

# MISSION DE MAITRISE D'ŒUVRE POUR LES TRAVAUX DE FIABILISATION DES DIGUES COMMUNALES DE NEVERS EN RIVE DROITE

Etude de diagnostic géotechnique (G5)

Etude du remblai de l'A77



V0-18/07/2022



	<p>Safège - Parc d'Activités du Champ de la Chaine 41 Boulevard du Pré Plantin Bâtiment B 58005 NEVERS Cedex</p>
	<p>BRL ingénierie  1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5</p>

Date du document	18/07/2022
Contact	NSI/ JAU

Titre du document	Etude de diagnostic géotechnique (G5) – Etude du remblai de l'A77
Référence du document :	A00414_NEVERS_RD_EP_A77
Indice :	B

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
15/04/2020	A	Première version	XMO	NSI
18/07/2022	B	Mise à jour suite au rapport géotechnique G5 de GINGER CEBTP	NSI	JAU



# MISSION DE MAITRISE D'ŒUVRE POUR LES TRAVAUX DE FIABILISATION DES DIGUES COMMUNALES DE NEVERS EN RIVE DROITE

## Etude de diagnostic géotechnique (G5)

### Etude du remblai de l'A77

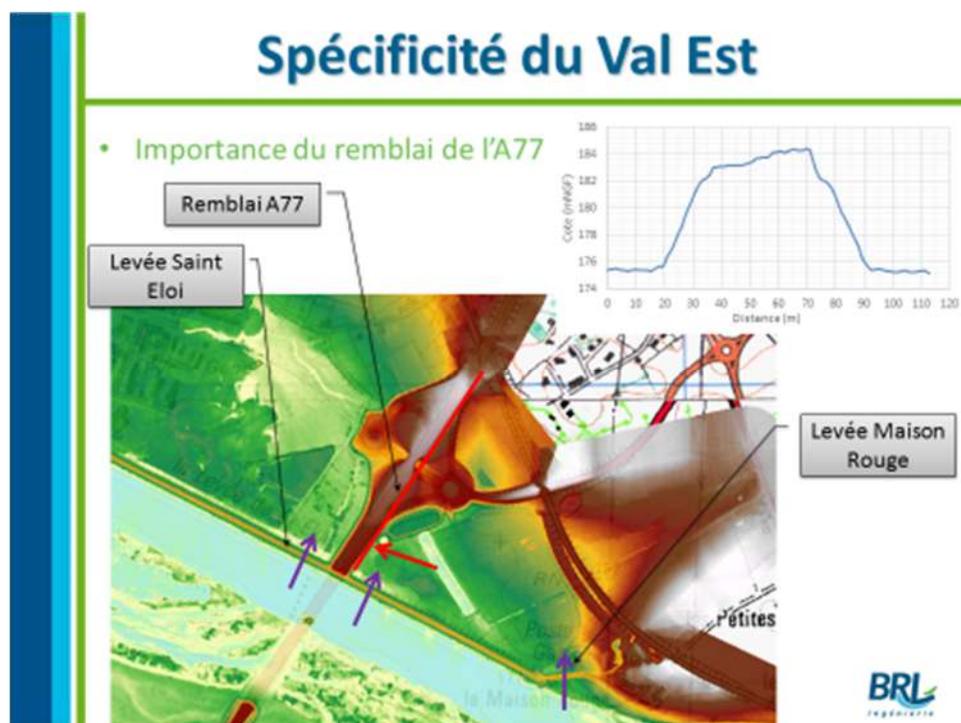
<b>PREAMBULE</b> .....	<b>1</b>
<b>1 OBJET DE LA NOTE</b> .....	<b>3</b>
<b>2 PRESENTATION DE L'OUVRAGE</b> .....	<b>3</b>
2.1 DESCRIPTION .....	3
2.2 CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES .....	4
<b>3 CALCULS DE STABILITE</b> .....	<b>11</b>
3.1 METHODE .....	11
3.2 RESULTATS .....	11
3.3 SYNTHESE .....	15
<b>4 ETUDE DU RISQUE D'EROSION INTERNE</b> .....	<b>16</b>
4.1 METHODE .....	16
4.2 RESULTATS .....	18
4.3 SYNTHESE .....	20



# PREAMBULE

L'analyse MNT du val Est du système d'endiguement de Nevers RD a mis en évidence l'influence du remblai de l'A77 en cas de rupture de la levée de Maison rouge et/ou de la levée de Saint Eloi 2<sup>nd</sup> section. En effet :

- Le remblai ne présente pas d'ouvrage de transparence hydraulique ;
- Le passage sous l'A77, est d'une part plus haut que la crête de digue et d'autre part isolé du casier par la bretelle de sortie et le rond-point associé ;
- En cas de brèche, le remblai de l'A77 jouera le rôle de digue et en l'absence d'ouvrage de transparence celui-ci sera mis en charge pendant toute la durée de la crue de la Loire.



Ce constat a conduit BRLi, MOA et AMO à s'interroger sur la pertinence d'éventuels travaux de confortement de la levée de maison rouge et/ou à envisager une modification de la ligne principale de défense et à des travaux d'arasement partiel ou complet des digues situées en amont de l'A77 (extrémité amont de la levée de St Eloi 2<sup>nd</sup> section et/ou levée de maison rouge).

Le présent document a pour objet, en cas d'arasement en amont de l'A77 d'étudier la pérennité des remblais de l'A77 vis-à-vis notamment des risques de glissement, d'érosion externe et d'érosion interne.



# 1 OBJET DE LA NOTE

L'objet de la présente note est de présenter l'étude géotechnique G5 réalisée par GINGER CEBTP sur les remblais de l'A77 dans l'hypothèse d'un arasement de la levée de St Eloi 2<sup>ème</sup> section et d'en expliciter les résultats.

Il est précisé que le rapport géotechnique G5 est référencé ainsi :

- Dossier : RDI2.L.148
- Février 2022
- indB du 14/02/2022

## 2 PRESENTATION DE L'OUVRAGE

### 2.1 DESCRIPTION

L'ouvrage étudié qui a vocation à devenir la nouvelle ligne de défense principale peut être décomposé en 3 tronçons :

- L'A77 à proprement parlé (en rouge sur l'extrait ci-dessous)
- La rampe d'accès à l'A77 et le giratoire associé (en vert ci-dessous)
- La RD981 jusqu'au raccordement au coteau.

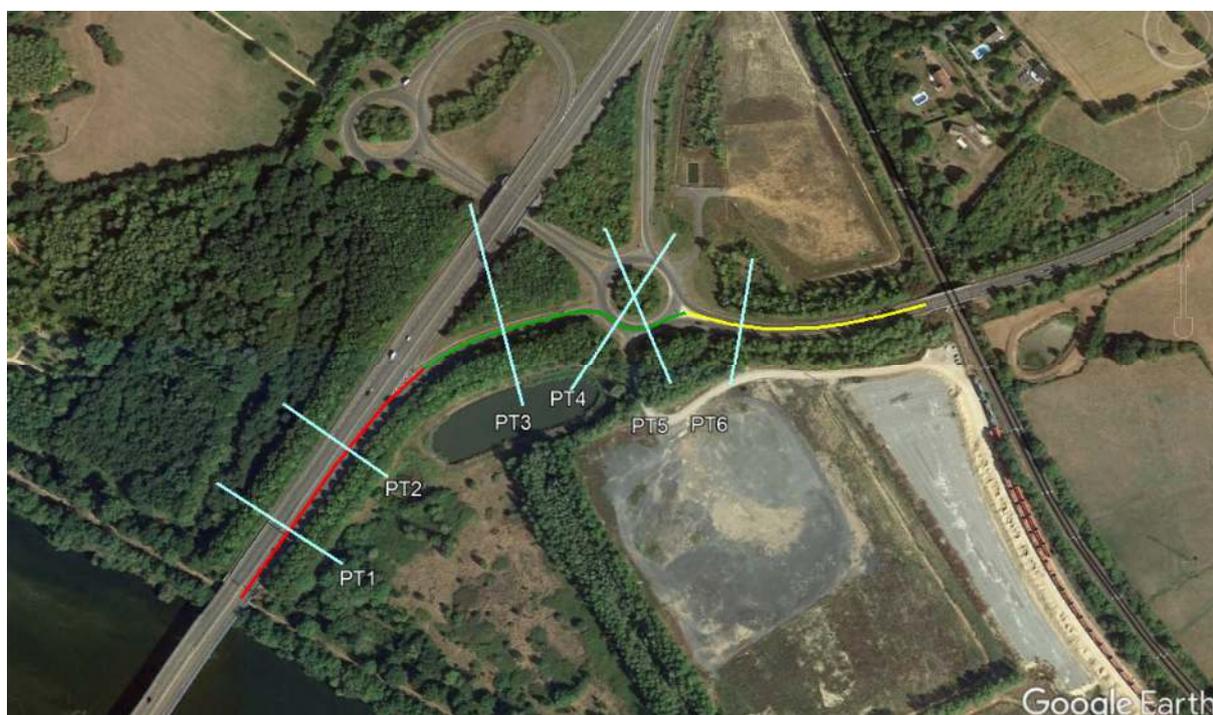




Figure 1 : vue en plan de la nouvelle ligne de défense projetée

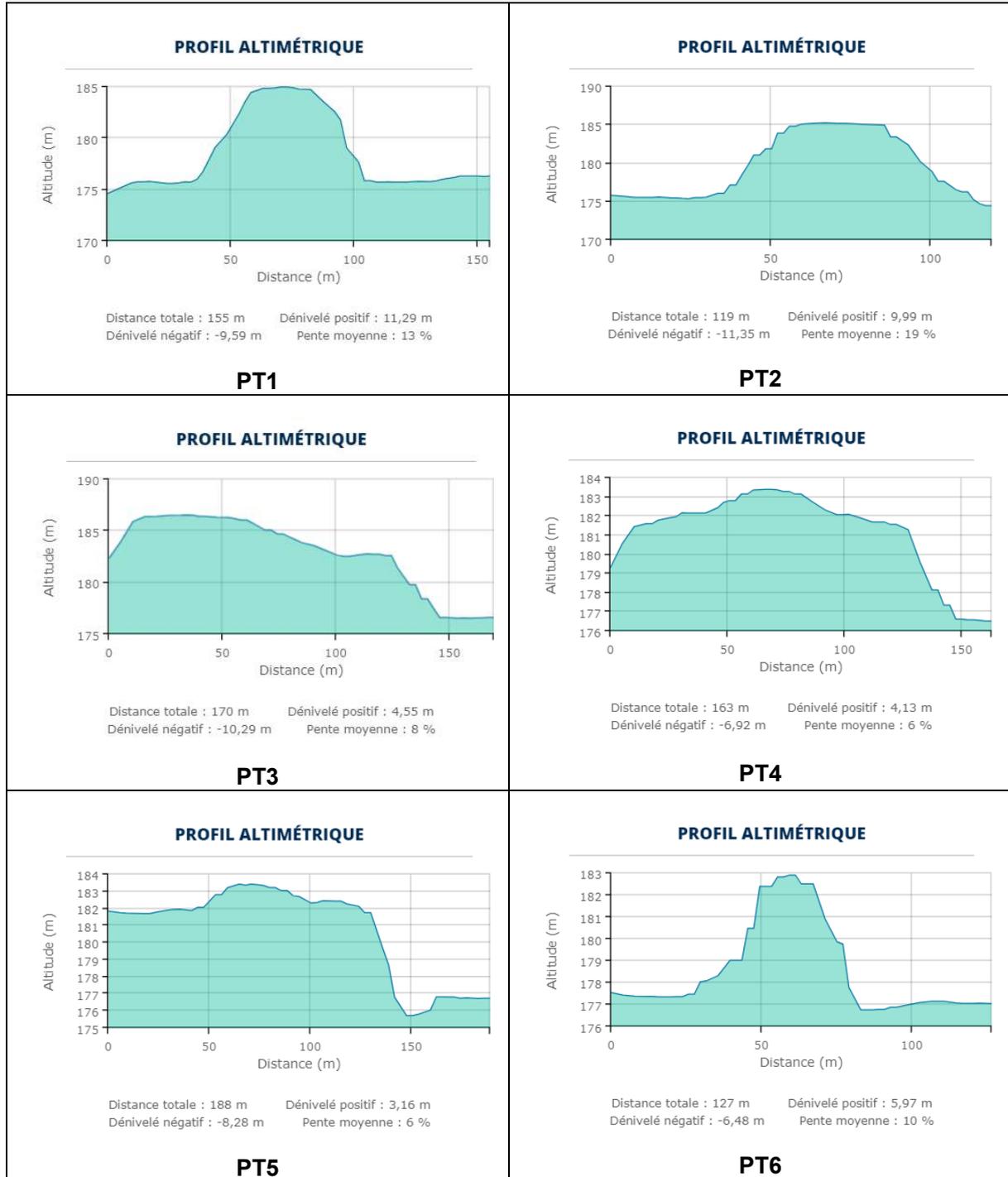


Figure 2 : profil en travers (Loire à droite)

## 2.2 CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Afin de préciser les caractéristiques géotechniques de l'ouvrage, une campagne de reconnaissances géotechnique a été réalisée en 2019 par le bureau d'étude GINGER CEBTP.

Les sondages et essais suivants ont été réalisés :



Type de sondage	Quantité	Dénomination	Profondeur
Sondage carotté : D114 mm	2	SC25 SC26	15.0 m/TA 15.0 m/TA

Essais de perméabilité in situ	Sondage de référence	Profondeur de l'essai
Essai d'injection à charge variable dit « Nasberg » selon la norme NF ISO 22282-2	SC25	1.0 – 2.0 m/TA 3.0 – 3.5 m/TA 6.0 – 7.0 m/TA
	SC26	0.5 – 1.5 m/TA 3.3 – 3.9 m/TA 6.0 – 7.0 m/TA

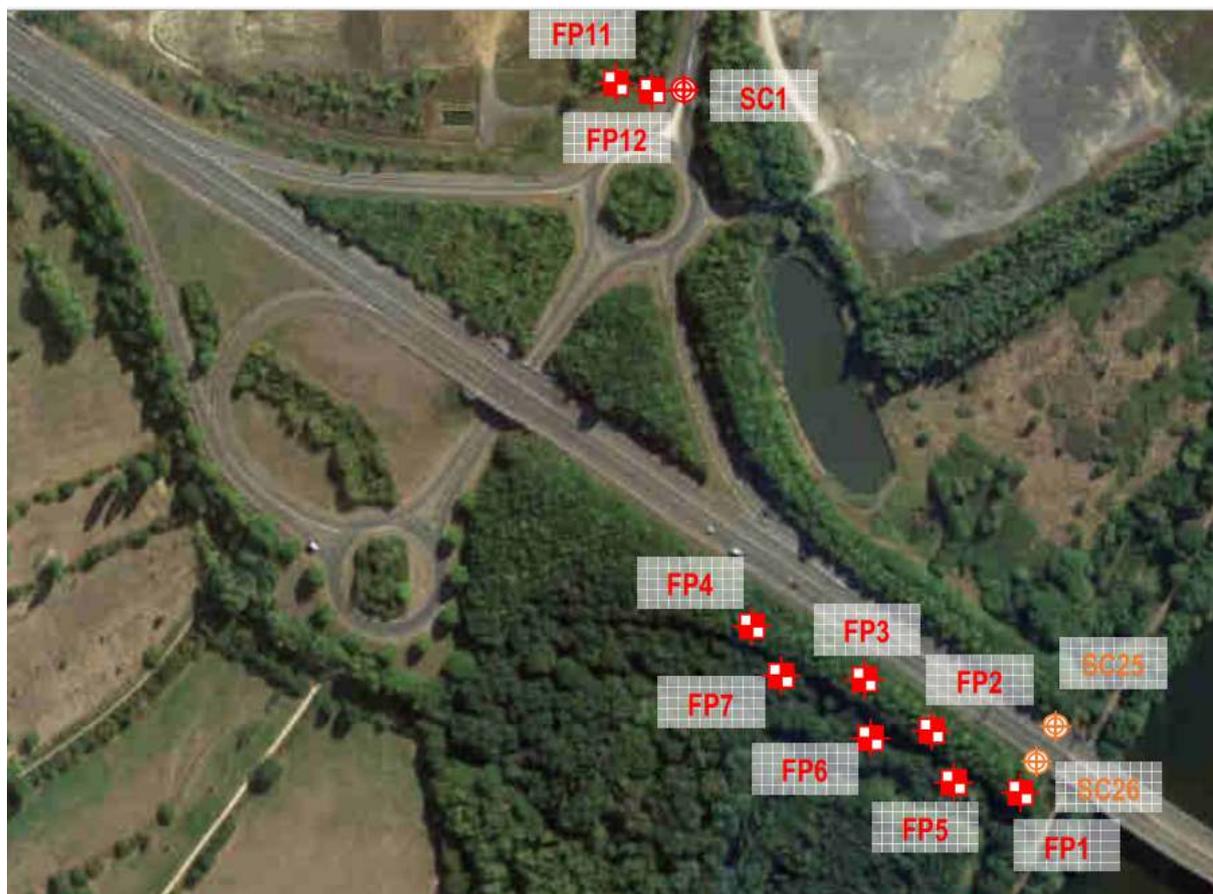
Essais de laboratoire	Sondage de référence	Profondeur de l'essai
Cisaillement direct Consolidé Drainé (CD) lent à la boîte de Casagrande selon la norme NF P 94-071-1	SC25	3.4 – 3.6 m/TA
	SC26	1.5 – 2.0 m/TA 3.5 – 4.0 m/TA 5.7 – 5.9 m/TA

Ces reconnaissances ont fait l'objet du rapport RDI2.I.048 – pièce 4 - de Février 2019.

En complément, 7 fouilles à la pelle ont été réalisées en octobre 2021 en pied de talus côté zone protégée (FP1 à FP7).

Au droit des sondages, descendus jusque -3.5 m/TA, il a été réalisé :

- des essais in-situ de mesure de la perméabilité ;
- des identifications en laboratoire
- et des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande (au droit de FP1, FP2, FP3, FP6 et FP7).



6

Le contexte géotechnique mis en évidence est synthétisé dans les tableaux ci-dessous.



Au niveau de l'A77, l'analyse et la synthèse des résultats des investigations réalisées ont permis de reconnaître les formations suivantes :

► **Formation 0.TV : Terre végétale**

► **Formation 0.R : Structure de chaussée avec revêtement bitumineux**

Les remblais sont principalement des matériaux d'apport graveleux (concassés) avec une matrice sableuse et argileuse plus ou moins abondante, et localement des morceaux d'enrobé bitumineux dans la matrice.

► **Formations 1 : Sols à dominante argileuse**

- Horizon 1a : Argile marron contenant de petits blocs calcaires
- Horizon 1b : Argile très sableuse à sables argileux
- Horizon 1c : Argile graveleuse marron-ocre

► **Formations 2 : Sols à dominante sableuse et graveleuse**

- Horizon 2a : Sables grossiers et graviers marron
- Horizon 2b : Sables et graviers limoneux ou argileux beiges, marron ou bruns à passages argilo-sableux
- Horizon 2c : Sables et graviers argileux à très argileux bruns. à passages argilo-sableux de. Cet horizon renferme également localement des racines et radicelles (observés jusqu'à la fin du sondage SC26).

Le tableau ci-dessous donne la lithologie rencontrée au droit de chaque sondage (profondeur par rapport au terrain à la date des investigations), du Sud vers le Nord :

Sondage	SC25 <sup>(2)</sup>	SC26 <sup>(2)</sup>	FP1 <sup>(3)</sup>	FP5 <sup>(3)</sup>	FP2 <sup>(3)</sup>	FP6 <sup>(3)</sup>	FP3 <sup>(3)</sup>	FP7 <sup>(3)</sup>	FP4 <sup>(3)</sup>
Implantation	Crête – BAU côté Est	Crête – BAU côté Ouest	Pied côté Ouest	Pied côté Ouest	Pied côté Ouest	Pied côté Ouest	Pied côté Ouest	Pied côté Ouest	Pied côté Ouest
0.TV – Terre végétale	-	-	0.0 – 0.6 m/TA	0.0 – 0.8 m/TA	0.0 – 0.5 m/TA	0.0 – 0.6 m/TA	0.0 – 0.8 m/TA	0.0 – 0.8 m/TA	0.0 – 0.7 m/TA
0.R – Structure de chaussée	0.0 – 1.9 m/TA	0.0 – 3.9 m/TA	-	-	-	-	-	-	-
1a - Argile à petits blocs calcaires	1.9 – 3.0 m/TA	-	-	-	-	-	-	-	-
2a – Sables et graviers	3.0 – 5.7 m/TA	-	-	-	-	-	-	-	-
1b – Argile très sableuse à sables argileux	-	-	0.6 – 3.5* m/TA	0.8 – 1.7 m/TA	0.5 – 1.7 m/TA	-	0.8 – 3.5* m/TA	0.8 – 3.5* m/TA	0.7 – 3.5* m/TA
1c – Argile graveleuse	-	3.9 – 6.9 m/TA	-	-	-	-	-	-	-
2b – Sables et graviers limoneux avec des passages d'argile	5.7 – 15.0* m/TA	-	-	-	1.7 – 3.5* m/TA	0.6 – 3.5* m/TA	-	-	-
2c – Sables et graviers +/- argileux	-	6.9 – 15.0* m/TA	-	1.7 – 3.5* m/TA	-	-	-	-	-

\* Arrêt du sondage

\*\* Arrêt du sondage à cause de fortes arrivées d'eau rendant l'approfondissement impossible (instabilité des parois)

- Formation absente ou non reconnue ou non atteinte

<sup>(2)</sup> Sondages réalisés en 2019

<sup>(3)</sup> Sondages complémentaires réalisés pour la présente étude



## 6.2 Corps de digue

Sondage	Localisation	Caractéristiques du corps de digue							
		Lithologie	Profondeur de la base	Epaisseur	Classe GTR	Densité $\gamma_n$	Perméabilité	Cohésion $C'$	Angle de frottement $\phi'$
SC25	A77 - Crête - BAU côté Est	0.R - Structure de chaussée	1.9 m/TA	1.9 m	-	19** kN/m <sup>3</sup>	2 à 4 . 10 <sup>-6</sup> m/s	1 kPa	27 °
		1a - Argile à petits blocs calcaires	3.0 m/TA	1.1 m	-	18** kN/m <sup>3</sup>	1 . 10 <sup>-7</sup> ** m/s	5** kPa	25** °
		2a - Sables grossiers et graviers	5.7 m/TA	2.7 m	-	18 kN/m <sup>3</sup>	1 . 10 <sup>-6</sup> m/s	0 kPa	36 °
		2b - Sables et graviers limoneux à passages argilo- sableux	10.0* m/TA	4.3* m	-	20** kN/m <sup>3</sup>	2 à 3 . 10 <sup>-7</sup> m/s	0** kPa	35** °
SC26	A77 - Crête - BAU côté Ouest	0.R - Structure de chaussée	3.9 m/TA	3.9 m	-	19 kN/m <sup>3</sup>	2 . 10 <sup>-6</sup> m/s	1 kPa	27 °
		1b - Argile graveleuse	6.9 m/TA	3.0 m	-	18 kN/m <sup>3</sup>	1 . 10 <sup>-7</sup> m/s	9 kPa	25 °
		2c - Sables et graviers +/- argileux	10.0* m/TA	3.1* m	-	20** kN/m <sup>3</sup>	1 . 10 <sup>-7</sup> ** m/s	0** kPa	35** °
SC1	RD 981 - Axe de la chaussée en crête de digue	0.R - Structure de chaussée et remblais graveleux	1.9 m/TA	1.9 m	-	19** kN/m <sup>3</sup>	1 . 10 <sup>-4</sup> m/s	0** kPa	35** °
		1a - Argile à passages sableux	4.0* m/TA	2.1* m	A <sub>2</sub>	19** kN/m <sup>3</sup>	5 . 10 <sup>-8</sup> m/s	11 kPa	32 °

## 6.3 Sol d'assise alluvionnaire

Sondage	Localisation	Caractéristiques du corps de digue							
		Lithologie	Profondeur de la base	Epaisseur	Classe GTR	Densité $\gamma_h$	Perméabilité	Cohésion $C'$	Angle de frottement $\phi'$
SC25	A77 - Crête – BAU côté Est	2b – Sables et graviers limoneux avec des passages d'argile sableuse	$\geq 15.0$ m/TA	5.0 m	-	20** kN/m <sup>3</sup>	2 à 3 . 10 <sup>-7</sup> m/s	2** kPa	35** °
SC26	A77 - Crête – BAU côté Ouest	2c – Sables et graviers +/- argileux	$\geq 15.0$ m/TA	5.0 m	-	20** kN/m <sup>3</sup>	1 . 10 <sup>-7</sup> ** m/s	2** kPa	35** °
FP1 FP3 FP4 FP7	A77 – Pied de digue côté Ouest	1b – Argile très sableuse à sables très argileux	$\geq 3.5$ m/TA	3.0 m	A <sub>1</sub> -A <sub>2</sub> à B <sub>6</sub>	19** kN/m <sup>3</sup>	5 à 10 . 10 <sup>-4</sup> m/s	14 kPa	31 °
FP2 FP5	A77 – Pied de digue côté Ouest	1b – Argile très sableuse à sables très argileux	1.7 m/TA	1.0 m	A <sub>1</sub> -A <sub>2</sub> à B <sub>6</sub>	19** kN/m <sup>3</sup>	1 à 5 . 10 <sup>-5</sup> m/s	14 kPa	31 °
		2c – Sables et graviers +/- argileux	$\geq 1.8$ m/TA	1.8 m	B <sub>4</sub>	20** kN/m <sup>3</sup>	5 . 10 <sup>-4</sup> m/s	10 kPa	38 °
FP6	A77 – Pied de digue côté Ouest	2b – Sables et graviers limoneux avec des passages d'argile sableuse	$\geq 3.5$ m/TA	3.0 m	B <sub>2</sub>	20** kN/m <sup>3</sup>	5 . 10 <sup>-5</sup> m/s	4 kPa	37 °
SC1	RD 981 – Axe de la chaussée en crête de digue	1a – Argile à passages sableux	6.5 m/TA	2.5 m	A <sub>2</sub>	19** kN/m <sup>3</sup>	5 . 10 <sup>-8</sup> m/s	15 kPa	31 °
		2a – Sables argileux	7.5 m/TA	1.0 m	-	19** kN/m <sup>3</sup>	3 . 10 <sup>-6</sup> m/s	2** kPa	35** °
		1b – Argile graveleuse	$\geq 8.2$ m/TA	$\geq 0.7$ m	-	19** kN/m <sup>3</sup>	1 . 10 <sup>-8</sup> ** m/s	10** kPa	25** °



Au niveau de la Route Départementale n° 981, l'analyse et la synthèse des résultats des investigations réalisées ont permis de reconnaître les formations suivantes :

- ▶ **Formation 0.TV : Terre végétale**
- ▶ **Formation 0.C : Structure de chaussée** composée de couches d'enrobés bitumineux et sables noirs
- ▶ **Formations 0.R : Remblais**
  - Horizon 0.R1 : Grave sableuse beige
  - Horizon 0.R2 : Grave sableuse et argileuse marron
- ▶ **Formations 1 : Sols à dominante argileuse**
  - Horizon 1a : Argile beige à marron avec des passages sableux gris à noirs de 10 à 30 cm
  - Horizon 1b : Argile graveleuse marron
- ▶ **Formations 2 : Sols à dominante sableuse**
  - Horizon 2a : Sables plus ou moins argileux bruns à gris foncé

Le tableau ci-dessous donne la lithologie rencontrée au droit de chaque sondage (profondeur par rapport au terrain à la date des investigations), de l'Ouest vers l'Est :

Sondage	SC1 <sup>(1)</sup>	FP11 <sup>(2)</sup>	FP2 <sup>(2)</sup>
Implantation	Crête	Pied côté Terre	Pied côté Terre
0.TV - Terre végétale	-	0.0 – 0.5	0.0 – 0.3
0.C – Structure de chaussée	0.0 – 0.7 m/TA	-	-
0.R – Remblais graveleux	0.7 – 1.9 m/TA	-	-
1a – Argile +/- graveleuse à passages sableux	1.9 – 6.5 m/TA	0.5 – 3.2*	0.3 – 3.5*
2a – Sables argileux	6.5 – 7.5 m/TA	-	-
1b – Argile graveleuse	7.5 – 8.2* m/TA	-	-

\* Arrêt du sondage

- Formation absente ou non reconnue ou non atteinte

<sup>(2)</sup> Sondages réalisés pour la présente étude

Remarques :

- A noter que la profondeur des formations est donnée par rapport au terrain tel qu'il était au moment de chacune des reconnaissances ;
- Nous rappelons qu'il n'est pas toujours évident de distinguer les variations horizontales et/ou verticales éventuelles, inhérentes aux changements de faciès, compte tenu de la surface investiguée par rapport à celle concernée par le projet ; de ce fait, les caractéristiques indiquées ont un caractère représentatif mais non absolu ;
- Il ne nous a été communiqué aucun élément concernant la constitution de la digue : l'épaisseur et la nature des remblais peut fortement varier ;
- Les différentes formations rencontrées, de par leur nature, peuvent présenter d'importantes variations verticales et horizontales de faciès ; de même, la profondeur du toit du substratum peut fluctuer.

# 3 CALCULS DE STABILITE

## 3.1 METHODE

Les calculs de vérification de la stabilité au glissement de la digue sont réalisés avec le logiciel Talren v5 qui permet de déterminer le bilan des efforts moteurs et des efforts résistants le long de la surface de rupture pour un glissement plan, quelconque ou circulaire, ce qui se traduit par le coefficient de sécurité minimal « Fmin ».

Les calculs ont été réalisés selon la méthode des tranches (Bishop), sur la base d'une surface de rupture circulaire.

Pour la réalisation des calculs, on applique des coefficients partiels sur les paramètres et la méthode.

Dans ces conditions, on considère que la stabilité est assurée dès lors que le coefficient de sécurité  $F_{min} > 1.0$ .

Conformément au guide du CFBR 2015, des coefficients partiels sur les paramètres et la méthode sont appliqués en fonction de la situation étudiée :

Situation	Niveau de nappe	Coefficient $\gamma_m$	Coefficient $\gamma_m$	Coefficient $\gamma_d$
		Cohésion (c') Frottement (tan $\phi'$ )	Poids volumique ( $\rho$ )	Modèle
Situation de crue	Q200 Q500 Q750 Q1000	1.1	1.0	1.2

Conformément au CFBR 2015, les calculs réalisés sont les suivants :

Situation	Niveau de nappe	Talus côté Eau	Talus côté Terre
Situation de crue	Q200 Q500 Q750 Q1000	Cas de décrue rapide (pas de nappe mais digue saturée, les pressions n'ayant pas eu le temps de se dissiper)	Calcul avec nappe à la cote exceptionnelle de crue à l'amont et digue saturée

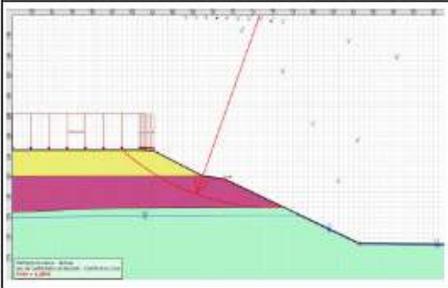
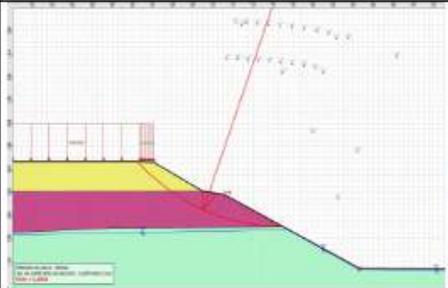
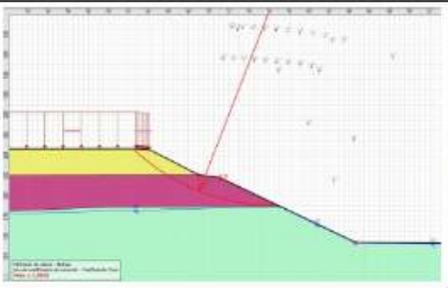
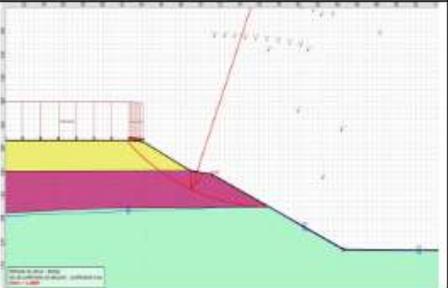
Note : le site étant en zone de sismicité 1, la vérification sismique n'est pas requise.

## 3.2 RESULTATS

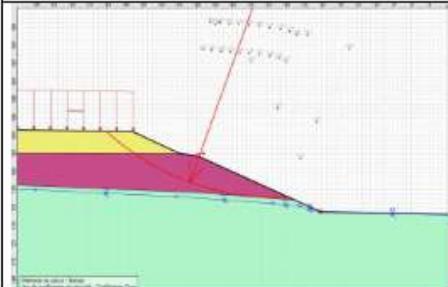
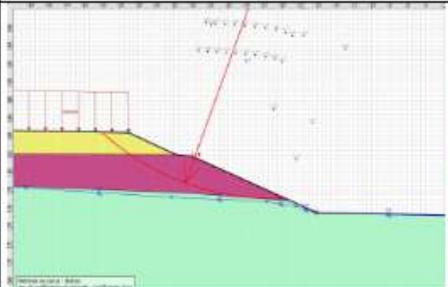
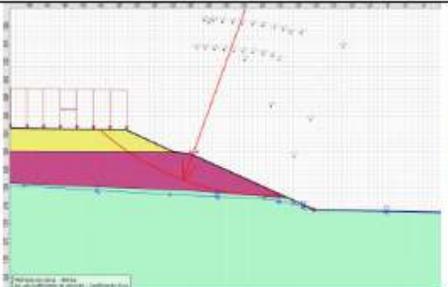
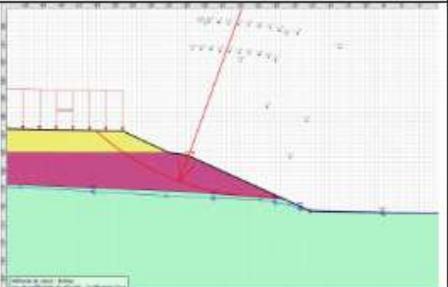


## 8.2.1 Autoroute A77 : Profil SC25 – SC26 – FP1

Pour le talus côté Eau, les calculs réalisés montrent que la stabilité de la digue vis-à-vis du glissement est assurée pour les crues définies (Q200, Q500, Q750 et Q1000) :

Crue Q200	Crue Q500	Crue Q750	Crue Q1000
Pas de nappe extérieure mais digue saturée jusqu'à la cote 178.22 m NGF à l'amont avec rabattement en pied côté terre (cas de décrue rapide sans dissipation des contraintes dans le corps de digue)	Pas de nappe extérieure mais digue saturée jusqu'à la cote 178.75 m NGF à l'amont avec rabattement en pied côté terre (cas de décrue rapide sans dissipation des contraintes dans le corps de digue)	Pas de nappe extérieure mais digue saturée jusqu'à la cote 178.97 m NGF à l'amont avec rabattement en pied côté terre (cas de décrue rapide sans dissipation des contraintes dans le corps de digue)	Pas de nappe extérieure mais digue saturée jusqu'à la cote 179.14 m NGF à l'amont avec rabattement en pied côté terre (cas de décrue rapide sans dissipation des contraintes dans le corps de digue)
			
$F_{min} = 1.28 > 1.0$	$F_{min} = 1.29 > 1.0$	$F_{min} = 1.29 > 1.0$	$F_{min} = 1.29 > 1.0$

Pour le talus côté Terre, les calculs réalisés montrent que la stabilité de la digue vis-à-vis du glissement est assurée pour les crues définies (Q200, Q500, Q750 et Q1000) :

Crue Q200	Crue Q500	Crue Q750	Crue Q1000
Nappe à la cote 178.22 m NGF à l'amont et digue saturée jusqu'en pied côté terre	Nappe à la cote 178.75 m NGF à l'amont et digue saturée jusqu'en pied côté terre	Nappe à la cote 178.97 m NGF à l'amont et digue saturée jusqu'en pied côté terre	Nappe à la cote 179.14 m NGF à l'amont et digue saturée jusqu'en pied côté terre
			
$F_{min} = 1.25 > 1.0$	$F_{min} = 1.25 > 1.0$	$F_{min} = 1.25 > 1.0$	$F_{min} = 1.25 > 1.0$

Remarque : pour ce profil, aussi bien pour le talus côté Eau que celui côté Terre, le niveau de crue n'a pas d'influence sur la stabilité, la partie du talus la plus critique étant située au dessus du niveau d'eau (les cercles interceptant le talus dans sa partie inférieure et sous le niveau d'eau étant plus stables).



### 3. CALCULS DE STABILITÉ

#### 8.2.2 Route Départementale 981 : Profil SC1 – FP11 – FP12

Pour le talus côté Eau, les calculs réalisés montrent que la stabilité de la digue vis-à-vis du glissement est assurée pour les crues définies (Q200, Q500, Q750 et Q1000) :

Crue Q200	Crue Q500	Crue Q750	Crue Q1000
Pas de nappe extérieure mais digue saturée jusqu'à la cote 178.22 m NGF à l'amont avec rabattement en pied côté terre (cas de décrue rapide sans dissipation des contraintes dans le corps de digue)	Pas de nappe extérieure mais digue saturée jusqu'à la cote 178.75 m NGF à l'amont avec rabattement en pied côté terre (cas de décrue rapide sans dissipation des contraintes dans le corps de digue)	Pas de nappe extérieure mais digue saturée jusqu'à la cote 178.97 m NGF à l'amont avec rabattement en pied côté terre (cas de décrue rapide sans dissipation des contraintes dans le corps de digue)	Pas de nappe extérieure mais digue saturée jusqu'à la cote 179.14 m NGF à l'amont avec rabattement en pied côté terre (cas de décrue rapide sans dissipation des contraintes dans le corps de digue)
Fmin = 1.43 > 1.0	Fmin = 1.37 > 1.0	Fmin = 1.34 > 1.0	Fmin = 1.31 > 1.0

Pour le talus côté Terre, les calculs réalisés montrent que la stabilité de la digue vis-à-vis du glissement est assurée pour les crues définies (Q200, Q500, Q750 et Q1000) :

Crue Q200	Crue Q500	Crue Q750	Crue Q1000
Nappe à la cote 178.22 m NGF à l'amont et digue saturée jusqu'en pied côté terre	Nappe à la cote 178.75 m NGF à l'amont et digue saturée jusqu'en pied côté terre	Nappe à la cote 178.97 m NGF à l'amont et digue saturée jusqu'en pied côté terre	Nappe à la cote 179.14 m NGF à l'amont et digue saturée jusqu'en pied côté terre
Fmin = 1.22 > 1.0			

Remarque : pour ce profil, pour le talus côté Terre, le niveau de crue n'a pas d'influence sur la stabilité, la partie du talus la plus critique étant située au dessus du niveau d'eau (les cercles interceptant le talus dans sa partie inférieure et sous le niveau d'eau étant plus stables).





### 3.3 SYNTHÈSE

Ces résultats mettent en évidence l'absence de risque de rupture par glissement de la nouvelle ligne de défense projetée.

En terme de probabilité de rupture, pour le talus côté terre, sur la base d'une méthode élaborée par le SYMADREM et consistant à établir la correspondance suivante entre les facteurs de sécurité et la probabilité de rupture :

Facteur de sécurité		Probabilité de rupture
FS < 0,9	0	0,99
0,9 < FS < 1	0,9	0,9
1 < FS < 1,1	1	0,5
1,1 < FS < 1,25	1,1	0,1
1,25 < FS < 1,35	1,25	0,05
1,35 < FS < 1,45	1,35	0,01
FS > 1,45	1,45	0,001

Il peut être retenu les valeurs suivantes :

A77	Q200	Q500	Q750	Q1000
F	> 1.25	> 1.25	> 1.25	> 1.25
P (%)	< 5%	< 5%	< 5%	< 5%

RD981	Q200	Q500	Q750	Q1000
F	1.22*	1.22*	1.22*	1.22*
P (%)	5%	5%	5%	5%

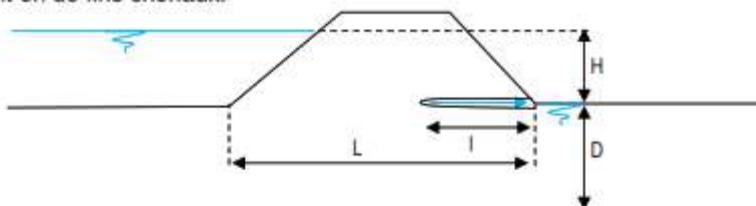
\* il est important de noter que le glissement critique mis en évidence correspond à la partie supérieure du talus, au-dessus du niveau d'eau et correspond donc à l'état normal sans considération du risque de crue.



## 4 ETUDE DU RISQUE D'ÉROSION INTERNE

### 4.1 METHODE

L'érosion interne régressive est un mécanisme d'entraînement des particules de sols de l'amont vers l'aval, s'initiant en de fins chenaux.



On retient 2 méthodes pour la vérification de la stabilité des sols vis-à-vis de l'érosion régressive.

La méthode de Lane permet d'évaluer le risque d'amorce de phénomène de Renard en comparant le gradient hydraulique fonction de la géométrie de la digue à un gradient critique fonction de la nature des matériaux et en dessous duquel il n'y a pas de déplacement des grains.

Pour cela, nous utilisons la méthode de Lane qui définit le gradient  $i$  par la formule suivante :

$$i = \frac{\Delta h}{\sum H + \frac{1}{3} \sum L}$$

avec :  $\Delta h$  : la perte de charge de l'écoulement  
 $\sum H$  : la somme des parties verticales de l'écoulement  
 $\sum L$  : la somme des parties horizontales de l'écoulement

Pour le gradient critique, nous retiendrons les valeurs suivantes proposées par Lane :

Argile à argile graveleuse	: $i_c = 0.2$ à $0.5$		
Sable très fin, silt	: $i_c = 0.12$		
Sables	: fins : $i_c = 0.14$	moyens : $i_c = 0.17$	grossiers : $i_c = 0.20$
Graves	: fines : $i_c = 0.25$	moyennes : $i_c = 0.30$	grossières : $i_c = 0.33$

La stabilité est assurée si  $i < i_c$ , soit un coefficient de sécurité  $F > 1.0$ .

Le critère d'érosion régressive par détachement est défini selon la formule de Sellmeijer, cette condition étant nécessaire mais pas suffisante : elle est déterminée à partir d'un modèle mécanique de l'équilibre limite des grains à l'extrémité du trou pour les sols respectant les critères suivants :

$34 < RD < 100$ %	: densité relative ou indice de compacité des sols pulvérulents $RD = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min}) \times 100$ avec $e = V_v / V_s$
$1.3 < U < 2.6$	: coefficient d'uniformité ( $Cu = d_{60} / d_{10}$ )
$35 < KAS < 70$ %	: angularité des particules
$0.15 < d_{70} < 0.43$ mm	: diamètre représentatif du sable

Le gradient critique ( $H/L$ ) est le produit de trois contributions : un facteur de résistance ( $Fr$ ), un facteur d'échelle ( $Fs$ ) et un facteur géométrique ( $Fg$ ).



Le principe est de comparer le gradient critique calculé à partir duquel l'érosion régressive peut progresser pour allonger le conduit et le mettre en contact avec le réservoir amont (c) au gradient du système étudié (H/L).

La formulation est la suivante :

$$\frac{H}{L} < \frac{1}{c} = F_R \cdot F_S \cdot F_G$$

$$F_R = \gamma \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \tan \theta \cdot \left( \frac{BD}{BD_m} \right)^{0.28} \cdot \left( \frac{U}{U_m} \right)^{0.13} \cdot \left( \frac{KAS}{KAS_m} \right)^{-0.02}$$

$$F_S = \frac{d_{70}}{\sqrt{70k}} \cdot \left( \frac{d_{70m}}{d_{70}} \right)^{0.46}$$

$$F_G = 0.91 \cdot \left( \frac{U}{L} \right) \left( \frac{D}{L} \right)^{-1.25}$$

- Avec :
- H : charge hydraulique (m)
  - L : largeur du remblai au niveau du calcul (m)
  - $\gamma_p$  : poids volumique déjaugé (kN/m<sup>3</sup>)
  - $\kappa$  : perméabilité intrinsèque (m<sup>2</sup>)  $\kappa = v \cdot k / g$
  - D : épaisseur de la couche concernée (m)
  - G : densité des particules solides (t/m<sup>3</sup>)
  - $\theta$  : angle de frottement interne du sol (°)
  - $\gamma_w$  : poids volumique de l'eau (kN/m<sup>3</sup>)
  - $\eta$  : coefficient de White (eau à 20 °C)
  - $\nu$  : viscosité cinématique (m<sup>2</sup>/s)
  - g : accélération de la gravité (m/s<sup>2</sup>)
  - k : perméabilité (m/s)
  - $d_{70}$  : ouverture du tamis au travers duquel passe 70% du poids des grains du sol
  - m : indice pour les valeurs moyennes d'étalonnage

La stabilité est assurée si  $H/L < 1/c$ , soit un coefficient de sécurité  $F > 1.0$ .

**La suffusion ou ségrégation interne** est l'entraînement des particules fines libres à travers les vides d'un sol de granulométrie discontinue.

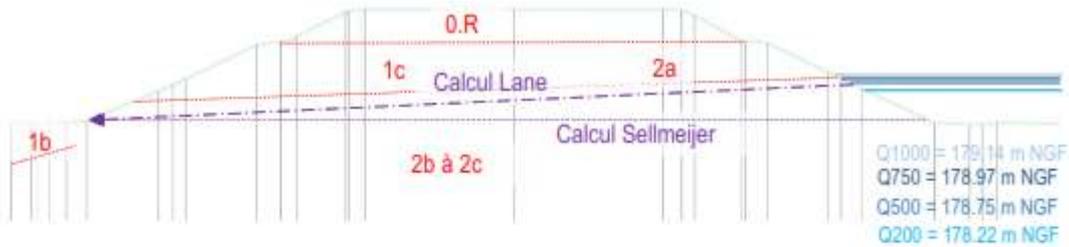
La stabilité du sol vis-à-vis de la suffusion se fait donc par l'étude des courbes granulométriques, ce critère est donc important, mais pas suffisant.



## 4.2 RESULTATS

### 7.2.1 Autoroute A77 : Profil SC25 – SC26 – FP1 - FP5

Coupe de principe :



Les calculs ont été réalisés selon les modèles ci-avant, en accord avec BRLI. Les hypothèses retenues et résultats des calculs sont les suivants :

Données géométriques			Sol concerné				Stabilité selon Sellmeijer	
Crue	Charge hydraulique	Largeur	Sol	$d_{70}$	Perméabilité	Angle de frottement	Coefficient de sécurité	Résultat
Q200	2.65 m	68.3 ml	2b à 2c	0.8 mm	$5.10^{-6}$ m/s	35 °	F = 4.0	OK
Q500	3.20 m						F = 3.3	OK
Q750	3.40 m						F = 3.1	OK
Q1000	3.60 m						F = 3.0	OK

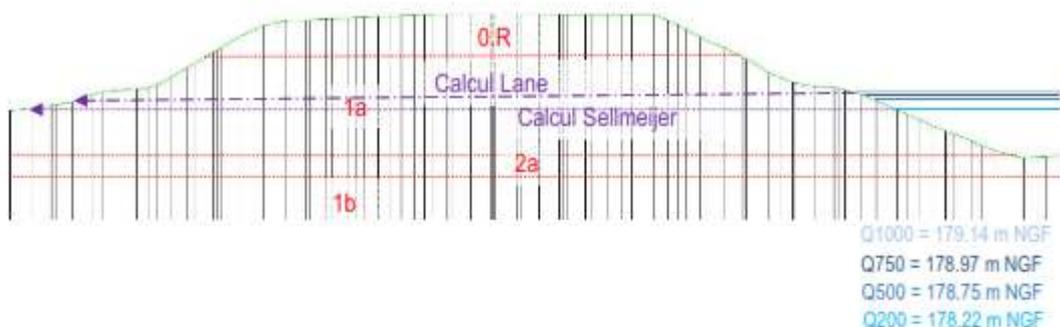
Données géométriques				Sol concerné		Stabilité selon Lane	
Crue	Charge hydraulique	Largeur	Hauteur	Sol	$i_c$	Coefficient de sécurité	Résultat
Q200	2.65 m	62.7 ml	2.65 m	2a	0.20	F = 1.8	OK
Q500	3.20 m	61.4 ml	3.20 m			F = 1.5	OK
Q750	3.40 m	60.9 ml	3.40 m			F = 1.4	OK
Q1000	3.60 m	60.5 ml	3.60 m			F = 1.3	OK

A noter que la suffusion est un risque potentiellement avéré pour les sols en place, même s'il n'existe à ce jour pas de méthode unanime permettant de statuer clairement.



### 7.2.2 Route Départementale 981 : Profil SC1 – FP11 – FP12

Coupe de principe :



Les calculs ont été réalisés selon les modèles ci-avant, en accord avec BRLi. Les hypothèses retenues et résultats des calculs sont les suivants :

Données géométriques			Sol concerné				Stabilité selon Sellmeijer	
Crue	Charge hydraulique	Largeur	Sol	$d_{70}$	Perméabilité	Angle de frottement	Coefficient de sécurité	Résultat
Q200	0.00 m	40.5 ml	1a	0.01 mm	$5.10^{-8}$ m/s	25 °	-	OK
Q500	0.45 m						F = 19.1	OK
Q750	0.65 m						F = 13.2	OK
Q1000	0.80 m						F = 10.7	OK

Données géométriques			Sol concerné		Stabilité selon Lane		
Crue	Charge hydraulique	Largeur	Hauteur	Sol	$i_c$	Coefficient de sécurité	Résultat
Q200	0.00 m	40.5 ml	0.00 m	1a	0.4	-	OK
Q500	0.25 m	36.7 ml	0.25 m			F = 20.0	OK
Q750	0.50 m	36.7 ml	0.50 m			F = 10.2	OK
Q1000	0.30 m	33.5 ml	0.30 m			F = 15.3	OK

A noter que la suffusion est un risque potentiellement avéré pour les sols en place, même s'il n'existe à ce jour pas de méthode unanime permettant de statuer clairement.



## 4.3 SYNTHÈSE

Ces résultats mettent en évidence l'absence de risque de rupture par érosion interne de la nouvelle ligne de défense projetée.

En termes de probabilité de rupture, pour le talus côté terre, il est utilisé la convention verbale de transformation numérique établi par Vick en 2002 :

Bilan de l'analyse du phénomène	Probabilité suggérée par Vick (2002)	Gamme de probabilité (Reagan et al. 1989)	Gamme de probabilité retenue (%)	Terminologie
Les conditions physiques connues et/ou les procédés peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance la non occurrence du phénomène	0.01	0 - 0.05	$P < 1$	Très improbable
Une certaine confiance dans la probabilité de non occurrence mais la possibilité inverse ne peut être écartée.	0.1	0.02 - 0.15	$1 \leq P < 5$	Improbable
La probabilité d'occurrence du phénomène ne peut plus être considérée comme négligeable			$5 \leq P < 15$	Très peu probable
Aucune raison de croire qu'un résultat est plus ou moins probable que l'autre	0.5	0.45 - 0.55	$15 \leq P < 50$	Peu probable
Une certaine confiance dans la probabilité d'occurrence mais la possibilité inverse ne peut être écartée	0.9	0.75 - 0.90	$50 \leq P < 90$	Probable
Les conditions physiques connues et/ou les procédés peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance l'occurrence du phénomène	0.99	0.90 - 0.995	$P > 90$	Très probable

Sur cette base et en considérant que les calculs réalisés conduisent en une certaine confiance en la non occurrence de la rupture par érosion interne, il est proposé de retenir les probabilités de rupture suivantes :

A77	Q200	Q500	Q750	Q1000
P (%)	1%	3%	4%	5%

RD981	Q200	Q500	Q750	Q1000
P (%)	<1%	<1%	<1%	<5%





**BRL**  
*Ingénierie*



[www.brl.fr/brli](http://www.brl.fr/brli)

*Société anonyme au capital de 3 183 349 euros  
SIRET : 391 484 862 000 19 - RCS : NÎMES B 391 484 862  
N° de TVA intracom : FR 35 391 484 862 000 19*

1105, avenue Pierre Mendès-France  
BP 94001 - 30 001 Nîmes Cedex 5  
FRANCE  
Tél. : +33 (0) 4 66 87 50 85  
Fax : +33 (0) 4 66 87 51 09  
e-mail : [brli@brl.fr](mailto:brli@brl.fr)