

SOMMAIRE

1	CONTEXTE GENERAL ET OBJET DE LA NOTE.....	1
1.1	SECTEUR D'ETUDE	1
1.2	CONCEPTION DE CONFORTEMENT RETENUE	3
1.3	OBJET DE LA NOTE	4
1.4	REFERENCES.....	4
2	CONTEXTE GEOLOGIQUE	5
3	CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	6
4	HISTORIQUES DES CAMPAGNES DE SONDAGES	8
4.1	CAMPAGNES DE RECONNAISSANCE	8
4.2	SONDAGES IN-SITU EXPLOITES DANS LE CADRE DE L'ETUDE	8
4.3	ESSAIS DE LABORATOIRE	9
5	ANALYSE DES CAMPAGNES	12
5.1	INTERPRETATION SELON LES ABAQUES DE ROBERTSON.....	12
5.2	LITHOLOGIE GENERALE RETENUE EN RIVE GAUCHE	16
5.3	ANALYSE SPECIFIQUE AU PK115.....	16
5.4	ANALYSE SPECIFIQUE AU PK113,3.....	17
5.5	COHESION ET ANGLE DE FROTTEMENT	19
6	MODELE GEOTECHNIQUE.....	20
6.1	ANALYSE SPECIFIQUE AU PK115.....	20
6.2	ANALYSE SPECIFIQUE AU PK113,3.....	20
7	METHODE DE CALCUL DES FICHES DES PALPLANCHES.....	21

7.1	MODELE GEOMETRIQUE	21
7.2	METHODE DE CALCUL MEL	22
7.3	ELU STABILITE D'ENSEMBLE	22
7.4	ELU ELS STABILITE INTERNE	23
7.5	STABILITE EXTERNE AU GLISSEMENT	23
7.6	GEOMETRIE ET CARACTERISTIQUES DES PALPLANCHES	24
7.7	INCLINAISON DE LA POUSSEE / BUTEE	26
7.8	ACTIONS ET COMBINAISONS D'ACTIONS	26
7.9	CRITERES DE DIMENSIONNEMENT	26
7.9.1	Déplacement limite	26
7.9.2	Résistance des palplanches	27
8	RESULTATS DES VERIFICATIONS	27
8.1	VERIFICATION ELU STABILITE D'ENSEMBLE	27
8.2	LONGUEURS DE PALPLANCHES RETENUES	27
8.3	VERIFICATION DE LA RESISTANCE DES PALPLANCHES	28
8.3.1	Phases de calcul	28
8.3.2	Déplacements, moments et efforts tranchants	28
8.3.3	Vérification de la stabilité structurelle des palplanches	29
8.4	VERIFICATION DE LA STABILITE AU GRAND GLISSEMENT	30
9	ANALYSE DES RISQUES DE REFUS	30

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1	MODELE DE CALCUL MEL	1
----------	----------------------------	---

ANNEXE 2	VERIFICATION	STRUCTURELLE	DES
PALPLANCHES2			

ANNEXE 3	RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT	4
----------	------------------------------------	---

ANNEXE 4 DETAILS DES MODELES K-REA1

ANNEXE 5 LOCALISATION ET JUXTAPOSITION DES SONDAGES 7

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : PK 113,3 : tronçons déversés de jonction avec le wateringue.....	1
Figure 2 : PK 115,25 : tronçon droit déversé.....	1
Figure 3 : PK 115,25 : tronçons déversés de jonction avec le wateringue.....	2
Figure 4 : Coupe des travaux.....	3
Figure 5 : Carte géologique de la commune de Watten et de Saint-Momelin	5
Figure 6 : Localisation des piézomètres (source Arcadis)	6
Figure 7 : log de SC2	10
Figure 8 : Schéma du modèle géométrique au PK 113,3	21
Figure 9 : Schéma du modèle géométrique au PK 115	21
Figure 10 : Exemple d'une vérification au grand glissement réalisée pour la TF en RG	23
Figure 11 : Caractéristiques de la palplanche ZZ 12-770 d'Altifers (Valétudes).....	24
Figure 12 : Caractéristique de la palplanche AZ 12-770 d'Arcelor Mittal	25
Figure 13 : Synthèse des résultats de dimensionnement à l'ELS au PK 113,3.....	4
Figure 14 : Synthèse des résultats de dimensionnement à l'ELU au PK 113,3	4
Figure 15 : Synthèse des diagrammes des efforts internes et des pressions appliquées en phase de décrue au PK 113,3	4
Figure 16 : Synthèse des résultats de dimensionnement à l'ELS au PK 115.....	5
Figure 17 : Synthèse des résultats de dimensionnement à l'ELU au PK 115	5
Figure 18 : Synthèse des diagrammes des efforts internes et des pressions appliquées en phase de décrue au PK 115.....	5

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : relevés piézométriques (source Arcadis).....	7
Tableau 2 : Essais exploités	8
Tableau 3 : Résultats des essais de laboratoire	9
Tableau 4 : Utilisation de l'abaque de Robertson (1990)	13
Tableau 5 : Analyse des 15 points de sondage.....	15
Tableau 6 : Lithologie au PK 115 (CPT2 ²⁰²²)	16

Tableau 7 : Lithologie au PK 115 (SP2, CPT2)	17
Tableau 8 : Lithologie au PK 113,3	17
Tableau 9 : Lithologie au PK 113,3 (CPT1/SP1)	18
Tableau 10 : Caractéristiques de sols retenues à la rupture.....	19
Tableau 11 : Annexe néerlandaise à l'Eurocode 7	19
Tableau 12 : Lithologie au PK 115	20
Tableau 13 : Lithologie au PK 113,3	20
Tableau 14 : Caractéristiques de la palplanche AZ 12-770	25
Tableau 15 : Caractéristiques de la palplanche AZ 14-770	26
Tableau 16 : Phasage	26
Tableau 17 : Longueur de palplanche optimisée par secteurs et par situation de calcul.....	27
Tableau 18 : Longueur de palplanche retenue par secteurs.....	28
Tableau 19 : Efforts internes dans les palplanches par secteurs et par phase de calcul	29
Tableau 20 : Synthèse de la vérification structurelle des palplanches	29

1 CONTEXTE GENERAL ET OBJET DE LA NOTE

1.1 SECTEUR D'ETUDE

Le projet concerne la restauration des berges du canal à grand gabarit rivière de l'Aa dans la traversée des communes de Watten et Saint Momelin (département du Nord), sur des secteurs bien spécifiques :

- PK113,30 au droit de la jonction avec un wateringue (cf. plan 21F163_PRO_ISL_006),
- PK115,25 au droit de la jonction avec un wateringue (cf. plan 21F163_PRO_ISL_007),
- PK115,00 à 115,070 sur environ 60 ml (cf. plan 21F163_PRO_ISL_007).

Ces secteurs ont en commun la protection de la berge par un rideau de palplanches en béton dont les caractéristiques ne sont pas connues. Ces rideaux ont commencé à basculer ou ne sont plus visibles car ils ont déjà basculé dans le canal.

Les photographies suivantes présentent les différents secteurs.



Figure 1 : PK 113,3 : tronçons déversés de jonction avec le wateringue



Figure 2 : PK 115,25 : tronçon droit déversé



Figure 3 : PK 115,25 : tronçons déversés de jonction avec le wateringue

1.2 CONCEPTION DE CONFORTEMENT RETENUE

Les travaux en rive droite consistent à mettre en place un nouveau rideau de soutènement au droit des zones endommagées :

- Les talus seront purgés et les enrochements en place évacués.
- Le nouveau rideau sera enfoncé à l'arrière du rideau existant déversé.
- Une fois le soutènement mis en place, le rideau existant sera évacué.
- Un remblaiement des talus est prévu pour récupérer la pente initiale., par un matériau granulaire 50-200 mm,
- Une couche de terre végétale de 20 cm, avec ensemencement, vient finaliser le remblai.

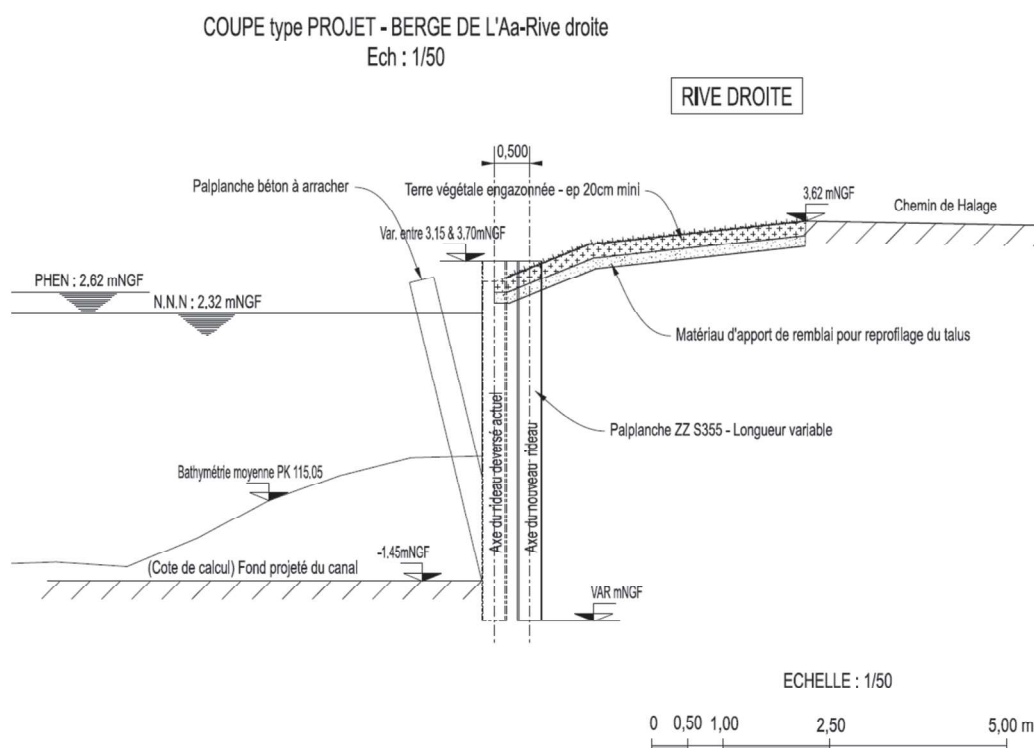


Figure 4 : Coupe des travaux

1.3 OBJET DE LA NOTE

Cette note constitue **le rapport G2-PRO pour la rive droite**. Elle définit les différents modèles géologiques et présente les calculs nécessaires de dimensionnement des fiches des palplanches.

Elle reprend les méthodes et approches mises en œuvre pour la rive droite.

1.4 REFERENCES

Arcadis. (2004). *Annexe du rapport de diagnostic des berges de l'Aa*.

Arcadis. (2006). *Synthèse géotechnique*.

Fondasol. (2015). *Synthèse géotechnique*.

Géomètres experts. (2021). *Rapport bathymétrique complémentaire de l'Overstel et de la rive droite*.

Hydrogéotechnique. (2016). Profil géologique le long de la rive gauche.

Hydrogéotechnique. (2016). *Rapport géotechnique*.

Hydrogéotechnique. (2022). *Compte rendu des sondages 2021 - PK 113,6-113,7 et PK 115-115,2*

2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le contexte géologique est caractérisé par la présence abondante en profondeur d'Argile des Flandres. Cette argile est la principale formation géologique de la plaine de Flandres dont elle constitue le soubassement. Elle forme une couche de forte épaisseur généralement affleurante sauf sur la cote. C'est une argile raide, très plastique (en général $30 < I_p < 50$), fortement surconsolidée et considérée comme très peu perméable. Ces caractéristiques mécaniques sont relativement constantes.

Elle est généralement recouverte de formations sableuses plus ou moins limoneuses.

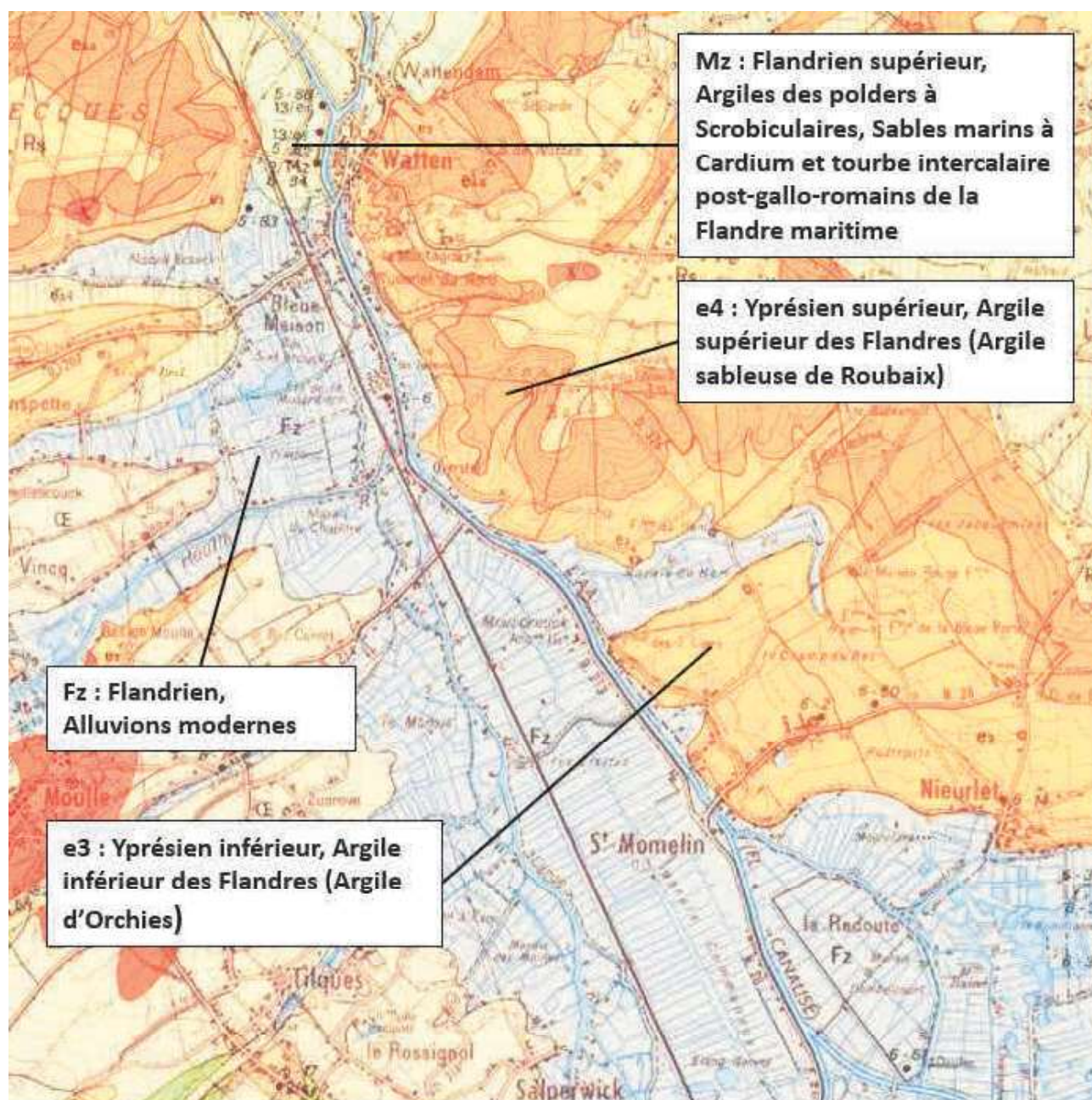


Figure 5 : Carte géologique de la commune de Watten et de Saint-Momelin

L'argile des Flandres peut être altérée sur plusieurs mètres de profondeur et peut se subdiviser en Argile de Roubaix au sommet et en Argile d'Orchies à la base.

3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Le contexte hydrogéologique est caractérisé par les aquifères suivants :

- circulations superficielles contenues au sein des remblais,
- nappe alluviale,
- nappe des Sables d'Ostricourt,
- nappe de la Craie.

Arcadis a procédé à la pose de 6 piézomètres dans la berge du canal et à leur suivi entre décembre 2005 et septembre 2006 (10 mois). La localisation des piézomètres est présentée sur la figure suivante. La zone d'étude correspond aux piézomètres Pz4, Pz5 et Pz6.

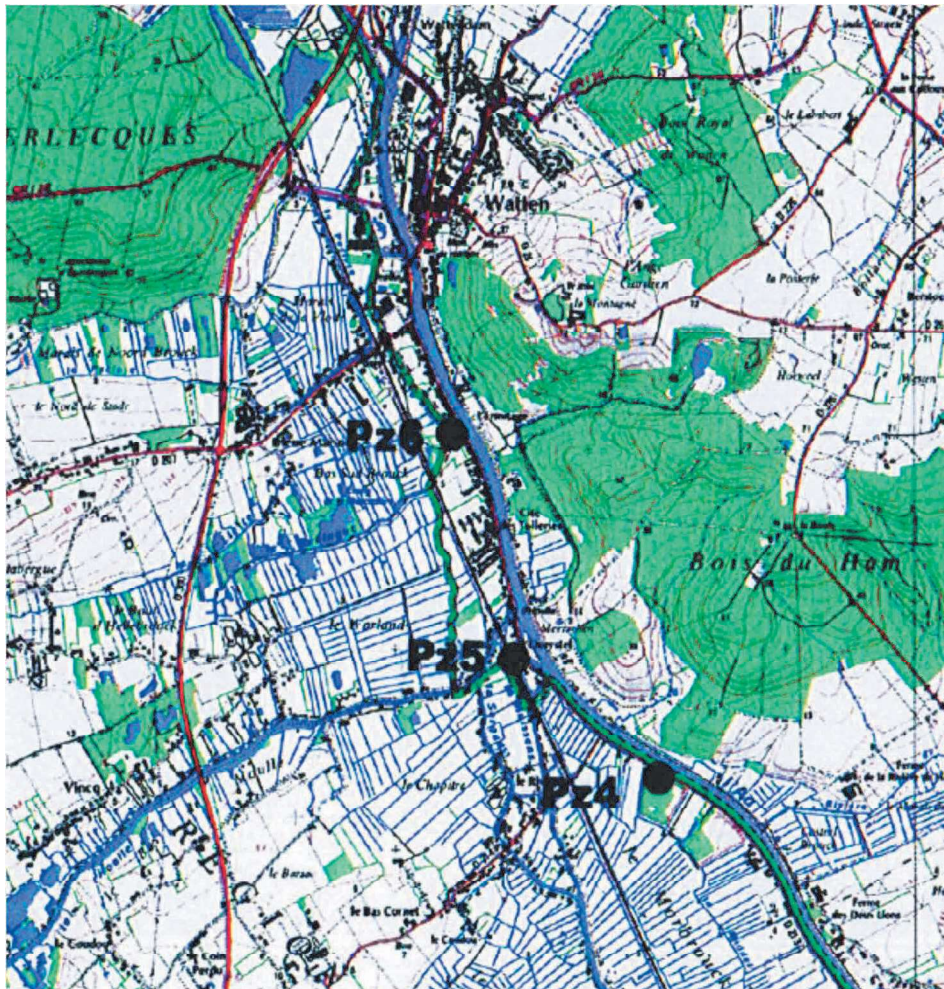


Figure 6 : Localisation des piézomètres (source Arcadis)

Le tableau suivant présente les relevés mis à disposition d'ISL.

Tableau 1 : relevés piézométriques (source Arcadis)

DATE	PZ1		PZ2		PZ3		PZ4		PZ5		PZ6	
	Prof (m)	Cote (NGF)	Prof (m)	Cote (NGF)	Prof (m)	Cote (NGF)	Prof (m)	Cote (NGF)	Prof (m)	Cote (NGF)	Prof (m)	Cote (NGF)
21/12/2005	1.54	2.32	1.35	2.49	1.26	2.32						
23/12/2005	1.52	2.34	1.30	2.54	1.23	2.35	1.11	2.89				
11/01/2006	1.52	2.34	1.34	2.50	1.21	2.37	1.74	2.26				
30/01/2006	1.56	2.30	1.52	2.32	1.32	2.26	1.77	2.23	1.87	2.10	1.34	2.17
07/02/2006	1.58	2.28	1.52	2.32	1.36	2.22	1.78	2.22	1.77	2.20	1.33	2.18
16/02/2006	1.37	2.49	1.26	2.58	1.40	2.18	1.65	2.35	1.60	2.37	1.17	2.34
07/03/2006	1.58	2.28	1.46	2.38	1.34	2.24	1.72	2.28	1.75	2.22	1.31	2.20
16/03/2006	1.56	2.30	1.41	2.43	1.30	2.28	1.75	2.25	1.74	2.23	1.29	2.22
21/03/2006	1.56	2.30	1.46	2.38	1.34	2.24	1.76	2.24	1.75	2.22	1.31	2.20
27/03/2006	1.57	2.29	1.45	2.39	1.38	2.20	1.75	2.25	1.75	2.22	1.28	2.23
04/04/2006	1.56	2.30	1.39	2.45	1.35	2.23	1.74	2.26	1.73	2.24	1.30	2.21
12/04/2006	1.56	2.30	1.44	2.40	1.38	2.20	1.73	2.27	1.71	2.26	1.28	2.23
02/05/2006	1.70	2.16	1.57	2.27	1.45	2.13	1.83	2.17	1.82	2.15	1.35	2.16
12/05/2006	1.66	2.20	1.46	2.38	1.42	2.16	1.77	2.23	1.80	2.17	1.32	2.19
19/05/2006	1.62	2.24	1.20	2.64	1.40	2.18	1.80	2.20	1.75	2.22	1.31	2.20
30/05/2006	1.62	2.24	1.15	2.69	1.36	2.22	1.79	2.21	1.74	2.23	1.32	2.19
02/08/2006	1.79	2.07	1.53	2.31	1.47	2.11	1.81	2.19	1.80	2.17	1.35	2.16
15/09/2006	1.64	2.22	1.59	2.25	1.44	2.14	1.79	2.21	1.79	2.18	1.32	2.19

Sans surprise, à l'exception d'une mesure (Pz4 le 23/12/2005) à 2,89 m NGF que l'on attribue à une erreur de mesure ou de report, toutes les valeurs sont à moins d'un décimètre du niveau normal de navigation. **Le niveau d'eau dans la berge est donc le niveau imposé par le canal.**

4 HISTORIQUES DES CAMPAGNES DE SONDAGES

4.1 CAMPAGNES DE RECONNAISSANCE

Sur le linéaire de l'étude, les résultats de 2 campagnes de sondage hydrogéotechniques sont exploitables pour l'étude :

- Campagne réalisée en 2016 sur un secteur plus vaste mais en rive gauche,
- Campagne spécifique à la présente note réalisée en 2022.

Il convient de préciser que l'analyse intègre également acquise au travers d'une campagne réalisée par Arcadis en 2006 sur un périmètre plus large mais principalement en rive gauche.

4.2 SONDAGES IN-SITU EXPLOITES DANS LE CADRE DE L'ETUDE

Le tableau suivant présente les essais in-situ réalisés **dans le périmètre de l'étude**. Ils ont été réalisés depuis le haut de berge. Ils sont localisés sur le plan inséré en annexe qui présente également leur juxtaposition.

Les sondages CPT1²⁰²² et CPT2²⁰²² sont réalisés respectivement au PK 115,0 et 113,6 soit dans la zone des désordres à traiter.

Tableau 2 : Essais exploités

Dénomination	PK	Type d'essai	Année	Profondeur (ml)	Rive
CPT1 ²⁰²²	~ 113,3	Essais au cône de pénétration statique (CPT)	2022	15 m	Rive droite
CPT2 ²⁰¹⁶	~ 113,5	Essais au cône de pénétration statique (CPT)	2016	19 m	Rive droite
SC203 ²⁰¹⁶	~ 113,5	Sondage carotté	2016	19 m	Rive gauche
SC1/SP1 ²⁰²²	~ 113,7	Sondage carotté et essai pressiométrique	2022	21 m	Rive droite
SC204 ²⁰¹⁶	~ 113,7	Sondage carotté	2016	20 m	Rive gauche
CPT3 ²⁰¹⁶	~ 114,0	Essais au cône de pénétration statique (CPT)	2016	16 m	Rive droite
CPT2 ²⁰²²	~ 115,0	Essais au cône de pénétration statique (CPT)	2022	17 m	Rive droite
SC2/SP2 ²⁰²²	~ 115,0	Sondage carotté et essai pressiométrique	2022	20 m	Rive droite

4.3 ESSAIS DE LABORATOIRE

Le tableau suivant présente les essais de laboratoire réalisés sur des prélèvements d'échantillons intacts au droit des sondages SC1 et SC2.

Tableau 3 : Résultats des essais de laboratoire

Sondage	Profondeur	Lithologie rencontrée	Type d'essais	C' [kPa]	Phi' [°]
SC1	2 m	Limon sableux marron clair	Triaxial CU+u	7	29
	5 m	Sable fin gris foncé	Cisaillement rectiligne à la boîte	17	33
	10,15 m	Sable fin gris humide	Cisaillement rectiligne à la boîte	9	33
	10,8 m	Sable fin gris humide	Cisaillement rectiligne à la boîte	10	33
SC2	2,5 m	Sable fin gris humide	Cisaillement rectiligne à la boîte	18	32
	6,6 m	Argile plastique grise	Triaxial CU+u	30	14
	10,1 m	Argile marron foncé	Triaxial CU+u	16	12
	15,9 m	Argile gris foncé compact	Triaxial CU+u	5	21

Les résultats de ces essais ne sont pas jugés directement exploitables pour la présente étude.

En effet, la lithologie fait état d'une grande hétérogénéité dans le détail (cf. log ci-dessous) où seul l'horizon d'argile des Flandres constitue un horizon à peu près homogène.

		Contrat C.21.33.063	
		SAINT MOMELIN RD - AA	
Date début : 25/05/2021		Cote NGF : 3.57	Profondeur : 0,00 - 20,00 m
		Machine : H750	X : 1646867.23
			Y : 9288579.39
Forage : SC2		EXGTE 3.20/GYE	
Profondeur	Lithologie	Outil	Récupération (%)
0	Terre végétale à limon sableux noir + cailloux et cailloutis diverses	Carotier Ø110mm	100
0,40 m			
1	Sable fin gris à racines		80
0,62 m			
2	Limon marron foncé à cailloutis diverses		75
1,22 m			
3	Tourbe noire à quelques débris diverses		100
1,50 m			
4	Limon sableux gris foncé humide		100
2,40 m			
5	Sable fin gris humide		100
4,95 m			
6	Argile plastique grise		100
6,00 m			
7	Argile sableuse grise humide		100
6,11 m			
8	Argile plastique grise		100
6,92 m			
9	Argile marron foncé		100
10,50 m			
11	Limon argileux marron		100
10,65 m			
12	Argile marron		100
13,50 m			
15	Argile gris foncé compact		100
16,50 m			
17	Argile grise molle		100
17,16 m			
18	Argile grise compact		100
18,10 m			
19	Argile grise molle		100
18,53 m			
20	Argile gris foncé compact		
20,00 m			

Logiciel JEAN LUTZ S.A. - www.jeantlutzsa.fr

Figure 7 : log de SC2

Au sein d'un horizon, les résultats des essais réalisés sur l'un des matériaux composant l'horizon ne peuvent donc être utilisés pour caractériser l'horizon.

Dans le modèle géologique, les horizons considérés dans la suite de l'étude ont principalement été définis sur la base des propriétés mécaniques de résistance que l'on peut déduire des CPT1²⁰²² et CPT2²⁰²². Chacun des horizons considérés peut donc regrouper des alternances de matériaux contrastés.

On signale par ailleurs qu'on peut douter de la pertinence des essais de cisaillement rectiligne à la boîte qui font état de cohésions comprises entre 5 et 30 kPa.

5 ANALYSE DES CAMPAGNES

5.1 INTERPRETATION SELON LES ABAQUES DE ROBERTSON.

Nota : les éléments ci-dessous sont issus de la mission G2-PRO réalisés sur 12 CPT de rive gauche. Ils sont repris car les conclusions s'appliquent à la rive droite.

Pour bien caractériser la lithologie, il est nécessaire d'être en mesure d'associer une signature au CPT pour les différents matériaux.

Pour 15 points localisés (pour ceux appartenant au secteur des travaux) sur le plan 21F163-PRO-ISL-008 (qui correspond à la rive gauche), des associations ont été réalisées en utilisant l'un des abaques proposés par Robertson et les logs des sondages carottés disponibles.

L'abaque de Robertson utilise les grandeurs Q_t (résistance de pointe normalisée) et R_f (rapport de frottement).

Les 15 points retenus ne correspondent qu'aux alluvions (et pas au remblai hétérogène de surface).

Pour mémoire :

Les données brutes mesurées par le CPT sont la résistance de pointe (q_c) et le frottement sur le manchon (f_s).

Le log du forage présente également le rapport de frottement $R_f = \frac{q_c}{f_s}$

Une mesure de la pression interstitielle u est proposée. Toutefois, s'agissant d'un canal avec un niveau constant, elle a été recalculée à partir du niveau du canal.

La résistance de pointe q_c doit être corrigée en résistance nette à l'aide de la formule suivante.

$$q_t(z) = q_c(z) + (1 - a) \cdot u(z)$$

Le coefficient « a » dépend de la dimension de la pointe (0,45 à 0,58). Dans le cas présent du projet, la correction peut être négligée car q_c est de l'ordre de 1000 à 10 000 kPa alors que $(1-a) \cdot u$ est au maximum de l'ordre de 100 kPa.

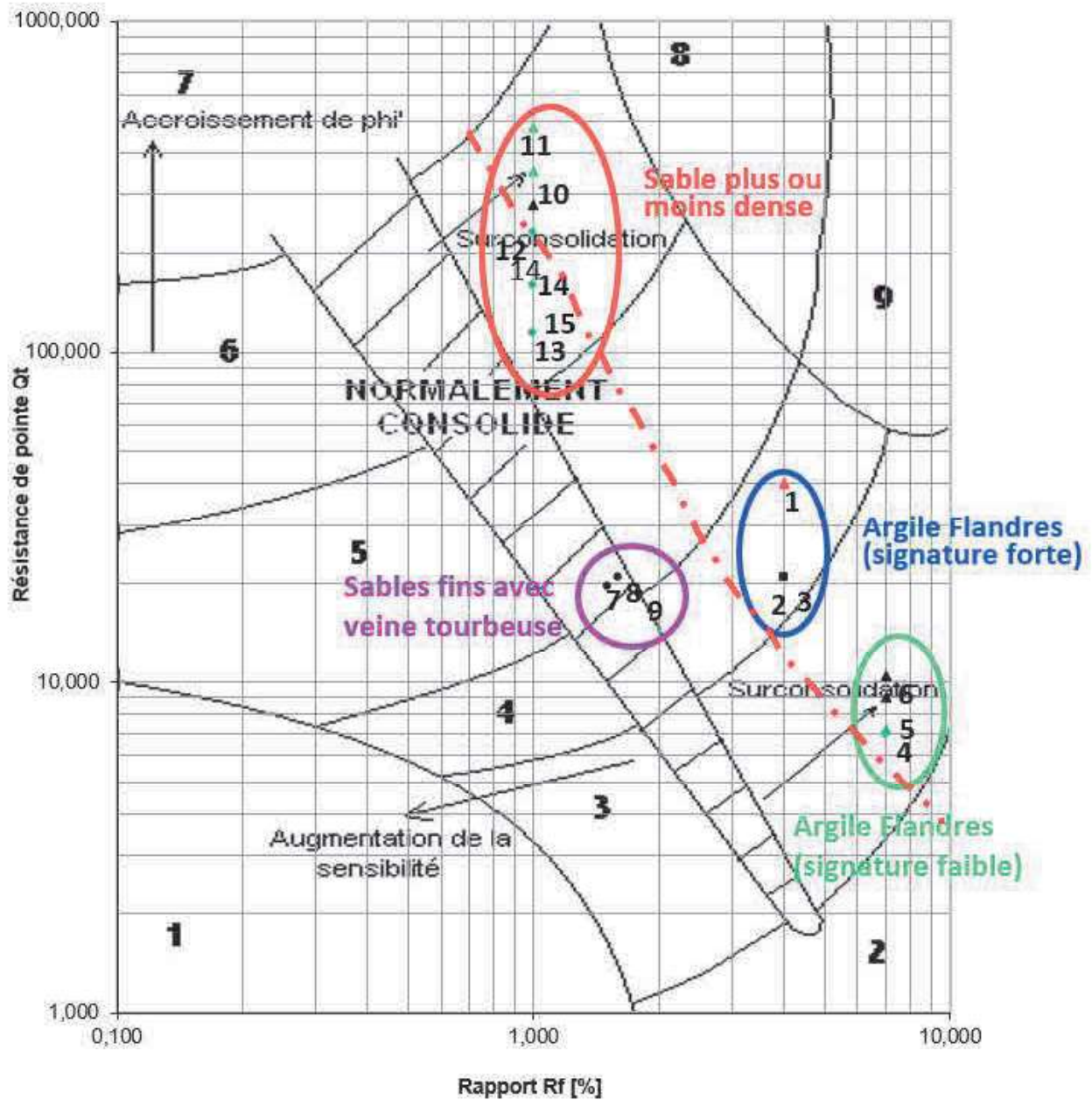
La résistance de pointe normalisée est donnée par la formule :

$$Q_t(z) = \frac{(q_t(z) - \sigma_{v0}(z))}{(\sigma_{v0}(z) - u(z))}$$

Avec $\sigma_{v0}(z)$ contrainte effective à la profondeur z appréciée de manière simplifiée en considérant une densité moyenne des terrains de 1,8.

Les 15 points analysés sont présentés ci-après sur l'abaque de Robertson.

Tableau 4 : Utilisation de l'abaque de Robertson (1990)



- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1. matériaux fins sensibles | 2. matériaux organiques, tourbes, |
| 3. argile à argile limoneuse | 4. limon argileux à argile limoneuse, |
| 5. sable limoneux à limon sableux | 6. sable : sable propre ou sable limoneux |
| 7. sable graveleux à sable, | 8. sable surconsolidé à sable argileux |
| 9. sol fin très raide (surconsolidé) | |

Le tableau suivant présente, pour chacun des 15 échantillons :

- L'horizon-type auquel il a été associé sur le profil en long géotechnique,
- Les q_c et R_f moyens,
- La nature selon la classification de Robertson,
- La nature selon l'interprétation des sondages carottés et tarières proches,
- L'état de consolidation que l'on peut déduire de la position des points au sein d'une classe (1 à 9) sur l'abaque de Robertson.

Tableau 5 : Analyse des 15 points de sondage

N° point de sondage	Horizon-type	qc moyen (Mpa)	Rf moyen (%)	Nature selon Robertson	Nature selon interprétation du SC/TAR	Consolidation selon Robertson
1	Argile Flandres	2	4	Limon argileux à argile limoneuse	Argile beige gris parfois veiné	Surconsolidé
2	Argile Flandres	2	4	Limon argileux à argile limoneuse	-	Surconsolidé
3	Argile Flandres	1.8	4	Limon argileux à argile limoneuse	-	Surconsolidé
4	Signature faible	0.5	7	Argile à argile limoneuse	-	Surconsolidé
5	Signature faible	0.7	8	Argile à argile limoneuse	Tourbe brun-noir	Surconsolidé
6	Signature faible	0.8	7	Argile à argile limoneuse	-	Surconsolidé
7	Sable fin à veine tourbeuse	2	1.6	Sable limoneux à limon sableux	-	Normalement consolidé
8	Sable fin à veine tourbeuse	2	1.5	Sable limoneux à limon sableux	Sable fin gris	Normalement consolidé
9	Sable fin à veine tourbeuse	2	1.8	Sable limoneux à limon sableux	-	Normalement consolidé
10	Sable dense	22	1	Sable propre ou sable limoneux	Sable gris	Surconsolidé
11	Sable dense	30	1	Sable propre ou sable limoneux	Sable gris	Surconsolidé
12	Sable dense	20	1	Sable propre ou sable limoneux	-	Surconsolidé
13	Sable moyennement dense	4	1	Sable propre ou sable limoneux	-	Légèrement surconsolidé
14	Sable moyennement dense	8	1	Sable propre ou sable limoneux	Sable gris	Légèrement surconsolidé
15	Sable moyennement dense	7	1	Sable propre ou sable limoneux	-	Légèrement surconsolidé

5.2 LITHOLOGIE GENERALE RETENUE EN RIVE GAUCHE

En rive gauche, les signatures correspondant à ces échantillons ont été exploitées pour interpréter les logs de tous les CPT en les regroupant dans 5 catégories :

- Remblai,
- Sable légèrement surconsolidé à surconsolidé,
- Sable fin normalement consolidé avec veines tourbeuses
- Argile des Flandres avec une signature forte au CPT (surconsolidée),
- Argile des Flandres avec une signature faible au CPT (surconsolidée).

5.3 ANALYSE SPECIFIQUE AU PK115

Le sondage CPT2²⁰²² (rive droite) et son insertion au sein des sondages voisins permet d'établir la lithologie figurée dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Lithologie au PK 115 (CPT2 ²⁰²²)

Profondeur m NGF	Horizon-type	qc moyen (Mpa)	Rf moyen (%)	Nature selon Robertson	Nature selon interprétation du SC2022	Consolidation selon Robertson
+4 à +2	Sables fins et tourbes	1	3	Sable limoneux à limons sableux	argile, limon	Normalement consolidé
+2 à -1	Sable moyennement dense	5	1	Sable propre ou sable limoneux	sable, tourbe, argile	Légèrement surconsolidé
-1 à -11	Argile Flandres	2	4	Limon argileux à argile limoneuse	Argile, tourbe, sable fin	Surconsolidé

Ces données peuvent être confrontés au sondage pressiométrique SP2, réalisé à proximité immédiate de CPT2 (cf. tableau suivant).

Tableau 7 : Lithologie au PK 115 (SP2, CPT2)

Profondeur m NGF	Horizon-type	qc moyen (Mpa)	Nature selon Robertson	Consolidation selon Robertson	PI* (MPa)	Etat selon PI*
+4 à +2	Sables fins et tourbes	1	Sable limoneux à limons sableux	Normalement consolidé	0,1 à 0,4	Lâche ou mou
+2 à -1	Sable lâche à moyennement dense	5	Sable propre ou sable limoneux	Légèrement surconsolidé	0,4 à 1,1	Lâche à moyennement compact
-1 à -11	Argile Flandres	2	Limon argileux à argile limoneuse	Surconsolidé	0,6 à 1,8	Argiles fermes

5.4 ANALYSE SPECIFIQUE AU PK113,3

Le sondage CPT1²⁰²² (rive droite) permet d'établir la lithologie figurée dans le tableau suivant.

Tableau 8 : Lithologie au PK 113,3

Profondeur m NGF	Horizon-type	qc moyen (Mpa)	Rf moyen (%)	Nature selon Robertson	Nature selon interprétation des SC	Consolidation selon Robertson
+3,5 à +0,5	Sables fins et tourbe	0,5	3	Sable limoneux à limon sableux	Sable fin, tourbe, limon sableux	Normalement consolidé
+0,5 à -3	Sable moyennement dense	6	0,5	Sable propre ou sable limoneux	Sable fin, argile	Légèrement surconsolidé
-3 à -5	Sables fins et tourbe	1	10	Tourbe	Argile	Normalement consolidé
-5 à -8,5	Sable lâche à moyennement dense	4	2	Sable propre ou sable limoneux	Argile, sable fin	Légèrement surconsolidé
-8,5 à -12	Argile Flandres	2	4	Limon argileux à argile limoneuse	Argile, tourbe, sable fin	Surconsolidé

Ces données peuvent être confrontés au sondage pressiométrique SP1, le plus proche du CPT1 en rive droite. SP1 et CPT1 sont distants d'environ 400 m ce qui est important. D'autant que la juxtaposition des sondages (CPT1²⁰²², SC203²⁰¹⁶, CPT2²⁰¹⁶, SC1/SP1²⁰²²) permet d'estimer qu'il existe une certaine variabilité.

Tableau 9 : Lithologie au PK 113,3 (CPT1/SP1)

Profondeur m NGF	Horizon-type	qc moyen (Mpa)	Nature selon Robertson	Consolidation selon Robertson	PI* (MPa)	Etat selon PI*
+3,5 à +0,5	Sables fins et tourbe	0,5	Sable limoneux à limon sableux	Normalement consolidé	0,1 à 0,3	Lâche ou mou
+0,5 à -3	Sable lâche à moyennement dense	6	Sable propre ou sable limoneux	Légèrement surconsolidé	0,6 à 0,8	Lâche à moyennement compact
-3 à -5	Sables fins et tourbe	1	Tourbe	Normalement consolidé	0,1 à 0,4	Lâche ou mou
-5 à -8,5	Sable lâche à moyennement dense	4	Sable propre ou sable limoneux	Légèrement surconsolidé	0,5 à 0,8	Lâche à moyennement compact
-8,5 à -12	Argile Flandres	2	Limon argileux à argile limoneuse	Surconsolidé	0,2 à 0,3	molle

On relève une distorsion des résultats entre le CPT1²⁰²² et le SP1²⁰²² pour l'horizon situé entre -8,5 m et -12 m NGF. Les sondages autres que le CPT1²⁰²² conduisent à douter de la nature des matériaux. La présence d'un horizon différent plus en profondeur conduirait même à penser qu'il ne peut s'agir du soubassement constitué par l'argile des Flandres.

De manière prudente, on attribuera à cette couche les caractéristiques médiocres des sables fins avec veines tourbeuses.

5.5 COHESION ET ANGLE DE FROTTEMENT

Le tableau suivant présente les caractéristiques mécaniques retenues pour les différents horizons constitués à partir des différentes données disponibles dans le rapport G2-PRO de la rive gauche et des valeurs-guide de la littérature.

Tableau 10 : Caractéristiques de sols retenues à la rupture

	Cohésion drainée [kPa]	Angle de frottement interne drainé
Sable lâche à moyennement dense	0	32
Argile des Flandres	20	23
Sables fins avec veines tourbeuses	5	25

Les densités ont été appréciées à partir du tableau suivant et des résultats des CPT.

Tableau 11 : Annexe néerlandaise à l'Eurocode 7

Type de sol	Qualificatif	Compacité	q_c (MPa)	R_f (%)	γ inférieur (kN/m ³)	γ supérieur (kN/m ³)
gravier	-	modérée	10-20	<1%	18	20
		ferme	>20		19	21
	argileux ou limoneux	modérée	10-20	1-2%	19	21
		ferme	>20		20	22
Sable	-	faible	2-4	<1%	16	18
		modérée	4-10		17	19
	argileux ou limoneux	ferme	>10	1-2%	18	20
		faible	2-4		16	18
		modérée	4-10		17	19
		ferme	>10		18	20
Limon	-	très peu compacté	0,4-1	2-4%	17	17
		peu compacté	1-2		18	18
		moyennement compacté	2-4		19	19
		compacté	>4		20	20
	sableux	très peu compacté	0,4-1	1-3%	17	17
		peu compacté	1-2		18	18
		moyennement compacté	2-4		19	19
		compacté	>4		20	20
Argile	-	très peu compacté	0,4-1	3-6%	16	16
		peu compacté	1-2		17	17
		moyennement compacté	2-4		18	18
		compacté	>4		19	19
	sableux	très peu compacté	0,4-1	2-5%	16	16
		peu compacté	1-2		17	17
		moyennement compacté	2-4		18	18
		compacté	>4		19	19
Tourbe	-	très peu compacté	0,2-0,5	>6%	10	10
		peu compacté	0,5-1		12	12
		compacté	>1		14	14

6 MODELE GEOTECHNIQUE

6.1 ANALYSE SPECIFIQUE AU PK115

Le tableau suivant présente les caractéristiques retenues pour le modèle géotechnique sur ce secteur.

Tableau 12 : Lithologie au PK 115

Profondeur m NGF	Horizon-type	qc moyen (Mpa)	PI* (MPa)	Densité humide (kN/m3)	Cohésion drainée (kPa)	Angle de frottement interne drainée (°)
+4 à +2	Sables fins et tourbes	1	0,1 à 0,3	18	5	25
+2 à -1	Sable lâche à moyennement dense	5	0,6 à 0,8	18,5	0	32
-1 à -11	Argile Flandres	2	Non clairement identifiable en SP1	20	20	23

6.2 ANALYSE SPECIFIQUE AU PK113,3

Le tableau suivant présente les caractéristiques retenues pour le modèle géotechnique sur ce secteur.

Tableau 13 : Lithologie au PK 113,3

Profondeur m NGF	Horizon-type	qc moyen (Mpa)	PI* (MPa)	Densité humide (kN/m3)	Cohésion drainée (kPa)	Angle de frottement interne drainée (°)
+3,5 à +0,5	Sables fins et tourbe	0,5	0,1 à 0,4	18	5	25
+0,5 à -3	Sable lâche à moyennement dense	6	0,3 à 1,1	18,5	0	32
-3 à -5	Sables fins et tourbe	1	0,6 à 0,8	18	5	25
-5 à -8,5	Sable lâche à moyennement dense	4	0,8 à 1,0	18,5	0	32
-8,5 à -12	Sables fins et tourbe	2	0,2 à 0,3	18	5	25

7 METHODE DE CALCUL DES FICHES DES PALPLANCHES

7.1 MODELE GEOMETRIQUE

Un modèle géométrique a été défini pour les 2 secteurs (PK115 et 113,3) à partir des profils topographiques et bathymétriques dressés par un Géomètre Experts. Ce modèle est présenté sur la figure suivante.

Conformément aux hypothèses arrêtées en concertation avec VNF, pour le talus sous-fluvial, un fond horizontal à la cote -1,45 m NGF a été considéré. Sur la base des profils, cette cote est généralement atteinte à une distance d'environ 10 à 11 m des palplanches en béton armé.

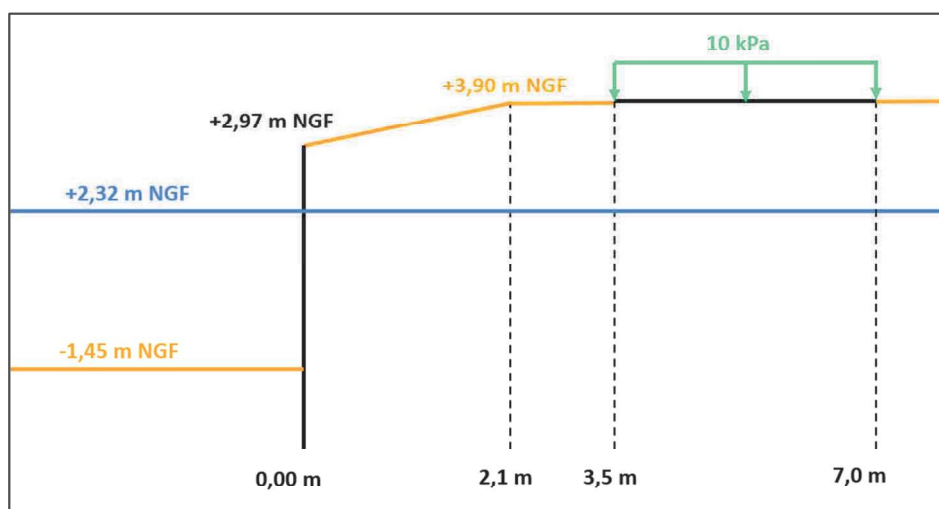


Figure 8 : Schéma du modèle géométrique au PK 113,3

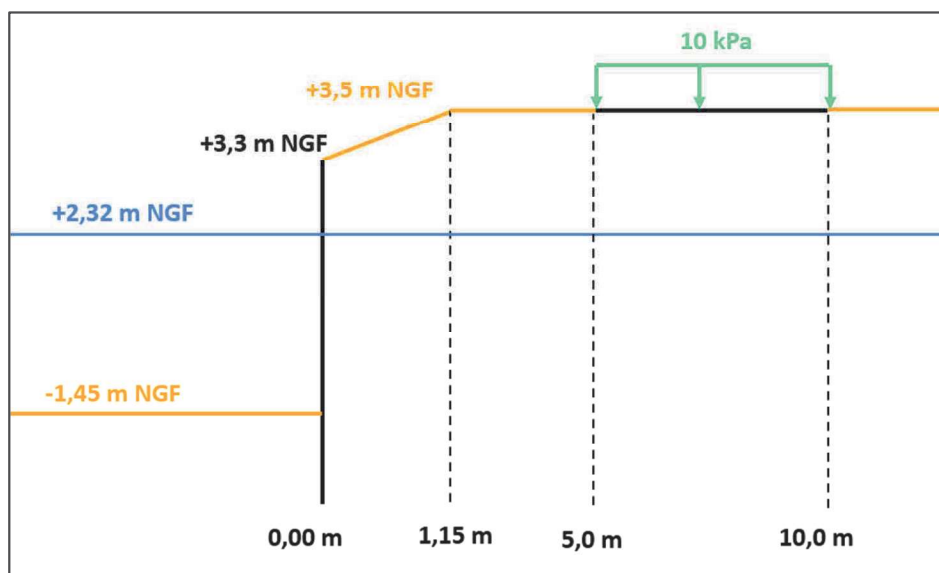


Figure 9 : Schéma du modèle géométrique au PK 115

7.2 METHODE DE CALCUL MEL

La détermination des longueurs minimales de fiche requises est effectuée à l'ELU fondamental en situation d'exploitation. Les objectifs du calcul sont les suivants :

- Vérifier la tenue du sol en évitant un mouvement d'ensemble de l'ouvrage.
- Vérifier la résistance interne des palplanches, en prenant en compte la corrosion.

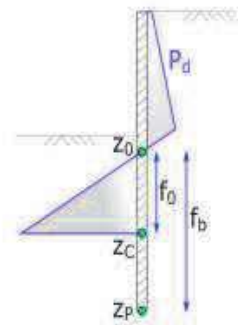
7.3 ELU STABILITE D'ENSEMBLE

Pour un rideau autostable, il convient de vérifier :

- La vérification des critères de conception de l'Eurocode 7 ;
- Le calcul de la fiche par un calcul aux équilibres limites imposés par la norme 94-282 (méthode MEL) :

- En vérifiant que la fiche disponible est supérieure, avec une sécurité suffisante, à la fiche minimale nécessaire à l'équilibre des moments lorsque l'inégalité suivante est satisfaite : $f_b \geq 1,2 f_0$ avec :

- $f_0 = (Z_0 - Z_c)$:
 - Z_0 cote du point de pression nul
 - Z_c cote du point de moment nul
- $f_b : (Z_0 - Z_p)$:
 - Z_0 cote du point de pression nul
 - Z_p cote de fiche de la palplanche

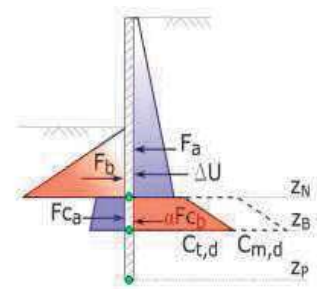


- En vérifiant que la contre-butée disponible sous le point de transition est suffisante pour équilibrer les efforts horizontaux lorsque l'inégalité suivante est satisfaite : $C_{t,d} < C_{m,d}$ avec :

- Z_n cote du point de transition entre butée et contre-butée
- Z_b cote de base effective de l'écran
- Z_p cote de base réelle de l'écran
- Majoration de la force de poussée F_a , la force de pression différentielle d'eau ΔU et de contre-poussée FC_a de 1,35 pour passer de :

- $C_{t,k}$: valeur caractéristique de la contre-butée nécessaire à l'équilibre des efforts horizontaux
- à $C_{t,d}$: valeur de calcul de la contre-butée

- Minoration de la force de butée F_b et de la force de contre-butée FC_b de 1,4 en phase définitive et 1,1 en phase provisoire pour passer de :
 - $C_{m,k}$ = valeur caractéristique de la contre-butée mobilisable entre Z_n et Z_b
 - à $C_{m,d}$: valeur de calcul de la contre-butée mobilisable entre Z_n et Z_b



Cette vérification se base sur les articles §9.1.2 et §9.3.1 de la NF P 94-282. Ce calcul est réalisé à l'aide du logiciel K-REA.

7.4 ELU ELS STABILITE INTERNE

La justification de stabilité interne de la structure aux Etats Limites Ultimes et de Services (ELU et ELS) suit les étapes suivantes :

- Calcul des efforts dans les palplanches à l'aide du logiciel K-REA (modèle MEL),
- Vérification des contraintes admissibles dans les palplanches conformément à l'Eurocode 3.

7.5 STABILITE EXTERNE AU GLISSEMENT

Il s'agit de vérifier que la sécurité vis-à-vis d'un grand glissement d'ensemble sous le rideau.

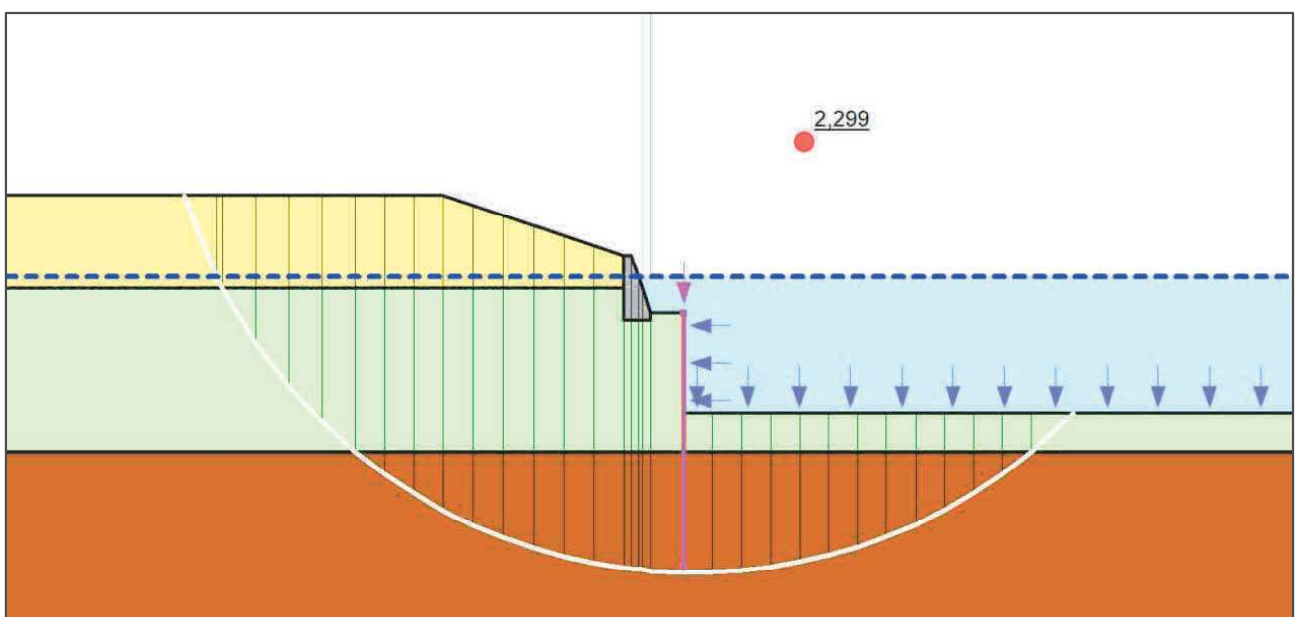


Figure 10 : Exemple d'une vérification au grand glissement réalisée pour la TF en RG

7.6 GEOMETRIE ET CARACTERISTIQUES DES PALPLANCHES

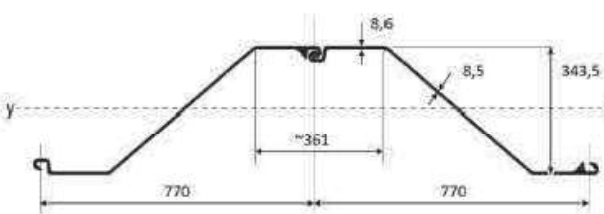
Les caractéristiques géométriques des palplanches considérées sont celles issues du commerce, et plus particulièrement les palplanches fabriquées par ALTIFERS titulaire d'un accord-cadre pour la fourniture des palplanches.

On retient les caractéristiques suivantes :

- Module d'Young $E = 210 \text{ GPa}$
- Poids volumique de l'acier : 7850 kg/m^3
- Nuance d'acier privilégiée S355 : résistance limite de traction de 355 MPa,
- Palplanches de profil Z.

Ce profil est préféré au profil U car il permet des gains substantiels en termes de poids. Il est cependant réputé plus difficile à mettre en œuvre par les entreprises.

Les palplanches utilisées lors des travaux précédents sont des ZZ 12-770 d'Altifers. Les caractéristiques de la palplanche sont les suivantes (encadrées en rouge).



	Sectional Area	Mass	Moment of Inertia	Elastic Section Modulus	Radius of Gyration	Coating Area*	Class**
	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	m ² /m	S 270GP S 355GP S 390GP S 430GP
ZZ12-770	S 92,99	72,8	16.557	964	13,34	1,96	
	D 186,0	145,6	33.115	1.928	13,34	3,92	
	W 120,8	94,5	21.496	1.252	13,34	2,55	2 3 3 3

Figure 11 : Caractéristiques de la palplanche ZZ 12-770 d'Altifers (Valétudes)

Arcelor Mittal propose un outil de calcul pour déterminer la résistance après corrosion en intégrant les spécificités du profil et de ses serrures (et éventuels connecteurs spéciaux). Il ne s'applique cependant qu'aux palplanches d'Arcelor Mittal.

Le catalogue d'Arcelor Mittal propose une palplanche AZ 12-770 d'Arcelor Mittal dont les caractéristiques sont les suivantes.

Caractéristiques palpl.	
	ini.
W _{el}	1245 cm ³ /m
W _{pl}	... cm ³ /m
I	21430 cm ⁴ /m
A	120,1 cm ² /m
t _f	8,50 mm
t _w	8,50 mm
h	344,0 mm
alpha	39,5 °
b	351,0 mm
c	527,5 mm
A _v	37,0 cm ² /m
S _y	740 cm ³ /m
r ₀	15,0 mm
masse	94,3 kg/m ²

Figure 12 : Caractéristique de la palplanche AZ 12-770 d'Arcelor Mittal

Les palplanches ZZ 12-770 d'Altifers et AZ 12-770 d'Arcelor Mittal sont comparables.

La corrosion est prise en compte via la diminution des épaisseurs des palplanches. La durée de vie considérée est identique à celle prise en compte pour la première partie des travaux.

Pour des ouvrages d'une durée de vie de 75 ans, l'Eurocode 3 partie 5 considère une épaisseur sacrifiée à la corrosion de :

- 1,15 mm / face, concernant la partie de la paroi en contact avec de l'eau douce ordinaire ;
- 0,9 mm / face, concernant la partie de la paroi en contact avec des sols naturels intacts.

La corrosion est considérée constante sur la totalité de la longueur de la palplanche. Une perte d'acier de 2,05 mm le long de la palplanche est retenue. Les caractéristiques géométriques des palplanches (inertie, ...) sont automatiquement recalculées avec l'épaisseur résiduelle.

Les caractéristiques de la palplanche AZ 12-770 en état non-corrodé et corrodé issus de l'outil Durability^{ArcelorMittal} sont présentées dans le tableau suivant.

	E [GPa]	I [cm ⁴ /m]	A [cm ²]	Masse [kN/m ²]	f _y [MPa]
Non-corrodé	210	21430	120,1	0,94	355
Corrodé	210	17330	95,8	0,76	355

Tableau 14 : Caractéristiques de la palplanche AZ 12-770

Le dimensionnement du linéaire de palplanches de la zone du PK 113,3 montre la nécessité de palplanches de résistance plus élevées. Le dimensionnement montre que des palplanches AZ 14-770 d'Arcelor Mittal sont suffisantes. Les caractéristiques de la palplanche AZ 14-770 en état non-corrodé et corrodé issus de l'outil Durability^{ArcelorMittal} sont présentées dans le tableau suivant.

	E [GPa]	I [cm ⁴ /m]	A [cm ²]	Masse [kN/m ²]	f _y [MPa]
Non-corrodé	210	23300	131,6	1,03	355
Corrodé	210	19200	107,1	0,84	355

Tableau 15 : Caractéristiques de la palplanche AZ 14-770

Les calculs présentés dans la note au §8 et les annexes sont réalisés en considérant :

- des palplanches AZ 12-770 pour le secteur 115 ;
- des palplanches AZ 14-770 pour le secteur 113,3.

7.7 INCLINAISON DE LA POUSSEE / BUTEE

On retient les inclinaisons suivantes appliquées sur le rideau autostable :

- 0 du coefficient de frottement interne du sol, pour la poussée ;
- -2/3 du coefficient de frottement interne du sol, pour la butée.

7.8 ACTIONS ET COMBINAISONS D'ACTIONS

Les palplanches sont dimensionnées pour les cas de charges correspondant aux phases de construction et d'exploitation du canal d'amenée. Le tableau suivant présente le phasage et les coefficients majorateur et minorateur.

Phase	Stade	Situation de projet	Niveau hydrostatique (m NGF)	Charges d'exploitation sur crête au niveau des voiries RG	Modèle MEL : coefficient minorateur sur la butée	Modèle MEL : coefficient majorateur sur les actions
1	Construction	Battage du rideau de palplanches	+2,32	10 kPa	1,1	1,35
2		Rideau battu, déblais et remblais des affouillement	+2,32	10 kPa	1,1	1,35
3	Exploitation	Exploitation	+2,32	10 kPa	1,4	1,35
4	Exploitation	Crue	+2,62	10 kPa	1,4	1,35
5	Exploitation	Décrue	+2,62 / +2,32 m	10 kPa	1,4	1,35

Tableau 16 : Phasage

Une charge d'exploitation de 10,0 kPa appliquée sur la largeur du chemin de halage a été retenue.

7.9 CRITERES DE DIMENSIONNEMENT

7.9.1 DEPLACEMENT LIMITE

Les déplacements en tête de palplanche seront calculés. Néanmoins, le déplacement (hors rupture) n'a pas d'impact sur la stabilité d'ensemble. Aucun déplacement limite n'est retenu.

7.9.2 RESISTANCE DES PALPLANCHES

Le moment résistant $M_{c,rd}$ est déterminé selon la relation suivante :

$$M_{c,rd} = \beta_B W_{el} f_y$$

Avec

$$\beta_B \begin{cases} = 1 \text{ si profil en Z} \\ < 1 \text{ si profil en U, v} \\ \text{ici } \beta_B = 1 \end{cases}$$

- W_{el} le module de flexion élastique déterminée pour un rideau continu. Ce module doit être calculé en prenant en compte la corrosion éventuelle.
- f_y la limite élastique de l'acier

8 RESULTATS DES VERIFICATIONS

8.1 VERIFICATION ELU STABILITE D'ENSEMBLE

Le tableau suivant synthétise les résultats de dimensionnement des palplanches optimisés en fonction des secteurs d'études et des situations de calcul.

	Situation	Longueur de palplanche [m]	Longueur de fiche [m]	$f_b/f_0 > 1,2$	$C_{t,d} / C_{m,d} < 1$
PK113,3	Exploitation	11,5	7,1	1,24	0,99
	Crue	11,3	6,9	1,26	0,94
	Décrue	12,1	7,7	1,26	0,96
PK115	Exploitation	8,0	3,3	1,31	0,95
	Crue	7,9	3,2	1,35	0,87
	Décrue	8,5	3,8	1,32	0,88

Tableau 17 : Longueur de palplanche optimisée par secteurs et par situation de calcul

Les longueurs de palplanches dimensionnantes pour les différents secteurs sont celles issues du calcul en situation de décrue.

8.2 LONGUEURS DE PALPLANCHES RETENUES

Les longueurs des palplanches ont été déterminées par des calculs itératifs.

Les valeurs retenues pour les différents secteurs sont les suivantes.

	Longueur de palplanche [m]	Longueur de fiche [m]
PK113,3	12,1	7,7
PK115	8,5	3,8

Tableau 18 : Longueur de palplanche retenue par secteurs

8.3 VERIFICATION DE LA RESISTANCE DES PALPLANCHES

8.3.1 PHASES DE CALCUL

Sous K-REA, 4 phases de calculs ont été définies :

- Phase 1 : Nappe d'eau à +2,32 m NGF et palplanche non corrodée (phase d'exploitation à court terme)
- Phase 2 : Nappe d'eau à +2,32 m NGF et palplanche corrodée (phase d'exploitation à long terme en situation normal)
- Phase 3 : Nappe d'eau à +2,62 m NGF et palplanche corrodée (phase d'exploitation à long terme en situation de crue)
- Phase 4 : Nappe d'eau en arrière du rideau à +2,62 m NGF et nappe d'eau en avant du rideau à +2,32 m NGF, et palplanche corrodée (Phase d'exploitation à long terme en situation de décrue)

8.3.2 DEPLACEMENTS, MOMENTS ET EFFORTS TRANCHANTS

Le tableau suivant synthétise les résultats des déplacements en tête de palplanche et des efforts internes en fonction des secteurs et des phases de calculs en considérant les longueurs de palplanche retenues par secteurs. Les résultats détaillés sont disponibles en ANNEXE 33.

	Phase	Déplacement en tête de palplanche [cm]	Moment max pondéré [kN.m/ml]	Effort tranchant max pondéré [kN/ml]
PK113,3	Phase d'exploitation à court terme	11,6	302	147
	Phase d'exploitation à long terme	13,4	302	147
	Phase d'exploitation à long terme en situation de crue	13,4	264	124
	Phase d'exploitation à long terme en situation de décrue	16,5	378	197
PK115	Phase d'exploitation à court terme	3,5	126	85
	Phase d'exploitation à long terme	4,0	126	85
	Phase d'exploitation à long terme en situation de crue	4,0	112	74
	Phase d'exploitation à long terme en situation de décrue	5,0	159	116

Tableau 19 : Efforts internes dans les palplanches par secteurs et par phase de calcul

La phase de calcul dimensionnante pour chaque secteur est la phase d'exploitation à long terme en situation de décrue. Les efforts internes calculés lors de cette phase seront utilisés pour la vérification de la stabilité structurelle des palplanches.

8.3.3 VERIFICATION DE LA STABILITE STRUCTURELLE DES PALPLANCHES

La vérification de la section de palplanche en fonction des efforts internes calculés est effectuée à partir de l'outil Durability^{ArcelorMittal}. Les vérifications sont effectuées conformément à l'Eurocode 3 partie 5. Le tableau suivant synthétise les résultats de vérification des palplanches vis-à-vis des efforts internes calculés. Le détail des vérifications est disponible en ANNEXE 2.

	Flexion		Flexion & Cisaillement		Voilement de l'âme par cisaillement		Facteur d'optimisation	Palplanches
	M _{Ed} [kN.m/ml]	M _{c,Rd} [kN.m/ml]	V _{Ed} [kN/ml]	V _{pl,Rd} [kN/ml]	V _{Ed} [kN/ml]	V _{b,Rd} [kN/ml]		
PK113,3	378	398	197	665	139	549	0,95	AZ 14-770
PK115	159	356	116	569	116	409	0,44	AZ 12-770

Tableau 20 : Synthèse de la vérification structurelle des palplanches

Les efforts internes ne dépassent pas les valeurs limites de résistance en flexion, en flexion & cisaillement, ainsi qu'en voilement de l'âme par cisaillement avec une marge de sécurité importante. Les déplacements calculés pour les palplanches AZ 14-770 de la zone du PK 113,3 sont de 16,0 cm. L'augmentation du module de la palplanche permet une réduction limitée du déplacement calculé (le passage à une palplanche AZ 20-700 permet un gain de 5,0 cm). Il faut toutefois noter que les déplacements calculés sous K-REA par la méthode MISS aux coefficients de réactions sont conservatifs. Il est aussi à noter que le secteur à conforter ne possède que de faibles enjeux (absence de structure hors chaussée du chemin de halage). Nous sommes ainsi favorables pour conserver des palplanches AZ 14-770 dans la zone du PK 113,3.

Il convient toutefois de préciser que le choix des palplanches résulte également de la nécessité de résister aux contraintes de battage ou vibrofonçage lors de la mise en fiche.

8.4 VERIFICATION DE LA STABILITE AU GRAND GLISSEMENT

Compte tenu de la longueur des fiches obtenues par le dimensionnement des palplanches sur les deux secteurs d'études, la stabilité au grand glissement apparaît évidente et il n'a pas été considéré nécessaire de réaliser ce calcul.

9 ANALYSE DES RISQUES DE REFUS

Le REX de l'opération menée entre les PK116,0 et PK117,5 a permis d'apprécier les conditions géotechniques ayant conduit à des désordres liés en partie à des difficultés de vibrofonçage des palplanches. Les deux précurseurs les plus probables des refus sont l'argile des Flandres et les passages de sables très denses.

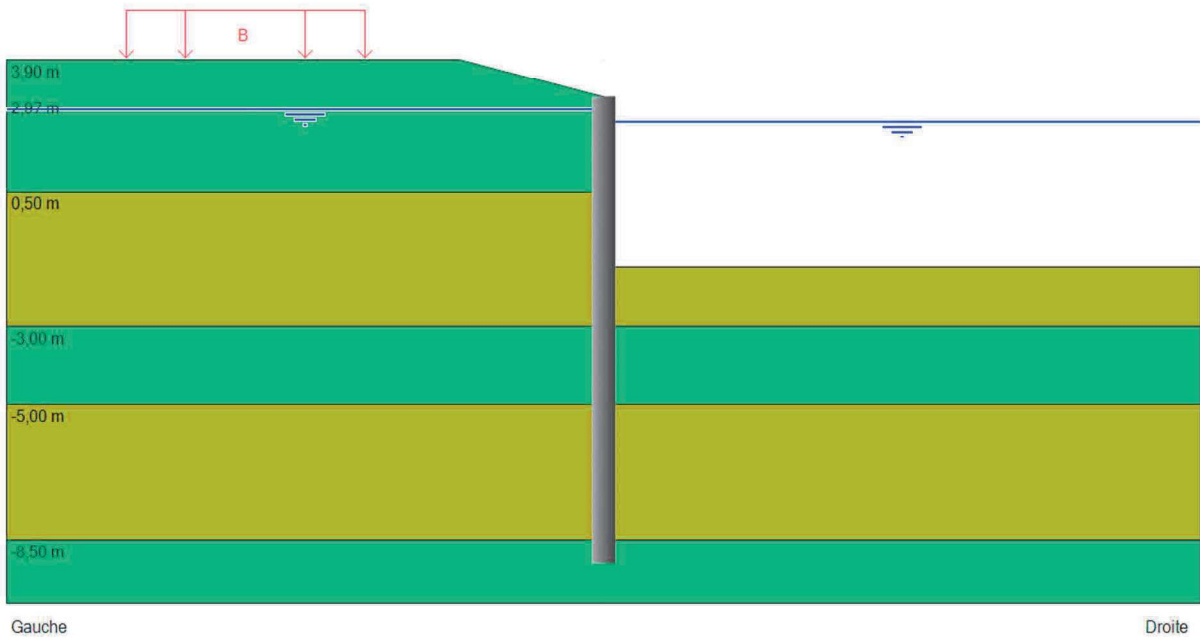
Les sondages ne font pas état d'horizon susceptible de conduire à des difficultés au droit des travaux (PK113,3 et PK115,0).

Par prudence, deux possibilités sont cependant envisageables :

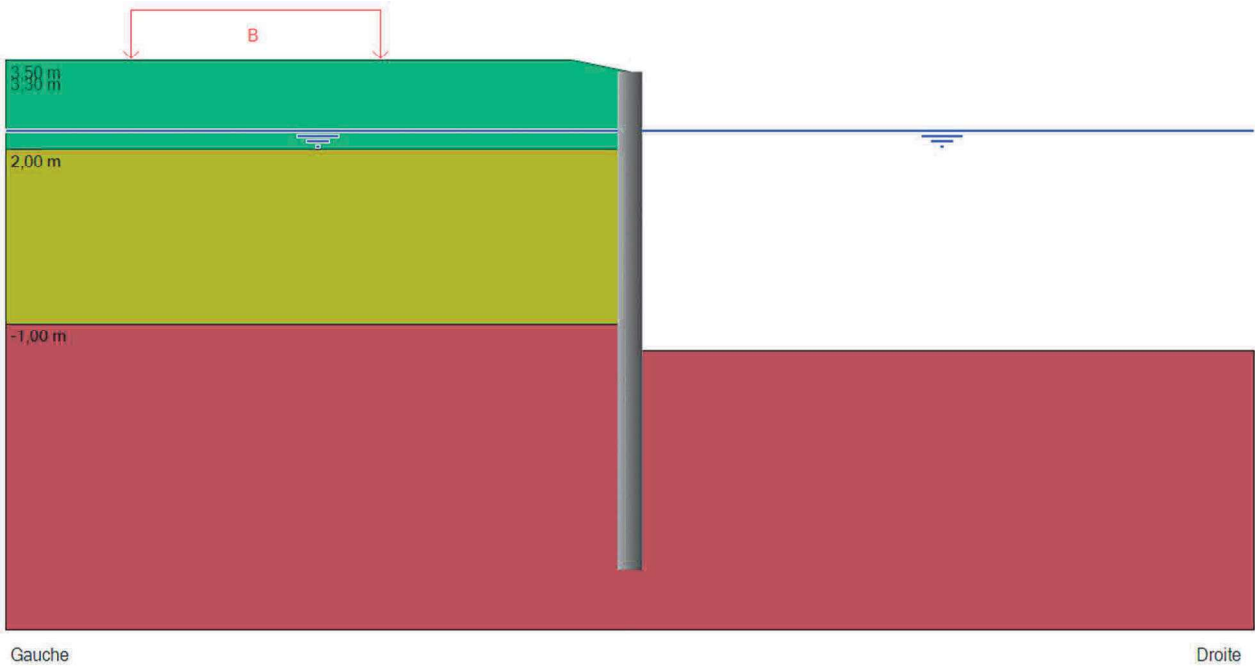
- Anticiper les difficultés au moyen d'un marteau trépideur ;
- Dans un premier temps, utiliser le vibrofonçeur sur tout le linéaire en prévoyant un arrêt dès les premières difficultés et dans un second temps, mobiliser un marteau trépideur pour rebalayer l'intégralité du linéaire.

ANNEXE 1 MODELE DE CALCUL MEL

1 SECTEUR PK113,3



2 SECTEUR PK115



ANNEXE 2 VERIFICATION STRUCTURELLE DES PALPLANCHES

1 SECTEUR PK113,3

<p>(5.2.2) Flexion</p> $M_{Ed} = 378 \leq M_{c,Rd} = 398 \quad \checkmark$ $\beta_B = 1,00 \quad W_{el} = 1120$ <p>$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$. Ok!</p>	<p>type Z: $w = 0 \leq 5 \text{ m}$, Ok.</p> <p>$(b/t_{min})^* \varepsilon = \dots$ $f_{y,red} = \dots$</p> <p>$p_{pl} = \dots$ $M_{c,Rd,red} = \dots$</p>	<p>Résultats</p> <p>Bon choix.</p> <p>Facteur optimisation Ok: $0,95 \leq 1,0$</p>																		
<p>(5.2.2) Flexion & cisaillement</p> $V_{Ed} = 197 \leq V_{pl,Rd} = 665 \quad \checkmark$ $M_{Ed} = \dots \leq M_{V,Rd} = \dots$ <p>avec $p = \dots$ $V_{Ed} \leq 0,5 * V_{pl,Rd}$. Ok!</p>		<p>Caractéristiques palpl.</p> <table border="1"> <tr><td>Palplanche</td><td>AZ 14-770</td></tr> <tr><td>Nuance acier</td><td>S 355 GP</td></tr> <tr><td>fy</td><td>355 MPa</td></tr> <tr><td>epsilon</td><td>0,814</td></tr> <tr><td>Classe ini.</td><td>2</td></tr> <tr><td>Durée de vie</td><td>75 années</td></tr> <tr><td>Perte acier</td><td>2,050 mm</td></tr> <tr><td>Classe réd.</td><td>3</td></tr> <tr><td>gamma_M0</td><td>1,00</td></tr> </table>	Palplanche	AZ 14-770	Nuance acier	S 355 GP	fy	355 MPa	epsilon	0,814	Classe ini.	2	Durée de vie	75 années	Perte acier	2,050 mm	Classe réd.	3	gamma_M0	1,00
Palplanche	AZ 14-770																			
Nuance acier	S 355 GP																			
fy	355 MPa																			
epsilon	0,814																			
Classe ini.	2																			
Durée de vie	75 années																			
Perte acier	2,050 mm																			
Classe réd.	3																			
gamma_M0	1,00																			
<p>(5.2.2) Voilement de l'âme par cisaillement</p> <p>$(c/t_w)/\varepsilon = 87,0 > 72$ $f_{bv} = 169,2$ $\lambda_w = 1,007$</p> $V_{Ed} = 197 \leq V_{b,Rd} = 549 \quad \checkmark$ <p>$V_{Ed} \leq V_{b,Rd}$. Ok!</p>																				
<p>(5.2.3) Flambement</p> $N_{Ed} = 0 \leq N_{pl,Rd} = \dots$ $N_{cr} = \dots$ $\beta_{cr} = \dots$ $0,04 * N_{cr} = \dots$ <p>$\lambda = \dots$ $\Phi = \dots$ $\chi = \dots$</p>																				
<p>(5.2.3) Flexion & effort normal compression</p> $N_{Ed} = 0 \leq k * N_{pl,Rd} = \dots$ $M_{Ed} = \dots \leq M_{N,Rd} = \dots$ <p>avec $k = \dots$</p>																				
<p>(5.2.3) Flexion & effort normal & effort tranchant</p> $M_{Ed} = 378 \dots M_{N,Rd,red} = \dots$ <p>with $f_{y,red} = \dots$</p>																				
	<p>Unités</p> <table border="1"> <tr><td>M</td><td>kNm/m</td></tr> <tr><td>V</td><td>kN/m</td></tr> <tr><td>N</td><td>kN/m</td></tr> <tr><td>W_{el}, W_{pl}</td><td>cm³/m</td></tr> <tr><td>fy, fbv</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>autres</td><td>sans dimensions</td></tr> </table>	M	kNm/m	V	kN/m	N	kN/m	W _{el} , W _{pl}	cm ³ /m	fy, fbv	MPa	autres	sans dimensions							
M	kNm/m																			
V	kN/m																			
N	kN/m																			
W _{el} , W _{pl}	cm ³ /m																			
fy, fbv	MPa																			
autres	sans dimensions																			

2 SECTEUR PK115

<p>(5.2.2) Flexion</p> $M_{Ed} = 159 \leq M_{c,Rd} = 356 \quad \checkmark$ $\beta_B = 1,00 \quad W_{el} = 1015$ $M_{Ed} \leq M_{c,Rd}. \text{ Ok!}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> type Z: $w = 0 \leq 5 \text{ m. Ok.}$ $(b/t_{min})^* \varepsilon = \dots$ $f_{y,red} = \dots$ $p_p = \dots$ $M_{c,Rd,red} = \dots$ </div>	<p>Résultats</p> <p style="color: blue;">Bon choix.</p> <p style="color: blue;">Facteur utilisation $U_f: 0,45 \leq 1,0$ (Optimisation = 0,44)</p>																						
<p>(5.2.2) Flexion & cisaillement</p> $V_{Ed} = 116 \leq V_{pl,Rd} = 569 \quad \checkmark \quad \text{Ok!}$ $M_{Ed} = \dots \leq M_{V,Rd} = \dots \quad \text{avec } p = \dots \quad V_{Ed} \leq 0,5 * V_{pl,Rd}. \text{ Ok!}$	<p>Caractéristiques palpl.</p> <table border="1"> <tr><td>Palplanche</td><td>AZ 12-770</td></tr> <tr><td>Nuance acier</td><td>S 355 GP</td></tr> <tr><td>f_y</td><td>355 MPa</td></tr> <tr><td>epsilon</td><td>0,814</td></tr> <tr><td>Classe ini.</td><td>3</td></tr> <tr><td>Durée de vie</td><td>75 années</td></tr> <tr><td>Perte acier</td><td>2.050 mm</td></tr> <tr><td>Classe réd.</td><td>4</td></tr> <tr><td>Classe 3: $f_{y,red}$</td><td>350,9 MPa</td></tr> <tr><td>et epsilon</td><td>0,818</td></tr> <tr><td>gamma_M0</td><td>1,00</td></tr> </table>	Palplanche	AZ 12-770	Nuance acier	S 355 GP	f_y	355 MPa	epsilon	0,814	Classe ini.	3	Durée de vie	75 années	Perte acier	2.050 mm	Classe réd.	4	Classe 3: $f_{y,red}$	350,9 MPa	et epsilon	0,818	gamma_M0	1,00
Palplanche	AZ 12-770																						
Nuance acier	S 355 GP																						
f_y	355 MPa																						
epsilon	0,814																						
Classe ini.	3																						
Durée de vie	75 années																						
Perte acier	2.050 mm																						
Classe réd.	4																						
Classe 3: $f_{y,red}$	350,9 MPa																						
et epsilon	0,818																						
gamma_M0	1,00																						
<p>(5.2.2) Voilement de l'âme par cisaillement</p> $(c/t_w)/\varepsilon = 99,9 > 72 \quad f_{bv} = 145,6 \quad \lambda_w = 1,157$ $V_{Ed} = 116 \leq V_{b,Rd} = 409 \quad \checkmark \quad V_{Ed} \leq V_{b,Rd}. \text{ Ok!}$	<p>Unités</p> <table border="1"> <tr><td>M</td><td>kNm/m</td></tr> <tr><td>V</td><td>kN/m</td></tr> <tr><td>N</td><td>kN/m</td></tr> <tr><td>W_{el}, W_{pl}</td><td>cm³/m</td></tr> <tr><td>f_y, f_{bv}</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>autres</td><td>sans dimensions</td></tr> </table>	M	kNm/m	V	kN/m	N	kN/m	W_{el}, W_{pl}	cm ³ /m	f_y, f_{bv}	MPa	autres	sans dimensions										
M	kNm/m																						
V	kN/m																						
N	kN/m																						
W_{el}, W_{pl}	cm ³ /m																						
f_y, f_{bv}	MPa																						
autres	sans dimensions																						
<p>(5.2.3) Flambement</p> $N_{Ed} = 0 \leq N_{pl,Rd} = \dots$ $N_{cr} = \dots \quad \frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} + 1,15 \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \dots \quad \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M1}} = \dots$ $\beta_D = \dots \quad \lambda = \dots \quad \Phi = \dots \quad \chi = \dots$ $0,04 * N_{cr} = \dots$																							
<p>(5.2.3) Flexion & effort normal compression</p> $N_{Ed} = 0 \leq k * N_{pl,Rd} = \dots \quad \text{avec } k = \dots$ $M_{Ed} = \dots \leq M_{N,Rd} = \dots$																							
<p>(5.2.3) Flexion & effort normal & effort tranchant</p> $M_{Ed} = 159 \quad \dots \quad M_{N,Rd,red} = \dots$ <p>with $f_{y,red} = \dots$</p>																							

ANNEXE 3 RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT

1 SECTEUR PK113,3

N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées
1	116,64	116,64	157,87	-68,36	-58,70	4,129
2	134,39	134,39	156,58	-69,80	-57,08	4,105
3	133,96	133,96	157,12	-67,59	-57,37	4,175
4	164,62	164,62	191,47	-78,84	-72,73	3,837
Extrema	164,62	164,62	191,47	-78,84	-72,73	3,837

Figure 13 : Synthèse des résultats de dimensionnement à l'ELS au PK 113,3

N° PHASE	Type	M,d max écran [kNm/m]	N,d max écran [kN/m]	V,d maxi écran [kN/m]	Vérif. Def. Butée	Bilan Vert	Vérif. Kranz
1	MEL	301,90	-125,68	-147,01	OK	-45,76	OK
2	MEL	301,90	-126,94	-147,01	OK	-47,39	OK
3	MEL	264,28	-109,12	-124,14	OK	-35,67	OK
4	MEL	377,54	-164,44	-196,66	OK	-75,24	OK
Extrema		377,54	-164,44	-196,66			

Figure 14 : Synthèse des résultats de dimensionnement à l'ELU au PK 113,3

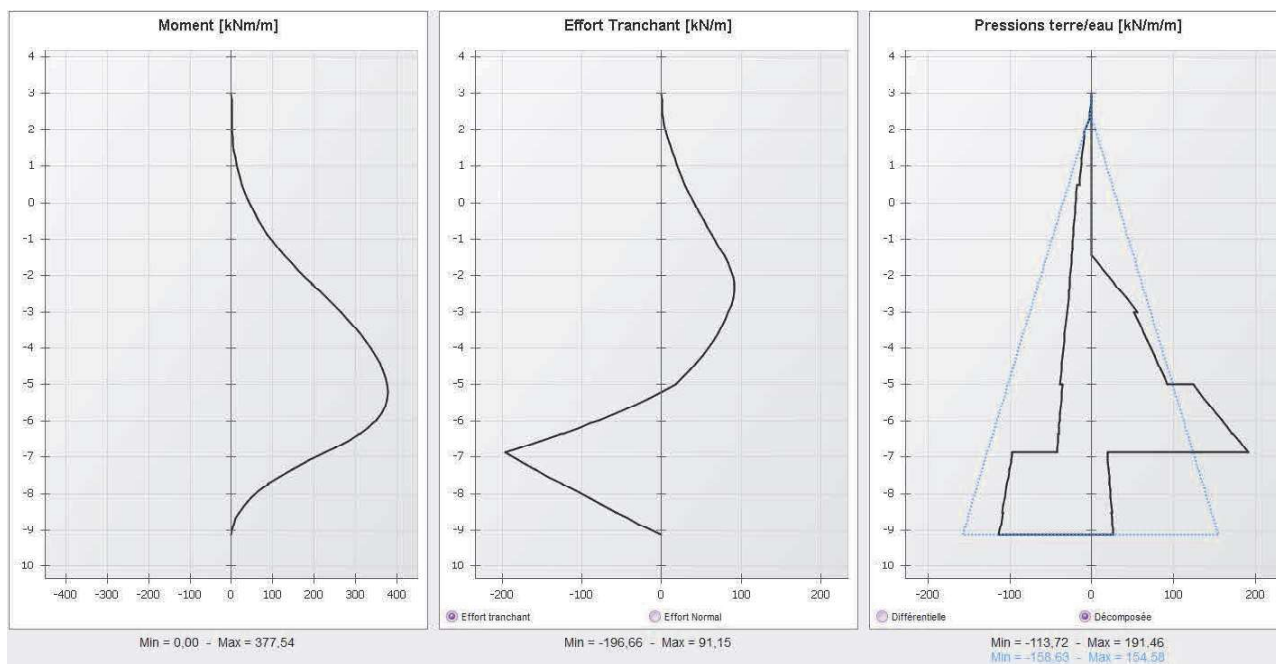


Figure 15 : Synthèse des diagrammes des efforts internes et des pressions appliquées en phase de décrue au PK 113,3

2 SECTEUR PK115

N° PHASE	Déplacement en tête [mm]	Déplacement maximal [mm]	M,k max écran [kNm/m]	N,k max écran [kN/m]	V,k max écran [kN/m]	Rapport butées
1	34,54	34,54	85,46	-19,44	41,33	4,017
2	39,70	39,70	84,73	-20,75	41,33	3,988
3	39,63	39,63	84,51	-19,99	41,04	4,078
4	50,00	50,00	104,10	-26,14	-50,61	3,605
Extrema	50,00	50,00	104,10	-26,14	-50,61	3,605

Figure 16 : Synthèse des résultats de dimensionnement à l'ELS au PK 115

N° PHASE	Type	M,d max écran [kNm/m]	N,d max écran [kN/m]	V,d maxi écran [kN/m]	Vérif. Def. Butée	Bilan Vert	Vérif. Kranz
1	MEL	125,53	-34,75	-84,86	OK	-6,96	OK
2	MEL	125,53	-36,34	-84,86	OK	-9,03	OK
3	MEL	112,16	-31,63	-73,93	OK	-7,04	OK
4	MEL	158,68	-51,21	-116,33	OK	-17,81	OK
Extrema		158,68	-51,21	-116,33			

Figure 17 : Synthèse des résultats de dimensionnement à l'ELU au PK 115

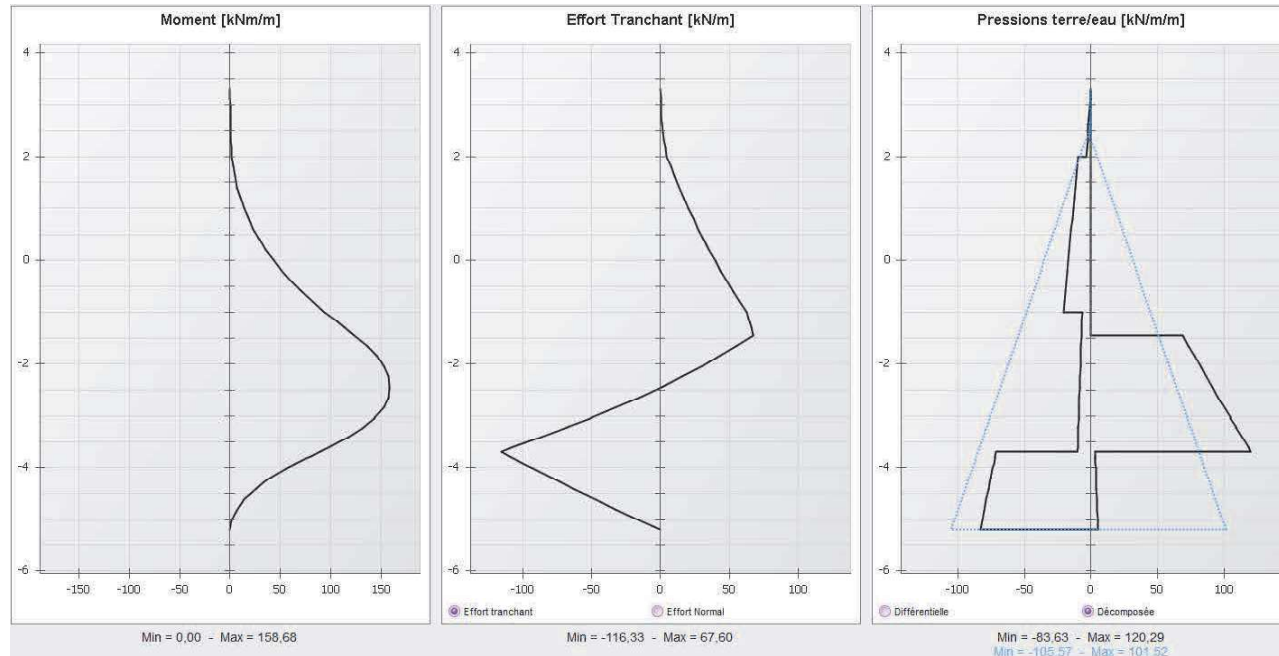


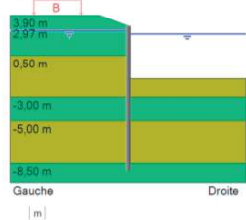
Figure 18 : Synthèse des diagrammes des efforts internes et des pressions appliquées en phase de décrue au PK 115

1 SECTEUR PK113,3

[illegible]

 K-Réa v4 v.4.0.27	AFFAIRE PK_115		
SYNTHESE PHASAGE			
<p>Phase initiale</p> 	<p>Phase 1 : Phase durable</p> 	<p>Phase 2 : Phase durable</p> 	<p>Phase 3 : Phase durable</p> 
	<ul style="list-style-type: none">- Excavation (côté gauche) : $z_1 [m] = 2.97$ Mise en place d'un talus : $z_2 [m] = 3.50$ $a [m] = 2.10$ $z_3 [m] = 2.97$ $b [m] = 0.01$ $oe = 1.000$- Excavation (côté droit) : $z_4 [m] = -1.45$- Surcharge de Boussinesq (côté gauche) : n°1 $z [m] = 3.50$ $x [m] = 3.50$ $L [m] = 3.50$ $q [kN/m^2] = 10.00$ $oe = 1.222$- Action hydraulique : (droite) $zw [m] = 2.32$		
	Calcul réalisé par : ISL INGENIERIE		


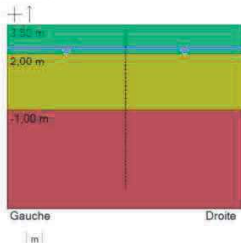
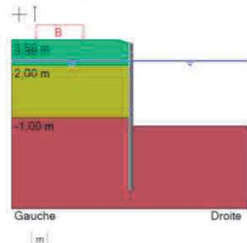
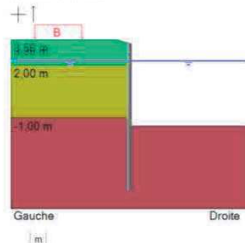
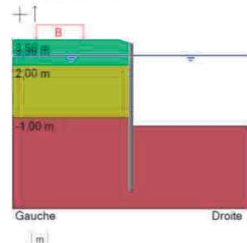

SYNTHESE PHASAGE



- Action hydraulique : (droite)
zw [m] = 2,32

2 SECTEUR PK115

[illegible]

 K-Réa v4 v.4.0.27	AFFAIRE PK_113,3		
SYNTHESE PHASAGE			
<p>Phase initiale</p>  <p>Gauche Droite</p> <p>[m]</p>	<p>Phase 1 : Phase durable</p>  <p>Gauche Droite</p> <p>[m]</p>	<p>Phase 2 : Phase durable</p>  <p>Gauche Droite</p> <p>[m]</p>	<p>Phase 3 : Phase durable</p>  <p>Gauche Droite</p> <p>[m]</p>
	<ul style="list-style-type: none">- Excavation (côté gauche) : zh [m] = 3.30 Mise en place d'un talus : z1 [m] = 3.50 a [m] = 1.15 zh [m] = 3.30b [m] = 0.01 os = 1.000- Excavation (côté droit) : zh [m] = -1.45- Surcharge de Boussinesq (côté gauche) : n°1 z [m] = 3.50 x [m] = 6.00 l [m] = 6.00 q [kN/m²] = 10.00 os = 1.167- Action hydraulique : (droite) zw [m] = 2.32	<ul style="list-style-type: none">- Modification de la raideur de l'écran : Z1 [m] = 3.30 Z2 [m] = -0.20 E [kN/m²] = 36393 PP [kN/m/m] = 0.76	<ul style="list-style-type: none">- Action hydraulique : (gauche) zw [m] = 2.62- Action hydraulique : (droite) zw [m] = 2.62
	Calcul réalisé par : ISL INGENIERIE		

<div><div><div>K-Réa v4</div><div>v.4.0.27</div></div></div>		AFFAIRE	
		PK_113,3	
SYNTHESE PHASAGE			
<div>Phase 4 : Phase durable</div> <div><div><div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div></div><div><div><div>3.50 m</div><div>2.00 m</div><div>-1.00 m</div></div><div><div>Gauche</div><div>Droite</div></div><div><div> m </div></div></div></div></div>			
<div>- Action hydraulique : (droite)</div> <div>zw (m) = 2.32</div>			
<div><div><div>S</div><div>terrasol</div></div><div><div>setec</div></div></div>	Calcul réalisé par : ISL INGENIERIE		