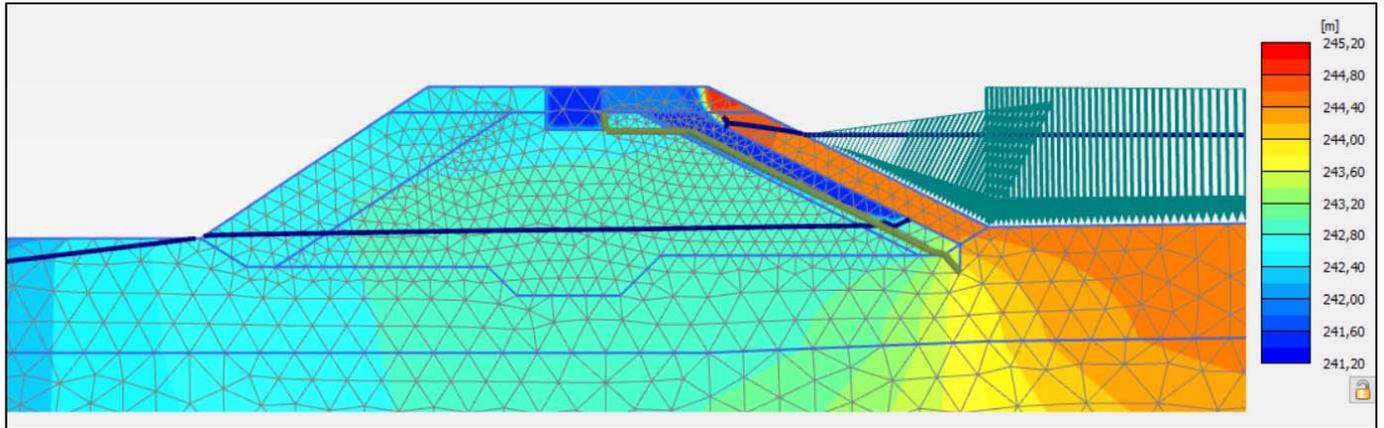
On constate à nouveau que les écoulements se développent essentiellement dans la partie centrale du corps de la digue (tout venant) saturée, ainsi qu'en amont et en aval de cette zone, notamment autour du pied du GSB.



Coupe 5b – Q100 - fin montée - Champs de vitesse

Lors de la décrue, on observe que les pressions interstitielles dans le corps de digue se dissipent mais avec un décalage par rapport au niveau de la Leyse notamment au niveau du talus amont, dans les matériaux de couverture du GSB de façon très proche de la coupe 5.

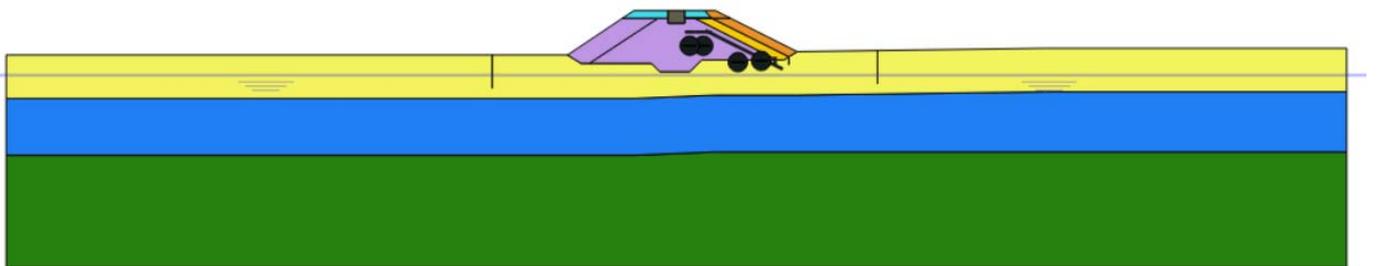
On note également qu'en fin de crue, le front de saturation dans le corps de digue n'a pas varié significativement mais qu'il reste toujours relativement bas.



*Coupe 5b - Q100 - fin décrue - Charge hydraulique*

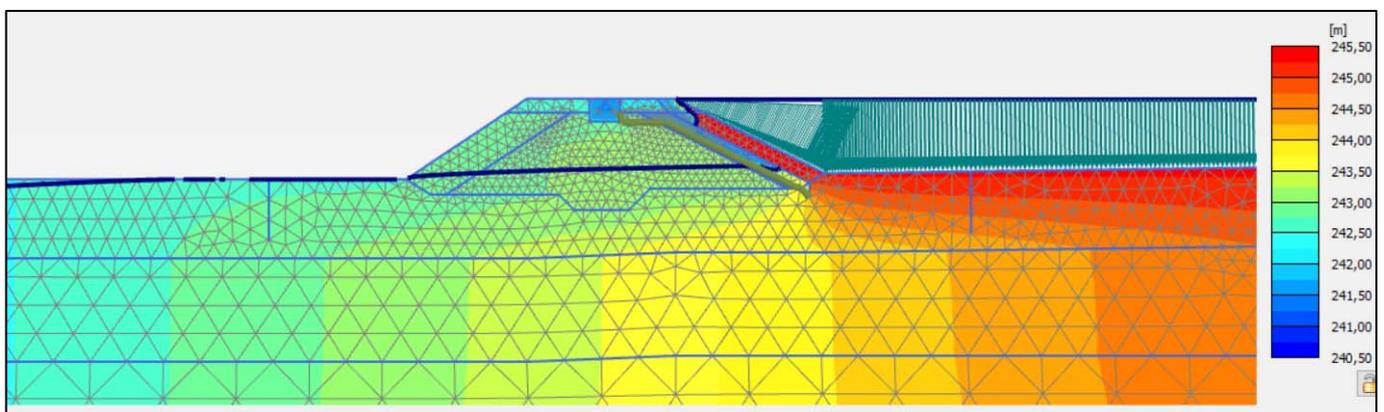
### 3.2.3. Coupe 6 - Limon sur Graves

Cette coupe correspond à une zone de changement de lithologie entre les PK 0+600 (PT36) et 0+900 (PT51) où on rencontre une couche d'alluvions sablo-graveleuse entre la couche limoneuse superficielle et la couche argileuse en profondeur.



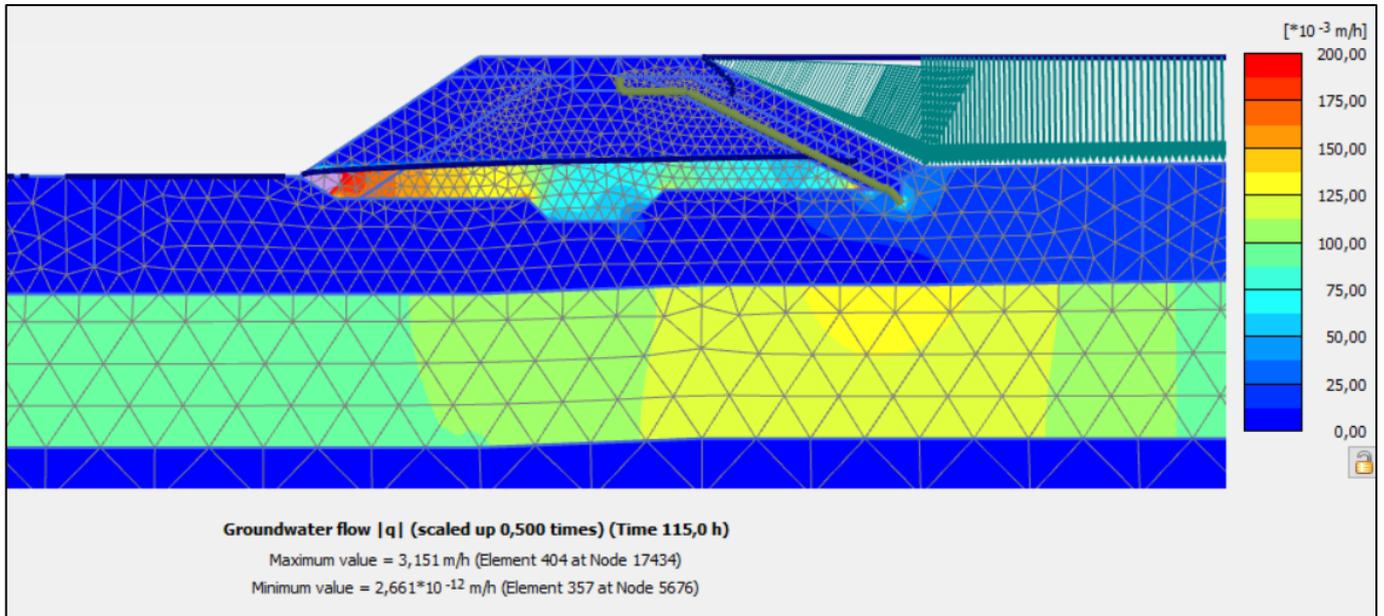
*Coupe 6 - Vue du modèle Plaxis*

Les calculs d'écoulement montrent que le corps de la digue est faiblement saturé en fin de montée de la crue. Les écoulements débouchent en pied de talus aval mais très ponctuellement et le front de saturation est nettement abaissé par rapport à la coupe 5. Le GSB induit une perte de charge significative (environ 2,2 m). Par rapport à la coupe 5b, on constate toutefois que le front de saturation remonte au TN en aval de la digue sur une distance beaucoup plus importante.



*Coupe 6 - Q100 - fin montée - Charge hydraulique*

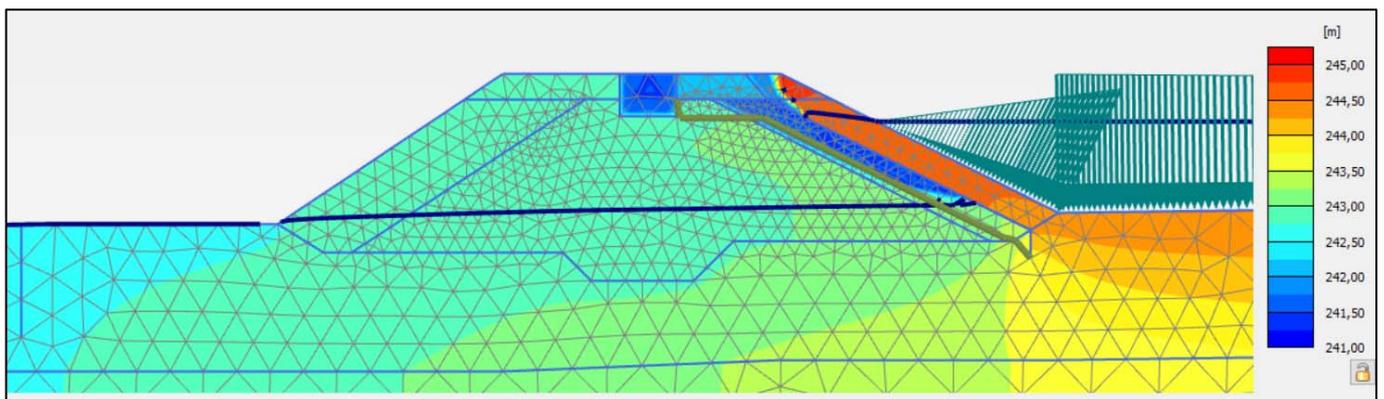
On constate également que les écoulements sont nettement plus importants que sur la coupe 5, notamment dans la couche d'alluvions graveleuses mais également dans le matériau Tout venant du corps de digue (comme sur la coupe 5).



*Coupe 6 - Q100 - fin montée - Champs de vitesse*

Lors de la décrue, on observe, comme pour la coupe 5b, que les pressions interstitielles dans le corps de digue se dissipent mais avec un décalage par rapport au niveau de la Leyse notamment au niveau du talus amont, dans les matériaux de couverture du GSB.

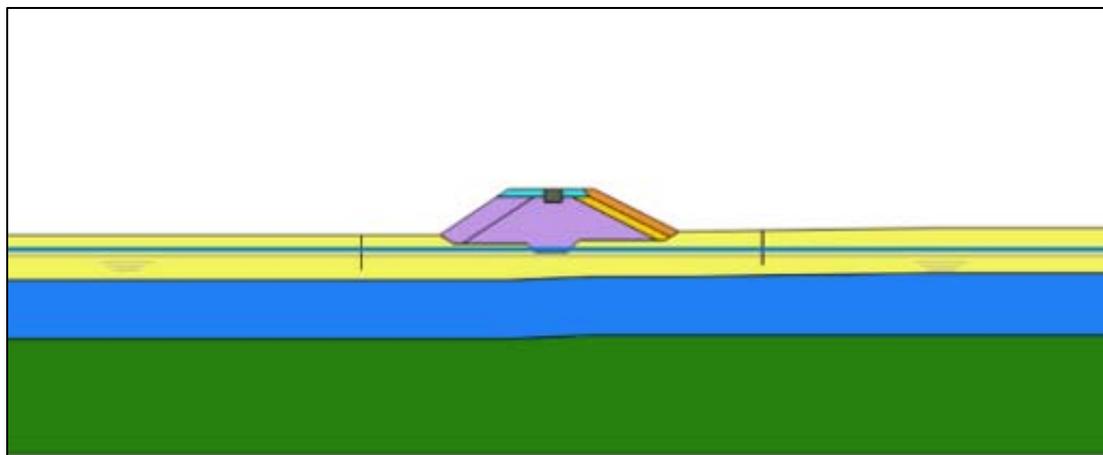
On note également qu'en fin de crue, le niveau de saturation dans la digue est peu modifié par rapport au pic de crue.



*Coupe 6 - Q100 - fin décrue - Charge hydraulique*

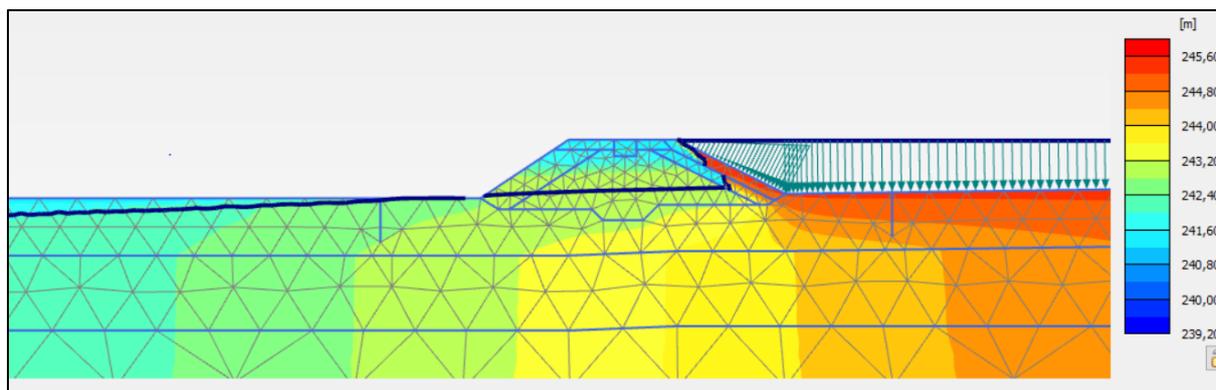
### 3.2.1. Coupe 8 - Coupe 6 avec GSB remplacé par masque argileux

Cette coupe correspond à la coupe 6 pour laquelle le GSB a été remplacé par un masque argileux de 0.5 m d'épaisseur et avec une perméabilité de  $10^{-6}$  m/s.



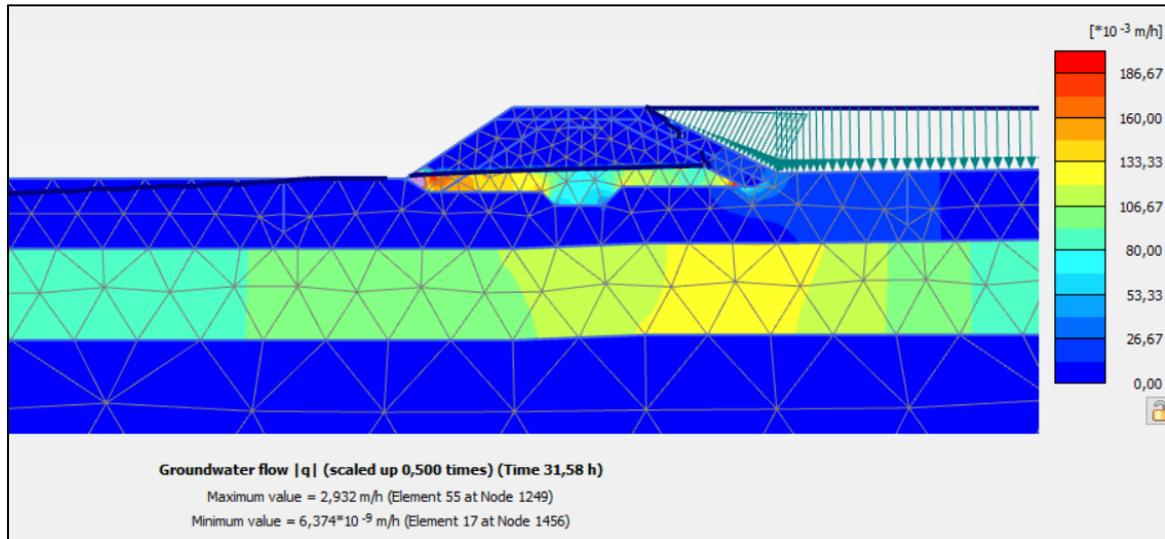
*Coupe 8 - Vue du modèle Plaxis*

Les calculs d'écoulement montrent que le corps de la digue est faiblement saturé en fin de montée de la crue derrière le masque argileux. Les écoulements débouchent en pied de talus aval comme sur la coupe 6. La perte de charge induite par le remplacement du GSB par le masque argileux est très proche de celle de la coupe 6.



*Coupe 8 - Q100 - fin montée - Charge hydraulique*

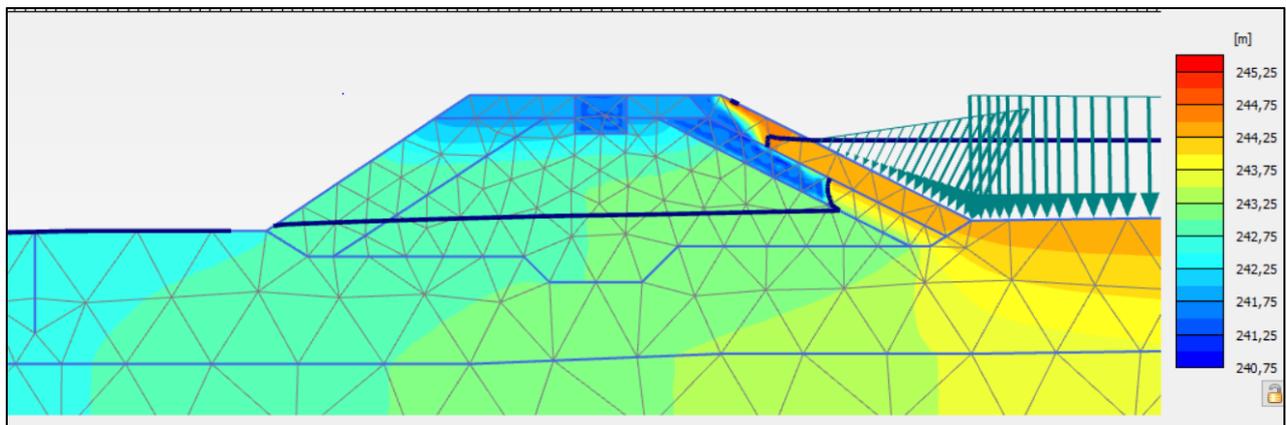
Les écoulements se développent, comme la coupe 6, essentiellement dans la couche d'alluvions graveleuses et dans le matériau Tout venant du corps de digue depuis le pied du masque argileux.



*Coupe 8 - Q100 - fin montée - Champs de vitesse*

Lors de la décrue, les pressions interstitielles dans le corps de digue se dissipent toujours avec un décalage par rapport au niveau de la Leysse notamment au niveau du talus amont, dans les matériaux de couverture.

On note également qu'en fin de crue, le niveau de saturation dans la digue est peu modifié par rapport au pic de crue.

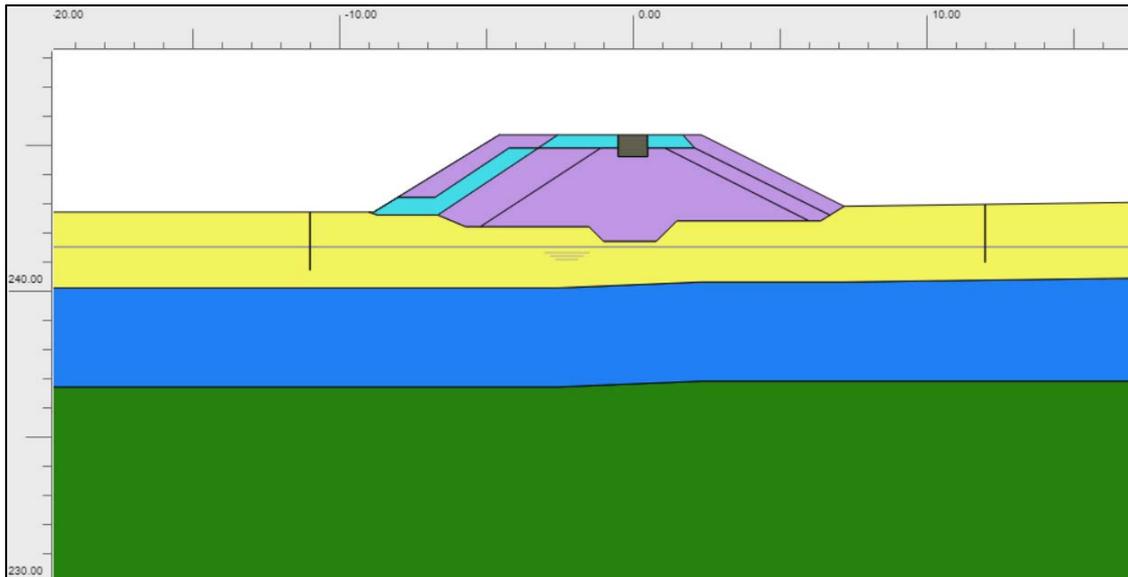


*Coupe 8 - Q100 - fin décrue - Charge hydraulique*

De façon globale les écoulements sont très similaires à ceux de la coupe 6, le remplacement du GSB par un masque argileux ne modifiant pas le comportement global sauf localement au niveau du masque lui-même.

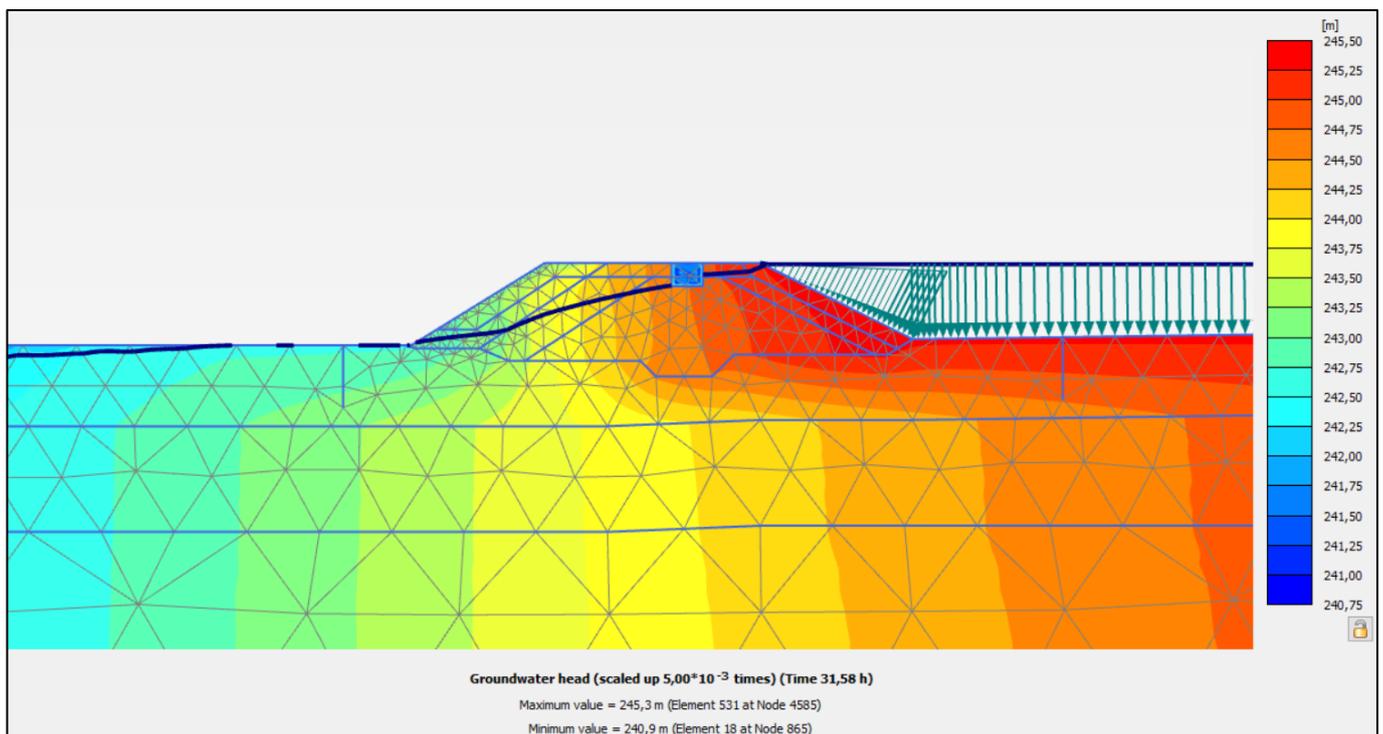
### 3.2.1. *Coupe 9 - Coupe 6 sans GSB et avec recharge drainante aval*

Cette coupe correspond à la coupe 6 pour laquelle le GSB a été supprimé et une recharge drainante de 2.0 m de large ajoutée devant le talus aval.



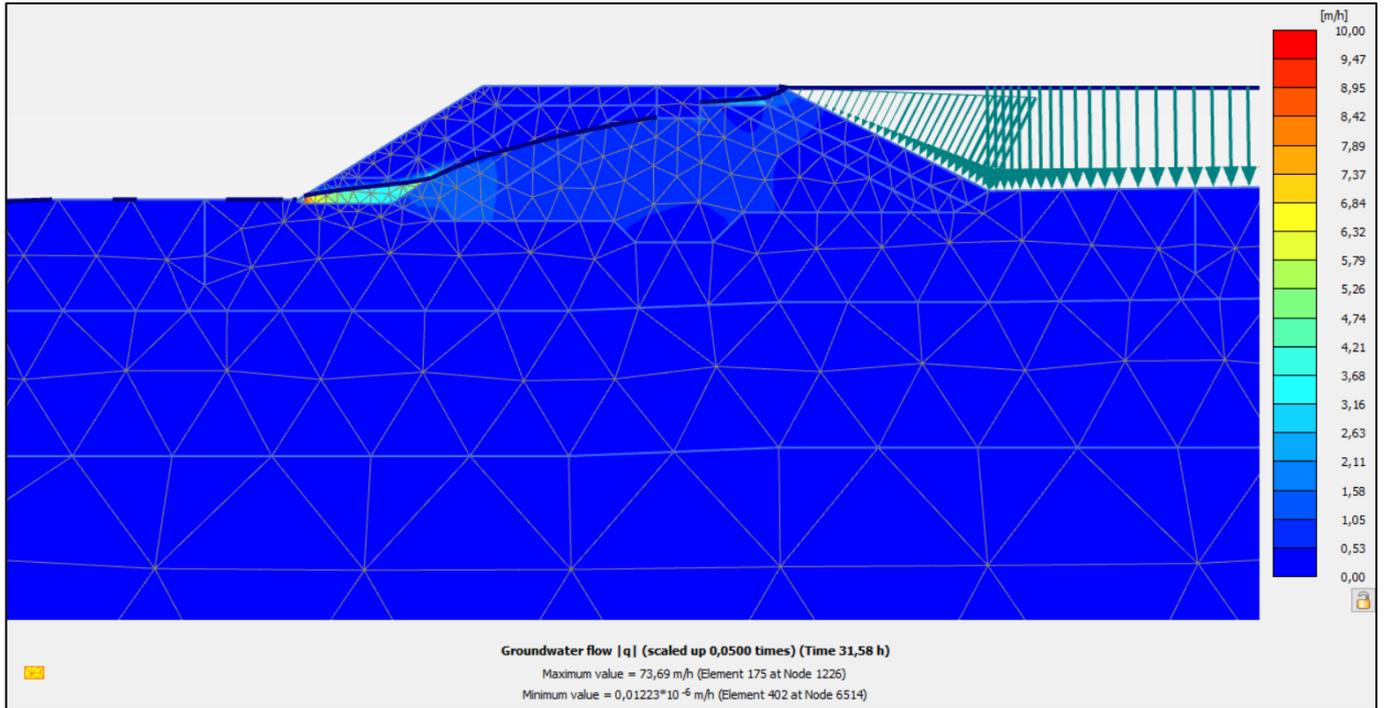
Coupe 9 - Vue du modèle Plaxis

Les calculs d'écoulement montrent que le corps de la digue est saturé en fin de montée de la crue. Les écoulements, dirigés par la recharge drainante, débouchent en pied de talus aval comme sur la coupe 6 mais remontent au-dessus du TN sur une plus grande distance. Il n'y a pas de perte de charge significative, les écoulements se propageant dans le même matériau.



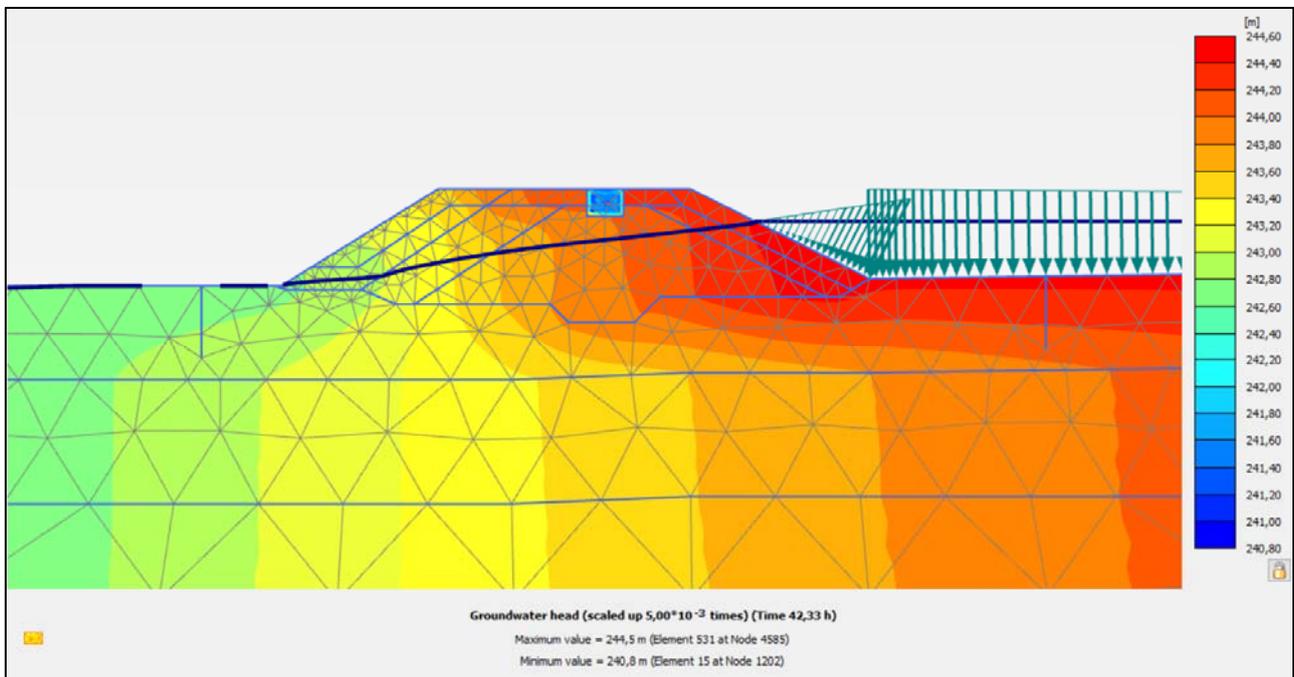
Coupe 9 - Q100 - fin montée - Charge hydraulique

Les écoulements se concentrent essentiellement en pied du talus aval dans la partie drainante de la recharge.



*Coupe 9 - Q100 - fin montée - Champs de vitesse*

Lors de la décrue, les pressions interstitielles dans le corps de digue se dissipent progressivement en phase avec le niveau dans le cours d'eau.



*Coupe 9 - Q100 - fin décrue - Charge hydraulique*

On note également qu'en fin de crue, le niveau de saturation dans la digue est plus bas qu'au pic de crue mais le corps de digue reste saturé.

## 4. Vérification de la stabilité au glissement

Les résultats de ces calculs sont synthétisés dans les paragraphes ci-après. Les détails des calculs sont présentés en annexe.

### 4.1. Coupe 5b – Limons sur Argiles

N° coupe	Phase	Talus	Coefficient de sécurité	Commentaires
5b	Etiage	Aval	1,17 > 1,0	
	Fin de la montée - Q100	Aval	1,14 > 1,0	
	Etiage	Amont	1,41 > 1,0	
	Fin de la décrue - Q100	Amont	1,14 > 1,0	

Selon les résultats des calculs de stabilité sur la coupe 5b, les risques de glissements lors des phases de crue sont acceptables.

#### 4.2. Coupe 6 – Limons sur Graves

N° coupe	Phase	Talus	Coefficient de sécurité	Commentaires
6	Etiage	Aval	1,16 > 1,0	
	Fin de la montée - Q100	Aval	1,05 > 1,0	
	Etiage	Amont	1,41 > 1,0	
	Fin de la décrue - Q100	Amont	1,13 > 1,0	

Selon les résultats des calculs de stabilité sur la coupe 6, les risques de glissements lors des phases de crue sont acceptables.

#### 4.3. Coupe 8 – Coupe 6 avec GSB remplacé par masque argileux

N° coupe	Phase	Talus	Coefficient de sécurité	Commentaires
8	Etiage	Aval	1,18 > 1,0	
	Fin de la montée - Q100	Aval	1,07 > 1,0	
	Etiage	Amont	1,40 > 1,0	
	Fin de la décrue - Q100	Amont	1,30 > 1,0	

Selon les résultats des calculs de stabilité, les risques de glissements lors des phases de crue sont acceptables. Les résultats sont améliorés comparé à la coupe 6 lors de la décrue.

#### 4.4. Coupe 9 – Coupe 6 sans GSB et avec recharge drainante aval

N° coupe	Phase	Talus	Coefficient de sécurité	Commentaires
9	Etiage	Aval	1,41 > 1,0	
	Fin de la montée - Q100	Aval	1,11 > 1,0	
	Etiage	Amont	1,41 > 1,0	
	Fin de la décrue - Q100	Amont	1,31 > 1,0	

Les coefficients de sécurité en amont sont améliorés comparé à la coupe 6 lors de la décrue. En aval, il est à noter que le coefficient de sécurité chute à la fin de la crue par rapport à l'étiage mais reste acceptable. Selon les résultats des calculs de stabilité sur cette coupe, les risques de glissements lors des phases de crue sont acceptables.

## 5. Etudes des risques d'érosion interne

### 5.1. Boullance

Pour un écoulement vertical ascendant le critère suivant doit être vérifié afin de garantir la sécurité vis-à-vis du soulèvement hydraulique :

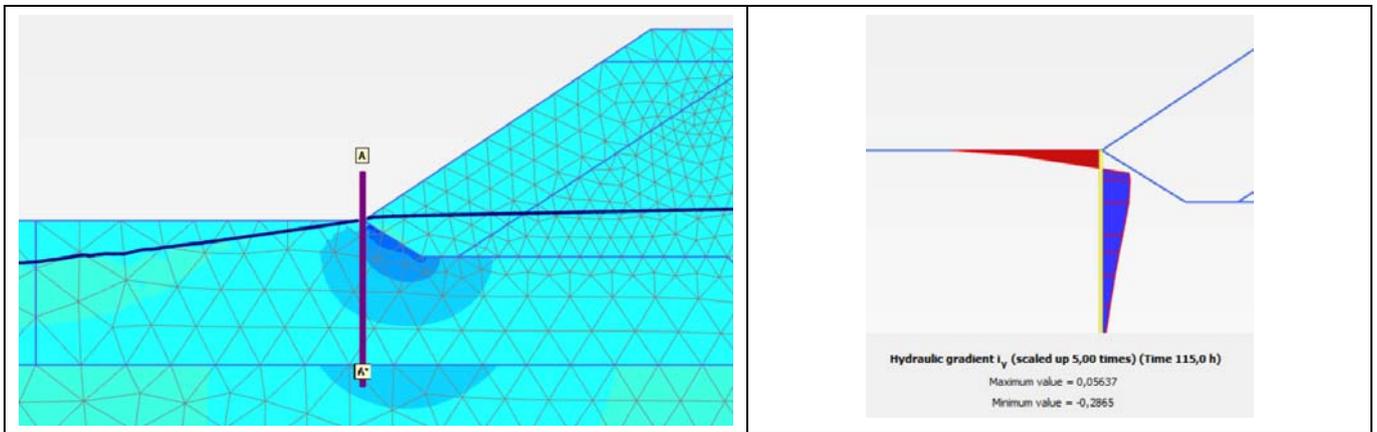
$$i < i_c$$

Avec :

$$i_c = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Dans le cas présent, la couche avec le poids volumique le plus faible est de  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$  soit  $i_c = 0,9$ .

- Coupe 5b – Fin de la montée Q100 :

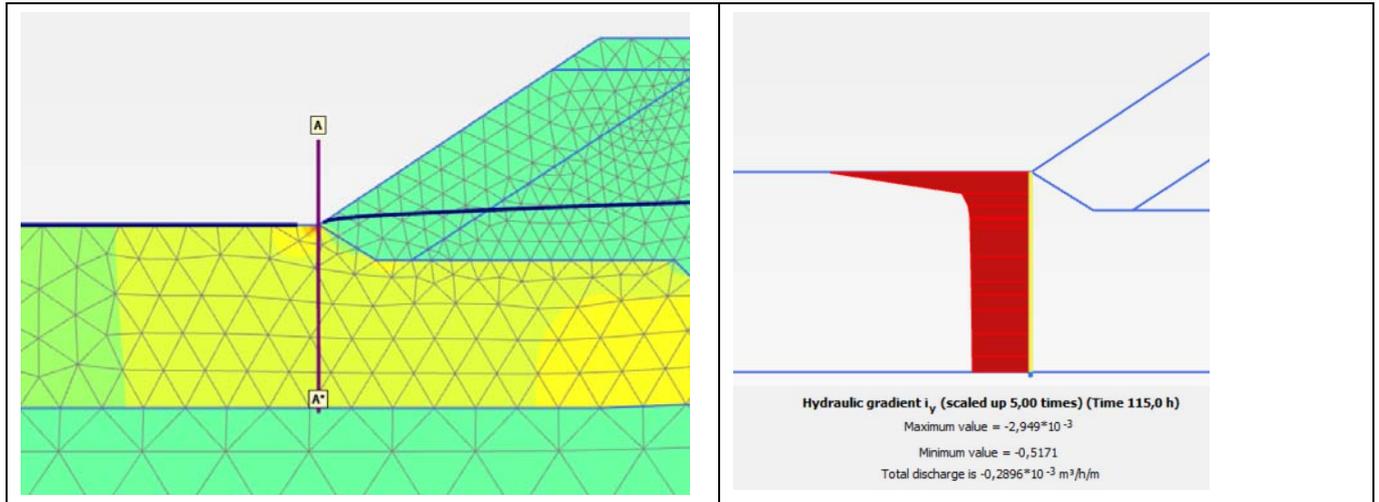


Coupe 5b - Q100 - fin montée - gradient hydraulique vertical ( $i_y$ )

- Caractéristiques de l'écoulement : écoulements résurgents côté aval
- Critère :  $i_{y,max} = 0,3 \ll 0,9$
- Synthèse : Risque boullance écarté

Nota : les valeurs de gradient  $i_y$  négatives correspondent à un écoulement ascendant ( $\vec{V} = -k \times \vec{i}$ ).

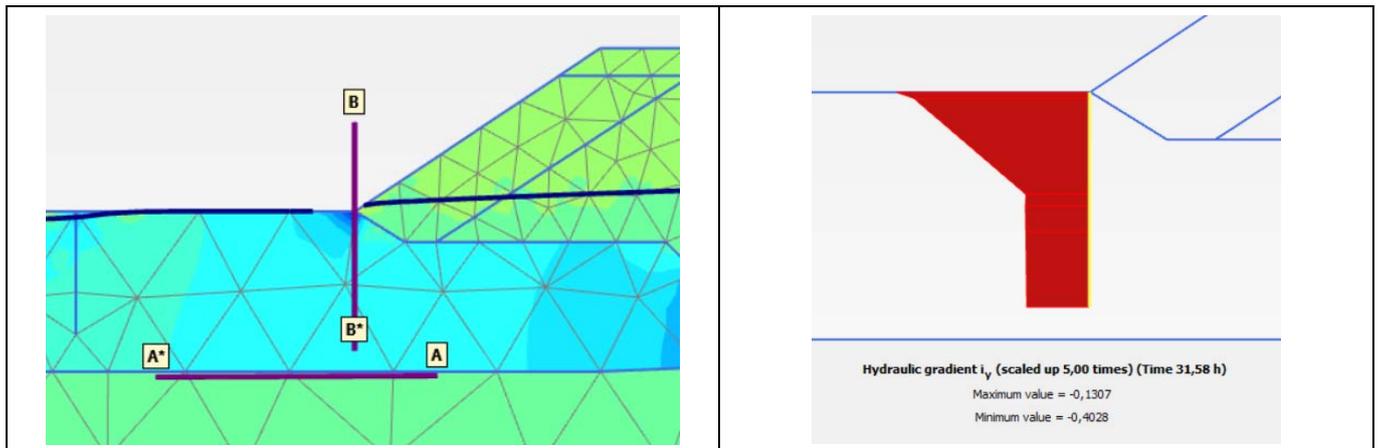
• Coupe 6 – Fin de la montée Q100 :



*Coupe 6 – Q100 – fin montée – gradient hydraulique vertical ( $i_y$ )*

- Caractéristiques de l'écoulement : écoulements résurgents côté aval
- Critère :  $i_{y,\max} = 0,55 < 0,9$
- Synthèse : Risque boulangé écarté

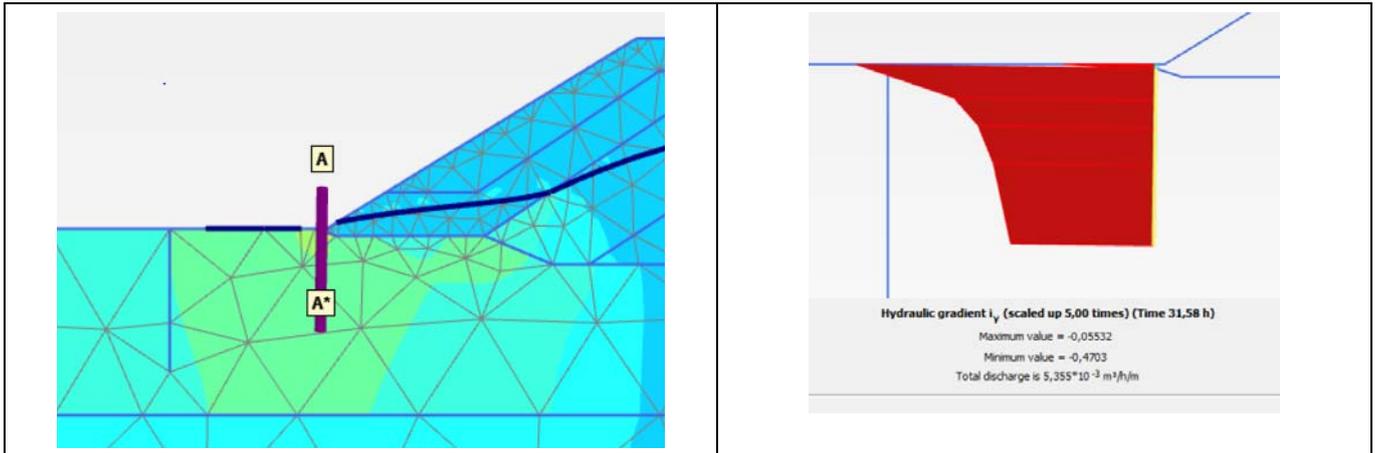
Coupe 8 – Fin de la montée Q100 :



*Coupe 8 – Q100 – fin montée – gradient hydraulique vertical ( $i_y$ )*

- Caractéristiques de l'écoulement : écoulements résurgents côté aval
- Critère :  $i_{y,\max} = 0,4 \ll 0,9$
- Synthèse : Risque boulangé écarté

• Coupe 9 – Fin de la montée Q100 :



Coupe 9 – Q100 - fin montée – gradient hydraulique verticale ( $i_y$ )

- Caractéristiques de l'écoulement : écoulements résurgents côté aval
- Critère :  $i_{y,max} = 0,5 < 0,9$
- Synthèse : Risque boulangé écarté

### 5.2. Soulèvement côté aval

Le risque de soulèvement intervient lorsque de la pression interstitielle à la base d'une couche relativement peu perméable devient supérieure à la contrainte totale induite essentiellement par le poids des terres susjacentes.

Dans le cas des digues de la Leyse, il convient d'étudier ce risque en tête de la couche d'alluvions graveleuses [2] lorsqu'elle est couverte par des formations moins perméables [1a] et [3]. La coupes 6 est concernée par ce contexte.

Coupe	Couche « imperméable »	Pression interstitielle	Contrainte totale	Conclusion
6	Limon sableux ou sable limoneux [3]	$u = 30$ kPa	$\sigma_v = 46$ kPa	$u < \sigma_v$ ( $F = 1,38$ )
8	Limon sableux ou sable limoneux [3]	$u = 31$ kPa	$\sigma_v = 46$ kPa	$u < \sigma_v$ ( $F = 1,33$ )
9	Limon sableux ou sable limoneux [3]	$u = 34$ kPa	$\sigma_v = 46$ kPa	$u < \sigma_v$ ( $F = 1,21$ )

Sur la base de la modélisation des écoulements hydrauliques, le risque de soulèvement côté aval de la digue apparaît très peu probable.

### 5.3. Suffusion

La suffusion correspond à un mouvement des grains de petite taille, non structuraux, à l'intérieur du squelette, plus grossier.

L'initiation de la suffusion suppose tout d'abord qu'il y ait des particules libres de se mouvoir, c'est-à-dire des particules qui ne sont pas étreintes par la matrice du sol. La suffusion peut se développer lorsque le squelette du sol (la matrice), par lequel les contraintes de confinement circulent, est constitué par un assemblage de particules grossières, les particules les plus fines occupent les pores de cette matrice, et ne reçoivent pas les contraintes effectives de confinement.

Compte tenu de la nature des matériaux rencontrés au niveau du système d'endiguement de la Leysse aval, la plupart des couches présentent une teneur en éléments fins significative à l'exception des alluvions graveleuses **2** (classées selon le GTR, D2 à C1B4 avec une teneur en fines de 4 à 8%).

De nombreux critères sont proposés dans la littérature pour qualifier la résistance d'un sol à la suffusion. Ils fournissent des résultats parfois très différents. On notera notamment que le critère géométrique de Kenney&Lau, fréquemment évoqué, est jugé conservateur par certaines sources (Li PhD) et qu'il garantirait une stabilité interne pour des gradients hydrauliques très importants, supérieurs à 1.

Malgré les nombreux critères proposés dans la littérature, on peut proposer une tendance concernant les valeurs de gradients hydrauliques critiques pour la suffusion dans les sols dits « instables » selon les critères granulométriques :

- $i < 0,10$  : gradient faible, faible probabilité de suffusion,
- $0,10 < i < 0,30$  : gradient moyen, probabilité de suffusion non négligeable, fonction de la nature du sol,
- $i > 0,30$  : gradient fort, importante probabilité de suffusion à long terme.

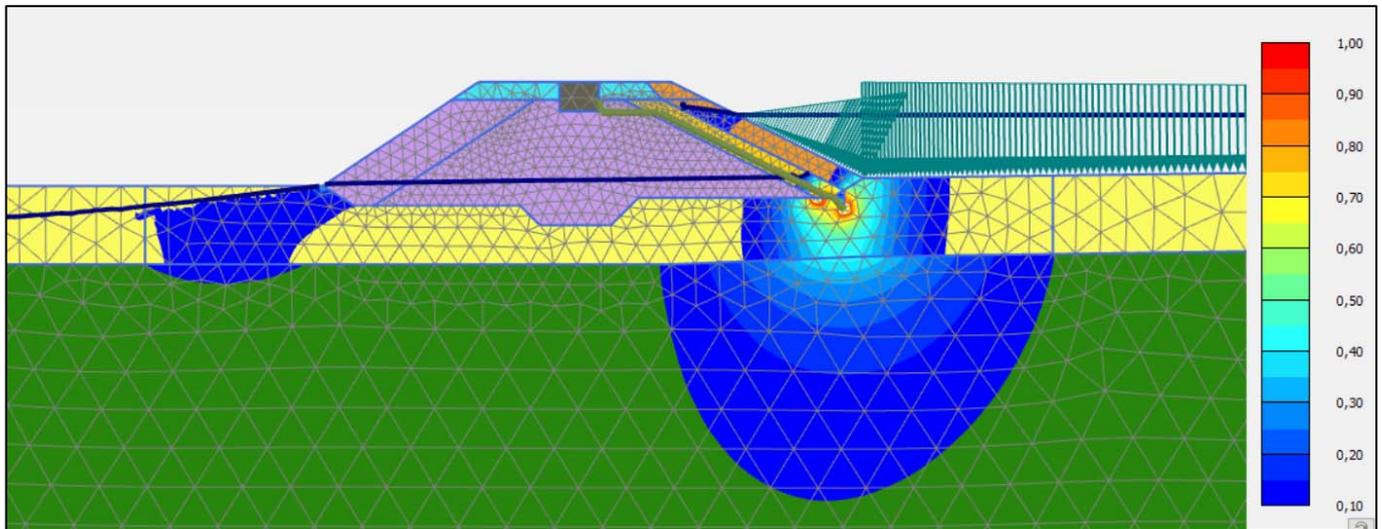
En s'appuyant sur l'approche de Burenkova, jugée moins conservatrice que Kenney&Lau, nous avons classé les différentes couches rencontrées sur la Leysse aval sur la base selon les analyses granulométriques disponibles.

N° horizon	Lithologie	Nombre d'essais	Critère de Burenkova
<b>1a</b>	Remblai de corps de digue Sable limoneux	5	Stables : 2/5 Instables : 3/5
<b>3</b>	Limon sableux ou sable limoneux	11	Stables : 8/11 Instables : 3/11
<b>4</b>	Argile plus ou moins sableuse ou limoneuse	2	Stables : 2/2 Instables : 0/2

Cette approche indique que les couches **3** et **4** seraient globalement « stables » vis-à-vis de la suffusion et que la couche **1a** présente des faciès « instables ».

Afin d'évaluer les risques de suffusion du point de vue du critère hydraulique, on présente ci-après les gradients hydrauliques calculés pour les différentes coupes de calcul au pic de la crue.

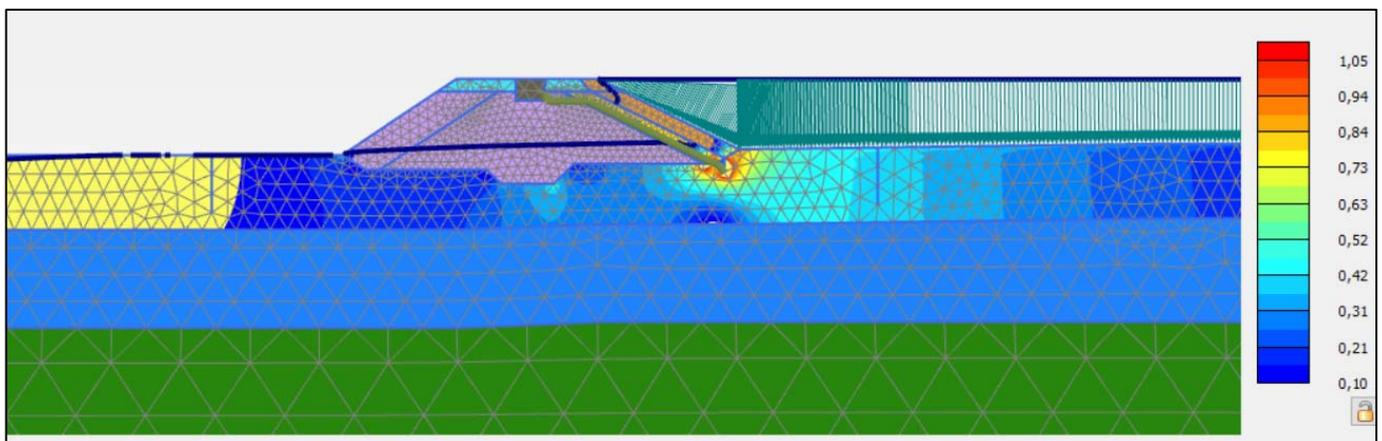
- Coupe 5b – Fin de la montée Q100 :



Coupe 5b – Q100 - fin montée - Charge gradient hydraulique  $|i|$

Le gradient hydraulique est supérieur à 0,1 ponctuellement au pied du talus aval dans la couche des alluvions sablo-limoneuses [3] et sur une zone plus significative autour du pied du GSB dans les alluvions sablo-limoneuses [3] ainsi que dans les alluvions argileuses [4]. Si on considère les gradients supérieurs à 0,3 alors seule la zone au pied du GSB dans les alluvions sablo-limoneuses [3] apparaît significative. Compte tenu du volume de sol concerné limité et de sa position ainsi que du caractère « stable » des couches [3] et [4], l'initiation de la suffusion peut être jugée peu probable et le risque de désordre très faible.

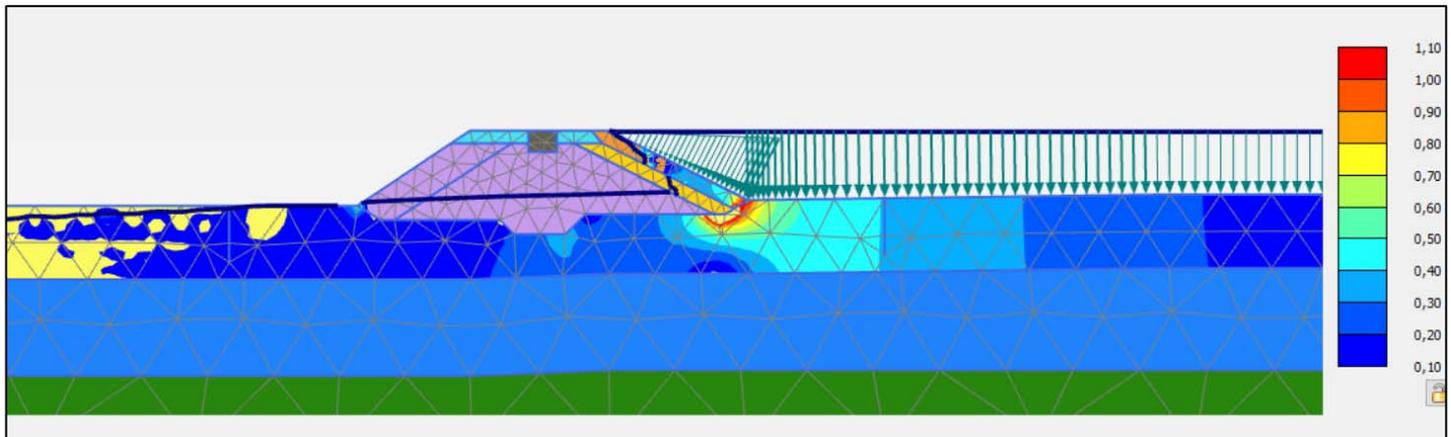
- Coupe 6 – Fin de la montée Q100 :



Coupe 6 – Q100 - fin montée - Charge gradient hydraulique  $|i|$

Le gradient hydraulique est supérieur à 0,1 sur un volume de sol beaucoup plus significatif sur toute l'emprise de la digue ainsi qu'en amont mais uniquement dans les alluvions sablo-limoneuses [3]. Ils ne sont supérieurs à 0,3 que sur un volume de sol nettement plus limité entre le pied du GSB et environ 4 m en amont de la digue. Compte tenu du volume de sol concerné par les gradients les plus forts ( $>0,3$ ) et de sa position ainsi que du caractère « stable » des couches [3], l'initiation de la suffusion peut être jugée peu probable et le risque de désordre très faible.

- Coupe 8 – Fin de la montée Q100 :

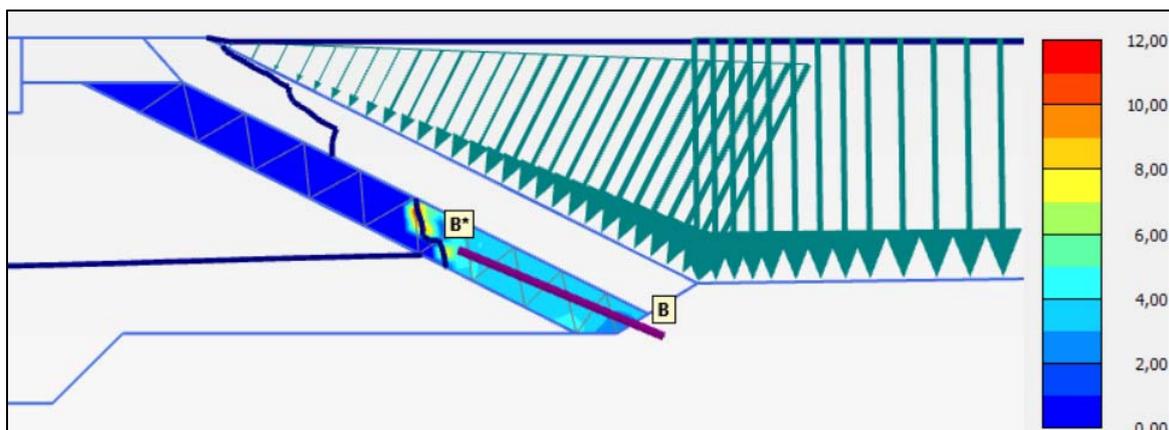


*Coupe 8 – Q100 - fin montée – Charge gradient hydraulique  $|i|$*

Le gradient hydraulique est supérieur à 0,1 sur un volume de sol important comme sur la coupe 6 dans alluvions sablo-limoneuses [3]. Ils ne sont supérieurs à 0,3 que sur un volume de sol plus limité entre le pied du GSB et environ 8 m en amont de la digue. La répartition des gradients est globalement très proche de ceux de la coupe 6.

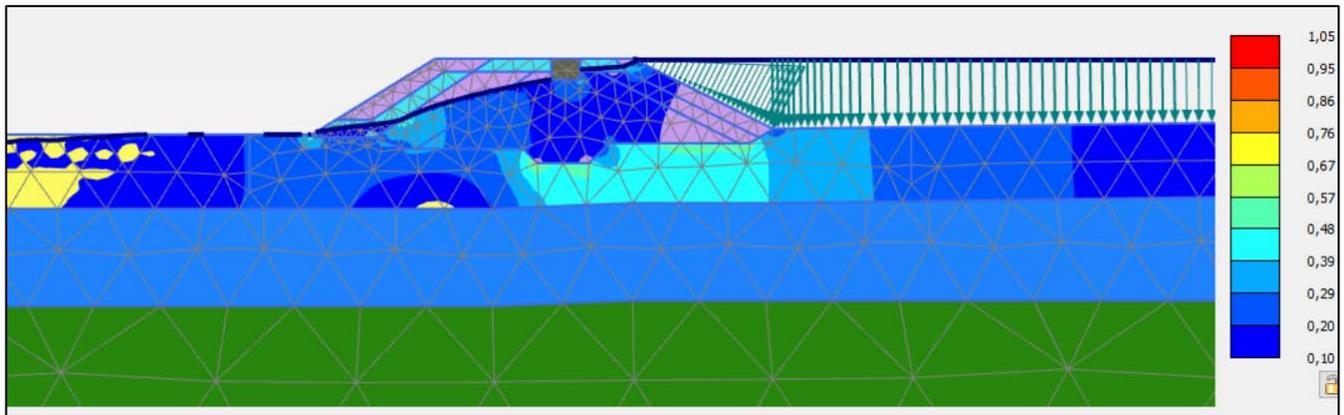
Compte tenu du volume de sol concerné par les gradients les plus forts ( $>0,3$ ) et de sa position ainsi que du caractère « stable » des couche [3], l'initiation de la suffusion peut être jugée peu probable et le risque de désordre très faible.

On note cependant de très forts gradients au niveau du talus amont, dans le masque argileux (2,5 à 4). Les valeurs exactes sont difficiles à estimer finement compte tenu de l'épaisseur limitée dans le modèle mais il paraît logique que les gradients soient élevés dans cet élément peu perméable faisant fonction de système d'étanchéité. Les gradients calculés sont très importants pourraient engendrer des phénomènes d'érosion. Comme indiqué au §3.1. , il est donc préconisé d'épaissir le masque argileux. Dans tous les cas, il conviendra de prévoir un géotextile filtrant en séparation du masque argileux pour en limiter l'érosion.



*Coupe 8 – Q100 - fin montée – Charge gradient hydraulique  $|i|$  dans le masque argileux*

- Coupe 9 – Fin de la montée Q100 :



*Coupe 9 - Q100 - fin montée - Charge gradient hydraulique  $|i|$*

Le gradient hydraulique est supérieur à 0,1 sur un volume de sol important comme sur la coupe 6 dans alluvions sablo-limoneuses [3] mais, pour la présente coupe, également dans le corps de la digue en tout venant alluvionnaire. Ils ne sont supérieurs à 0,3 que sur un volume de sol nettement plus limité entre le pied du talus amont et le milieu de la digue et très ponctuellement au niveau du débouché des écoulements dans la recharge drainante. On constate que les gradients sont moins concentrés que pour la coupe 6 du fait de la suppression du système d'étanchéité. Compte tenu du volume de sol concerné par les gradients les plus forts ( $>0,3$ ) et de sa position ainsi que du caractère « stable » des couche [3], l'initiation de la suffusion peut être jugée peu probable et le risque de désordre très faible.

On peut enfin rappeler que le processus de suffusion est relativement lent et qu'il présente donc un risque limité pour des digues fluviales comme celles de la Leyse aval dont les épisodes de crue sont d'une durée inférieure à 48h. Le retour d'expérience (cf. recommandations du CFBR) montre en effet qu'il s'agit d'un mode de rupture très rarement identifié pour les digues fluviales.

#### 5.4. Erosion de contact

L'érosion de contact est la forme d'érosion qui se développe à l'interface entre deux couches de sols de granulométrie et de perméabilité différents. Dans cette forme d'érosion, les particules fines de la couche la moins perméable, sont détachées et emportées à travers les pores de la couche la plus perméable.

Dans le cas du système d'endiguement de la Leyse aval, ce mécanisme ne semble possible qu'au contact entre les matériaux grossiers des alluvions graveleuses (2) et les formations relativement plus fines des alluvions limono-sableuses (3), des matériaux de digue sablo-limoneux (1a) et des alluvions argileuses (4).

Pour que l'érosion de contact apparaisse, il faut que deux conditions soient respectées :

- Non filtration : les pores du sol grossier doivent permettre le passage des particules de sol fin au niveau de leurs constrictions. C'est une condition géométrique de filtre
- Initiation : la contrainte hydraulique induite par l'écoulement doit être suffisante pour arracher les particules fines en contact avec la couche de sol grossier. C'est un critère hydraulique.

La condition géométrique se base sur le ratio  $D_{15}/d_{85}$  avec  $D_{15}$  relatif au matériau grossier  $d_{85}$  au matériau fin érodable.

Dans le cas des digues de la Leysse, les essais granulométriques fournissent les résultats suivants :

N° horizon	Lithologie	D <sub>15</sub>	d <sub>85</sub>	D <sub>15</sub> /d <sub>85</sub>
2	Grave avec quelques galets	0,3 à 0,4 mm Retenu : 0,4 mm	-	
1a	Remblai de corps de digue Sable limoneux	-	15 à 48 mm Retenu : 15 mm	0,026
3	Limon sableux ou sable limoneux	-	0,095 à 0,35 mm Retenu : 0,095 mm	4,2
4	Argile plus ou moins sableuse ou limoneuse	-	<0,08 à 0,12 mm Hyp : 0,05 mm	8

La valeur de seuil du ratio D<sub>15</sub>/d<sub>85</sub> varie selon les auteurs entre 4 et 9 avec plusieurs références proches de 8. Sur cette base et compte tenu des hypothèses granulométriques défavorables retenues, on peut écarter le risque d'érosion de contact pour les couches 1a et 3. La couche 4 apparait elle en limite entre un critère purement géométrique et un critère mixte géométrique et hydraulique.

La condition hydraulique la plus utilisée est issue de la condition d'érosion externe : la vitesse dans les pores doit être supérieure à la vitesse qui correspond au début d'entraînement des particules.

Plusieurs approches études ont été réalisées pour déterminer la vitesse de Darcy critique, généralement en fonction du paramètre granulométrique d<sub>50</sub>.

Pour la couche 4, on a d<sub>50</sub> généralement inférieur 0,080 mm (absence de sédimentométrie) et un essai fournissant d<sub>50</sub> = 0,025 mm. Pour l'analyse du risque d'érosion de contact, on fait l'hypothèse prudente d'un d<sub>50</sub> égal à 0,005 mm. Sur la base de cette hypothèse, la plupart des études indiquent une vitesse de Darcy critique supérieure à 1\*10<sup>-3</sup> m/s.

On analyse ci-dessous les vitesses de Darcy maximale dans la couche 2 sur les différentes coupes de calcul :

#### Coupe 5b – Fin de la montée Q100 :

Sans objet en l'absence des alluvions graveleuses 2.

#### Coupe 6 – Fin de la montée Q100 :

V<sub>D,max</sub> = 0,19 m/h = 5,3\*10<sup>-5</sup> m/s << V<sub>D,crit</sub> = 1\*10<sup>-3</sup> m/s.

#### Coupe 8 – Fin de la montée Q100 :

V<sub>D,max</sub> = 0,13 m/h = 3,6\*10<sup>-5</sup> m/s << V<sub>D,crit</sub> = 1\*10<sup>-3</sup> m/s.

#### Coupe 9 – Fin de la montée Q100 :

V<sub>D,max</sub> = 0,14 m/h = 3,9\*10<sup>-5</sup> m/s << V<sub>D,crit</sub> = 1\*10<sup>-3</sup> m/s.

Le risque d'érosion de contact de la couche 4 par les écoulements dans la couche 2 apparait donc très faible pour les différentes coupes de calcul.

### 5.5. Erosion régressive

L'érosion régressive est caractérisée par son processus : l'érosion débute au débouché aval de l'écoulement. Les particules sont transportées vers l'aval par l'écoulement tandis que la surface d'érosion remonte vers l'amont.

Dans le cas des digues de la Leysse en rive gauche, on note que les coupes présentent bien des écoulements résurgents pouvant être associés à une érosion régressive. L'érosion régressive peut être initiée par des gradients élevés au niveau de l'exutoire aval notamment ceux engendrant des problèmes de boulanges. De ce point de vue, aucune des coupes étudiées ne présente de risque de boulanges significatif.

## SYNTHESE ET ALEAS RESIDUELS

L'étude de la stabilité des digues de la Leysse aval en rive gauche a montré que le projet d'aménagement permet de garantir un niveau de fiabilité satisfaisant du système d'endiguement vis-à-vis des risques de glissements et d'érosion interne.

Le seul point de vigilance relevé concerne la mise en place d'un parement aval en matériaux peu perméables qui a un impact défavorable sur la stabilité et qui a donc été modifié dans la solution retenue (cf. §3.2.1. ).

Il convient de rappeler que des aléas résiduels subsistent inévitablement à l'issue de la présente étude. Les principaux aléas sont :

- Hétérogénéité de la nature et de l'épaisseur des matériaux constitutifs des terrains d'assise de la nouvelle digue en rive gauche du fait de reconnaissances nécessairement ponctuelles. Cette hétérogénéité se traduit notamment par l'identification de 2 contextes géotechniques pris en compte dans la présente étude.
- Estimation de la perméabilité des différentes couches : le paramètre de perméabilité peut varier rapidement en fonction de la nature et de la compacité des matériaux. Les essais de perméabilité réalisés in situ ont permis d'identifier des perméabilités contrastées entre les différents horizons mais il reste difficile de définir une valeur précise et de distinguer chacun des horizons rencontrés. Les valeurs retenues pour l'étude se veulent toutefois prudentes et cohérentes relativement à chaque couche afin de tenir compte de cette incertitude et de fournir une évaluation enveloppe du niveau de sécurité des digues.
- La présence de défauts ponctuels et d'ouvrage traversant qui peuvent générer des écoulements préférentiels lors des phases de crue et constituer ainsi des points faibles pour le système d'endiguement. Dans le cas de la rive gauche, cet aléa peut être jugé faible dans la mesure où il s'agit d'un ouvrage neuf à créer. Il conviendra néanmoins de s'assurer que les éventuels ouvrages traversants soient conçus pour ne pas constituer des points faibles dans le système d'endiguement.

Extrait norme sur les missions d'ingénierie géotechniques

Documents graphiques et résultats d'investigations

Coupes de calcul

## ANNEXE EXTRAIT DE LA NORME FRANCAISE SUR LES MISSIONS D'INGENIERIE GEOTECHNIQUE (NF P 94 500 de novembre 2013)

### CLASSIFICATION DES MISSIONS D'INGENIERIE GEOTECHNIQUE TYPES

L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étapes 1 à 3) doit suivre les étapes de conception et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géotechniques. Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit faire réaliser successivement chacune de ces missions par une ingénierie géotechnique. Chaque mission s'appuie sur des données géotechniques adaptées issues d'investigations géotechniques appropriées.

#### **ÉTAPE 1 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉALABLE (G1)**

*Cette mission exclut toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages géotechniques qui entre dans le cadre de la mission d'étude géotechnique de conception (étape 2). Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire. Elle comprend deux phases :*

##### **Phase Étude de Site (ES)**

Elle est réalisée en amont d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour une première identification des risques géotechniques d'un site.

- Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et l'existence d'avoisinants avec visite du site et des alentours.
- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport donnant pour le site étudié un modèle géologique préliminaire, les principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs.

##### **Phase Principes Généraux de Construction (PGC)**

Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport de synthèse des données géotechniques à ce stade d'étude (première approche de la ZIG, horizons porteurs potentiels, ainsi que certains principes généraux de construction envisageables (notamment fondations, terrassements, ouvrages enterrés, améliorations de sols).

#### **ÉTAPE 2 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE DE CONCEPTION (G2)**

*Cette mission permet l'élaboration du projet des ouvrages géotechniques et réduit les conséquences des risques géotechniques importants identifiés. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'oeuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend trois phases :*

##### **Phase Avant-projet (AVP)**

Elle est réalisée au stade de l'avant-projet de la maîtrise d'oeuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport donnant les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet, les principes de construction envisageables (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants), une ébauche dimensionnelle par type d'ouvrage géotechnique et la pertinence d'application de la méthode observationnelle pour une meilleure maîtrise des risques géotechniques.

##### **Phase Projet (PRO)**

Elle est réalisée au stade du projet de la maîtrise d'oeuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées suffisamment représentatives pour le site.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier), des notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions vis-à-vis des nappes et des avoisinants), des notes de calcul de dimensionnement, un avis sur les valeurs seuils et une approche des quantités.

##### **Phase DCE / ACT**

Elle est réalisée pour finaliser le Dossier de Consultation des Entreprises et assister le maître d'ouvrage pour l'établissement des Contrats de Travaux avec le ou les entrepreneurs retenus pour les ouvrages géotechniques.

- Établir ou participer à la rédaction des documents techniques nécessaires et suffisants à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (dossier de la phase Projet avec plans, notices techniques, cahier des charges particulières, cadre de bordereau des prix et d'estimatif, planning prévisionnel).
- Assister éventuellement le maître d'ouvrage pour la sélection des entreprises, analyser les offres techniques, participer à la finalisation des pièces techniques des contrats de travaux.

### ÉTAPE 3 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DE RÉALISATION (G3 et G 4, distinctes et simultanées)

#### ÉTUDE ET SUIVI GÉOTECHNIQUES D'EXECUTION (G3)

*Cette mission permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en oeuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation. Elle est confiée à l'entrepreneur sauf disposition contractuelle contraire, sur la base de la phase G2 DCE/ACT.*

Elle comprend deux phases interactives :

##### Phase Étude

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment établissement d'une note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par le contrat de travaux ainsi que des résultats des éventuelles investigations complémentaires, définition et dimensionnement (calculs justificatifs) des ouvrages géotechniques, méthodes et conditions d'exécution (phasages généraux, suivis, auscultations et contrôles à prévoir, valeurs seuils, dispositions constructives complémentaires éventuelles).
- Élaborer le dossier géotechnique d'exécution des ouvrages géotechniques provisoires et définitifs : plans d'exécution, de phasage et de suivi.

##### Phase Suivi

- Suivre en continu les auscultations et l'exécution des ouvrages géotechniques, appliquer si nécessaire des dispositions constructives prédéfinies en phase Étude.
- Vérifier les données géotechniques par relevés lors des travaux et par un programme d'investigations géotechniques complémentaire si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats).
- Établir la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et fournir les documents nécessaires à l'établissement du dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO)

#### SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXECUTION (G4)

*Cette mission permet de vérifier la conformité des hypothèses géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'oeuvre ou intégrée à cette dernière.*

Elle comprend deux phases interactives :

##### Phase Supervision de l'étude d'exécution

- Donner un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et méthodes d'exécution, des adaptations ou optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du plan de contrôle, du programme d'auscultation et des valeurs seuils.

##### Phase Supervision du suivi d'exécution

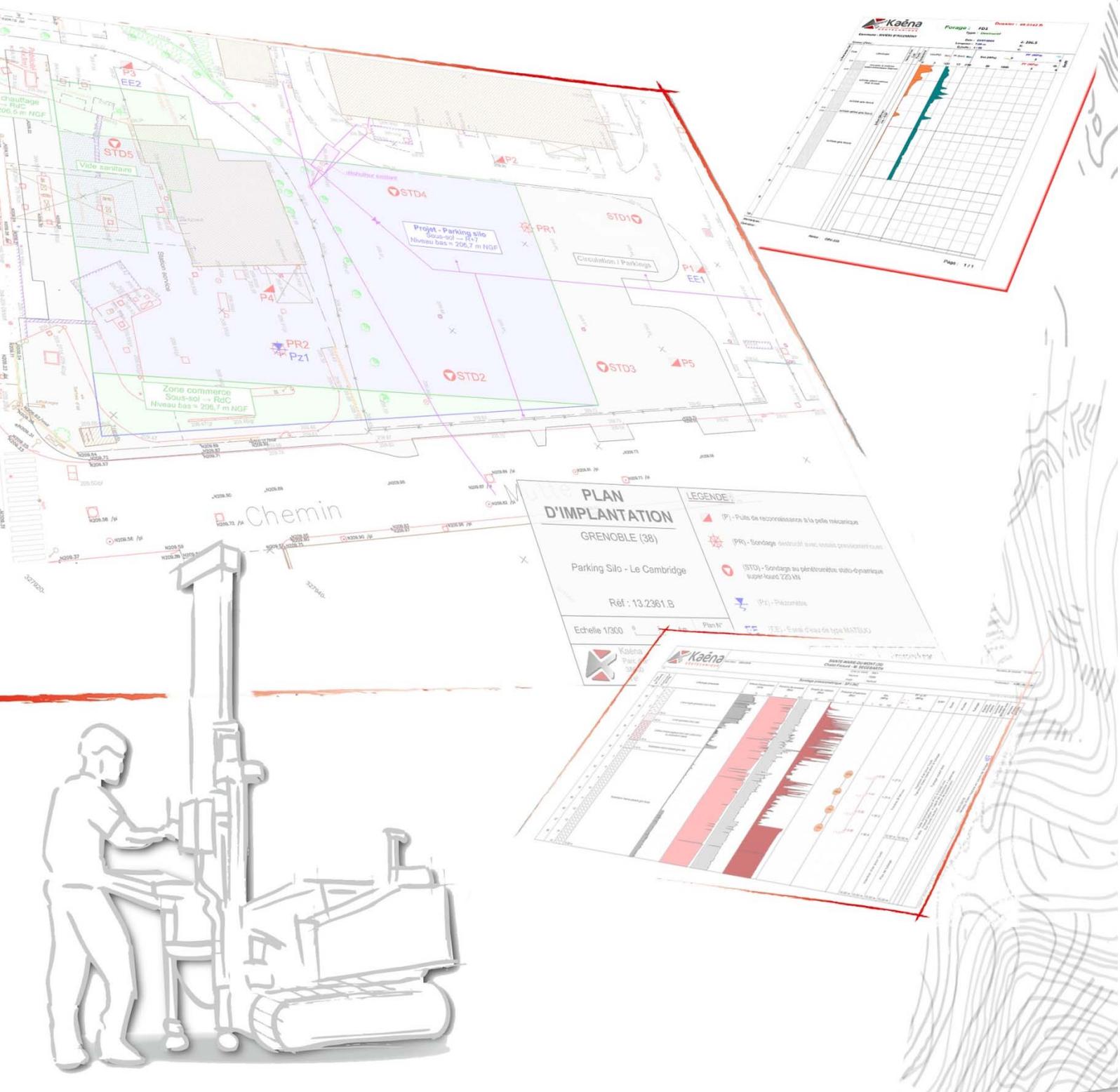
- Par interventions ponctuelles sur le chantier, donner un avis sur la pertinence du contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur (G3), du comportement tel qu'observé par l'entrepreneur de l'ouvrage et des avoisinants concernés (G3), de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur (G3).
- donner un avis sur la prestation géotechnique du DOE et sur les documents fournis pour le DIUO.

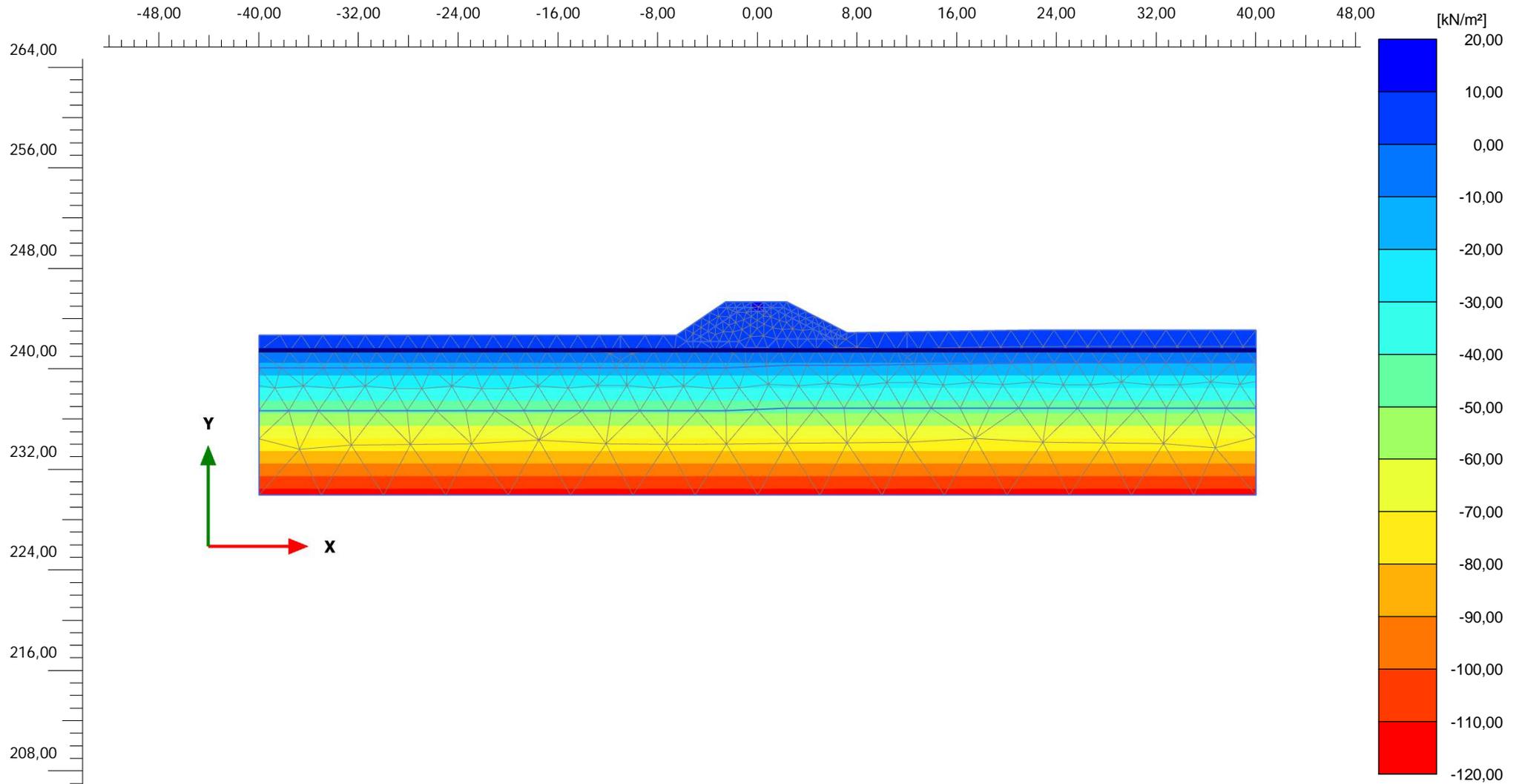
#### DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE (G5)

Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon strictement limitative, à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle. Ce diagnostic géotechnique précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.

- Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'étude de l'état général de l'ouvrage existant.
- Si ce diagnostic conduit à modifier une partie du projet ou à réaliser des travaux sur l'ouvrage existant, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechniques seront réalisés ultérieurement, conformément à l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étape 2 et/ou 3).

# DOCUMENTS GRAPHIQUES ET RESULTATS DES INVESTIGATIONS





**Active pore pressures  $p_{active}$  (scaled up 0,0200 times) (Pressure = negative) (Time 0,000 h)**

Maximum value = 13,85 kN/m<sup>2</sup> (Element 17 at Node 1453)

Minimum value = -115,0 kN/m<sup>2</sup> (Element 541 at Node 4779)



**PLAXIS® 2D**  
CONNECT Edition

*Project description*

**TEA220189 - Leysse aval - RG - Coupe 6**

*Date*

**20/12/2022**

*Project filename*

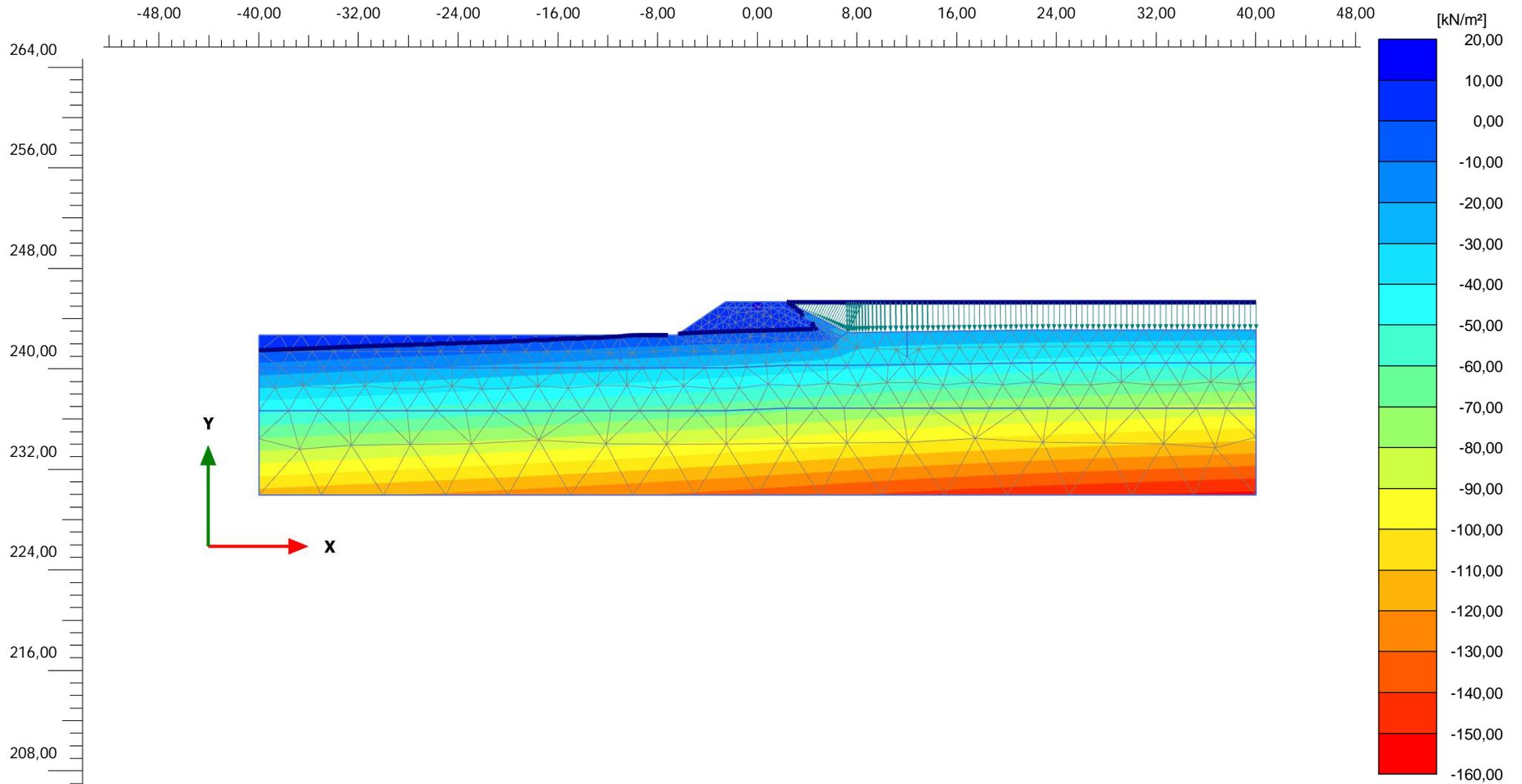
**Coupe 8**

*Step*

**0**

*Company*

**Technosol SA**



**Active pore pressures  $p_{active}$  (scaled up 0,0200 times) (Pressure = negative) (Time 31,58 h)**

Maximum value = 13,85 kN/m<sup>2</sup> (Element 17 at Node 1454)

Minimum value = -153,1 kN/m<sup>2</sup> (Element 541 at Node 4779)



**PLAXIS® 2D**  
CONNECT Edition

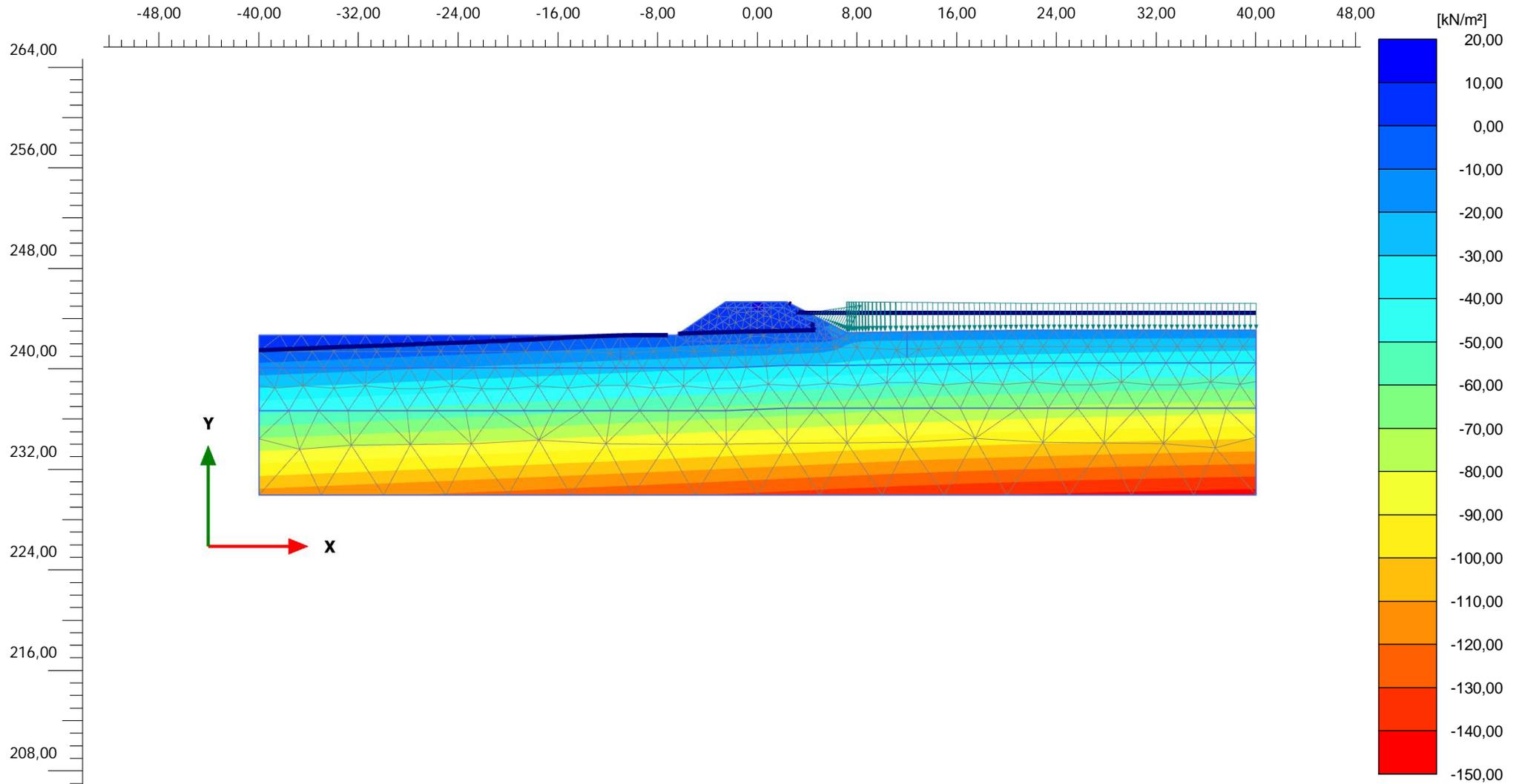
*Project description*  
**TEA220189 - Leysse aval - RG - Coupe 6**

*Date*  
**20/12/2022**

*Project filename*  
**Coupe 8**

*Step*  
**75**

*Company*  
**Technosol SA**



**Active pore pressures  $p_{active}$  (scaled up 0,0200 times) (Pressure = negative) (Time 42,33 h)**

Maximum value = 13,91 kN/m<sup>2</sup> (Element 17 at Node 1453)

Minimum value = -144,7 kN/m<sup>2</sup> (Element 541 at Node 4779)



**PLAXIS® 2D**  
CONNECT Edition

*Project description*  
**TEA220189 - Leysse aval - RG - Coupe 6**

*Date*  
**20/12/2022**

*Project filename*  
**Coupe 8**

*Step*  
**6**

*Company*  
**Technosol SA**

# Données du projet

Numéro d'affaire : TEA220189

Titre du calcul : Leysse aval - coupe 6

Lieu : Leysse aval - RG - solution GSB

Commentaires : N/A

Système d'unités : kN, kPa, kN/m3

γw : 10.0

## Couches de sol

	Nom	Couleur	γ	φ	c	Δc	qs clous	pl	KsB	Anisotropie	Favorable	Coefficients de sécurité spécifiques
1	Confinement GSB		20,0	32,00	0,1	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
2	Enrochements		20,0	45,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
3	2 - Grave sableuse		22,0	35,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
4	3 - Sablo-limoneux		20,0	33,00	2,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
5	4 - Argile sablo-limoneuses		20,0	26,00	5,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
6	Support GSB		20,0	30,00	2,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
7	Tout venant		20,0	30,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
8	1a - Remblai Sable limoneux		20,0	30,00	2,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
9	1b - Remblai Grave sableuse		20,0	35,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
10	GNT ciment		21,0	35,00	150,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
11	GNT 0/63		21,0	35,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non

## Couches de sol (cont.)

	Nom	Couleur	Γγ	Γc	Γtan(φ)	Type de cohésion	Courbe
1	Confinement GSB		-	-	-	Effective	Linéaire
2	Enrochements		-	-	-	Effective	Linéaire
3	2 - Grave sableuse		-	-	-	Effective	Linéaire
4	3 - Sablo-limoneux		-	-	-	Effective	Linéaire
5	4 - Argile sablo-limoneuses		-	-	-	Effective	Linéaire
6	Support GSB		-	-	-	Effective	Linéaire
7	Tout venant		-	-	-	Effective	Linéaire
8	1a - Remblai Sable limoneux		-	-	-	Effective	Linéaire
9	1b - Remblai Grave sableuse		-	-	-	Effective	Linéaire
10	GNT ciment		-	-	-	Effective	Linéaire
11	GNT 0/63		-	-	-	Effective	Linéaire

## Points

	X	Y		X	Y		X	Y		X	Y		X	Y		X	Y
1	-40,000	242,700	3	-6,500	242,700	5	-2,550	245,350	10	7,200	242,900	11	22,000	243,100	12	40,000	243,100
13	-40,000	240,100	15	40,000	240,500	28	2,330	245,350	45	7,200	240,300	46	22,000	240,500	47	-5,700	242,200
48	-5,200	242,200	49	-1,500	242,200	50	-1,000	241,700	51	0,800	241,700	52	1,500	242,400	53	6,000	242,400
54	6,400	242,400	55	-0,500	245,350	56	0,500	245,350	57	-0,500	244,600	58	0,500	244,600	62	-0,500	244,900
63	0,500	244,900	65	-1,100	244,900	66	1,091	244,900	67	2,100	244,900	68	6,716	242,597	69	1,700	245,350
70	6,716	242,100	71	2,330	240,300	72	3,224	244,900	73	-3,221	244,900	74	-40,000	236,700	75	-6,500	240,100
76	-6,500	236,700	77	-2,550	240,100	78	-2,550	236,700	79	2,330	236,900	80	7,200	236,900	81	22,000	236,900
82	40,000	236,900															

## Segments

	Point 1	Point 2																		
10	10	11	11	11	12	60	1	3	62	45	46	63	46	15	67	3	47	68	47	48
69	48	49	70	49	50	71	50	51	72	51	52	73	52	53	74	53	54	76	5	55
79	55	56	81	57	58	87	62	55	88	62	57	90	63	58	91	63	56	96	62	65
97	65	48	98	63	66	100	66	53	102	66	67	103	67	68	104	54	68	105	10	68
106	28	69	107	56	69	108	67	69	109	68	70	110	71	45	112	10	72	114	72	67
115	72	28	116	3	73	118	73	65	119	73	5	120	74	76	121	76	78	122	78	79
123	79	80	124	80	81	125	81	82	126	13	75	127	75	77	128	77	71			

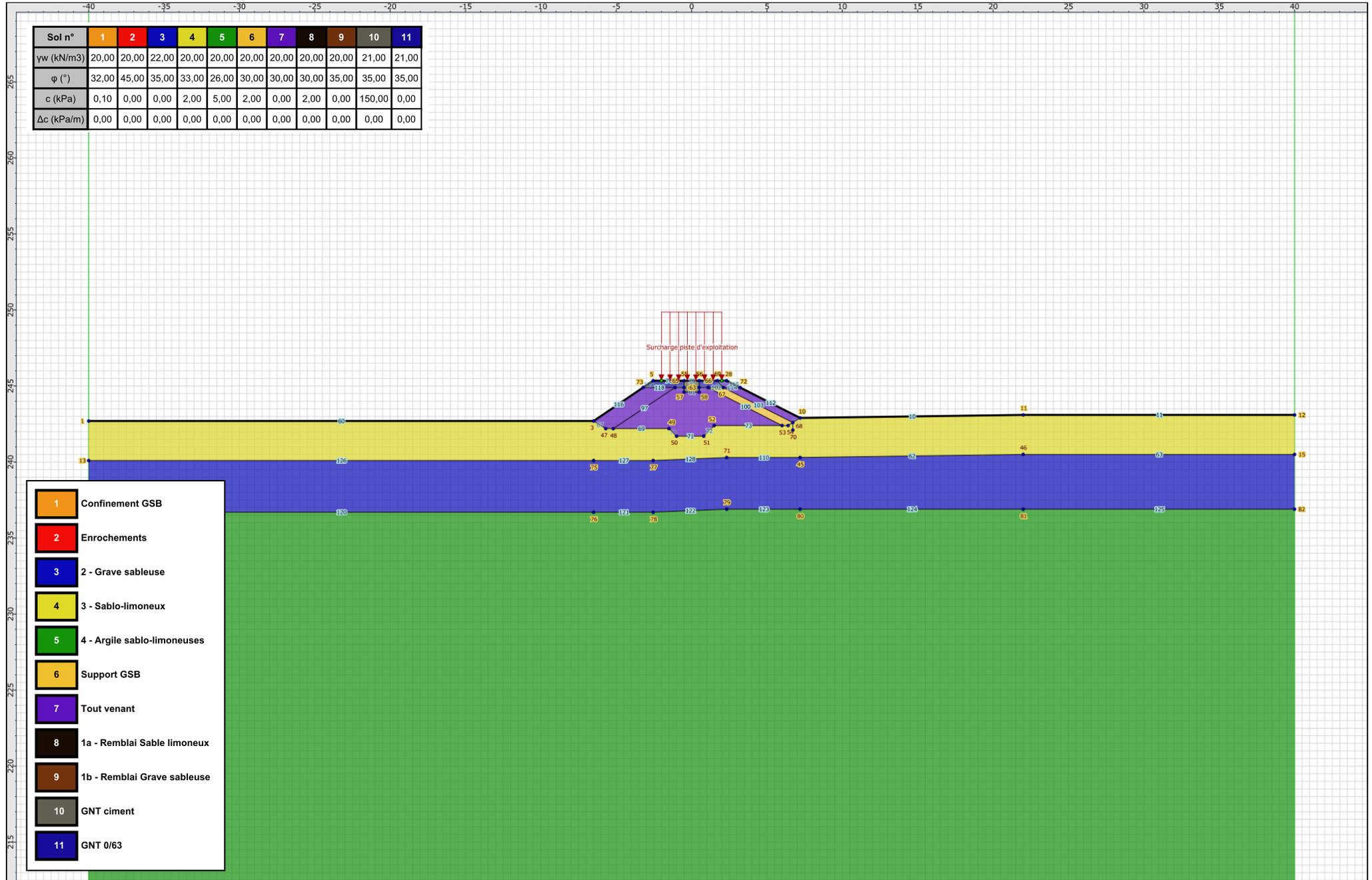
## Surcharges réparties

	Nom	X gauche	Y gauche	q gauche	X droite	Y droite	q droite	Ang/horizontale
1	Surcharge piste d'exploitation	-2,000	245,350	10,0	2,000	245,350	10,0	90,00



Talren v5  
v5.2.10

Imprimé le : 20 déc. 2022 09:02:07  
Calcul réalisé par : TECHNOSOL  
Projet : Leysse aval - coupe 6



- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 - Grave sableuse
- 3 - Sablo-limoneux
- 4 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63



**Talren v5**  
v5.2.10

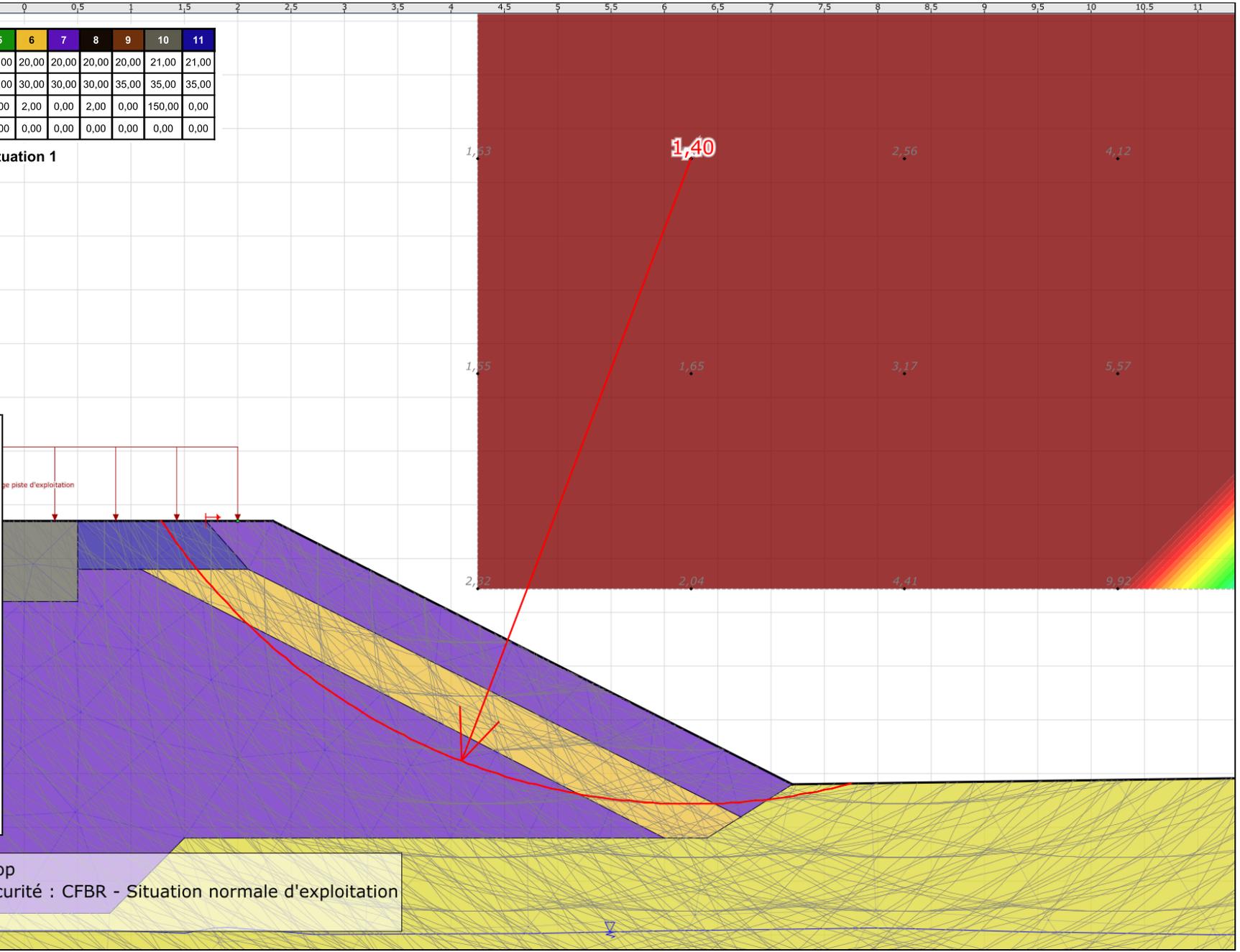
Imprimé le : 20 déc. 2022 09:02:07  
Calcul réalisé par : TECHNOSOL

Projet : Laysse aval - coupe 6

Sol n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γw (kN/m3)	20,00	20,00	22,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	21,00	21,00
φ (°)	32,00	45,00	35,00	33,00	26,00	30,00	30,00	30,00	35,00	35,00	35,00
c (kPa)	0,10	0,00	0,00	2,00	5,00	2,00	0,00	2,00	0,00	150,00	0,00
Δc (kPa/m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Phase : Etiage / Situation : Situation 1

- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 2 - Grave sableuse
- 4 3 - Sablo-limoneux
- 5 4 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63



Méthode de calcul : Bishop  
 Jeu de coefficients de sécurité : CFBR - Situation normale d'exploitation  
**Fmin = 1,4012**



**Talren v5**  
v5.2.10

Imprimé le : 20 déc. 2022 09:02:08  
 Calcul réalisé par : TECHNOSOL

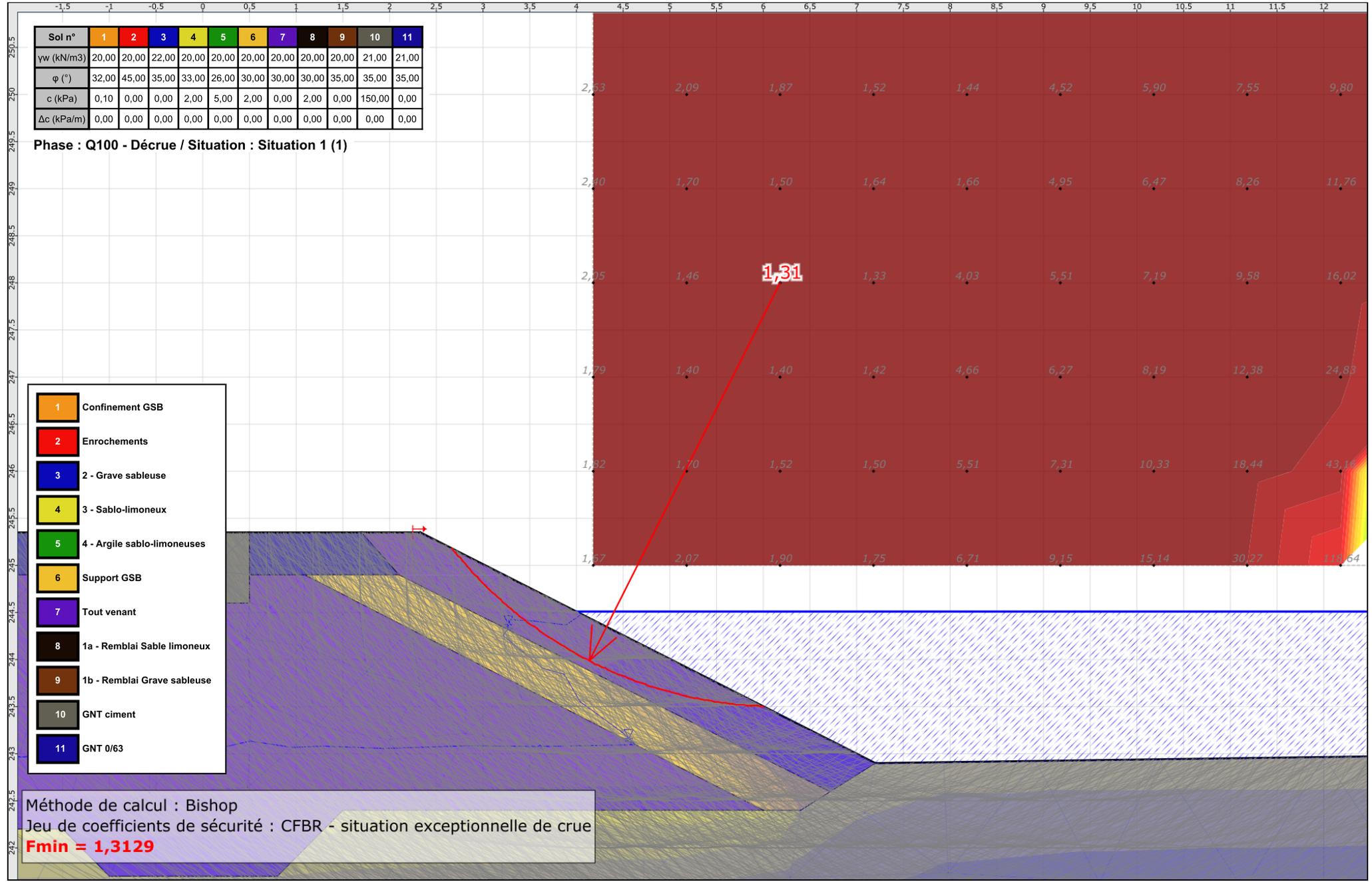
Projet : Laysse aval - coupe 6

Sol n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γw (kN/m3)	20,00	20,00	22,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	21,00	21,00
φ (°)	32,00	45,00	35,00	33,00	26,00	30,00	30,00	30,00	35,00	35,00	35,00
c (kPa)	0,10	0,00	0,00	2,00	5,00	2,00	0,00	2,00	0,00	150,00	0,00
Δc (kPa/m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Phase : Q100 - Décrue / Situation : Situation 1 (1)

- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 2 - Grave sableuse
- 4 3 - Sablo-limoneux
- 5 4 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63

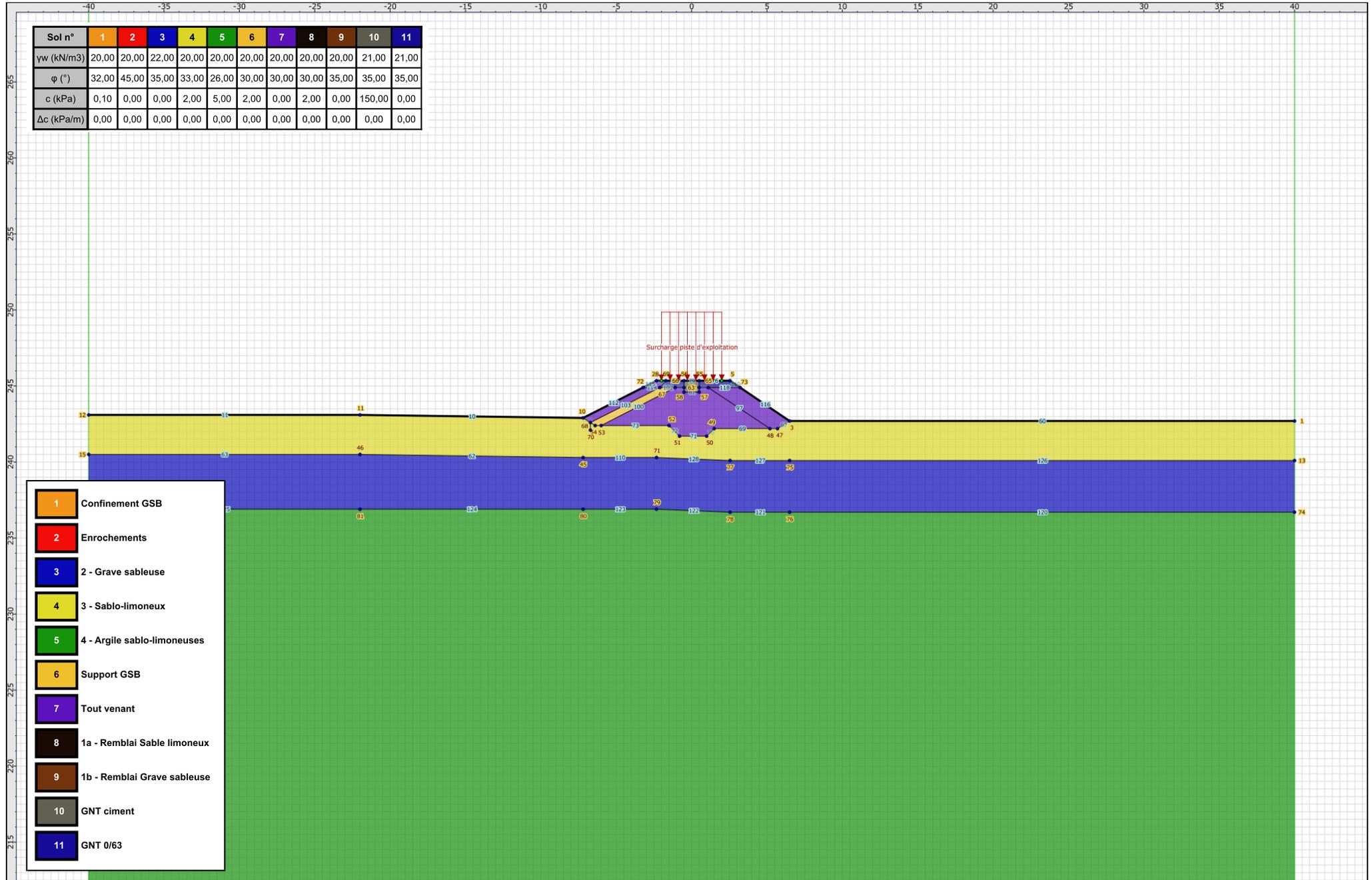
Méthode de calcul : Bishop  
 Jeu de coefficients de sécurité : CFBR - situation exceptionnelle de crue  
**Fmin = 1,3129**



Talren v5  
v5.2.10

Imprimé le : 20 déc. 2022 09:02:08  
 Calcul réalisé par : TECHNOSOL

Projet : Laysse aval - coupe 6

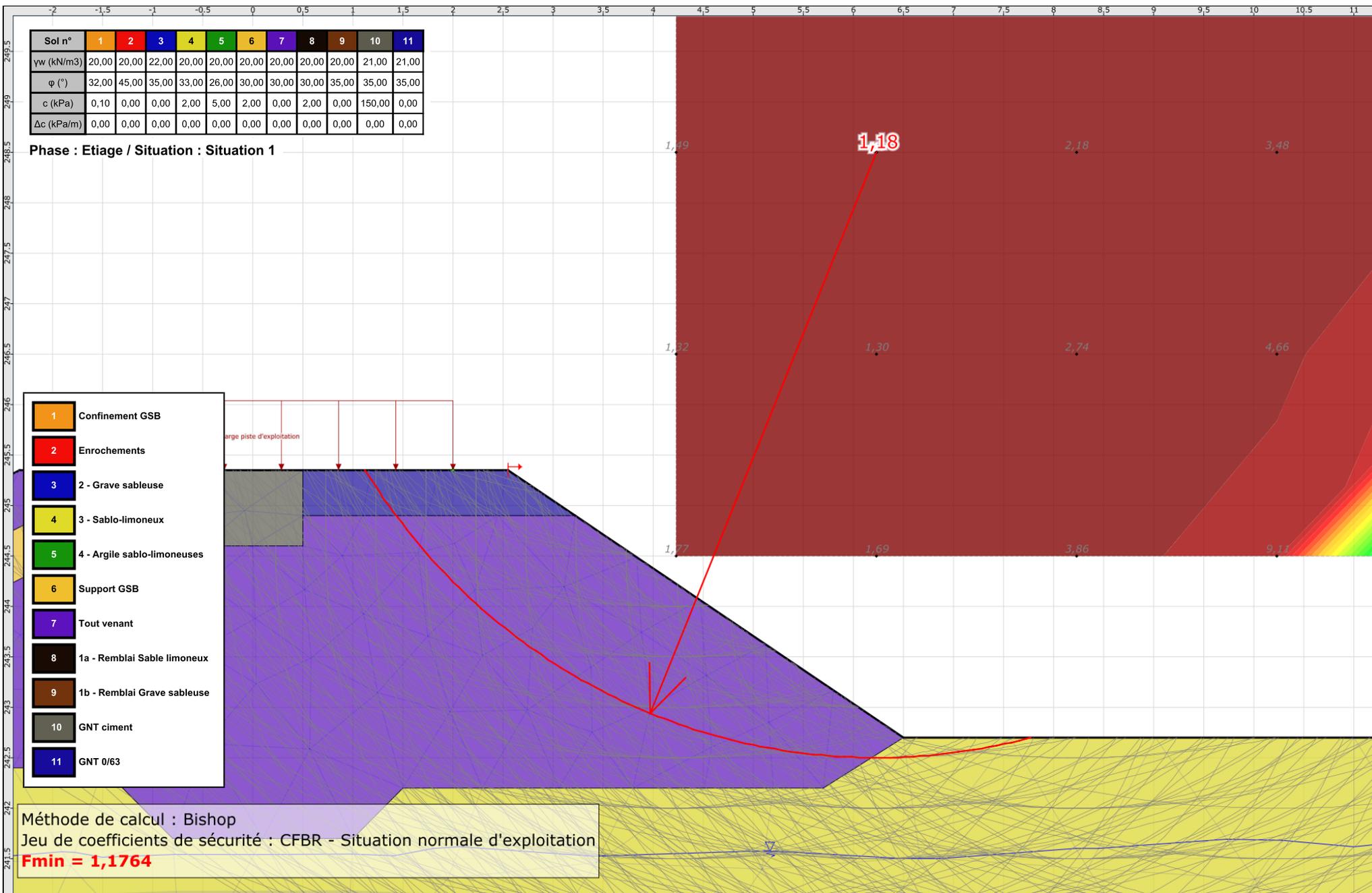


Sol n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γw (kN/m3)	20,00	20,00	22,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	21,00	21,00
φ (°)	32,00	45,00	35,00	33,00	26,00	30,00	30,00	30,00	35,00	35,00	35,00
c (kPa)	0,10	0,00	0,00	2,00	5,00	2,00	0,00	2,00	0,00	150,00	0,00
Δc (kPa/m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Phase : Etage / Situation : Situation 1

- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 2 - Grave sableuse
- 4 3 - Sablo-limoneux
- 5 4 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63

Méthode de calcul : Bishop  
 Jeu de coefficients de sécurité : CFBR - Situation normale d'exploitation  
**Fmin = 1,1764**

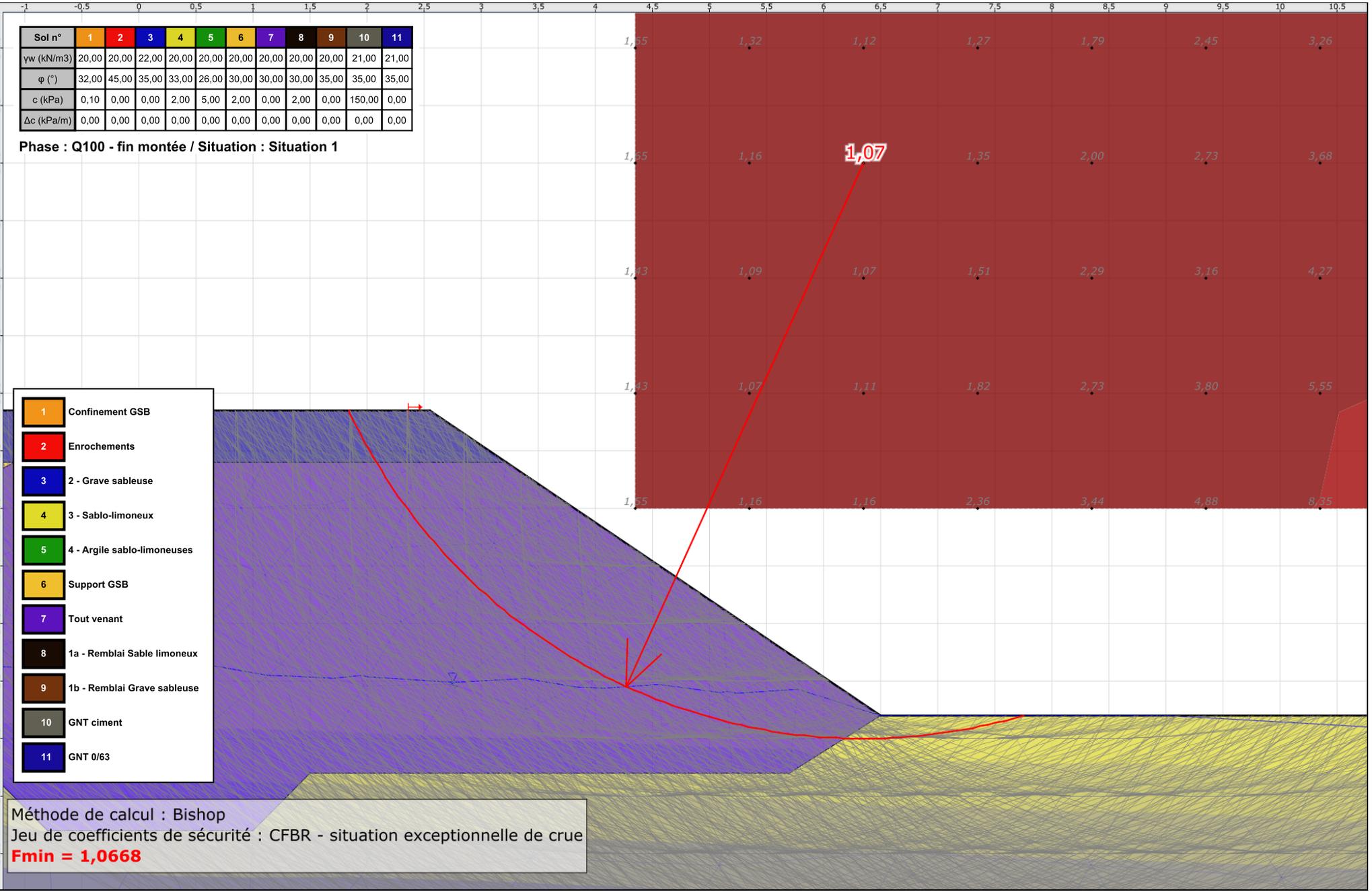


Sol n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γw (kN/m3)	20,00	20,00	22,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	21,00	21,00
φ (°)	32,00	45,00	35,00	33,00	26,00	30,00	30,00	30,00	35,00	35,00	35,00
c (kPa)	0,10	0,00	0,00	2,00	5,00	2,00	0,00	2,00	0,00	150,00	0,00
Δc (kPa/m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Phase : Q100 - fin montée / Situation : Situation 1

- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 2 - Grave sableuse
- 4 3 - Sablo-limoneux
- 5 4 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63

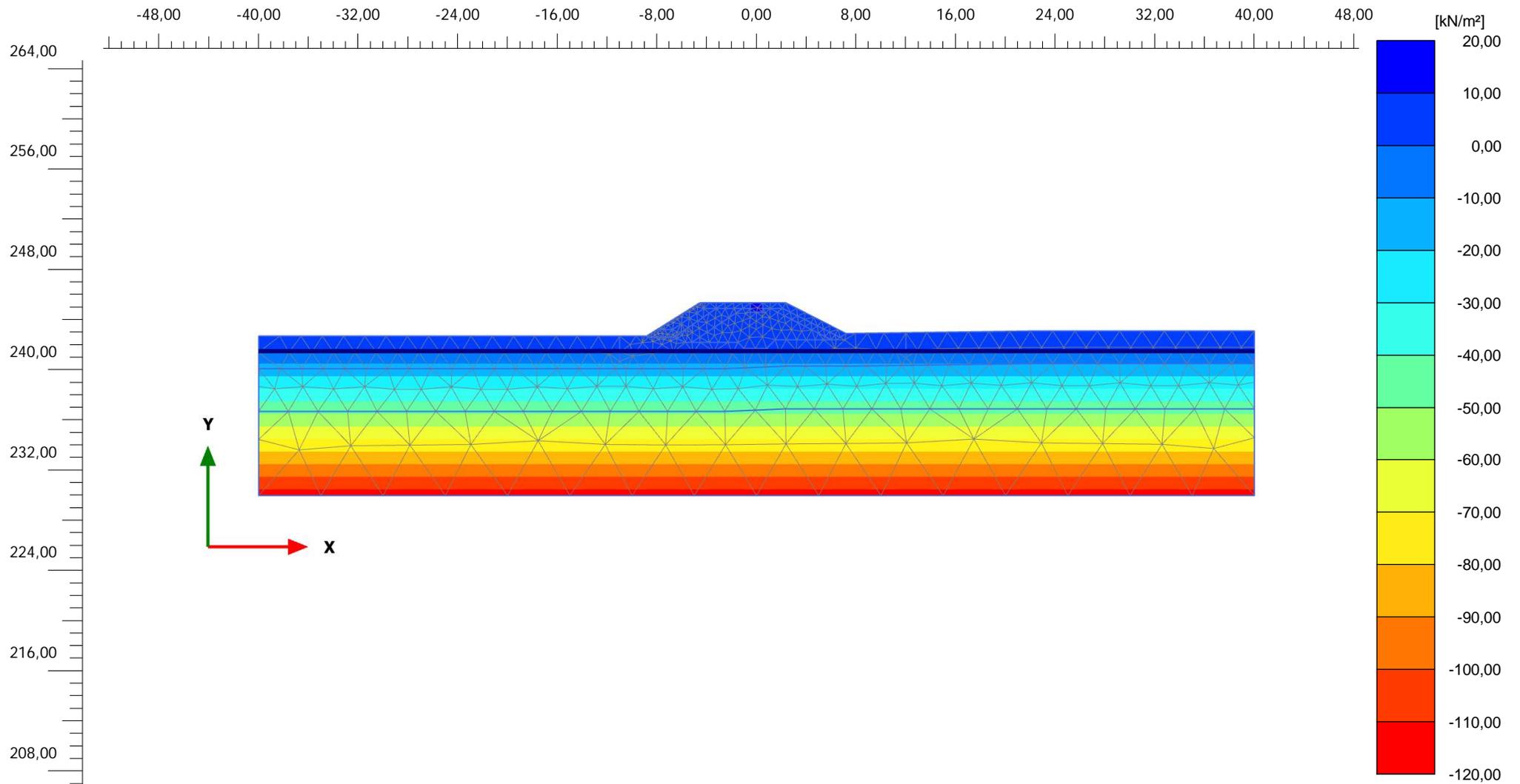
Méthode de calcul : Bishop  
 Jeu de coefficients de sécurité : CFBR - situation exceptionnelle de crue  
**Fmin = 1,0668**



Talren v5  
v5.2.10

Imprimé le : 20 déc. 2022 09:03:48  
 Calcul réalisé par : TECHNOSOL

Projet : Laysse aval - coupe 6



**Active pore pressures  $p_{active}$  (scaled up 0,0200 times) (Pressure = negative) (Time 0,000 h)**

Maximum value = 13,85 kN/m<sup>2</sup> (Element 17 at Node 1167)

Minimum value = -115,0 kN/m<sup>2</sup> (Element 723 at Node 6283)



**PLAXIS® 2D**  
CONNECT Edition

*Project description*

TEA220189 - Leysse aval - RG - Coupe 6

*Date*

20/12/2022

*Project filename*

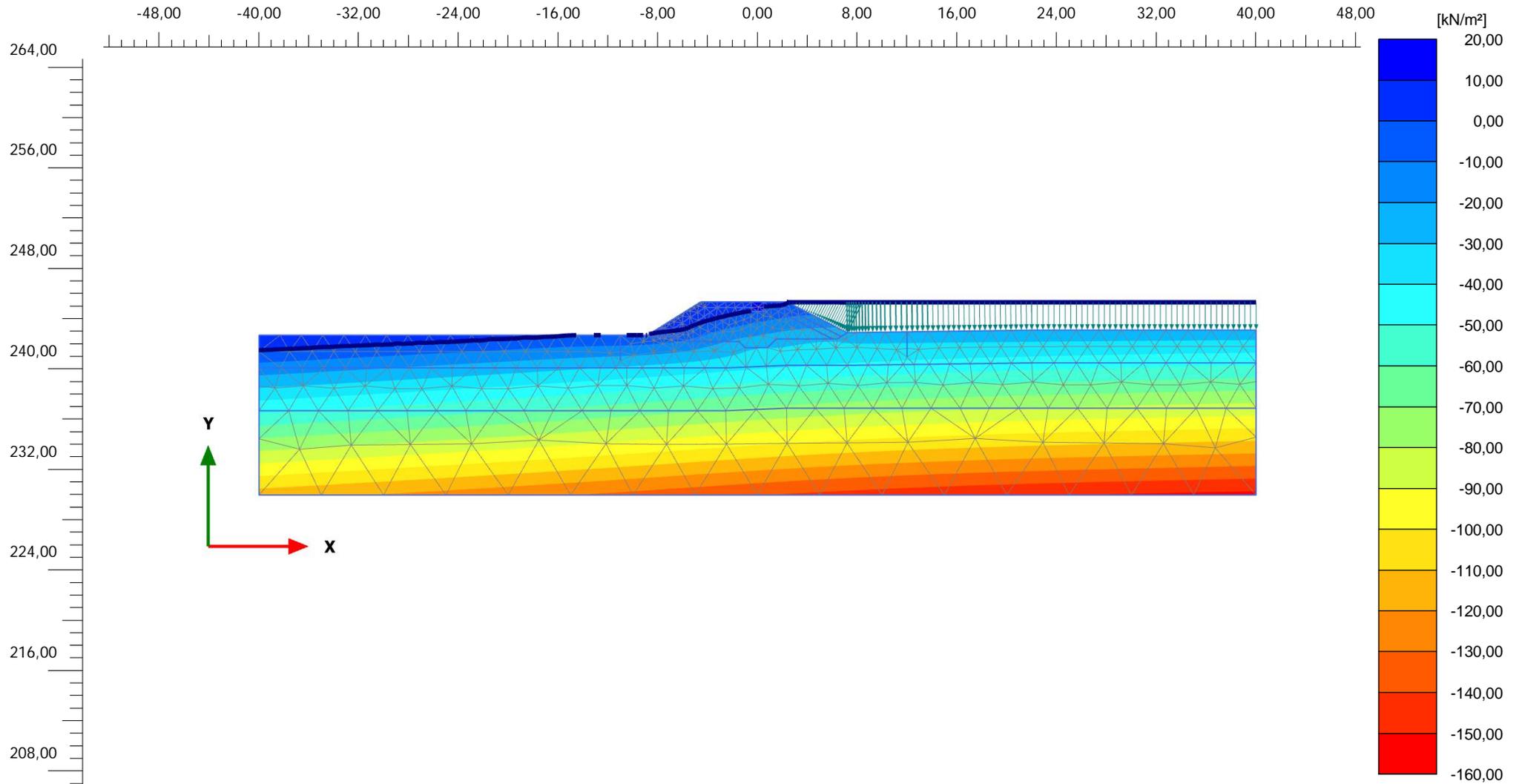
Coupe 9

*Step*

0

*Company*

Technosol SA



Active pore pressures  $p_{active}$  (scaled up 0,0200 times) (Pressure = negative) (Time 31,58 h)

Maximum value = 14,65 kN/m<sup>2</sup> (Element 18 at Node 865)

Minimum value = -153,1 kN/m<sup>2</sup> (Element 723 at Node 6283)



**PLAXIS® 2D**  
CONNECT Edition

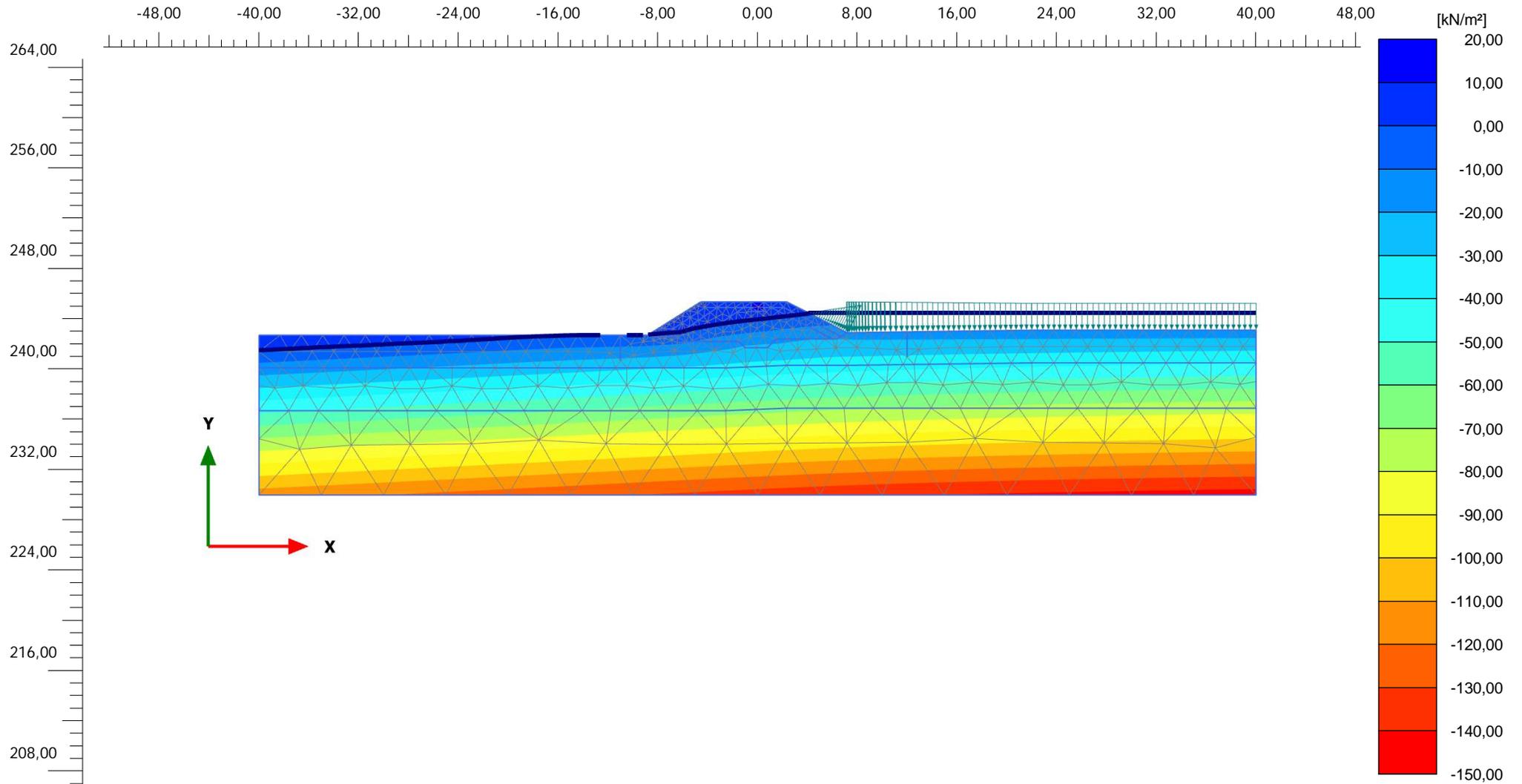
*Project description*  
**TEA220189 - Leysse aval - RG - Coupe 6**

*Date*  
**20/12/2022**

*Project filename*  
**Coupe 9**

*Step*  
**71**

*Company*  
**Technosol SA**



**Active pore pressures  $p_{active}$  (scaled up 0,0200 times) (Pressure = negative) (Time 42,33 h)**

Maximum value = 14,33 kN/m<sup>2</sup> (Element 17 at Node 1167)

Minimum value = -144,7 kN/m<sup>2</sup> (Element 723 at Node 6283)



**PLAXIS® 2D**  
CONNECT Edition

*Project description*  
**TEA220189 - Leysse aval - RG - Coupe 6**

*Date*  
**20/12/2022**

*Project filename*  
**Coupe 9**

*Step*  
**79**

*Company*  
**Technosol SA**

# Données du projet

Numéro d'affaire : TEA220189

Titre du calcul : Leysse aval - coupe 6

Lieu : Leysse aval - RG - solution GSB

Commentaires : N/A

Système d'unités : kN, kPa, kN/m3

γw : 10.0

## Couches de sol

	Nom	Couleur	γ	φ	c	Δc	qs clous	pl	KsB	Anisotropie	Favorable	Coefficients de sécurité spécifiques
1	Confinement GSB		20,0	32,00	0,1	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
2	Enrochements		20,0	45,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
3	2 - Grave sableuse		22,0	35,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
4	3 - Sablo-limoneux		20,0	33,00	2,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
5	4 - Argile sablo-limoneuses		20,0	26,00	5,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
6	Support GSB		20,0	30,00	2,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
7	Tout venant		20,0	30,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
8	1a - Remblai Sable limoneux		20,0	30,00	2,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
9	1b - Remblai Grave sableuse		20,0	35,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
10	GNT ciment		21,0	35,00	150,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non
11	GNT 0/63		21,0	35,00	0,0	0,0	-	-	-	Non	Non	Non

## Couches de sol (cont.)

	Nom	Couleur	Γγ	Γc	Γtan(φ)	Type de cohésion	Courbe
1	Confinement GSB		-	-	-	Effective	Linéaire
2	Enrochements		-	-	-	Effective	Linéaire
3	2 - Grave sableuse		-	-	-	Effective	Linéaire
4	3 - Sablo-limoneux		-	-	-	Effective	Linéaire
5	4 - Argile sablo-limoneuses		-	-	-	Effective	Linéaire
6	Support GSB		-	-	-	Effective	Linéaire
7	Tout venant		-	-	-	Effective	Linéaire
8	1a - Remblai Sable limoneux		-	-	-	Effective	Linéaire
9	1b - Remblai Grave sableuse		-	-	-	Effective	Linéaire
10	GNT ciment		-	-	-	Effective	Linéaire
11	GNT 0/63		-	-	-	Effective	Linéaire

## Points

	X	Y		X	Y		X	Y		X	Y		X	Y		X	Y
1	-40,000	242,700	3	-6,500	242,700	5	-2,550	245,350	10	7,200	242,900	11	22,000	243,100	12	40,000	243,100
13	-40,000	240,100	15	40,000	240,500	28	2,330	245,350	45	7,200	240,300	46	22,000	240,500	47	-5,700	242,200
48	-5,200	242,200	49	-1,500	242,200	50	-1,000	241,700	51	0,800	241,700	52	1,500	242,400	53	6,000	242,400
54	6,400	242,400	55	-0,500	245,350	56	0,500	245,350	57	-0,500	244,600	58	0,500	244,600	62	-0,500	244,900
63	0,500	244,900	65	-1,096	244,900	66	1,091	244,900	67	2,100	244,900	68	6,716	242,597	69	1,700	245,350
70	6,716	242,100	71	2,330	240,300	72	3,224	244,900	73	-3,222	244,900	74	-40,000	236,700	75	-6,500	240,100
76	-6,500	236,700	77	-2,550	240,100	78	-2,550	236,700	79	2,330	236,900	80	7,200	236,900	81	22,000	236,900
82	40,000	236,900	83	-6,645	242,600	84	-8,696	242,600	85	-9,000	242,700	86	-8,828	242,700	87	-8,008	243,210
88	-4,550	245,350	89	-4,222	244,900	90	-6,743	243,200									

## Segments

	Point 1	Point 2																		
10	10	11	11	11	12	62	45	46	63	46	15	67	3	47	68	47	48	69	48	49
70	49	50	71	50	51	72	51	52	73	52	53	74	53	54	76	5	55	79	55	56
81	57	58	87	62	55	88	62	57	90	63	58	91	63	56	96	62	65	97	65	48
98	63	66	100	66	53	102	66	67	103	67	68	104	54	68	105	10	68	106	28	69
107	56	69	108	67	69	109	68	70	110	71	45	112	10	72	114	72	67	115	72	28
116	3	73	118	73	65	119	73	5	120	74	76	121	76	78	122	78	79	123	79	80
124	80	81	125	81	82	126	13	75	127	75	77	128	77	71	129	1	85	131	3	86
132	85	86	133	5	88	134	88	87	135	87	86	136	85	84	137	84	83	138	83	47
139	87	90	140	90	89	141	89	73	142	3	83									



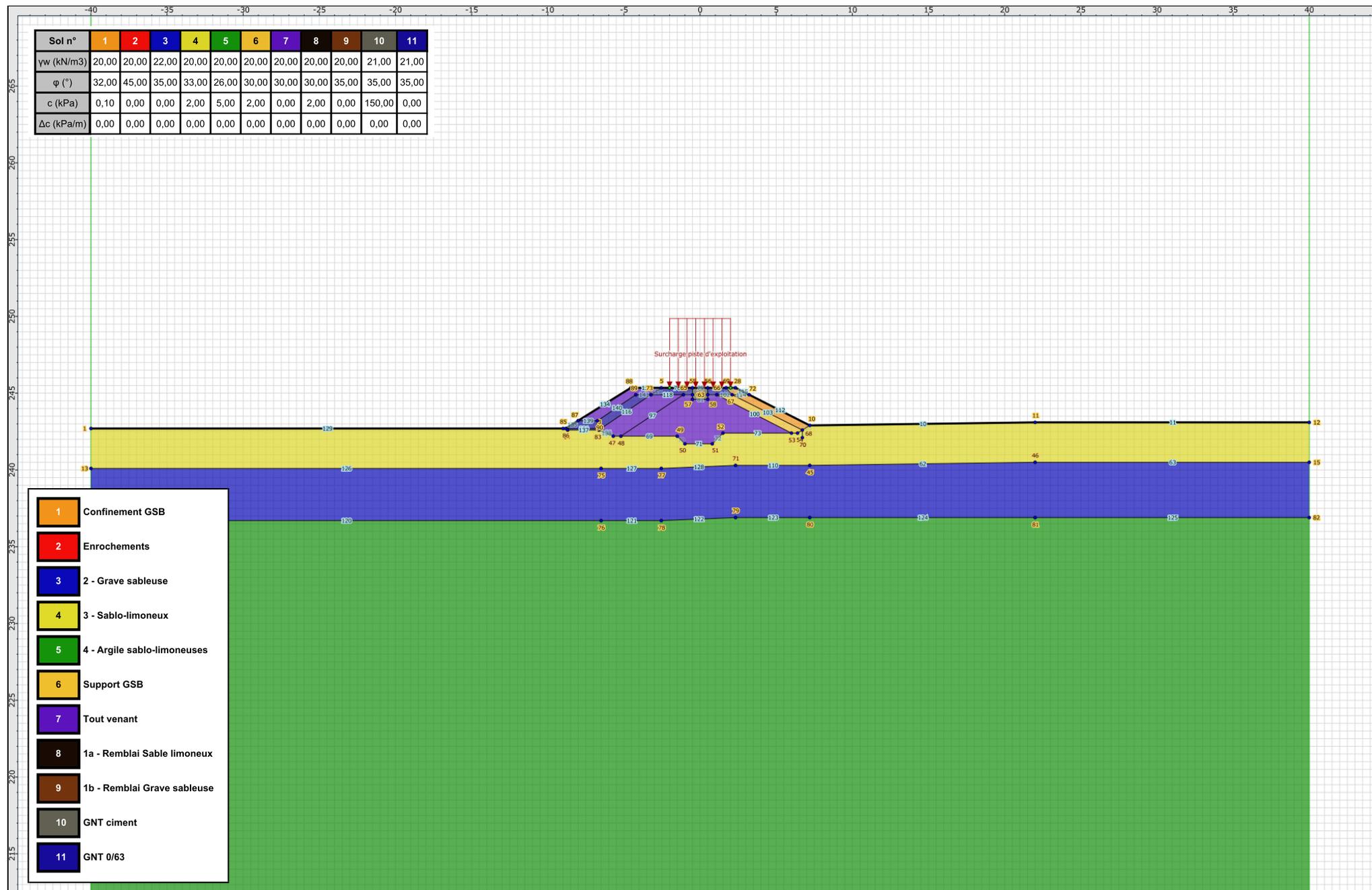
Talren v5  
v5.2.10

Imprimé le : 20 déc. 2022 09:13:10  
Calcul réalisé par : TECHNOSOL  
Projet : Leysse aval - coupe 6

# Données du projet

## Surcharges réparties

	Nom	X gauche	Y gauche	q gauche	X droite	Y droite	q droite	Ang/horizontale
1	Surcharge piste d'exploitation	-2,000	245,350	10,0	2,000	245,350	10,0	90,00



- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 - Grave sableuse
- 4 - Sablo-limoneux
- 5 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63



Talren v5  
v5.2.10

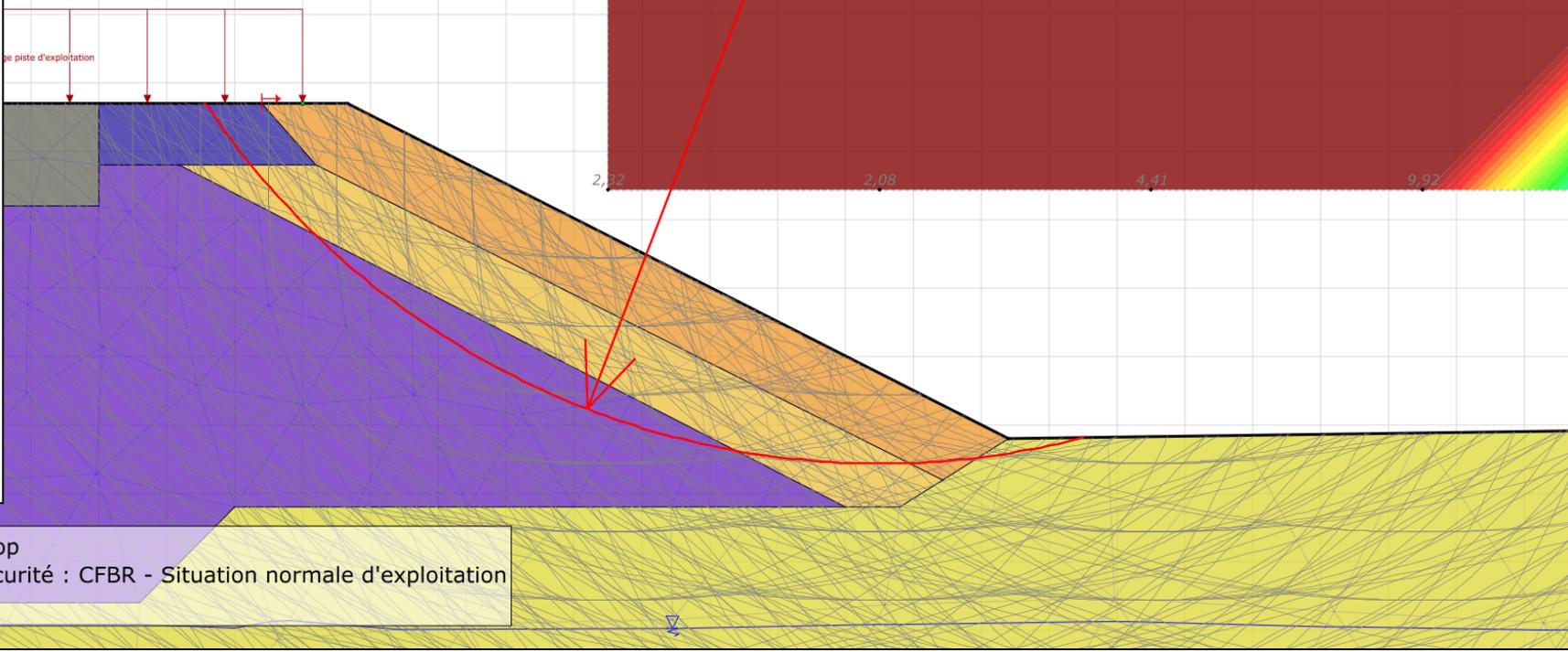
Imprimé le : 20 déc. 2022 09:13:11  
Calcul réalisé par : TECHNOSOL

Projet : Laysse aval - coupe 6

Sol n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γw (kN/m3)	20,00	20,00	22,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	21,00	21,00
φ (°)	32,00	45,00	35,00	33,00	26,00	30,00	30,00	30,00	35,00	35,00	35,00
c (kPa)	0,10	0,00	0,00	2,00	5,00	2,00	0,00	2,00	0,00	150,00	0,00
Δc (kPa/m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Phase : Etiage / Situation : Situation 1

- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 2 - Grave sableuse
- 4 3 - Sablo-limoneux
- 5 4 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63



Méthode de calcul : Bishop  
 Jeu de coefficients de sécurité : CFBR - Situation normale d'exploitation  
**Fmin = 1,4072**



Talren v5  
v5.2.10

Imprimé le : 20 déc. 2022 09:13:11  
 Calcul réalisé par : TECHNOSOL

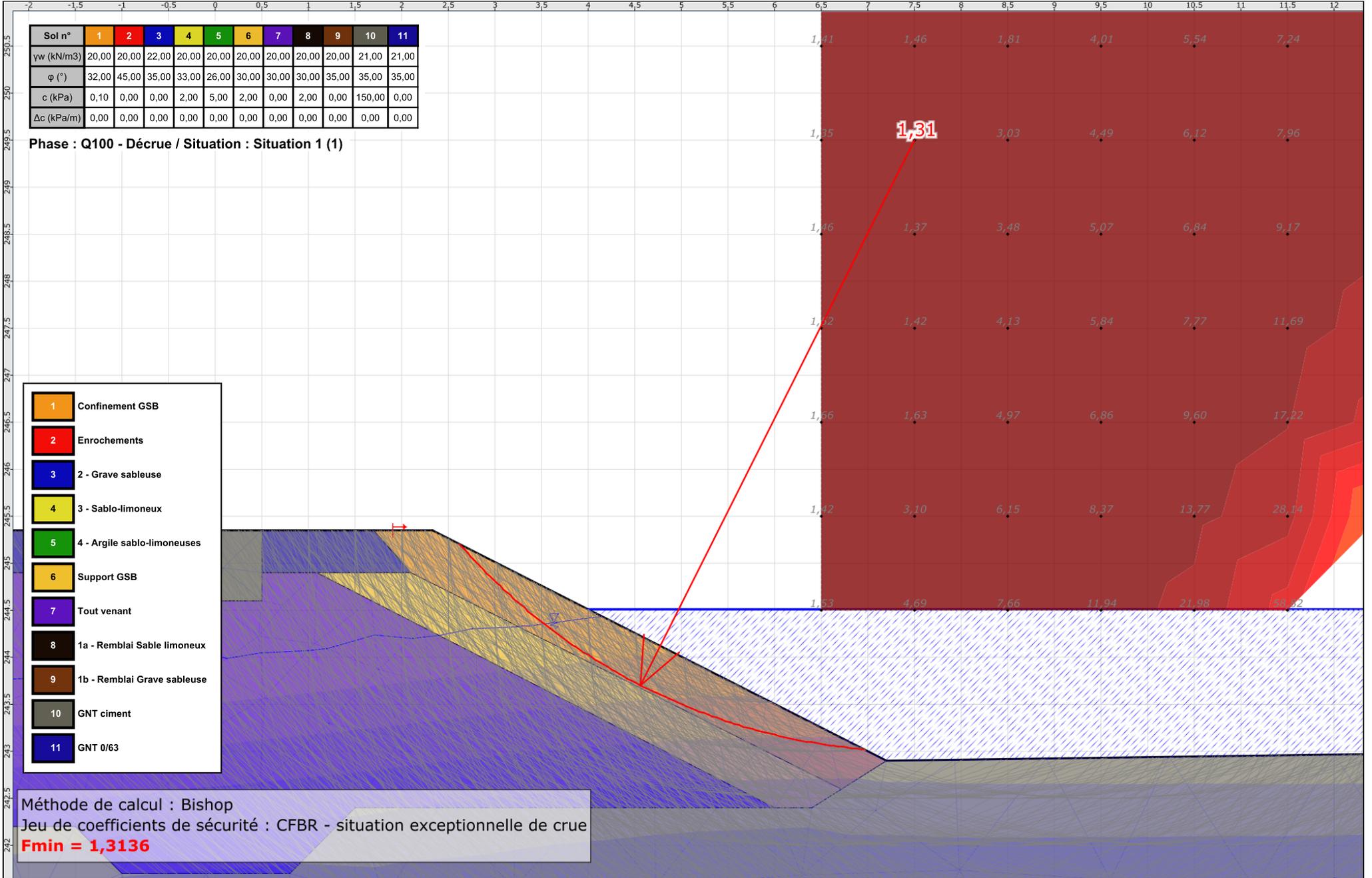
Projet : Laysse aval - coupe 6

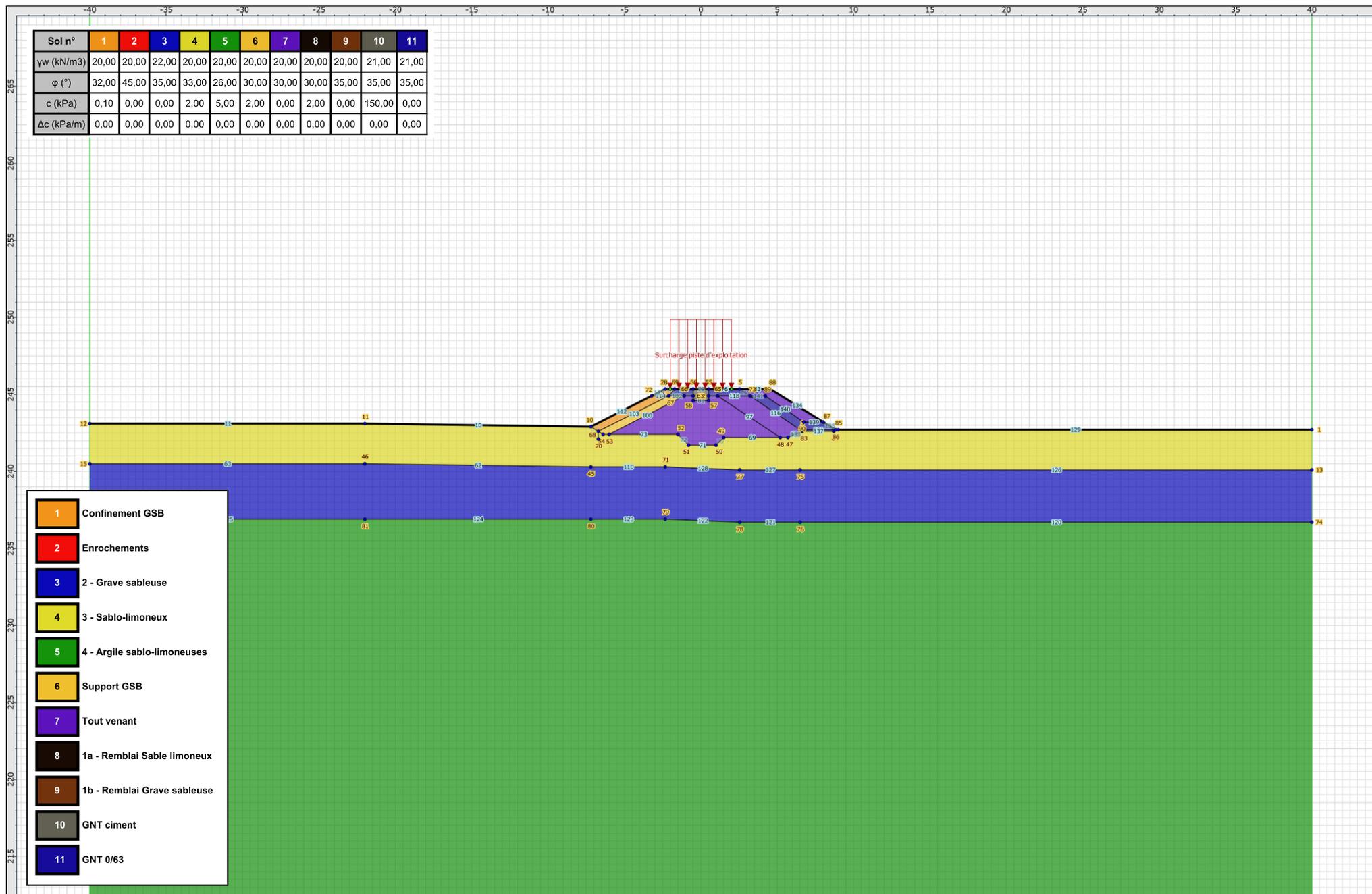
Sol n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γw (kN/m3)	20,00	20,00	22,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	21,00	21,00
φ (°)	32,00	45,00	35,00	33,00	26,00	30,00	30,00	30,00	35,00	35,00	35,00
c (kPa)	0,10	0,00	0,00	2,00	5,00	2,00	0,00	2,00	0,00	150,00	0,00
Δc (kPa/m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Phase : Q100 - Décrue / Situation : Situation 1 (1)

- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 2 - Grave sableuse
- 4 3 - Sablo-limoneux
- 5 4 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63

Méthode de calcul : Bishop  
 Jeu de coefficients de sécurité : CFBR - situation exceptionnelle de crue  
**Fmin = 1,3136**



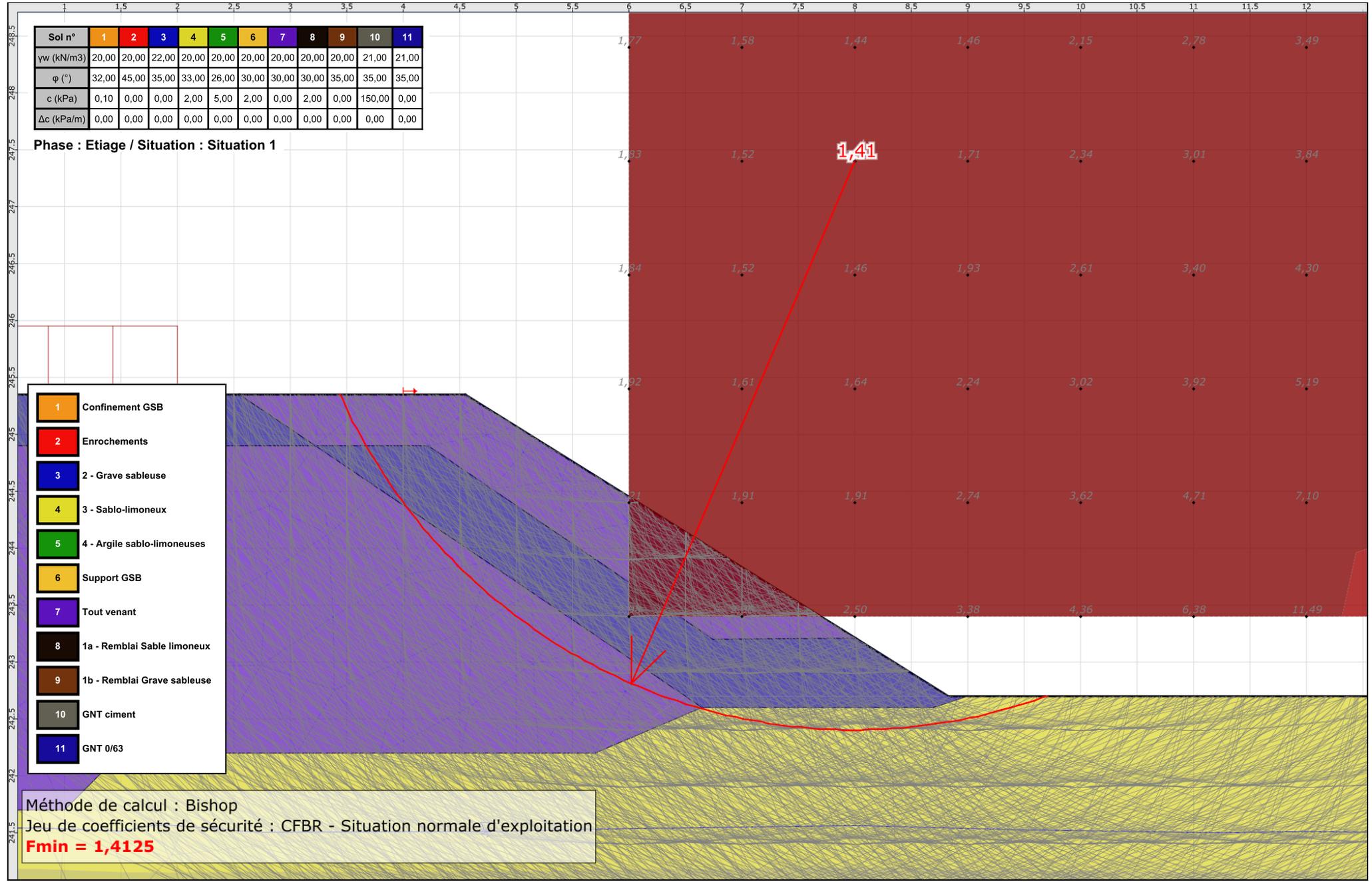


Sol n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γw (kN/m3)	20,00	20,00	22,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	21,00	21,00
φ (°)	32,00	45,00	35,00	33,00	26,00	30,00	30,00	30,00	35,00	35,00	35,00
c (kPa)	0,10	0,00	0,00	2,00	5,00	2,00	0,00	2,00	0,00	150,00	0,00
Δc (kPa/m)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Phase : Etage / Situation : Situation 1

- 1 Confinement GSB
- 2 Enrochements
- 3 2 - Grave sableuse
- 4 3 - Sablo-limoneux
- 5 4 - Argile sablo-limoneuses
- 6 Support GSB
- 7 Tout venant
- 8 1a - Remblai Sable limoneux
- 9 1b - Remblai Grave sableuse
- 10 GNT ciment
- 11 GNT 0/63

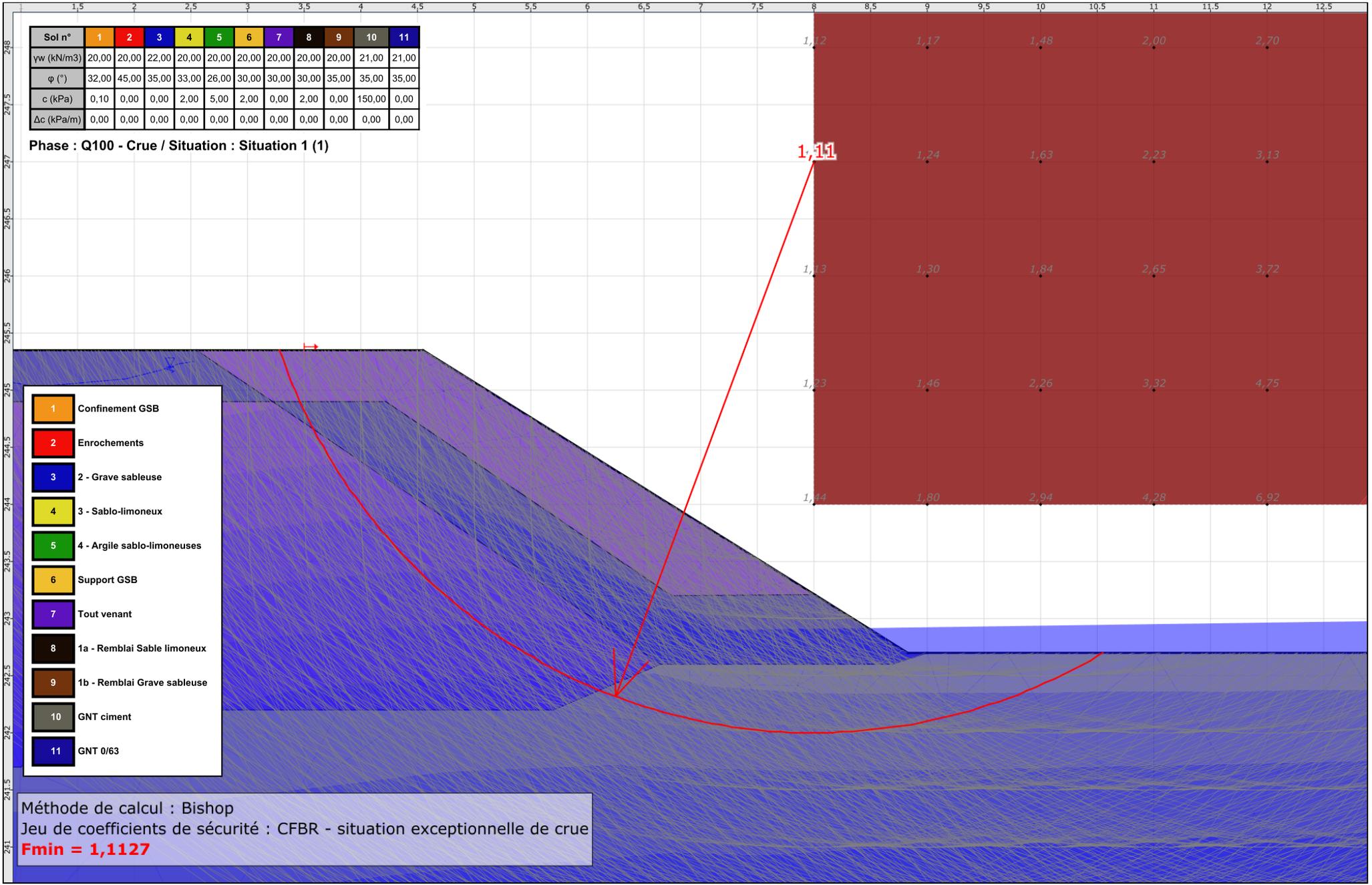
Méthode de calcul : Bishop  
 Jeu de coefficients de sécurité : CFBR - Situation normale d'exploitation  
**Fmin = 1,4125**



Talren v5  
v5.2.10

Imprimé le : 20 déc. 2022 09:37:40  
 Calcul réalisé par : TECHNOSOL

Projet : Laysse aval - coupe 6





[www.kaena.fr](http://www.kaena.fr)

**Kaéna - Siège social** - Parc d'Activités Eurékalp  
L'Épicentre-38660 Saint Vincent de Mercuze  
Tel 04 76 97 94 64 - Fax 04 76 97 94 65  
contact@kaena.fr - www.kaena.fr

**Kaéna - Pays de Savoie**  
12 avenue du Pont de Tasset  
Meythet - 74960 Annecy  
Tel 04 58 10 05 74 - paysdesavoie@kaena.fr

SAS au capital de 98 350,00 € - N° SIREN 510 277 478 - Code NAF 7112B RCS Grenoble - TVA FR 77510 277 478

