

CONSULTING

Polder de la Moder – Diagnostic de la digue ceinture Ouest et Nord

Rapport diagnostic

Vérification des documents IMP411

Numéro du projet : 24CAE040_BDC 12

Intitulé du projet : Polder de la Moder – diagnostic de la digue ceinture Ouest et Nord

Intitulé du document : Rapport diagnostic

La traçabilité des signatures est assurée en interne. Ce formulaire peut être communiqué au client à sa demande

Contrôle données entrée	Réunion de démarrage	RACI Agrément	Check List (EDD)
☒	☒	☒	☐

Version	Rédacteur NOM / Prénom		Contrôleur 1 NOM / Prénom		Contrôleur 2 NOM / Prénom		Date d'envoi JJ/MM/AA	COMMENTAIRES Documents de référence / Description des modifications essentielles
0	Nicolas SOLARTE		Julien MICELI		Anas OUASSI		18/02/2025	Version provisoire
1	Nicolas SOLARTE		Julien MICELI		Anas OUASSI		10/04/2026	Version après la réception des résultats des campagnes géotechniques et topographiques
2	Nicolas SOLARTE		Julien MICELI		Anas OUASSI		05/06/2026	Version avec prise en compte des remarques de VNF

Ce document a été réalisé par du personnel de SAFEGE SAS (opérant sous la marque commerciale SUEZ Consulting) ; SAFEGE SAS est un organisme agréé en tant qu'intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques, conformément à l'arrêté du 13 Juillet 2021 (Agrément « Auscultation - tous barrages » valide jusqu'au 31 juillet 2029

Sommaire

1.....	Introduction	1
1.1	Contexte.....	1
1.2	Localisation et accès.....	1
1.3	Données à disposition.....	1
2.....	Description de l'ouvrage.....	3
2.1	Généralités	3
2.2	Le Polder.....	3
2.3	Le barrage latéral du bief d'IFFEZHEIM.....	4
2.4	Les siphons de prise d'eau.....	5
2.5	La digue ceinture	5
2.6	Les ouvrages de vidange.....	6
2.7	Dispositif d'auscultation	7
3.....	Analyse et synthèse des données	8
3.1	Données topographiques	8
3.2	Données géotechniques	10
3.3	Investigations GEOTEC 2025	14
3.4	Synthèse géotechnique.....	24
3.5	Données hydrogéologiques	27
3.6	Données hydrauliques	28
3.7	Réseaux	29
3.8	Environnement.....	30
3.9	Faits marquants sur l'ouvrage	31
3.10	Travaux sur l'ouvrage en 1994	35
3.11	Exercice de remplissage 2025.....	39
4.....	Diagnostic visuelle.....	41
4.1	Inspection visuelle.....	41

4.2	Analyse préliminaire des phénomènes	49
5.....	Stabilité des talus	50
5.1	Hypothèses et situations de projet	50
5.2	Résultats	56
5.3	Récapitulatif	59
6.....	Analyse de l'érosion interne	60
6.1	Méthode	60
6.2	Suffusion interne	60
6.3	Suffusion de contact	65
6.4	Erosion régressive.....	71
6.5	Erosion de conduit	77
6.6	Récapitulatif	78
7.....	Programme de travaux	80
7.1	Profil 1 et 2 (Désordres 1 à 8)	80
7.2	Profil 3 (Désordres 9 à 16)	82
7.3	Profil 4 (Désordres 17 à 19)	84
7.4	Profil 5 (Désordres 20 à 23)	85
7.5	Profil 6 (Désordres 24 à 26)	86
7.6	Dispositif d'auscultation	87
7.7	Calendrier prévisionnel global de travaux	88
7.8	Estimation financière.....	89
8.....	Synthese et suites à donner	90

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques du polder de la Moder	3
Tableau 2 : Caractéristiques du barrage latéral du PK 328,600 à 331,600	4
Tableau 3 : Caractéristiques de la digue ceinture	5
Tableau 4 : Sondages existants de 1992-1994 (BRGM).....	11
Tableau 5 : Résultats de laboratoire – GEOTEC 2025	16
Tableau 6 : Masses volumiques – GEOTEC 2025	18

Tableau 7 : Résultats des HET – GEOTEC/GeophyConsult 2025.....	18
Tableau 8 : Essais d'eau Lefranc – GEOTEC 2025.....	18
Tableau 9 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Zone A de palplanches	24
Tableau 10 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 1 à 8	25
Tableau 11 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 9 à 16	25
Tableau 12 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 17 à 19	26
Tableau 13 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 20 à 23	26
Tableau 14 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 20 à 23	27
Tableau 15 : Mesures APRONA à proximité du Polder	28
Tableau 16 : Niveaux statistiques de la nappe à STATTMATTEN.....	28
Tableau 17 : Synthèse du déroulement du test de mise en eau de janvier 2016	32
Tableau 18 : Caractéristiques des zones équipées de rideau.....	37
Tableau 19 : Situations de projet.....	50
Tableau 20 : Valeur des accélérations sismiques.....	52
Tableau 21 : Caractéristiques hydrauliques des matériaux	54
Tableau 22 : Caractéristiques mécaniques de matériaux	54
Tableau 23 : Coefficients partiels et de modèle	55
Tableau 24 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 1	56
Tableau 25 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 2.....	56
Tableau 26 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 3.....	57
Tableau 27 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 4.....	57
Tableau 28 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 5.....	58
Tableau 29 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 6.....	58
Tableau 30 : Analyse de la sensibilité à la ségrégation	61
Tableau 31 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 1	64
Tableau 32 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 1	64
Tableau 33 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 2	64
Tableau 34 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 3	65
Tableau 35 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 4	65
Tableau 36 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 5	65
Tableau 37 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 5	65
Tableau 38 : Règles de filtre – Profil 1	68
Tableau 39 : Règles de filtre – Profil 2	68
Tableau 40 : Règles de filtre – Profil 3	68
Tableau 41 : Règles de filtre – Profil 4	69
Tableau 42 : Règles de filtre – Profil 5	69
Tableau 43 : Règles de filtre – Profil 6	69
Tableau 44 : Gradient en pied aval pour les différents profils	73
Tableau 45 : Bilan d'estimation financière	89

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation du périmètre du projet - Source Géoportail	1
Figure 2 : Plan général de l'aménagement.....	3
Figure 3 : Coupe type du barrage latéral d'IFFEZHEIM au PK 329,000.....	4
Figure 4 : Vue en coupe du barrage au PK 330,000 avec les siphons.....	5
Figure 5 : Coupe de la digue ceinture sur la face Ouest avant l'OH5.....	6
Figure 6 : Coupe type de la digue ceinture sur les faces Ouest et Nord	6
Figure 7 : Coupe type d'un ouvrage de vidange	6
Figure 8 : Profil au PK 29,800	8
Figure 9 : Profil au PK 30,200	8
Figure 10 : Profil au PK 30,800	9
Figure 11 : Profil au PK 31,350	9

Figure 12 : Profil au PK 31,700	9
Figure 13 : Profil au PK 32,140	10
Figure 14 : Carte géologique au droit du Polder de la Moder.....	10
Figure 15 : Profil en travers de PERMEAUFOR. Source : Etude géotechnique de LRPCS	12
Figure 16 : Profil en long de PERMEAUFOR. Source : Etude géotechnique de LRPCS	13
Figure 17 : Mesures thermométriques du 30/01/2025 (Solexperts)	14
Figure 18 : Localisation du point de mesure APRONA	27
Figure 19 : Débits de la Moder en janvier 2016 (Hydroportail).....	28
Figure 20 : Débits de la Moder en janvier-février 2025 (Hydroportail).....	29
Figure 21 : Position du réseau dans la digue Ouest - Source : Archives VNF.....	30
Figure 22 : Localisation du changement de position du réseau dans la digue Nord - Source : Archives VNF	30
Figure 23 : Carte des enjeux environnementaux	31
Figure 24 : Test de mise en eau en rapport aux débits du Rhin à la station de Kehl-Kronenhof	32
Figure 25 : Remplissage du Polder au niveau de l'OH n°2	33
Figure 26 : Localisation des désordres sur la digue ceinture lors du test de mise en eau de 2016	33
Figure 27 : Transition de la risberme drainante ajoutée.....	36
Figure 28 : Localisation du rechargement du pied côté Polder	36
Figure 29 : Localisation des rideaux de palplanches – Source : Plan d'implantation de palplanches (Archives VNF) ...	37
Figure 30 : Coupe type de la Zone A.....	38
Figure 31 : Coupe type de la Zone B.....	38
Figure 32 : Coupe type de la Zone C	39
Figure 33 : Anomalies 1 à 5 – Vue générale.....	41
Figure 34 : Sortie de la fuite n°1	41
Figure 35 : Anomalie 7 – Dépôt de sable	42
Figure 36 : Anomalie 8 – Fuite sans transport.....	42
Figure 37 : Anomalie 10 – Tumulus de sable	43
Figure 38 : Anomalie 11 – Tumulus de sable	43
Figure 39 : Anomalie 12 – Tumulus supplémentaire dans la forêt	44
Figure 40 : Anomalie 13 – Tumulus de sable	44
Figure 41 : Anomalie 15 – Tumulus.....	44
Figure 42 : Anomalie 16 – Fuite sur le talus de la risberme aval.....	44
Figure 43 : Anomalies 17 – Affaissement.....	45
Figure 44 : Anomalie 18-19 – Position avec la risberme aval	45
Figure 45 : Anomalies 19 – Glissement avec fuite.....	46
Figure 46 : Anomalie 18 – Exutoire de la fuite et plage de sable en berge.....	46
Figure 47 : Anomalies 21 à 22 – Tumulus dans la dépression.....	47
Figure 48 : Anomalie 23 – Tumulus.....	47
Figure 49 : Anomalie 24 – Fuite au droit de la dépression.....	48
Figure 50 : Anomalie 25 – Tumulus.....	48
Figure 51 : Chablis avec traces de dépôts de sable proche de l'anomalie n°25.....	48
Figure 52 : Anomalie 26 – Vue générale en pied de risberme aval.....	49
Figure 53 : Anomalie 26 – Zoom sur le tumulus à proximité de celui de 2016	49
Figure 54 : Conditions hydrauliques aval.....	51
Figure 55 : Evolution des niveaux du Polder et de la Moder au droit de l'OH2 - Source : Bilan final du Test de mise en eau du 11 au 15 janvier 2016 (VNF).....	51
Figure 56 : Profil 1 – Zone A de palplanches.....	52
Figure 57 : Profil 2 - désordres 1 à 8	53
Figure 58 : Profil 3 - désordres 9 à 16	53
Figure 59 : Profil 4 - désordres 17 à 19	53
Figure 60 : Profil 5 - désordres 20 à 23	53
Figure 61 : Profil 6 - désordres 24 à 26	54
Figure 62 : Critère géométrique de Fanning - Profil 1.....	62
Figure 63 : Critère géométrique de Fanning - Profil 2.....	62
Figure 64 : Critère géométrique de Fanning - Profil 3.....	63
Figure 65 : Critère géométrique de Fanning - Profil 4.....	63

Figure 66 : Critère géométrique de Fanning - Profil 5.....	63
Figure 67 : Critère géométrique de Fanning - Profil 6.....	64
Figure 68 : Interfaces du profil 1 – Zone A de palplanches.....	66
Figure 69 : Interfaces du profil 2 - désordres 1 à 8.....	66
Figure 70 : Interfaces du profil 3 - désordres 9 à 16.....	66
Figure 71 : Interfaces du profil 4 - désordres 17 à 19.....	66
Figure 72 : Interfaces du profil 5 - désordres 20 à 23.....	67
Figure 73 : Interfaces du profil 6 - désordres 24 à 26.....	67
Figure 74 : Critères de filtre selon la teneur en fines - Source : Sherard et Dunningan.....	67
Figure 75 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 1 et 2.....	71
Figure 76 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 3.....	72
Figure 77 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 4.....	72
Figure 78 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 5.....	72
Figure 79 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 6.....	72
Figure 80 : Gradient hydraulique pour le Profil 1 – RN Fonctionnement Nominal.....	74
Figure 81 : Gradient hydraulique pour le Profil 1 – RN Essai.....	74
Figure 82 : Gradient hydraulique pour le Profil 2 – RN Fonctionnement Nominal.....	74
Figure 83 : Gradient hydraulique pour le Profil 2 – RN + Essai.....	74
Figure 84 : Gradient hydraulique pour le Profil 3 – RN.....	75
Figure 85 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 avec palplanches – RN Fonctionnement Nominal.....	75
Figure 86 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 avec palplanches – RN Essai.....	75
Figure 87 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 sans palplanches – RN Fonctionnement Nominal.....	75
Figure 88 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 sans palplanches – RN Essai.....	75
Figure 89 : Gradient hydraulique en aval pour le Profil 5 avec passe graveleuse – RN.....	75
Figure 90 : Gradient hydraulique dans la recharge pour le Profil 5 sans passe graveleuse – RN.....	76
Figure 91 : Gradient hydraulique en aval pour le Profil 5 sans passe graveleuse – RN.....	76
Figure 92 : Gradient hydraulique dans la recharge pour le Profil 5 sans passe graveleuse – RN.....	76
Figure 93 : Gradient hydraulique pour le Profil 6 avec palplanches – RN Fonctionnement Nominal.....	76
Figure 94 : Gradient hydraulique pour le Profil 6 avec palplanches – RN Essai.....	76
Figure 95 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 sans palplanches – RN Fonctionnement Nominal.....	76
Figure 96 : Gradient hydraulique pour le Profil 6 sans palplanches – RN Essai.....	77
Figure 97 : Travaux pour les profils 1 et 2.....	80
Figure 98 : Coupe type de la recharge sur le talus du canal de drainage.....	81
Figure 99 : Réalisation de la recharge filtrante sur le canal de drainage - Bief de Gamsheim 2022 (SAFEGE).....	81
Figure 100 : Coupe type du confortement - Profil 2.....	82
Figure 101 : Travaux pour le profil 3.....	82
Figure 102 : Coupe type du confortement - Profil 3.....	83
Figure 103 : Réfection du drain de pied du bief d'Iffezheim en 2013 (SAFEGE).....	83
Figure 104 : Travaux pour le profil 4.....	84
Figure 105 : Réalisation d'une paroi étanche en palplanches - Bief de Gamsheim 2023 (SAFEGE).....	84
Figure 106 : Coupe type du confortement - Profil 4.....	85
Figure 107 : Travaux pour le profil 5.....	85
Figure 108 : Coupe type du confortement - Profil 5.....	86
Figure 109 : Travaux pour le profil 6.....	86
Figure 110 : Coupe type du confortement - Profil 6.....	87

Table des annexes

- Annexe 1 Cartographie des sondages existants
- Annexe 2 Cartographie de l'inspection visuelle
- Annexe 3 Levés topographiques – GEOFIT 2025

Annexe 4 Bathymétrie de la berge de la Moder – GEOXYZ 2025

Annexe 5 Rapport G5 – GEOTEC 2026

Annexe 6 Rapport Tomographie électrique

Annexe 7 Estimation financière

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

La Direction Territoriale STRASBOURG (DTS) des Voies Navigables de France (VNF) a la charge de l'exploitation du Polder de la Moder entre FORT-LOUIS et NEUHAEUSEL (67). Cet ouvrage assure une rétention d'une partie de la crue du Rhin. L'ouvrage a été mis en service en 1992, mais n'a jamais été sollicité en période de crue depuis.

VNF avec les services de préfectures ont lancé un exercice de mise en service du 29 au 31 janvier 2025. Au cours du remplissage, la surveillance de VNF a mis en avant l'apparition de nombreuses anomalies sur les digues Ouest et Nord ceinturant le Polder. VNF a donc lancé une vidange contrôlée de la rétention à partir du 31 janvier.

Ces désordres remettent en cause la disponibilité de l'ouvrage pour écrêter les crues du Rhin jusqu'à nouvelle ordre.

Ainsi, par le biais du marché d'accord cadre, VNF a mandaté Consulting, via le bon de commande n°12, pour réaliser un diagnostic des digues Ouest et Nord du Polder, afin de pouvoir approfondir sur l'indisponibilité de l'ouvrage et de définir le cas échéant les mesures et/ou les travaux nécessaires.

1.2 Localisation et accès

Le projet se situe sur les communes de FORT-LOUIS et NEUHAEUSEL dans le département du Bas-Rhin (67). Le site se trouve entre les Point Kilométrique 328,600 et 331,600 du Rhin.



Figure 1 : Localisation du périmètre du projet - Source Géoportail

1.3 Données à disposition

Les données à disposition pour la réalisation de l'étude sont les suivantes :

- [1] Visite technique approfondie par SAFEGE en 2016 ;
- [2] Sondages géotechniques d'Infoterre du BRGM de 1992 et 1994 ;
- [3] Rapport d'étude sur les fuites de mars 1992 du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg (1993) ;

- [4] Marché DURMEYER (CCTP, Plan d'implantation, Profils en travers type et Cahier de profils en travers) concernant la réalisation d'un écran partiel en palplanches sous les digues du Polder (1994) ;
- [5] CCTP de SAVARIAU concernant les Travaux confortatifs sur l'aménagement du Polder de la Moder (1994) ;
- [6] Bilan final : Test de mise en eau du 11 au 15 janvier 2016. VNF (2016).

2. DESCRIPTION DE L'OURAGE

2.1 Généralités



Figure 2 : Plan général de l'aménagement

L'aménagement assure l'écrêtement des crues du Rhin par le stockage en dérivation des eaux dans un casier aménagé. Il a été construit à partir de 1987 puis mis en service en 1992 via un essai de mise en eau. L'aménagement comprend :

- Un ouvrage de prise d'eau sur le Rhin composé de 6 siphons ;
- Une digue ceinture de 4,5 km de long ;
- Cinq ouvrages de vidange et de sectionnement du canal de drainage ;
- Un poste de commande et de contrôle dit « PCC ».

La fermeture du casier côté Rhin est marquée par le barrage latérale rive gauche du bief d'IFFEZHEIM.

Le Polder est mis en service lorsque le Rhin atteint les 4 400 m³/s à la station de MAXAU (KARLSRUHE). La durée de remplissage total de l'ouvrage est de 12 h environ. Dès que le Rhin repasse sous les 4 000 m³/s à MAXAU, le remplissage est interrompu et la phase de vidange est activée via les ouvrages de vidange OH2 et OH3 sur une durée de l'ordre de 24 h vers la Moder.

2.2 Le Polder

Tableau 1 : Caractéristiques du polder de la Moder

Cote maxi de remplissage (RN)	118,45 m NN
Surface de remplissage à RN	240 ha
Volume de la retenue à RN	5 600 000 m ³
Hauteur moyenne de remplissage	2,30 m

2.3 Le barrage latéral du bief d'IFFEZHEIM

La face « est » du Polder est délimitée par le barrage latéral du bief d'IFFEZHEIM, qui surplombe le Polder, entre les PK du Rhin 328,600 à 331,600.

Tableau 2 : Caractéristiques du barrage latéral du PK 328,600 à 331,600

Type de barrage	Remblai zoné avec noyau limoneux et recharges sablo-graveleuses
Altitude crête (m NN)	124,90 à 124,76
Hauteur max par rapport au TN (m)	8,9
Longueur totale (m)	3 200
Largeur en crête (m)	6,0
Pente du talus amont (H/V)	2,5/1
Pente du talus aval	2,5/1
Largeur risberme amont (m)	6,0 à 8,0
Pente sous la risberme amont	2,5/1
Largeur risberme aval (m)	5,0
Pente du talus du contre-canal	2/1

Le niveau du Rhin pour un débit de 1 000 m³/s est de 123,74 m NN au PK 328,000 à 123,73 m NN au PK 331,900 (calcul hydraulique de 2003).

Un plan d'une coupe transversale du barrage au PK 329,000 est présenté sur ci-dessous.

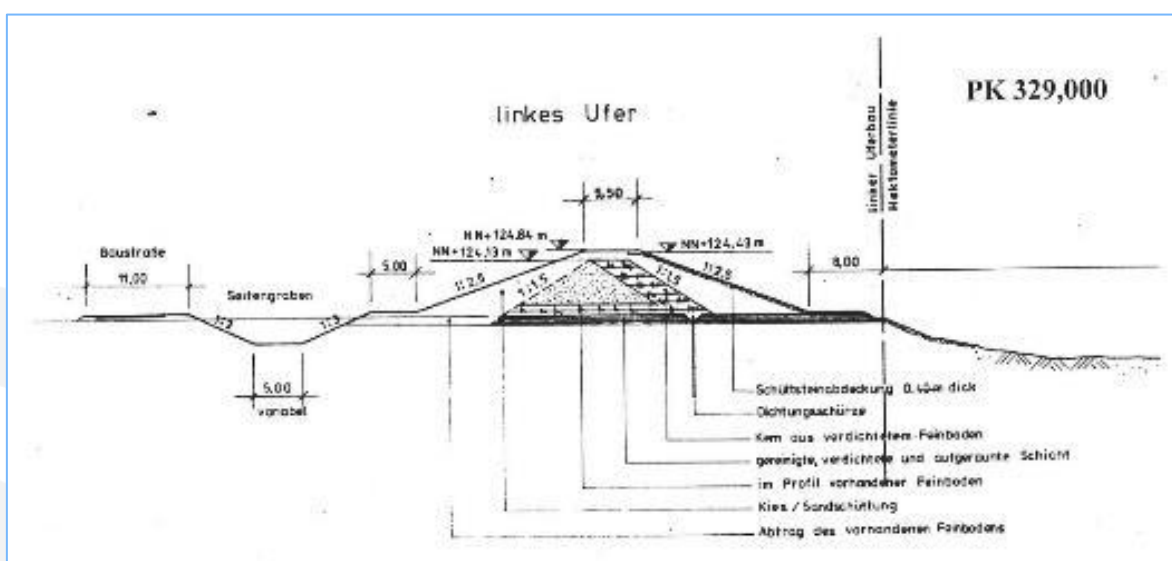


Figure 3 : Coupe type du barrage latéral d'IFFEZHEIM au PK 329,000

2.4 Les siphons de prise d'eau

Le polder est rempli grâce à six siphons (tuyaux en acier de diamètre 2 100 mm pour capacité totale de 160 m³/s) au-dessus du barrage latéral du Rhin au PK 330,000. Les siphons sont fondés sur des rideaux de palplanches côté Rhin et sur des massifs en béton côté terre. La fosse de dissipation (dans le canal de drainage) est également stabilisée par des rideaux de palplanches.

Le talus aval, la risberme et le talus canal de drainage du barrage latéral sont revêtus par des matelas Reno d'épaisseur 50 cm sur 50 m de part et d'autre du PK 330,000. Les matelas protègent le talus aval jusqu'à la cote 119,00 NN (RN+0,55 m) sous une couche de terre végétale de 10 cm.

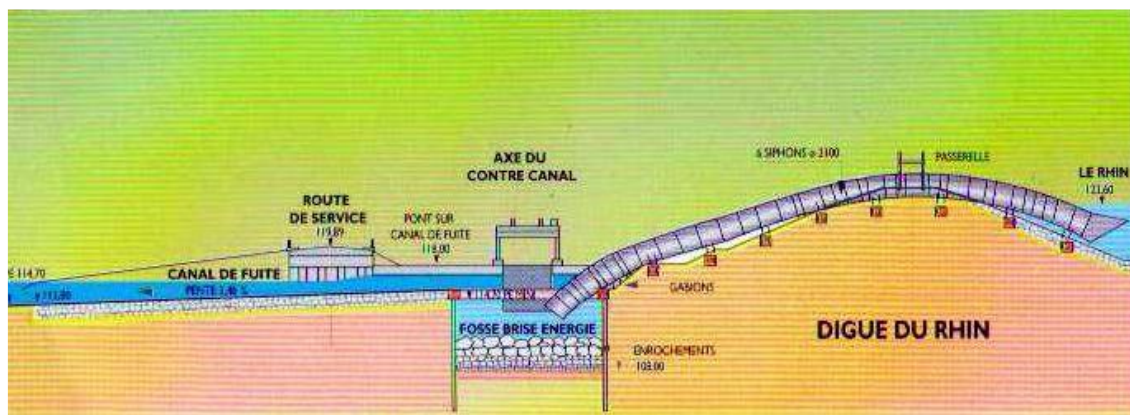


Figure 4 : Vue en coupe du barrage au PK 330,000 avec les siphons

L'amorçage des siphons est effectué à l'aide d'une pompe à vide mobile présente au Parc de GAMBSHEIM.

2.5 La digue ceinture

Les faces Ouest et Nord du Polder sont délimitées par une digue ceinture de près de 4,5 km avec les caractéristiques suivantes :

Tableau 3 : Caractéristiques de la digue ceinture

Type de barrage	Remblai zoné avec noyau limoneux et recharges sablo-graveleuses
Altitude crête (m NN)	119,20
Hauteur max par rapport au TN (m)	3,0 environ
Longueur totale (m)	4 500
Largeur en crête (m)	5,0
Pente du talus amont (H/V)	2,5/1
Pente du talus aval	2,7/1
Pente sous la risberme aval	2,5/1
Largeur risberme aval, digue Nord et Ouest (m)	10,0
Pente du talus du contre-canal	2/1

Sur les 700 premiers mètres, la digue n'est pas marquée sur la face amont par l'aménagement de la plateforme de la gravière Willersinn.

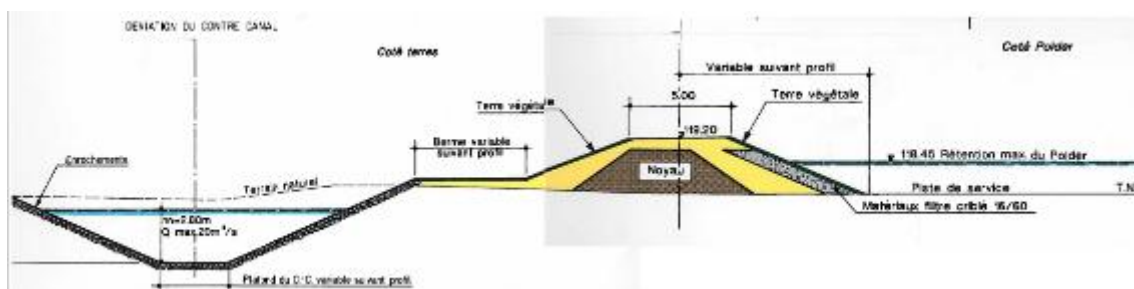


Figure 5 : Coupe de la digue ceinture sur la face Ouest avant l'OH5

La digue face ouest après l'OH5 et nord a fait l'objet d'un rechargement aval suite à la première mise en eau de 1992, en raison des résurgences de la nappe phréatique mises en pression par le remplissage du Polder.

Parallèlement à ce rechargement, trois zones de la digue ont été équipées d'un rideau de palplanches, pour un linéaire total de 280 m.

La description de ces travaux se trouve au §3.10.

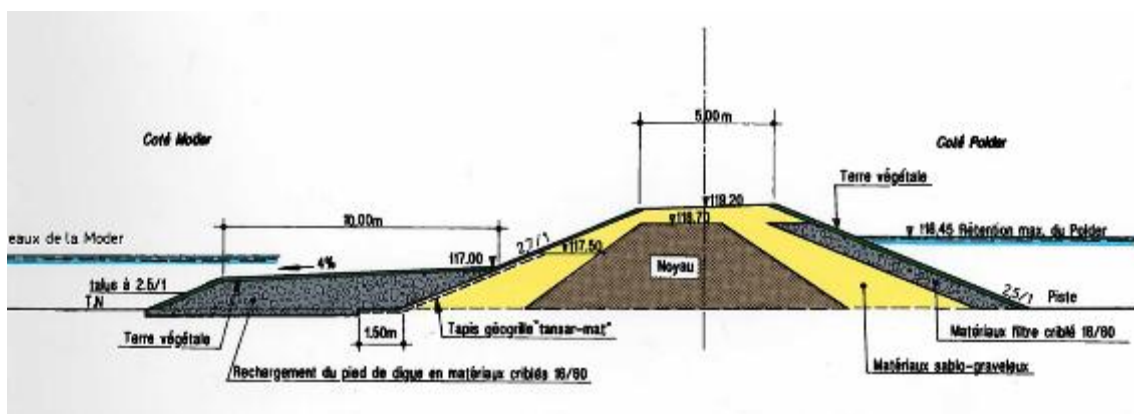


Figure 6 : Coupe type de la digue ceinture sur les faces Ouest et Nord

2.6 Les ouvrages de vidange

Cinq ouvrages assurent la vidange (OH 1, 2, 3 et 5) et le détournement des eaux du canal de drainage (OH 4). Un canal de dérivation reprend les eaux du canal de drainage au PK 328,500 vers la Moder.

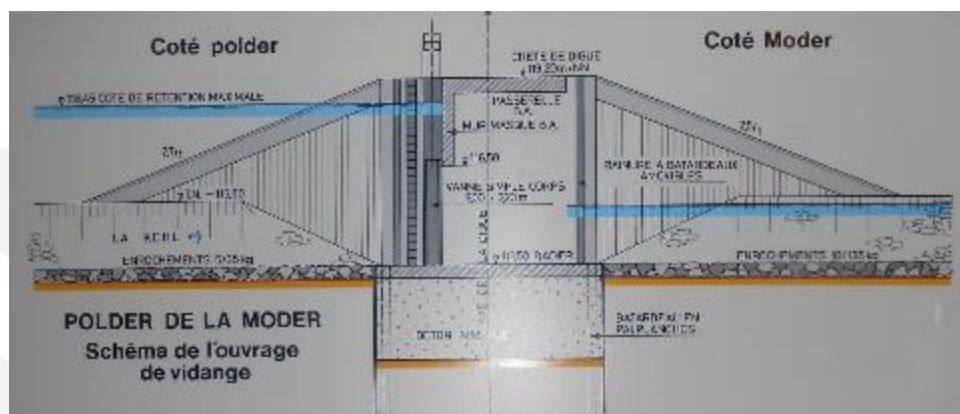


Figure 7 : Coupe type d'un ouvrage de vidange

2.7 Dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation du Polder se compose :

- De mesures de niveau amont et aval sur chaque OH et sur les siphons ;
- D'un réseau de piézomètres pour suivre la nappe phréatique en périphérie du Polder ;
- D'un réseau de piézomètres sur le barrage latéral d'IFFEZHEIM au droit des siphons.

Ces derniers sont relevés et contrôlés au sein des ouvrages du bief d'IFFEZHEIM.

3. ANALYSE ET SYNTHÈSE DES DONNÉES

3.1 Données topographiques

VNF dispose de plans d'archives au PCC (dossier d'ouvrage) mais uniquement en plans papiers.

Pour rappel, la conversion entre Normal Null et l'IGN69 est de +0,57 m ($Z_{\text{IGN69}} - Z_{\text{NN}} = 0,57$ m) au droit de DRUSENHEIM et d'IFFEZHEIM.

Lors du diagnostic, des investigations topographiques ont été réalisées en 2025 par GEOFIT. Au total, 9 profils en travers ont été réalisés au droit des désordres.

De plus, un profil en long de la crête a été réalisé, lequel montre que la crête se situe entre 119,63 et 119,95 m NGF (119,13 et 119,38 m NN). Deux zones sont au-dessous de la cote théorique de la crête (119,77 m NGF / 113,20 m NN) :

- Entre les PK 31,200 à 31,300 à environ 119,65 m NGF ;
- Un linéaire d'environ 20 m au PK 30,950.

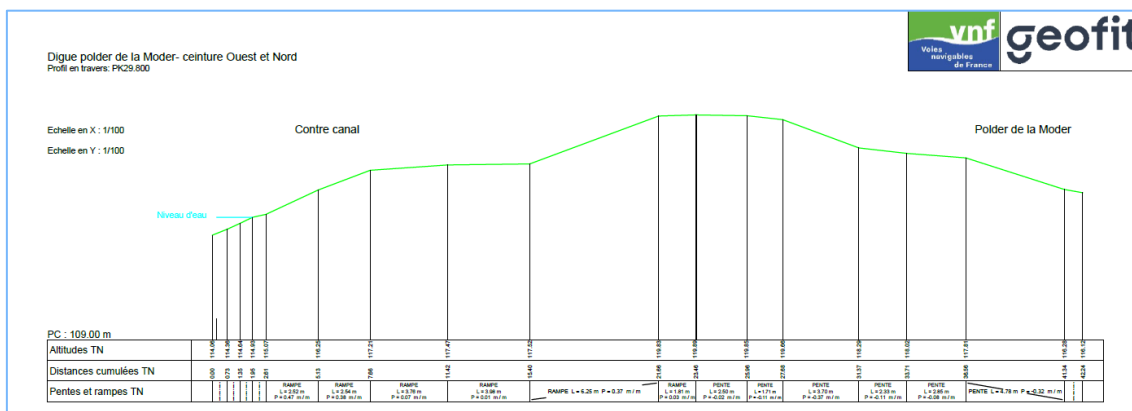


Figure 8 : Profil au PK 29,800

Les profils aux PK 29,600 et PK 29,800 montrent la configuration de la digue ouest à l'amont de l'OH5, soit pour les désordres 1 à 8. En effet, le profil de la digue est caractérisé par la présence du canal de dérivation en aval, en pied de la risberme de la digue. Par ailleurs, côté amont, la digue dispose d'une risberme à mi-hauteur, environ à 2 m sous le TN amont.

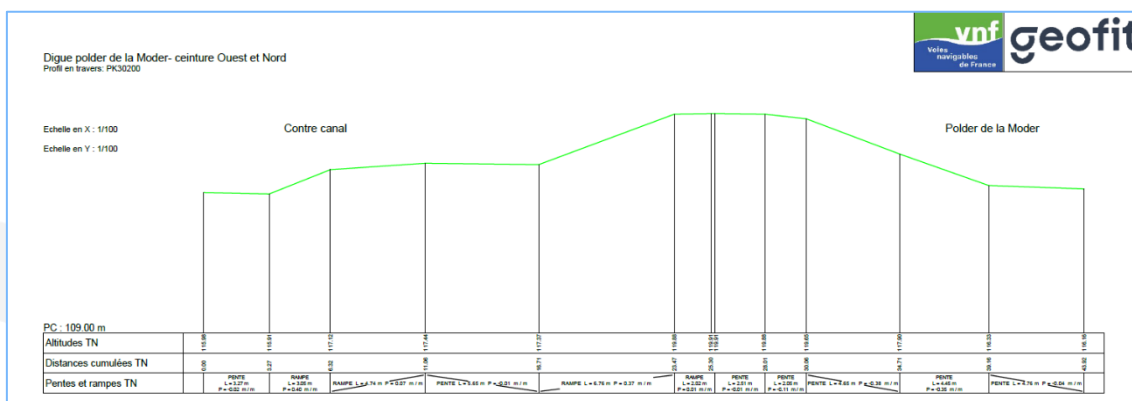


Figure 9 : Profil au PK 30,200

Les profils aux PK 30,200, PK 30,500 et PK 30,700 montrent la configuration de la digue ouest entre l'OH5 et la digue nord, soit pour les désordres 9 à 16. En effet, le profil de la digue est caractérisé par une risberme à 1,20m sous le TN aval.

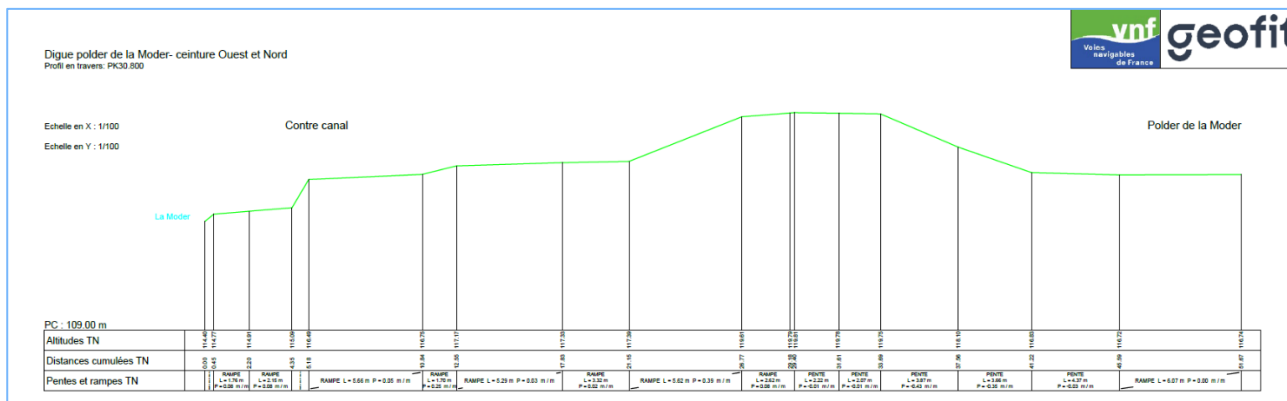


Figure 10 : Profil au PK 30,800

Le profil au PK 30,800 montre la configuration de la digue nord après le virage, soit pour les désordres 17 à 19. Le profil est caractérisé par sa proximité à la Moder. En effet, le pied de la risberme est la berge du cours d'eau.

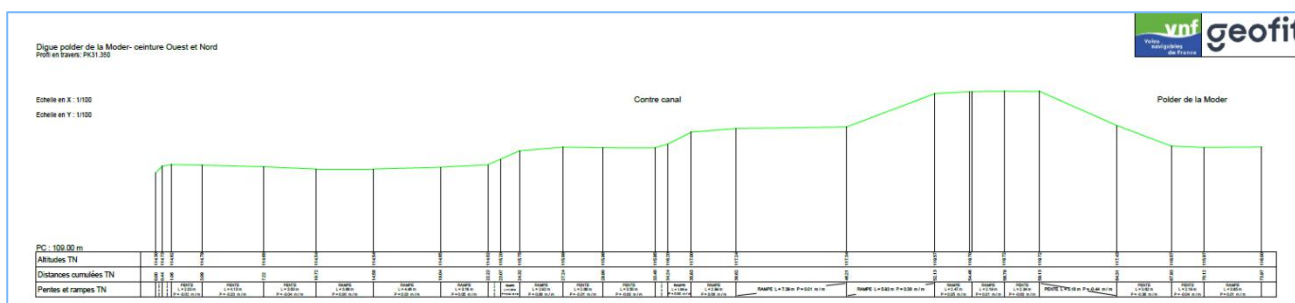


Figure 11 : Profil au PK 31,350

Le profil au PK 31,350 montre la configuration de la digue nord entre l'OH3 et l'OH2, soit pour les désordres 20 à 23. Le profil est caractérisé par une distance plus importante avec la Moder par rapport au profil précédent.

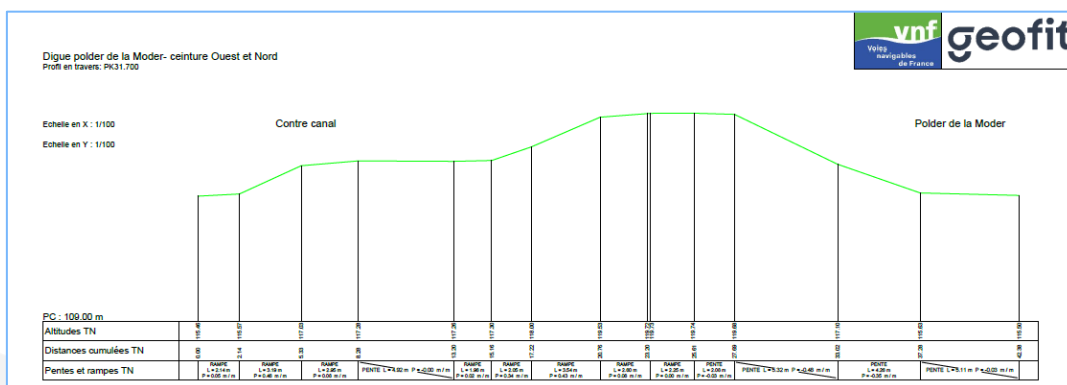


Figure 12 : Profil au PK 31,700

Le profil au PK 31,700 montre la configuration de la digue nord entre le bras de la Moder en pied aval et la zone d'emprunt de la gravière à l'amont, soit pour les désordres 24 et 25.

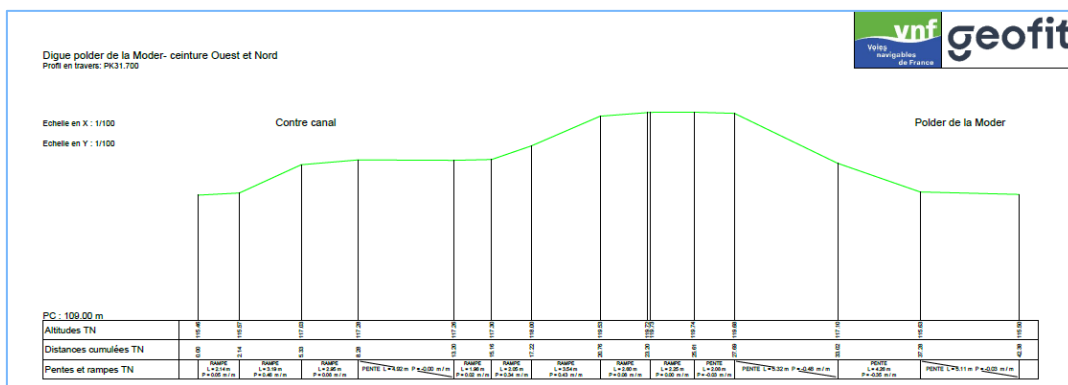


Figure 13 : Profil au PK 32,140

Le profil au PK 32,140 montre la configuration de la digue nord à la fin de la digue ceinture, soit pour les désordres 26. La digue est assez haute par rapport aux autres profils (environ 4m).

3.2 Données géotechniques

3.2.1 Carte géologique

La carte géologique du BRGM (feuille n°199 de SELTZ) indique que le site comporte essentiellement des alluvions rhénanes de l'Holocène (FzRd).

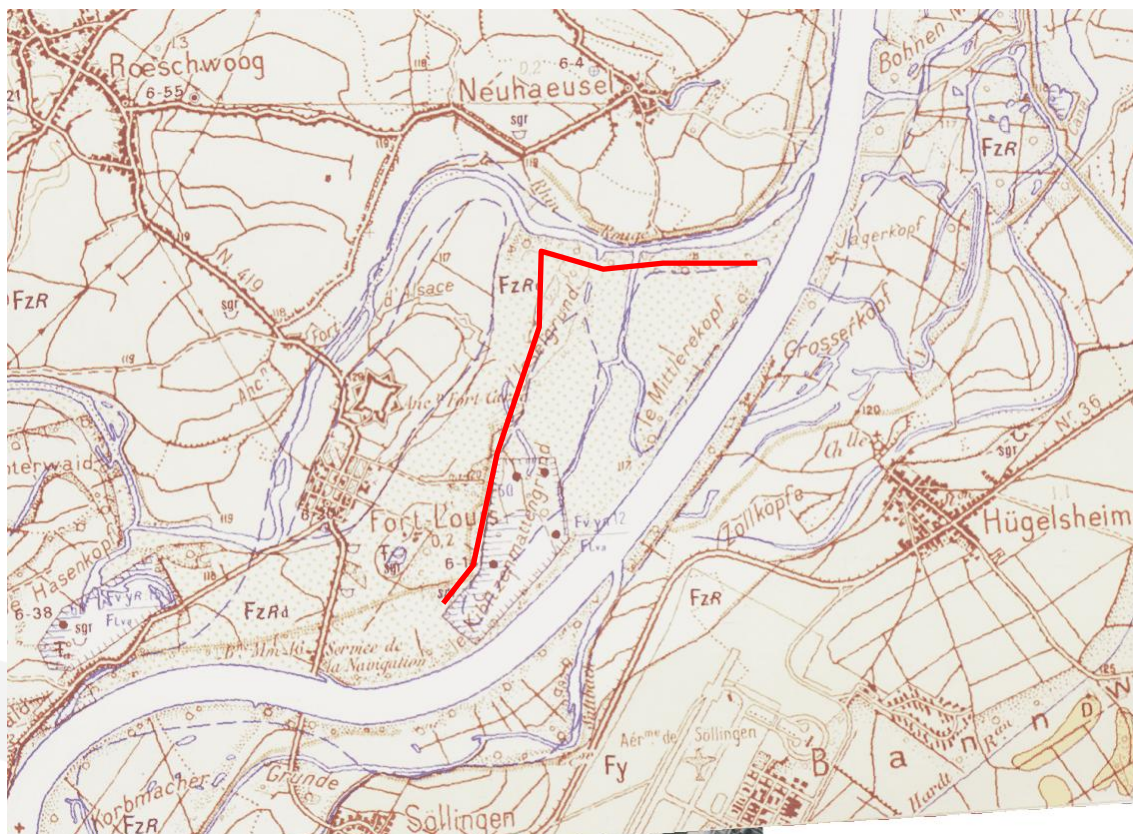


Figure 14 : Carte géologique au droit du Polder de la Moder

3.2.2 Etude géotechnique – LRPCS 1993

3.2.2.1 Reconnaissances géotechniques

En 1993 le Service de Navigation de Strasbourg a mandaté le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg pour réaliser une étude géotechnique et un avis technique suite aux phénomènes attestés pendant l'essai de remplissage du Polder en 1992 (essai de première mise en eau).

Dans le cadre de cette étude, un nombre assez important de sondages ont été réalisés entre 1992 et 1994 sur la digue ceinture en crête, en pied amont et aval. La base de données Infoterre du BRGM contient les résultats obtenus.

Les sondages sont repris dans le tableau ci-après et sur les cartes en annexe.

Tableau 4 : Sondages existants de 1992-1994 (BRGM)

Numéro de sondage	Point kilométrique	Position	Nivellement en tête (m NN)	Type sondage	Profondeur (m)
PK 4	29,430	Pied aval avec berme	116,91	Perméafor	6,5
PK 5	29,470	Pied aval avec berme	117,01	Perméafor	6,5
PK 6	29,510	Crête	119,38	Perméafor	10,5
PK 7	29,555	Pied aval avec berme	116,90	Perméafor	6,5
PK 8	29,815	Crête	119,28	Perméafor	11,0
PK 9	30,135	Crête	119,30	Perméafor	11,0
PK 10	30,500	Crête	119,27	Perméafor	11,0
PK 11	30,730	Amont	115,93	Perméafor	6,5
PK 12	30,770	Amont	116,32	Perméafor	6,0
PK 13	30,800	Amont	116,42	Perméafor	6,0
PK 14	30,830	Crête	119,21	Perméafor	11,0
PK 15	31,710	Amont	115,42	Perméafor	6,5
PK 16	31,830	Aval de la berme	115,55	Perméafor	6,5
PK 17	31,830	Crête	119,25	Perméafor	11,0
PK 18	31,940	Crête	119,24	Perméafor	11,0
PK 19	32,010	Amont	115,74	Perméafor	6,5
PK 20	31,830	Amont	116,14	Perméafor	17,5
PK 21	32,010	Amont	116,35	Perméafor	26,0
PK 22	31,940	Amont	116,14	Perméafor	25,0
PK 23 – SC	30,440	Amont	115,09	Carottage	28,7
PK 23	30,440	Amont	115,09	Perméafor	29,0
PK 24	31,030	Amont	114,57	Perméafor	28,0
PK 24 – SC	31,030	Amont	114,57	Carottage	28,6
PK 25	29,500	Amont	116,41	Perméafor	26,0
PK 25 – SC	29,500	Amont	116,41	Carottage	26,0
PZ	32,010	Crête	119,250	Piézomètre	8,0

L'implantation des sondages par rapport à l'ouvrage est déduite des coordonnées sur les documents et avec l'altitude de la tête de sondage.

Les Perméafor en crête affichent un noyau centrale étanche ($k < 1.10^{-7}$ m/s) sur 5 à 6 m de profondeur (PK 8, 9, 10, 17, 18). La fondation superficielle (0-3 à 0-4 m) affiche des zones très perméables allant au seuil haut de mesure du Perméafor ($k > 1.10^{-2}$ m/s). Ces perméabilités peuvent expliquer l'initiation d'érosion en fondation ou au contact noyau-fondation.

3.2.2.2 Résultats de l'étude

L'étude du LRPCS indique que les désordres sont apparus seulement 12 heures après avoir atteint le niveau de 117,5 m NN dans la retenue du Polder, soit à la suite d'un fonctionnement relativement bref de celui-ci. Ceci est assez proche des constats lors des essais de mise en eau de 2016 et 2025.

Par ailleurs, il est précisé que les conditions de l'essai étaient défavorables, car la nappe aval était très basse, contrairement à une situation réelle où la crue du Rhin provoque un remous dans la Moder à l'aval du BMR d'Iffezheim.

Un profil en travers a été réalisé au PK 31.940 à partir des résultats des investigations (PK 21, PK 18 et PK 19). Il atteste de la présence d'une couche d'alluvions perméables à très perméables, d'environ 8 m d'épaisseur, située entre les cotes 105,00 et 113,00 m NN.

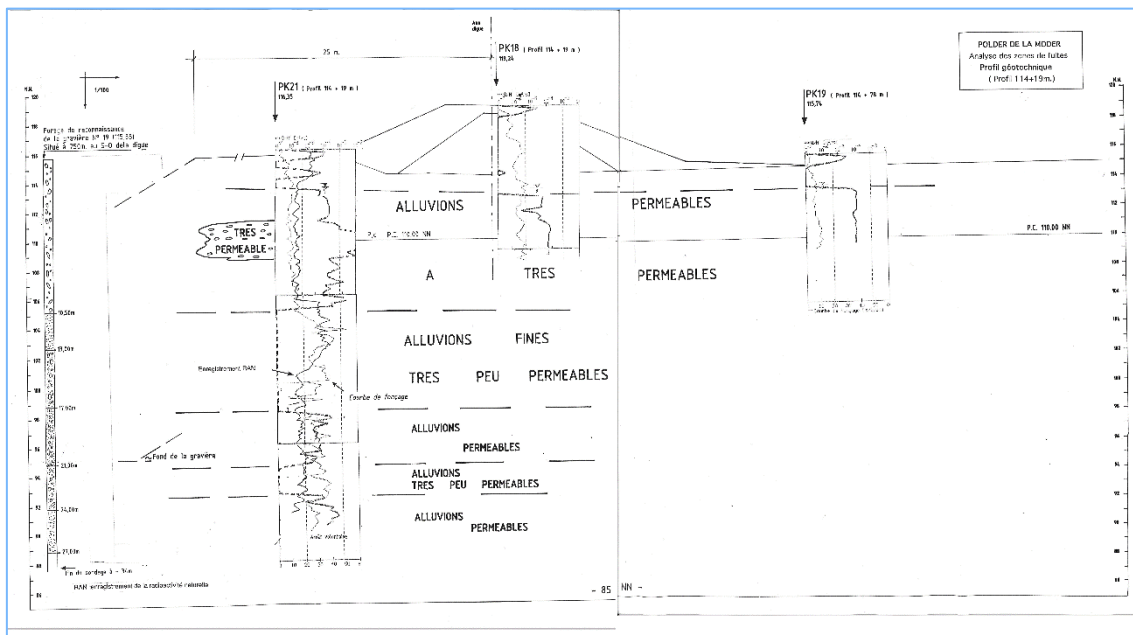


Figure 15 : Profil en travers de PERMEA FOR. Source : Etude géotechnique de LRPCS

Un profil en long a été ainsi réalisé à partir des résultats des investigations (PK20, PK21 et PK22). Le profil est compris entre les PK 31.940 au PK 32.010. Il atteste que le toit de la couche d'alluvions perméables à très perméables est assez constant (environ 113,00 m NN). Par contre, la base de la couche varie entre 105,00 m NN et 106,50 m NN.

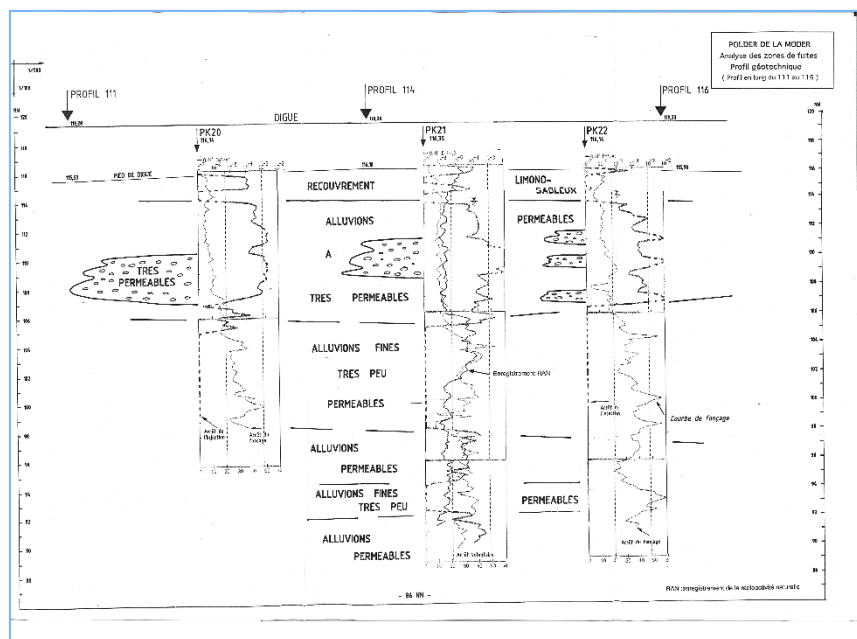


Figure 16 : Profil en long de PERMEAUFOR. Source : Etude géotechnique de LRPCS

Finalement, l'étude a abouti à la proposition des confortements suivants :

- Le pied de la digue doit être renforcé par la mise en place d'un tapis drainant en aval jusqu'au niveau 117,00 m NN, ainsi que par l'installation d'une protection des berges de la Moder ;
- La réalisation d'un écran vertical étanche localement sous le noyau dont la base atteindra les couches étanches identifiées, afin d'augmenter le cheminement hydraulique.

3.2.3 Thermométrie

Avec l'apparition des désordres, VNF a mandaté Solexperts pour la réalisation de mesures thermométriques les 30 et 31 janvier 2025 sur la digue du Polder sur 2 zones :

- Désordres n°9 à 11 – PK 30,180 (Zone 2) :
 - De manière générale, il n'y pas d'écoulements importants à travers le remblai de l'ouvrage (noyau) ;
 - 30/01 : Les écoulements sont identifiés sur les sondages à environ 5 m de profondeur en fondation, soit au niveau d'eau du canal de dérivation ;
 - 31/01 : Les écoulements sont encore actifs sur les mesures ;
- Désordres n°26 – PK 32,120 (Zone 1) :
 - De manière générale, il n'y pas d'écoulements importants à travers le remblai de l'ouvrage (noyau) ;
 - 30/01 : Les écoulements sont identifiés sur les sondages à environ 5-6 m de profondeur en fondation, soit au niveau d'eau de la Moder en contrebas ;
 - 31/01 : les écoulements sont encore actifs mais avec moins d'intensité que la veille.

Les mesures attestent bien des écoulements concentrés dans des horizons en fondation avec une perméabilité très forte, probablement des zones sableuses ou très graveleuses. Les mesures attestent aussi localement de poches plus étanches dans la fondation.

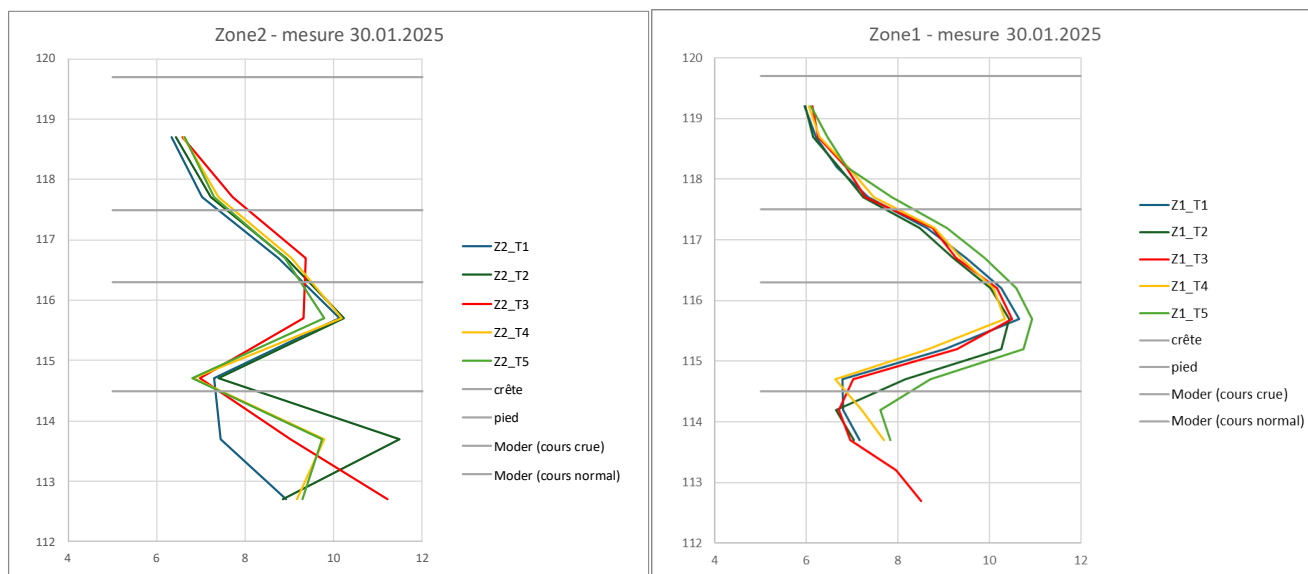


Figure 17 : Mesures thermométriques du 30/01/2025 (Solexperts)

3.3 Investigations GEOTEC 2025

3.3.1 Programme

En 2025, des reconnaissances ont été réalisées par FONDASOL. Le programme de reconnaissances a été établi avec pour objectif d'alimenter la connaissance sur l'ouvrage.

Le programme est le suivant :

- Tomographie électrique (approche systématique) : 29 profils réalisés, dont 16 en pied de talus et 13 en crête ;
- Sondages carottés (SC) : 14 sondages, répartis en 4 en pied et 10 en crête, avec des profondeurs comprises entre 7 et 20 m ;
- Essais au pénétromètre statique (CPT) : 30 essais, dont 15 en pied et 15 en crête, atteignant des profondeurs allant de 1,60 à 13,70 m. Certains essais ont nécessité la réalisation d'un avant-trou ;
- 19 essais de perméabilité de type Lefranc répartis dans les différents SC ;
- Analyse de laboratoire :
 - ☐ 46 identifications GTR (teneur en eau, granulométrie et VBS) ;
 - ☐ 16 analyses sédimentologiques ;
 - ☐ 10 masses volumiques ;
 - ☐ 6 Hole Erosion Test.

L'implantation des investigations est annexée. Les sondages carottés et CPT ont été ciblés sur les anomalies de l'essai de mise en eau de 2025 et selon les résultats des panneaux électriques.

Par ailleurs, deux identifications GTR ont été réalisées sur le matériau des sand-boils, plus précisément ceux des désordres 11 et 23.

3.3.2 Lithologie

Les sondages affichent la lithologie suivante :

- SC0-1 (crête 119,75 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 3,00 m : remblais sablo-graveleux, classés B3/D2 (G1). On note l'absence de noyau ;

- ☐ 3,00 – 5,00 m : sables limoneux à graviers, classés B5 (G3) ;
- ☐ 5,00 – 12,00 m : sables et graviers (alluvions naturels probables).
- SC1-1 (crête 119,75 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 4,50 m : sables et graviers à matrice sableuse et limoneuse, classés B5 (G3) selon l'échantillon de 1,95-2,60 m, ainsi que D2 (G3) selon l'échantillon de 3,00-4,50 m ;
 - ☐ 4,50 – 7,50 m : graviers et sables, classés D2 (G1) selon l'échantillon de 6,00-6,50m ;
 - ☐ 7,50 – 10,00 m : graviers ;
 - ☐ 10,00 – 12,00 m : graviers et sables.
- SC3-1 (crête 119,80 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 1,90 m : remblais sablo-graveleux, classés D2 (G1) ;
 - ☐ 1,90 – 3,00 m : noyau sablo-limoneux à limon-sableux, classé A1 (F1) selon l'échantillon de 1,90-2,90 m ;
 - ☐ 3,00 – 12 m : graviers et sables, classés D2 (G1) selon l'échantillon de 3,25-4,50m, et B3 (G3) selon l'échantillon de 4,50-6,00 m ;
- SC4-1 (crête 119,70 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 1,20 m : remblais sablo-graveleux ;
 - ☐ 1,20 – 4,85 m : noyau sablo-limoneux, classé B5 (I1) selon l'échantillon de 1,50-3,00 m et A1 (F1) selon l'échantillon de 3,00-4,50 m ;
 - ☐ 4,85 – 12 m : graviers et sables, classés B4 (G1) selon l'échantillon de 4,85-6,00.
- SC4-2 (crête 117,30 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 4,50 m : graviers et sables ;
 - ☐ 4,50 – 6,00 m : graviers, cailloux et sables ;
 - ☐ 4,50 – 7,00 m : graviers et sables.
- SC5-1 (crête 119,75 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 1,15 m : remblais sablo-graveleux ;
 - ☐ 1,15 – 5,15 m : noyau sablo-limoneux, classé B5 (I1) selon les échantillons de 1,50-3,00 m et 3,10-4,30 m ;
 - ☐ 5,15 – 12 m : graviers et sables, classés D2 (G1) selon l'échantillon de 5,15-6,00.
- SC9-1 (crête 119,70 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 0,50 m : remblais sablo-graveleux ;
 - ☐ 0,50 – 4,30 m : noyau sablo-limoneux, classé A1 (F1) selon les échantillons de 1,50-3,00 m et 3,00-4,30 m ;
 - ☐ 4,30 – 20 m : graviers et sables, classés D2 (G3) selon l'échantillon de 5,00-6,00.
- SC9-2 (risberme aval 117,35 m NGF) :
 - ☐ Sols à dominance sablo-graveleuse sur toute hauteur sauf pour les passages suivants :
 - ☐ 0,80 – 1,20 m : passage limoneux ;
 - ☐ 10,00 – 12 m : passage sablo-limoneux.
- SC12-1 (crête 119,70 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 0,70 m : remblais sablo-graveleux ;
 - ☐ 0,70 – 4,50 m : noyau sablo-limoneux, classé A1 (F1) selon les échantillons de 1,50-3,00 m et 3,00-4,30 m. **Un passage graveleux à 3,00-3,25m, classé D2 (G1) ;**

- ☐ 4,50 – 20 m : alluvions sablo-graveleuses, classés D2 (G1) selon l'échantillon de 4,50-6,00.
- SC12-2 (risberme aval 117,9 m NGF) :
 - ☐ Sols à dominance sablo-graveleuse sur toute hauteur sauf pour une lentille limono-sableuse à 3m de profondeur.
- SC13-1 (crête 119,65 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 0,65 m : remblais sablo-graveleux ;
 - ☐ 0,65 – 5,80 m : noyau sablo-limoneux, classé A1 (F1) selon les échantillons de 3,00–4,50 m et 4,50-5,80 m ;
 - ☐ 5,80 – 10 m : graves à matrice sableuse, classés B3 (G3) selon l'échantillon de 6-7,50m ;
 - ☐ 10 – 15 m : sables et graviers.
- SC13-2 (crête 117,9 m NGF) :
 - ☐ 0 – 1,50 m : couche limoneuse de surface, classé A1 (F1) ;
 - ☐ 1,50 – 4,50 m : sables et graviers, classés D2 (G1) selon l'échantillon de 3-4,5m ;
 - ☐ 4,50 – 10 m : sols à dominance sableuse, classés B1 (S2) selon l'échantillon 4,5-6m.
- SC14-1 (crête 119,65 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 0,45 m : remblais sablo-graveleux ;
 - ☐ 0,45 – 4,50 m : noyau sablo-limoneux, classé A1 (F1) selon les échantillons de 0,45–1,50m ; 3,60-4,25m et 4,50-4,80m ;
 - ☐ 4,50 – 6 m : graves et sables légèrement limoneux, classés D2 (G1) selon l'échantillon de 4,80-6,00m ;
 - ☐ 6,00 – 12 m : sables et graviers.
- SC15-1 (crête 119,75 m NGF) :
 - ☐ 0,00 – 0,70 m : remblais sablo-graveleux ;
 - ☐ 0,70 – 5,00 m : noyau sablo-limoneux, classé A1 (F1) selon les échantillons de 1,50-3,00m et 3,60-4,50m ;
 - ☐ 4,50 – 12 m : graves et sables, classés D2 (G1) selon l'échantillon de 5,00-6,00m ;

3.3.3 Essais en laboratoire

Tableau 5 : Résultats de laboratoire – GEOTEC 2025

	Profondeur (m/TA)	Altitude (m NGF)	W (%)	< 2 mm (%)	< 63 µm (%)	< 2 µm (%)	Cu	VBS	GTR
SC0-1	2,20 - 3,00	117,55 - 116,75	4,2	26,5	4,6	-	36	0,10	B3/D2 (G1)
SC0-1	3,00 - 3,50	116,75 - 116,25	11,6	61,7	22,3	-	-	0,39	B5 (I1)
SC0-1	5,00 - 6,00	114,75 - 113,75	3,6	23,2	3,4	-	29	0,04	D2 (G1)
SC1-1	1,95 - 2,60	117,80 - 117,15	9,6	39,9	13,0	2,0	213	0,18	B5 (G3)
SC1-1	3,00 - 4,50	116,75 - 115,25	5,1	24,9	5,4	-	45	0,03	D2 (G3)
SC1-1	6,00 - 6,50	113,75 - 113,25	3,0	13,4	2,2	-	20	0,02	D2 (G1)
SC3-1	1,50 - 1,90	118,30 - 117,90	5,7	30,2	4,4	-	45	0,08	D2 (G1)
SC3-1	1,90 - 2,90	117,90 - 116,90	20,2	98,7	48,3	11,6	-	1,03	A1 (F1)
SC3-1	3,25 - 4,50	116,55 - 115,30	2,5	29,2	4,8	-	35	0,04	D2 (G1)

	Profondeur (m/TA)	Altitude (m NGF)	W (%)	< 2 mm (%)	< 63 µm (%)	< 2 µm (%)	Cu	VBS	GTR
SC3-1	4,50 - 6,00	115,30 - 113,80	3,7	42,3	9,0	-	60	0,14	B3 (G3)
SC4-1	1,50 - 3,00	118,20 - 116,70	12,8	85,6	29,2	5,4	29	0,58	B5 (I1)
SC4-1	3,00 - 4,50	116,70 - 115,20	20,8	95,6	48,6	11,1	115	0,65	A1 (F1)
SC4-1	4,85 - 6,00	114,85 - 113,70	4,9	45,7	2,6	-	25	0,22	B4 (G1)
SC4-2	0,70 - 1,10	116,60 - 116,20	16,1	69,9	30,2	-	-	1,02	B5 (I1)
SC4-2	1,50 - 3,00	115,80 - 114,30	3,5	16,0	0,4	-	12	0,02	D2 (G1)
SC5-1	1,50 - 3,00	118,25 - 116,75	13,2	76,8	23,8	4,4	23	0,48	B5 (I1)
SC5-1	3,10 - 4,30	116,65 - 115,45	14,5	83,0	32,4	6,7	61	0,77	B5 (I1)
SC5-1	5,15 - 6,00	114,60 - 113,75	5,1	18,8	1,4	-	3	0,03	D2 (G1)
SC9-1	1,50 - 3,00	118,20 - 116,70	19,3	99,7	38,9	4,7	20	0,55	A1 (F1)
SC9-1	3,50 - 4,30	116,20 - 115,40	19,6	96,7	64,7	15,4	-	1,96	A1 (F1)
SC9-1	5,00 - 6,00	114,70 - 113,70	6,6	23,1	5,7	-	48	0,05	D2 (G3)
SC9-2	0,10 - 0,50	117,25 - 116,85	19,9	73,6	13,7	-	60	0,00	B5 (S3 ou S4)
SC9-2	1,50 - 2,70	115,85 - 114,65	5,9	23,7	2,3	-	3	0,03	D2 (G1)
SC9-2	3,00 - 4,50	114,35 - 112,85	4,9	22,1	1,7	-	7	0,02	D2 (G1)
SC12-1	1,50 - 3,00	118,11 - 116,61	21,9	97,4	57,9	13,1	-	1,14	A1 (F1)
SC12-1	3,00 - 3,25	116,61 - 116,36	3,5	15,6	2,9	-	3	0,02	D2 (G1)
SC12-1	3,65 - 4,50	115,96 - 115,11	18,4	91,7	55,4	12,3	-	0,80	A1 (F1)
SC12-1	4,50 - 6,00	115,11 - 113,61	6,9	33,8	4,2	-	30	0,05	D2 (G1)
SC12-2	0,05 - 1,35	117,85 - 116,55	2,5	24,1	4,0	-	4	0,06	D2 (G1)
SC12-2	1,50 - 3,00	116,40 - 114,90	2,2	27,2	4,1	-	4	0,06	D2 (G1)
SC12-2	3,20 - 4,50	114,70 - 113,40	9,7	56,5	1,8	-	12	0,05	D2 (S1)
SC13-1	3,00 - 4,50	116,65 - 115,15	23,6	98,0	60,3	13,1	-	1,36	A1 (F1)
SC13-1	4,50 - 5,80	115,15 - 113,85	31,0	99,4	64,6	-	-	1,75	A1 (F1)
SC13-1	6,00 - 7,50	113,65 - 112,15	10,1	45,4	10,2	-	60	0,18	B3 (G3)
SC13-2	0,80 - 1,50	116,40 - 115,70	16,5	78,7	47,9	-	-	1,30	A1 (F1)
SC13-2	3,00 - 4,50	114,20 - 112,70	10,6	48,6	2,0	-	22	0,06	D2 (G1)
SC13-2	4,50 - 6,00	112,70 - 111,20	11,1	74,5	1,5	-	3	0,14	B1 (S2)
SC14-1	0,45 - 1,50	119,20 - 118,15	16,6	88,8	50,1	7,3	50	1,10	A1 (F1)
SC14-1	3,60 - 4,25	116,05 - 115,40	26,0	97,5	70,3	15,3	-	1,70	A1 (F1)
SC14-1	4,50 - 4,80	115,15 - 114,85	17,8	67,3	40,2	7,0	78	0,99	A1 (F1)
SC14-1	4,80 - 6,00	114,85 - 113,65	9,4	45,9	5,0	-	30	0,05	D2 (G1)
SC15-1	1,50 - 3,00	118,25 - 116,75	17,2	81,7	38,6	9,0	109	1,06	A1 (F1)
SC15-1	3,60 - 4,50	116,15 - 115,25	22,0	96,8	52,3	9,3	71	1,36	A1 (F1)
SC15-1	5,00 - 6,00	114,75 - 113,75	5,5	25,8	3,0	-	27	0,04	D2 (G1)

	Profondeur (m/TA)	Altitude (m NGF)	W (%)	< 2 mm (%)	< 63 µm (%)	< 2 µm (%)	Cu	VBS	GTR
Sac 1	-	-	1,9	100,0	1,4	-	2	0,08	D1 (S2)
Sac 23	-	-	14,5	100,0	1,0	-	2	0,08	D1 (S2)

Tableau 6 : Masses volumiques – GEOTEC 2025

	Profondeur (m/TA)	Altitude (m NGF)	Nature du terrain testé	ph (g/cm3)	pd (g/cm3)
SC3-1	1,90 - 2,90	117,90 - 116,90	Sable limoneux marron légèrement argileux	1,96	1,62
SC4-1	1,50 - 3,00	118,20 - 116,70	Sable limoneux marron à quelques graviers	1,91	1,66
SC9-1	1,50 - 3,00	118,20 - 116,70	Sable limoneux marron	1,75	1,49
SC12-1	1,50 - 3,00	118,11 - 116,61	Limon sableux marron légèrement argileux	1,83	1,47
SC12-2	1,50 - 3,00	116,40 - 114,90	Graviers et sable marron	1,85	1,8
SC13-2	0,80 - 1,50	116,40 - 115,70	Limon sablonneux marron à graviers	1,89	1,59
SC15-1	1,50 - 3,00	118,25 - 116,75	Sable limoneux marron très légèrement argileux à quelques graviers	1,84	1,54

Le tableau suivant résume les résultats des HET.

Tableau 7 : Résultats des HET – GEOTEC/GeophyConsult 2025

Échantillons							Résultats d'essais									
Provenance		Caractéristiques					Conduits		Contrainte critique			Indice d'érosion de Fell			Indice de résistance à l'érosion	Qualité globale de l'essai
Sondage	Profondeur	Type d'essai	Teneur en eau	Masse volumique sèche	Fraction écrétée	Longueur échantillon	Diamètre initial	Diamètre final	Min	Retenu	Max	Min	Retenu	Max		
SC3-1	2,65-2,85m	Intact	22,1 %	1.63 Mg/m3	-	140 mm	6,0 mm	11,2 mm	120 Pa	120 Pa	140 Pa	3,1	3,2	3,2	4,5	Acceptable
SC9-1	0,65-0,75m	Intact	21,3 %	1.62 Mg/m3	-	100 mm	6,0 mm	11,8 mm	220 Pa	220 Pa	220 Pa	2,8	3,0	3,1	4,0	Acceptable
	3,85-3,95m	Intact	20,6 %	1.73 Mg/m3	-	100 mm	6,0 mm	9,8 mm	110 Pa	120 Pa	130 Pa	3,6	3,6	3,6	4,8	Acceptable
SC13-1	5,65-5,80m	Remanié	24,8 %	1.57 Mg/m3	8,6 %	150 mm	6,0 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	Non acceptable
SC14-1	3,90-4,10m	Intact	29,6 %	1.52 Mg/m3	-	137 mm	6,0 mm	10,2 mm	430 Pa	450 Pa	490 Pa	3,3	3,5	3,8	5,1	Acceptable
SC15-1	4,25-4,45m	Remanié	21,2 %	1.67 Mg/m3	1,1 %	150 mm	6,0 mm	14,7 mm	36 Pa	46 Pa	65 Pa	2,7	2,9	3,0	3,8	Acceptable

3.3.4 Essais d'eau

Le tableau ci-dessous présente les résultats des essais d'eau Lefranc réalisés.

Tableau 8 : Essais d'eau Lefranc – GEOTEC 2025

Sondage	Profondeur (m)	Altitude (m NGF)	Nature de sols	Perméabilité (m/s)
SC0-1	2,00 - 3,00	117,75 - 116,75	Sable et graviers	$> 1.10^{-4}$
SC1-1	2,00 - 3,00	117,75 - 116,75	Graviers à matrice limono-sableuse	$> 1.10^{-4}$
	4,00 - 5,00	115,75 - 114,75	Sables et graviers	$> 1.10^{-4}$
	5,00 - 6,00	114,75 - 113,75	Limons sableux	$> 1.10^{-4}$
SC3-1	1,50 - 2,50	118,30 - 117,30	Sables et graviers	2.10^{-7}
	5,00 - 6,00	114,80 - 113,80	Graviers à matrice limono-sableuse	$> 1.10^{-4}$
SC4-1	2,00 - 3,00	117,70 - 116,70	Sables limoneux à rare graviers	1.10^{-7}
	3,00 - 4,00	116,70 - 115,70	Sables limoneux à rare graviers	$< 1.10^{-7}$
SC5-1	2,00 - 3,00	117,75 - 116,75	Sables limoneux à rare graviers	1.10^{-7}
	3,50 - 4,50	116,25 - 115,25	Sables limoneux à rare graviers	1.10^{-7}

SC9-1	2,00 - 3,00	117,70 - 116,70	Sables limoneux à graviers	2.10^{-7}
	3,00 - 4,00	116,70 - 115,70	Sables limoneux	$< 1.10^{-7}$
SC12-1	2,00 - 3,00	117,61 - 116,61	Sables limoneux à quelques graviers	2.10^{-7}
SC13-1	4,00 - 5,00	115,65 - 114,65	Sables limoneux	2.10^{-7}
	6,00 - 7,00	113,65 - 112,65	Sables et graviers	$> 1.10^{-4}$
SC14-1	2,00 - 3,00	117,65 - 116,65	Sables limoneux à graviers	4.10^{-7}
	3,50 - 4,50	116,15 - 115,15	Limon sableux	$< 1.10^{-7}$
SC15-1	2,00 - 3,00	117,75 - 116,75	Limon sableux à graviers	$< 1.10^{-7}$
	5,50 - 6,50	114,25 - 113,25	Sables et graviers	$> 1.10^{-4}$

3.3.5 Résultats des essais mécaniques

- CPT1-1 (Crête = 119,82 m NGF)
 - 0,00 - 1,00 m : Un passage dense en surface → $q_c = 25$ MPa ;
 - 1,00 - 2,30 m : Un passage faible dans le corps de l'ouvrage → $q_c = 4$ MPa ;
 - 2,30 - 3,10 m : Un passage dense → $q_c = 25$ MPa ;
 - 4,00 - 9,90 m : Un passage très dense dans la fondation → $q_c > 25$ MPa, avec un passage faible/moyennement dense à 3,50 m → $q_c = 6$ MPa ;
 - 9,90 - 11,00 m : Un passage moyennement dense en fondation → $q_c = 8$ MPa ;
 - 11,00 - 12,00 m : Un passage faible à moyennement dense → $q_c = 6$ MPa.
- CPT1-2 (risberme aval = 117,51 m NGF)
 - 0,00 - 7,90 m : Un passage très dense entre la surface et la fondation → $q_c > 25$ MPa, avec deux passages denses à 1,70 m ($q_c = 10$ MPa) et à 6,90 m ($q_c = 16$ MPa) ;
 - **7,90 - 8,30 m : Un passage très faible en fondation → $q_c < 2$ MPa ;**
 - 8,30 - 10,00 m : Un passage faible à moyennement dense → $q_c = 6$ MPa.
- CPT2-1 (Crête = 119,89 m NGF)
 - 0,00 - 0,90 m : Un passage très dense en surface → $q_c = 27$ MPa ;
 - 0,90 - 1,30 m : Un passage dense → $q_c = 10$ MPa ;
 - 1,30 - 3,50 m : Un passage faible dans le corps de l'ouvrage → $q_c = 4$ MPa ;
 - 3,50 - 9,20 m : Un passage très dense → $q_c > 25$ MPa, avec plusieurs passages moins denses à 5,40 m ($q_c = 16$ MPa), à 7,50 m (18 MPa) et à 8,90 m ($q_c = 18$ MPa) ;
 - 9,20 - 10,50 m : Un passage dense en fondation → $q_c = 10$ MPa ;
 - 10,50 - 12,00 m : Un passage très dense → $q_c = 20$ MPa.
- CPT2-2 (risberme aval = 117,58 m NGF)
 - 0,00 - 3,00 m : Un passage très dense en surface → $q_c > 25$ MPa ;
 - 3,00 - 3,50 m : Un passage dense → $q_c = 14$ MPa ;
 - 3,50 - 6,50 m : Un passage très dense → $q_c > 25$ MPa, avec un point moins dense à 5,20 m avec $q_c = 16$ MPa ;
 - 6,50 - 7,50 m : Un passage dense en fondation → $q_c = 16$ MPa ;
 - 7,50 - 8,50 m : Un passage dense en fondation → $q_c = 20$ MPa ;
 - 8,50 - 10,00 m : Un passage très dense en fondation → $q_c > 25$ MPa.

- CPT3-1 (Crête = 119,83 m NGF)
 - 0,00 - 0,40 m : Un passage très dense en surface → $q_c = 25$ MPa ;
 - 0,40 - 1,10 m : Un passage très faible dans le corps de l'ouvrage → $q_c = 2$ MPa ;
 - 1,10 - 3,00 m : Un passage moyennement dense en corps de l'ouvrage → $q_c = 6$ MPa ;
 - 3,00 - 8,00 m : Un passage très dense dans le corps et fondation de l'ouvrage → $q_c > 25$ MPa, avec un point dense à 6,00 m ($q_c = 10$ MPa) ;
 - 8,00 - 9,00 m : Un passage dense en fondation → $q_c = 10$ MPa ;
 - 9,00 - 12,00 m : La fondation très dense → $q_c = 20$ MPa.
- CPT3-2 ter (risberme aval = 117,52 m NGF)
 - 0,00 - 0,50 m : La surface très dense → $q_c > 25$ MPa ;
 - L'essai n'a pas été poursuivi étant le 3^e essai.
- CPT4-1 (Crête = 119,88 m NGF)
 - 0,00 - 0,50 m : Un passage très dense en surface → $q_c = 25$ MPa ;
 - 0,50 - 1,50 m : Un passage très faible en surface → $q_c = 2$ MPa ;
 - 1,50 - 2,20 m : Un passage dense dans le corps de l'ouvrage → $q_c = 10$ MPa ;
 - **2,20 - 4,10 m : Un passage très faible dans le corps de l'ouvrage → $q_c = 2$ MPa**, avec points durs à différents profondeurs (3,00 et 3,50 m) ;
 - 4,10 - 9,20 m : La fondation très dense → $q_c > 25$ MPa, avec un point faible à 5,50 m ($q_c = 4$ MPa) et un point dur à 7,80 m ($q_c = 16$ MPa).
- CPT4-2 (risberme aval = 117,37 m NGF)
 - 0,00 - 0,50 m : La surface dense → $q_c = 18$ MPa ;
 - **0,50 - 1,50 m : Un passage très faible dans la surface → $q_c = 2$ MPa ;**
 - 1,50 - 2,20 m : Un passage très dense → $q_c = 25$ MPa ;
 - 2,20 - 3,70 m : Un passage moyennement dense à dense → q_c entre 8 et 16 MPa ;
 - 3,70 - 8,00 m : La fondation de l'ouvrage moyennement dense → $q_c = 6$ MPa, avec un point très dense à 6,90 m ($q_c = 25$ MPa) ;
 - **8,00 - 9,10 m : Un passage très faible en fondation → $q_c < 2$ MPa ;**
 - 9,10 - 10,00 m : La fondation dense → $q_c = 20$ MPa.
- CPT5-1 (Crête = 119,87 m NGF)
 - 0,00 - 0,50 m : La surface dense → $q_c = 25$ MPa ;
 - 0,50 - 3,90 m : Le corps de l'ouvrage moyennement dense à faible → q_c entre 2 et 6 MPa ;
 - **3,90 - 4,30 m : Un passage très faible dans le corps du barrage → $q_c < 2$ MPa ;**
 - 4,30 - 5,60 m : Un passage moyennement dense → $q_c = 6$ MPa ;
 - 5,60 - 6,80 m : Un passage faible en fondation → $q_c = 4$ MPa ;
 - 6,80 - 7,00 m : Un passage très dense en fondation → $q_c = 25$ MPa ;
 - 7,00 - 9,00 m : Un passage dense en fondation → $q_c = 12$ MPa ;
 - 9,00 - 10,00 m : Un passage dense à très dense en fondation → $q_c = 20$ MPa ;
 - 10,00 - 10,80 m : Un passage dense → $q_c = 14$ MPa ;
 - 10,80 - 12,00 m : La fondation très dense → $q_c > 25$ MPa ;
- CPT5-2 (risberme aval = 117,4 m NGF)
 - 0,00 - 1,50 m : La surface dense → $q_c = 10$ MPa, avec un point faible à 1 m ($q_c = 4$ MPa) ;

- ☐ **1,50 - 3,20 m : Un passage très faible → qc = 2 MPa**, avec certains points très denses (qc = 25 MPa) ;
 - ☐ 3,20 - 6,00 m : Un passage moyennement dense → qc = 6 MPa ;
 - ☐ 6,00 - 8,00 m : Un passage dense en fondation → qc = 14 MPa ;
 - ☐ 8,00 - 10,00 m : La fondation très dense → qc > 25 MPa.
- CPT6-1 (Crête = 119,90 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 0,50 m : La surface très dense → qc = 25 MPa ;
 - ☐ 0,50 - 3,50 m : Un passage moyennement dense dans le corps de l'ouvrage → qc entre 6 et 8 MPa ;
 - ☐ **3,50 - 4,00 m : Un passage très faible dans le corps de l'ouvrage → qc entre 2-3 MPa ;**
 - ☐ 4,00 - 8,00 m : Un passage faible en fondation → qc = 4 MPa, avec un point très dense à 6 m (qc = 25 MPa) ;
 - ☐ 8,00 - 12,00 m : Un passage très dense en fondation → qc > 25 MPa, avec deux points denses (qc = 16 MPa) à 9 et 10 m.
 - CPT6-2 (risberme aval = 117,27 m NGF)
 - ☐ **0,00 - 1,20 m : Un passage très faible en surface → qc entre 2-3 MPa ;**
 - ☐ 1,20 - 1,80 m : Un passage très dense → qc > 25 MPa ;
 - ☐ 1,80 - 6,00 m : Un passage moyennement dense → qc entre 6-8 MPa, avec un point très dur (qc = 25 MPa) à 3,80 m ;
 - ☐ 6,00 - 9,50 m : La fondation très dense → qc > MPa, avec un point dense (qc = 16 MPa) à 7,3 m ;
 - ☐ 9,50 - 10,00 m : Un passage dense en fondation → qc = 10 MPa.
 - CPT7-1 (Crête = 119,81 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 1,00 m : La surface très dense → qc = 25 MPa ;
 - ☐ 1,00 - 1,70 m : Un passage moyennement dense → qc entre 4-6 MPa ;
 - ☐ 1,70 - 4,30 m : Le corps du barrage moyennement dense à dense → qc = 8 MPa, avec un point faible (qc = 4 MPa) à 2,90 m ainsi qu'un autre très faible (qc = 2 MPa) à 4 m ;
 - ☐ 4,30 - 7,00 m : La fondation faible à moyennement dense → qc entre 4-6 MPa ;
 - ☐ **7,00 - 8,00 m : Un passage très faible en fondation → qc < 3 MPa ;**
 - ☐ 8,00 - 10,20 m : La fondation très dense → qc > 25 MPa.
 - CPT7-2 (Crête = 117,37 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 5,90 m : Un passage faible → qc = 4 MPa, avec plusieurs points denses (qc = 16 MPa) à 0,4 m, 1,2 m et 2,2 m ;
 - ☐ 5,90 - 10,00 m : La fondation très dense → qc > 25 MPa, avec un point dense (qc = 18 MPa) à 7,4 m.
 - CPT8-1 (Crête = 119,77 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 0,50 m : La surface très dense → qc = 25 MPa ;
 - ☐ 0,50 - 2,00 m : Un passage faible → qc = 4 MPa ;
 - ☐ 2,00 - 4,00 m : Un passage moyennement dense à dense → qc entre 8-10 MPa ;
 - ☐ **4,00 - 5,50 m : Un passage très faible → qc < 2 MPa ;**
 - ☐ 5,50 - 6,50 m : Un passage moyennement dense à dense → qc entre 8-10 MPa ;
 - ☐ 6,50 - 12,00 m : La fondation très dense → qc > 25 MPa.

- CPT8-2 (risberme aval = 117,49 m NGF)
 - 0,00 - 10,00 m : L'ouvrage très dense → $q_c > 25$ MPa, avec 2 points denses (q_c entre 10 et 14 MPa) à 2,8 m et 3,2 m, ainsi que deux points moyennement denses ($q_c = 6$ MPa) à 6,3 m et 7,9 m.
- CPT9-1 (Crête = 119,76 m NGF)
 - 0,00 - 0,50 m : La surface très dense → $q_c = 25$ MPa ;
 - 0,50 - 4,50 m : Le corps de l'ouvrage faible → $q_c = 4$ MPa, avec un point dense ($q_c = 12$ MPa) à 3,9 m ;
 - 4,50 - 11,50 m : La fondation très dense → $q_c = 25$ MPa, avec des points denses (q_c entre 10-14 MPa) à 5,5 m, 7 m et 8,5 m, ainsi qu'un point très dense ($q_c = 18$ MPa) à 10,9 m.
- CPT9-2 (risberme aval = 117,33 m NGF)
 - 0,00 - 0,50 m : La surface dense → $q_c = 10$ MPa ;
 - 0,50 - 1,00 m : Un passage très dense → $q_c = 25$ MPa ;
 - 1,00 - 1,70 m : Un passage faible → $q_c = 4$ MPa ;
 - 1,70 - 10,00 m : L'ouvrage et fondation très dense → $q_c > 25$ MPa, avec plusieurs points durs (q_c entre 10 et 14 MPa) à 2,8 m, 4,9 m, 6,8 m et 9,8 m.
- CPT10-1 (Crête = 119,72 m NGF)
 - 0,00 - 0,50 m : La surface dense → $q_c = 10$ MPa ;
 - **0,50 - 1,80 m : Un passage très faible → $q_c < 2$ MPa ;**
 - 1,80 - 3,20 m : Un passage moyennement dense → $q_c = 6$ MPa ;
 - 3,20 - 6,00 m : Un passage faible à moyennement dense → $q_c = 4$ MPa ;
 - **6,00 - 6,30 m : Un passage très faible en fondation → $q_c < 2$ MPa ;**
 - 6,30 - 8,00 m : Un passage moyennement dense en fondation → $q_c = 6$ MPa ;
 - **8,00 - 8,70 m : Un passage très faible en fondation → $q_c < 2$ MPa ;**
 - 8,70 - 10,30 m : Un passage moyennement dense en fondation → $q_c = 10$ MPa ;
 - 10,30 - 12,00 m : La fondation très dense → $q_c > 25$ MPa, avec un point dense ($q_c = 10$ MPa) à 11,2 m.
- CPT10-2 (risberme aval = 117,40 m NGF)
 - 0,00 - 1,00 m : la surface très dense → $q_c > 25$ MPa ;
 - L'essai n'a pas été poursuivi étant le 2^e essai.
- CPT11-1 (Crête = 119,71 m NGF)
 - 0,00 - 0,50 m : La surface très dense → $q_c > 25$ MPa ;
 - 0,50 - 1,60 m : Un passage faible → $q_c = 2$ MPa ;
 - **1,60 - 2,20 m : Un passage très faible → $q_c < 2$ MPa ;**
 - 2,20 - 3,00 m : Un passage faible → $q_c = 4$ MPa ;
 - 3,00 - 3,70 m : Un passage dense → $q_c = 14$ MPa ;
 - **3,70 - 6,90 m : Un passage très faible à faible → q_c entre 1-4 MPa,** avec un point très dense ($q_c = 23$ MPa) à 5,7 m ;
 - 6,90 - 8,10 m : Un passage très dense → $q_c > 25$ MPa ;
 - 8,10 - 9,00 m : Un passage moyennement dense à dense → $q_c = 10$ MPa ;
 - 9,00 - 12,00 m : Un passage dense à très dense → q_c entre 16 et 25 MPa.
- CPT11-2 (risberme aval = 117,23 m NGF)

- ☐ 0,00 - 0,50 m : Un passage dense en surface → $q_c = 10$ MPa ;
 - ☐ 0,50 - 2,00 m : Un passage très dense → $q_c > 25$ MPa ;
 - ☐ 2,00 - 2,90 m : Un passage faible → $q_c = 4$ MPa ;
 - ☐ 2,90 - 5,40 m : Un passage dense → $q_c = 25$ MPa, avec deux points moyennement denses ($q_c = 8$ MPa) à 3,6 m et 5 m ;
 - ☐ **5,40 - 7,10 m : un passage très faible → $q_c < 3$ MPa ;**
 - ☐ 7,10 - 8,20 m : un passage très dense en fondation → $q_c > 25$ MPa ;
 - ☐ 8,20 - 10,00 m : un passage dense en fondation → $q_c > 12$ MPa.
- CPT12-1 (Crête = 119,60 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 0,30 m : La surface très dense → $q_c = 25$ MPa ;
 - ☐ **0,30 - 4,80 m : Le corps de l'ouvrage très faible → $q_c < 2$ MPa**, avec des points denses (q_c entre 8 et 14 MPa) à 2 m et 3,2 m ;
 - ☐ 4,80 - 7,00 m : La fondation très dense → $q_c > 25$ MPa, avec un point moyennement dense ($q_c = 6$ MPa) à 5,2 m ;
 - ☐ 7,00 - 8,00 m : Un passage dense en fondation → $q_c > 10$ MPa ;
 - ☐ 8,00 - 11,00 m : La fondation très dense → $q_c > 25$ MPa.
 - CPT12-2 (risberme aval = 117,34 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 1,40 m : La surface dense → q_c entre 14 et 20 MPa ;
 - ☐ **1,40 - 4,00 m : Un passage très faible → $q_c < 2$ MPa**, avec un point très dense ($q_c = 25$ MPa) à 2,5 m ;
 - ☐ **4,00 - 6,00 m : Un passage très faible en fondation → $q_c < 1$ MPa ;**
 - ☐ 6,00 - 10,00 m : Un passage très dense en fondation → $q_c > 25$ MPa, avec un point moyennement dense ($q_c = 7$ MPa) à 6,6 m.
 - CPT13-1 (Crête = 119,53 m NGF)
 - ☐ **0,00 - 2,00 m : La surface très faible → $q_c < 2$ MPa**, avec un point très dense ($q_c > 25$ MPa) à 0,3 m ;
 - ☐ 2,00 - 3,00 m : Un passage faible dans le corps de l'ouvrage → $q_c = 4$ MPa ;
 - ☐ **3,00 - 5,20 m : Un passage très faible → $q_c < 2$ MPa ;**
 - ☐ 5,20 - 9,00 m : Un passage faible en fondation → $q_c = 4$ MPa ;
 - ☐ **9,00 - 9,80 m : Un passage très faible en fondation → $q_c = 2$ MPa ;**
 - ☐ **9,80 - 11,50 m : Un passage très faible en fondation → $q_c < 2$ MPa**, avec des points durs ($q_c = 10$ MPa) ;
 - ☐ 11,50 - 12,00 m : La fondation augmente sa compacité avec la profondeur → $q_c > 6$ MPa.
 - CPT13-2 (risberme aval = 117,25 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 0,80 m : La surface moyennement dense → $q_c = 6$ MPa ;
 - ☐ **0,80 - 1,20 m : Un passage très faible → $q_c < 2$ MPa ;**
 - ☐ 1,20 - 1,90 m : Un passage très très dense → $q_c > 25$ MPa.
 - CPT14-1 (Crête = 119,83 m NGF)
 - ☐ **0,00 - 5,00 m : Le corps de l'ouvrage très faible → $q_c < 2$ MPa**, avec des points denses (q_c entre 10-20 MPa) à 0,3 m, 1,5 m, 2,2 m et 3,9 m ;
 - ☐ 5,00 - 5,40 m : Un passage dense → $q_c = 20$ MPa ;
 - ☐ 5,40 - 8,30 m : Un passage moyennement dense → $q_c = 6$ MPa, avec un point très dense à 7 m ($q_c = 20$ MPa) ;

- ☐ 8,30 - 11,70 m : La fondation très dense → $q_c = 20$ MPa, **avec un point très faible à 11,2 m ($q_c = 4$ MPa).**
- CPT14-2 (risberme aval = 117,22 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 1,00 m : La surface moyennement dense → $q_c < 6$ MPa ;
 - ☐ 1,00 - 1,60 m : Un passage très dense → $q_c > 25$ MPa
- CPT15-1 (Crête = 119,84 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 0,70 m : La surface très dense → $q_c = 25$ MPa ;
 - ☐ **0,70 - 4,90 m : Le corps de l'ouvrage très faible → $q_c = 2$ MPa ;**
 - ☐ 4,90 - 5,60 m : La fondation dense → $q_c = 12$ MPa ;
 - ☐ **5,60 - 12,00 m : La fondation très dense → $q_c > 25$ MPa**, avec des points denses (q_c entre 10-20 MPa) à 6,5 m, 7,9 m, 8,8 m, 9,3 m, et 10,4 m.
- CPT15-2 (risberme aval = 117,44 m NGF)
 - ☐ 0,00 - 1,20 m : La surface dense → $q_c = 10$ MPa ;
 - ☐ 1,20 - 2,70 m : Un passage très dense → $q_c > 25$ MPa, avec un point dense à 12m ($q_c = 12$ MPa) ;
 - ☐ 2,70 - 6,70 m : Le corps de l'ouvrage et la fondation très dense → $q_c > 20$ MPa, avec des points moyennement denses à denses (q_c entre 6-12 MPa) à 3 m, 4 m, 5,2 m et 6,1 m.

3.4 Synthèse géotechnique

3.4.1 Zone A de palplanches

Ce modèle géotechnique concerne le linéaire équipé de palplanches (zone A) entre les PK 29,480 et 29,550, en amont des premiers désordres. Il est défini à partir des investigations géotechniques, et notamment du sondage SC0-1 et du PERMEAFOR PK25.

Les principales caractéristiques mécaniques des sols sont présentées ci-dessous.

Tableau 9 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Zone A de palplanches

Matériaux	Toit de la couche (m/TA)	Toit de la couche (m NGF)	Poids volumique γ (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)	k (m/s)
Recharges sablo-graveleuses	TN	TN	20	0	38	1.10^{-3}
Alluvions grossières	5,00 8,00	114,75 111,75	21	0	40	1.10^{-3}
Alluvions fines	3,00 7,00	116,75 112,75	20	2	35	5.10^{-4}

Ce profil ne présente pas de noyau parce que l'étanchéité est assurée par le rideau de palplanches.

Les perméabilités retenues sont celles obtenues par le PERMEAFOR, notamment celle de la couche d'alluvions fines.

3.4.2 Désordres 1 à 8

Ce modèle géotechnique concerne le linéaire compris entre les désordres 1 à 8 (fuites sans transports sur le talus du canal de dérivation), soit entre les PK 29,600 et 29,800. Il est défini à partir des investigations géotechniques, et notamment des sondages SC1-1, SC3-1, CPT1-1, CPT1-2, CPT2-1, CPT2-2, CPT3-1 et CPT3-2, ainsi que du PERMEAFOR PK8

Les principales caractéristiques mécaniques des sols sont présentées ci-dessous.

Tableau 10 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 1 à 8

Matériaux	Toit de la couche (m/TA)	Toit de la couche (m NGF)	Poids volumique γ (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)	k (m/s)
Recharges sablo-graveleuses	TN	TN	20	0	38	1.10^{-3}
Noyau sablo-limoneux	1,90	117,90	19	5	35	1.10^{-7}
Alluvions grossières	2,90 7,50	116,90 112,30	21	0	40	1.10^{-3}
Alluvions fines	4,50	115,30	20	2	35	5.10^{-4}

Les perméabilités retenues sont celles obtenues par le PERMEAFOR et les essais Lefranc.

3.4.3 Désordres 9 à 16

Ce modèle géotechnique concerne le linéaire compris entre les désordres 9 à 16 (sands boils), soit entre les PK 30,150 et 30,675. Il est défini à partir des investigations géotechniques, et notamment des sondages SC4-1, SC4-2, SC5-1, CPT4-1, CPT4-2, CPT5-1, CPT5-2, CPT6-1, CPT6-2, CPT7-1 et CPT7-2, ainsi que des PERMEAFOR PK9, PK23 et PK10.

Les principales caractéristiques mécaniques des sols sont présentées ci-dessous.

Tableau 11 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 9 à 16

Matériaux	Toit de la couche (m/TA)	Toit de la couche (m NGF)	Poids volumique γ (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)	k (m/s)
Recharges sablo-graveleuses	TN	TN	20	0	38	1.10^{-3}
Noyau sablo-limoneux	1,30	118,40	19	5	35	1.10^{-7}
Alluvions grossières	7,50	112,20	21	0	40	5.10^{-3}
Alluvions fines	4,90 10,00	114,80 109,70	20	2	35	5.10^{-4}

Les perméabilités retenues sont ceux obtenues par le PERMEAFOR et les essais Lefranc.

3.4.4 Désordres 17 à 19

Ce modèle géotechnique concerne le linéaire compris entre les désordres 17 à 19 (glissement et fuites sur la berge de la Moder), soit entre les PK 30,750 à 30,810. Il est défini à partir des investigations géotechniques, et notamment des sondages SC9-1, SC9-2, CPT9-1, CPT9-2, CPT10-1 et CPT10-2, ainsi que des PERMEAFOR PK14 et PK24.

Les principales caractéristiques mécaniques des sols sont présentées ci-dessous.

Tableau 12 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 17 à 19

Matériaux	Toit de la couche (m/TA)	Toit de la couche (m NGF)	Poids volumique γ (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement φ' (°)	k (m/s)
Recharges sablo-graveleuses	TN	TN	20	0	38	1.10^{-3}
Noyau sablo-limoneux	0,50	119,20	19	5	35	1.10^{-7}
Alluvions fines	4,30 6,00	115,40 113,70	20	2	35	5.10^{-4}
Alluvions limoneuses	5,00 7,50	114,70 112,20	20	2	35	2.10^{-7}
Alluvions grossières	7,50	112,20	21	0	40	5.10^{-3}

Les perméabilités retenues sont celles obtenues par le PERMEAFOR et les essais Lefranc.

3.4.5 Désordres 20 à 23

Ce modèle géotechnique concerne le linéaire compris entre les désordres 20 à 23 (sands boils), soit entre les PK 30,750 à 30,810. Il est défini à partir des investigations géotechniques, et notamment des sondages SC12-1, SC12-2, CPT11-1, CPT11-2, CPT12-1 et CPT12-2.

Les principales caractéristiques mécaniques des sols sont présentées ci-dessous.

Tableau 13 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 20 à 23

Matériaux	Toit de la couche (m/TA)	Toit de la couche (m NGF)	Poids volumique γ (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement φ' (°)	k (m/s)
Recharges sablo-graveleuses	TN	TN	20	0	38	1.10^{-3}
Noyau sablo-limon	0,70	119,00	19	5	35	1.10^{-7}
Alluvions fines	4,50	115,20	20	2	35	5.10^{-4}
Alluvions grossières	6,00	113,70	21	0	40	5.10^{-3}

Il faut préciser un passage graveleux franc entre 3,00 et 3,30 m (116,70 – 116,4 m NGF) lequel intervient seulement dans le modèle hydraulique avec une perméabilité de l'ordre de 5.10^{-3} m/s. Pour l'analyse de la stabilité, le passage reste négligeable et les propriétés mécaniques du noyau sont retenues.

Les perméabilités retenues sont celles obtenues par les essais Lefranc.

3.4.6 Désordres 24 à 26

Ce modèle géotechnique concerne le linéaire compris entre les désordres 24 à 26 (sands boils), soit entre les PK 30,750 à 30,810. Il est défini à partir des investigations géotechniques, et notamment des sondages SC13-1, SC13-2, SC14-1, SC15-1, CPT13-1, CPT13-2, CPT14-1, CPT14-2, CPT15-1 et CPT15-2, ainsi que des PERMEAFOR PK16, PK17 et PK20.

Les principales caractéristiques mécaniques des sols sont présentées ci-dessous.

Tableau 14 : Caractéristiques mécaniques de matériaux – Désordres 20 à 23

Matériaux	Toit de la couche (m/TA)	Toit de la couche (m NGF)	Poids volumique γ (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)	k (m/s)
Recharges sablo-graveleuses	TN	TN	20	0	38	1.10^{-3}
Noyau sablo-limoneux	0,65	119,00	19	5	35	1.10^{-7}
Couche limoneuse	4,50	115,15	19	5	35	1.10^{-7}
Alluvions grossières	5,80	113,85	21	0	40	5.10^{-3}
Alluvions fines	6,95	112,70	20	2	35	5.10^{-4}

La couche limoneuse est identifiée sur les sondages SC13-1 et SC13-2, ainsi que sur les PERMEAFOR PK16 (aval), PK17 (crête) et PK20 (amont).

Les perméabilités retenues sont celles obtenues par les essais Lefranc et les résultats des PERMEAFOR.

3.5 Données hydrogéologiques

Afin de comparer l'état de la nappe du Rhin entre les deux exercices de remplissage (2016 et 2025), il a été recherché les mesures du réseau de piézomètres de l'APRONA. Un point de mesure est en service à proximité du Polder : 01996X0008 / 341 à STATTMATTEN à 2,5 km au Sud-Ouest du Polder. Le point de mesure est exploité depuis 1979.



Figure 18 : Localisation du point de mesure APRONA

Les mesures durant les remplissages sont reprises ci-dessous.

Tableau 15 : Mesures APRONA à proximité du Polder

Point de mesure	05/01/2016	12/01/2016	19/01/2016	26/01/2016	07/01/2025	14/01/2025	21/01/2025	28/01/2025
341	116,47 m NGF	116,52 m NGF	116,60 m NGF	116,56 m NGF	117,02 m NGF	117,18 m NGF	116,71 m NGF	116,67 m NGF

En 2016, les niveaux de nappe étaient moyens (moyenne de la station à 116,71 m NGF).

Il en est de même lors de l'exercice de janvier 2025.

Les conditions hydrogéologiques sont donc assez similaires entre les deux exercices.

Notons qu'avant le lancement de la campagne de remplissage de 2025, la mesure du 14 janvier 2025 est le niveau maximum enregistré par la station depuis sa création.

Tableau 16 : Niveaux statistiques de la nappe à STATTMATTEN

Période de mesure 1979 à 2025						
Période de retour	2	5	10	20	50	100
Hautes Eaux	117,25	117,58	117,80	118,01	118,28	118,48
Basses Eaux	116,58	116,48	116,42	116,38	116,33	116,30

3.6 Données hydrauliques

Les débits de la Moder sont suivis à la station de DRUSENHEIM à environ 10 km au sud-ouest du Polder.

Débit instantané - Données les plus valides de l'entité - A350 0100 - La Moder à Drusenheim - du 01/01/2016 00:00 au 30/01/2016 23:59 (TU)



Figure 19 : Débits de la Moder en janvier 2016 (Hydroportail)

Lors de l'essai de 2016 (11 au 15/01), le débit de la Moder était relativement modeste entre 12 et 21 m³/s. Le module de la rivière est à 9,5 m³/s et la Q_2 à 50 m³/s à titre informatif.

Débit instantané - Données les plus valides de l'entité - A350 0100 - La Moder à Drusenheim - du 15/01/2025 00:00 au 10/02/2025 23:59 (TU)

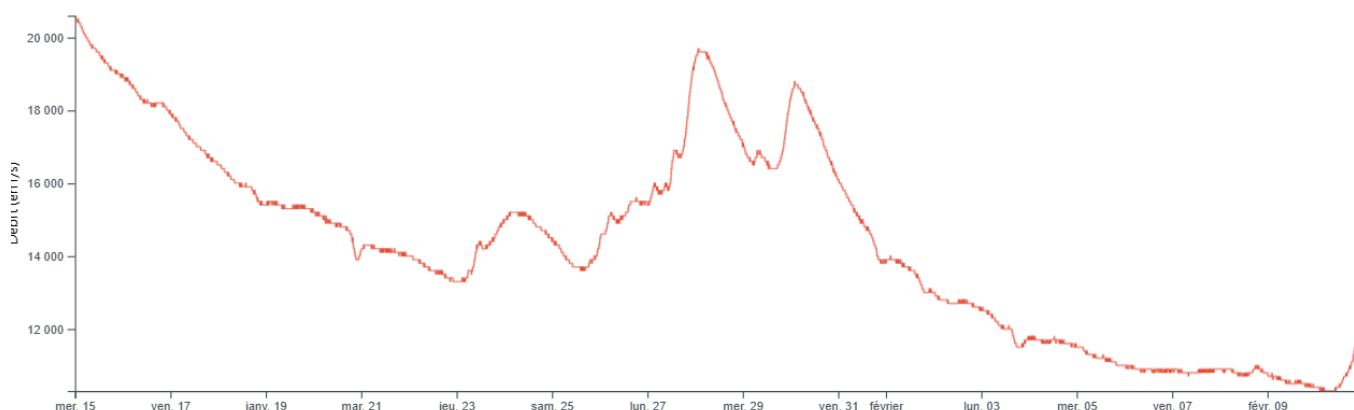


Figure 20 : Débits de la Moder en janvier-février 2025 (Hydroportail)

En 2025, les conditions dans le Moder sont assez proches avec des débits entre 16,5 et 19,0 m³/s.

Selon l'EDD du barrage d'Iffezheim, les niveaux d'eau aval sont les suivants dans le Rhin (PK 334.000) et font un effet de remous dans la Moder à la confluence :

- $Q = 2930 \text{ m}^3/\text{s}$ (dont 1070 m³/s par la centrale) : Z_{aval} de 115.70 m NN (116.27 m NGF) ;
- $Q = 4800 \text{ m}^3/\text{s}$ (dont 1070 m³/s par la centrale) : Z_{aval} de 116.90 m NN (117.47 m NGF).

On peut donc noter que la mise en service normale du Polder ($Q > 4400 \text{ m}^3/\text{s}$ à Maxau), le niveau d'eau dans la Moder est bien plus important que lors des exercices de mises en eau en 2016 et 2025.

3.7 Réseaux

Les réseaux présents sur l'ouvrage sont en lien avec le fonctionnement du Polder. Il s'agit de la boucle électrique d'alimentation des OH.

D'après les plans d'archive, le réseau est enterré à 0,50 m sous la crête. Dans la digue Ouest, il est implanté en crête côté aval, tandis que dans la digue Nord, il est implanté en crête côté amont.

Le basculement d'aval vers amont se situe aux alentours du PK 30.700, juste au droit de la rampe vers la risberme aval.



Figure 21 : Position du réseau dans la digue Ouest - Source : Archives VNF

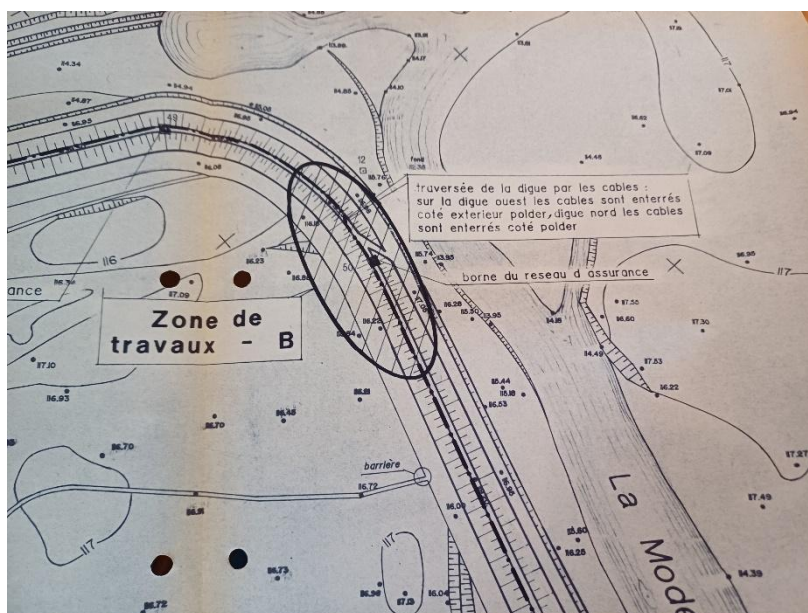


Figure 22 : Localisation du changement de position du réseau dans la digue Nord - Source : Archives VNF

3.8 Environnement

Le périmètre du Polder et en particulier des digues Ouest et Nord est englobé dans plusieurs zones réglementaires :

- Zones réglementaires :
 - ☐ Aire de protection de biotope : APB67_06 – FR3800122 – Cours inférieur de la Moder ;
 - ☐ Forêt de protection : Forêt de FORT-LOUIS (massif dans le Polder et à l'extérieure de la digue ceinture) ;
 - ☐ Zones Natura 2000 – ZPS – Vallée du Rhin de LAUTERBOURG à STRASBOURG (FR4211811) ;
 - ☐ Zones Natura 2000 – ZCS – Secteur Alluvial Rhin-Ried-Bruche (FR4201797) ;
- Inventaires patrimoniaux :
 - ☐ ZNIEFF type 1 – Forêts rhénanes de OFFENDORF à NEUHAEUSEL et cours inférieur de la Moder (420007033) ;
 - ☐ ZNIEFF type 2 – Ancien lit majeur du Rhin, de STRASBOURG à LAUTERBOURG (420014522) ;
- Autre :
 - ☐ Site RAMSAR – Rhin Supérieur (FR7200025).

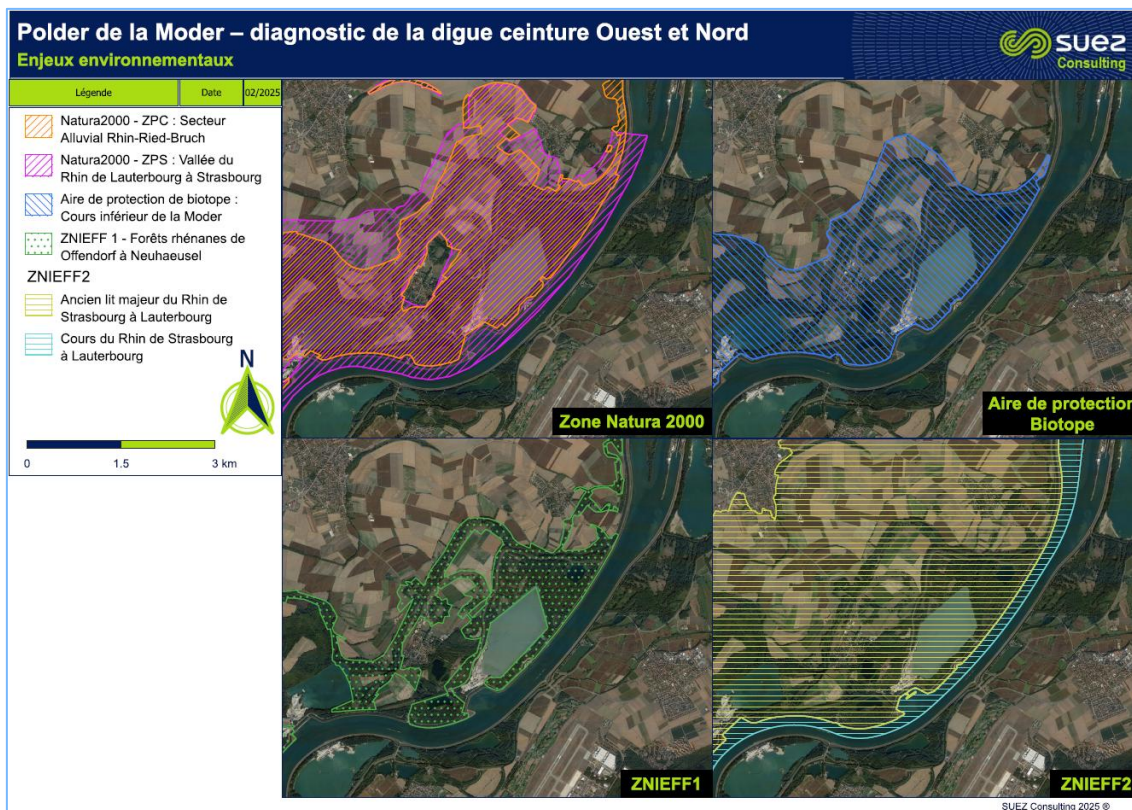


Figure 23 : Carte des enjeux environnementaux

3.9 Faits marquants sur l'ouvrage

3.9.1 Première mise en eau de 1992

L'exploitant nous a signalé qu'après la première mise en eau de l'ouvrage en 1992, le pied de la digue ceinture a été conforté par la mise en place d'une risberme drainante sur la digue Ouest à partir de l'OH5, ainsi que sur la digue Nord.

Par ailleurs, trois secteurs ont fait l'objet de l'installation de rideaux de palplanches PU12, d'une longueur variable entre 6,20 et 8,00 m. La description de ces travaux est disponible au §3.10.

Le confortement de l'ouvrage est la conséquence des importantes remontées de nappe et résurgences identifiées en pied aval lors de la première mise en eau.

3.9.2 Crues du Rhin

Lors des crues de mai 1999 (4 690 m³/s à la centrale d'IFFEZHEIM) et juin 2013 (4 160 m³/s), l'exploitant avait débuté l'Alerte de niveau 1, qui consiste à préparer l'ouvrage à sa mise en eau. En revanche, l'alerte de niveau 2 (mise en eau confirmée) n'a pas été déclenchée pour ces deux épisodes de crues.

3.9.3 Mise en eau de janvier 2016

Un test de mise en eau a été mis en place du 11 au 15 janvier 2016 pour contrôler le fonctionnement du Polder depuis 1992 en collaboration avec la DREAL. En effet, depuis 1992, seul des essais sur les OH et d'amorçage des siphons sont réalisées périodiquement par l'exploitant.

Le déroulé du remplissage peut se résumer de la manière suivante :

Tableau 17 : Synthèse du déroulement du test de mise en eau de janvier 2016

Date	Heure	Durée depuis T0	Nature des opérations
11/01	15h00	-	Validation des prévisions de débits du Rhin supérieur à 1 700 m ³ /s sur plus de 12 h pour assurer le remplissage total de l'aménagement Alerte n°1 déclenchée à 15h00 : fermeture du site et préparation logistique
12/01	9h45	-	Alerte n°2 déclenchée : fermeture des ouvrages OH et amené des pompes d'amorçage
	12h40	-	Alerte n°3 déclenchée pour la mise eau
	13h15	T0	Amorçage des siphons
13/01	0h05	10h50	Arrêt du remplissage à la cote 118,45 m NN
	12h30	23h45	Alerte n°4 réactivation du PCO pour le 14/01 à 8h30 Inspection des ouvrages par la DREAL
	9h20	1j 20h05	Alerte n°5 déclenchée pour vidange
14/01	9h30	1j 20h15	Ouverture à 20 cm des OH 2 et OH 3
	10h50	1j 21h35	Ouverture à 40 cm des OH2 et OH 3
	12h00	1j 22h45	Ouverture à 60 cm des OH2 et OH 3
	15h30	2j 2h15	Ouverture à 20 cm d'OH1
15/01	8h30	2j 17h15	Ouverture complète des OH1, 2 puis 3
	12h00	2j 22h45	Fin de vidange, durée 26h30

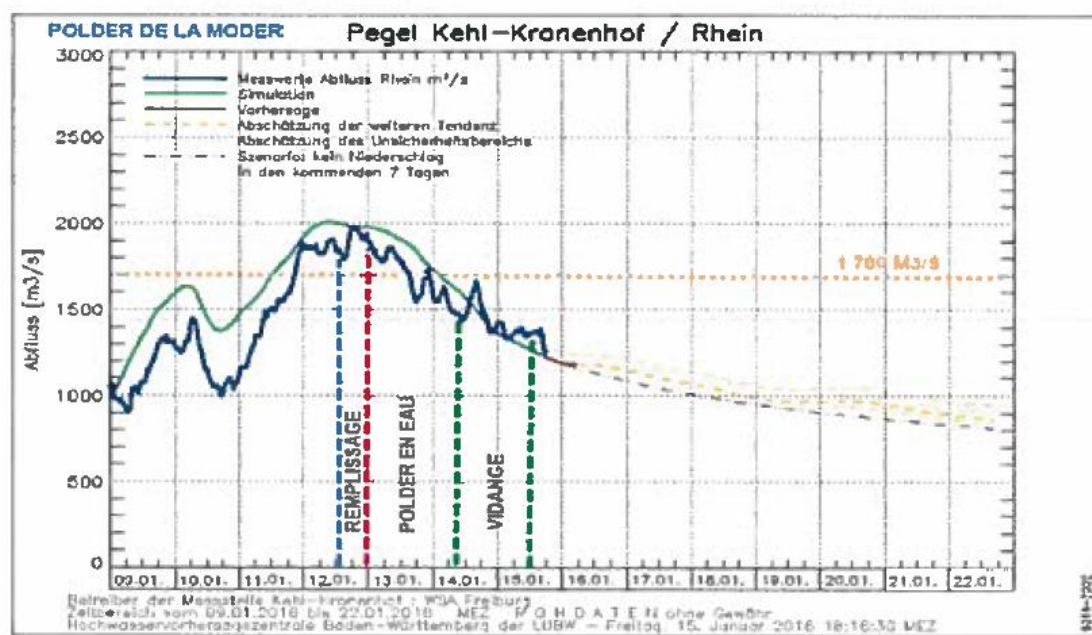


Figure 24 : Test de mise en eau en rapport aux débits du Rhin à la station de Kehl-Kronenhof

Ouvrage hydraulique n°2

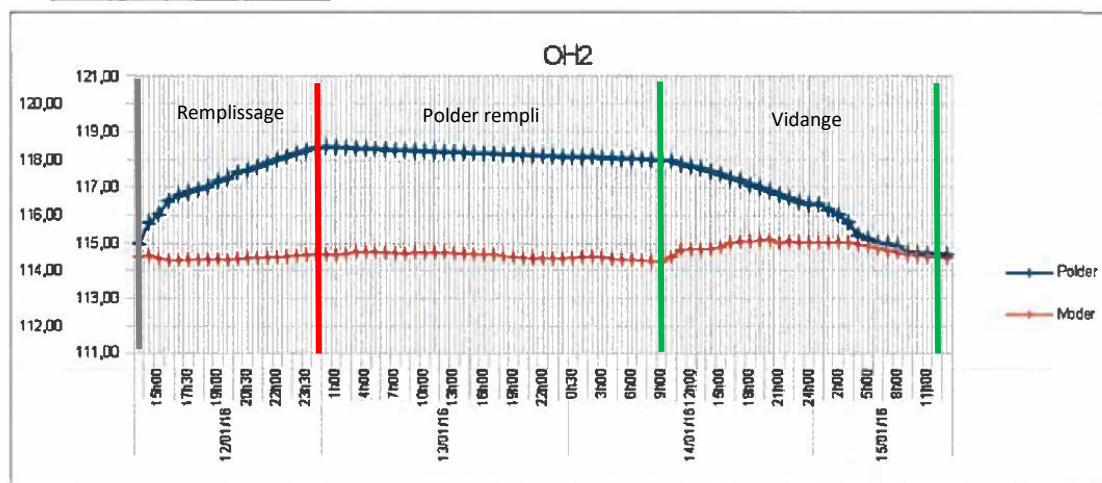


Figure 25 : Remplissage du Polder au niveau de l'OH n°2

En complément, la Moder affichait un débit compris entre 17,5 et 21,0 m³/s sur la période de l'essai.

Lors de la mise en eau, l'exploitant a relevé les remarques suivantes sur les ouvrages :

- L'arrachement d'un câble au niveau de la fosse brise-énergie, remis en état depuis ;
- Un affouillement des enrochements à l'aval de l'ouvrage de vidange OH2 lors de la vidange ;
- Sur la digue ceinture :
 - Une fuite d'eau avec la formation d'un sand-boil localisé à 3 m du pied de talus aval sur la digue nord ;
 - Une stagnation d'eau en pied de talus sur 30 mètres de la digue ouest ;
 - Fuites d'eau claire dans le bas de la berge du contre-canal de la digue ouest.

Le bilan ne cite pas quand les désordres sont apparus en fonction de la cote de remplissage ni leur évolution dans le temps et leur arrêt au cours ou après vidange. On note que le niveau de la Moder (piézométrie aval de la digue nord) est l'ordre de 114,50 m NN lors du remplissage et de maintien en eau. La charge relative sur le remblai de la digue Nord est donc de l'ordre de 4,0 m lors de l'exercice.



Figure 26 : Localisation des désordres sur la digue ceinture lors du test de mise en eau de 2016

L'exploitant tire de ce test de mise en eau l'adaptation de la consigne de surveillance (mise à jour en mai 2016) et des travaux :

- Réfection des câbles arrachés aux siphons ;
- Reprise des enrochements en aval de l'OH2 ;
- Débroussaillage des zones à désordres (résurgence d'eau, sand-boil) pour améliorer l'inspection visuelle.

Après le test, la DREAL a notifié des remarques sur les points suivants :

- Le besoin de mettre en place un pare-embâcle sur les OH2 et OH3 ;
- L'étude plus approfondie des désordres sur la digue.

3.9.4 VTA SAFEGE 2016

La première VTA du Polder a été réalisée les 24 et 25 octobre 2016 par SAFGE (Consulting). La visite a notamment contenu l'essai d'amorçage des siphons et des manœuvres sur les OH2 et 3 (vidange). La VTA concluait au bon état général de l'ouvrage et à sa capacité à poursuivre l'exploitation de manière courante.

L'inspection visuelle des ouvrages ainsi que les essais de manœuvre ont aboutis aux remarques principales suivantes sur les ouvrages pour la digue ceinture :

- Digue ceinture du Polder :
 - **Végétation arbustive sur le talus amont du PK 28,980 à 29,580 ;**
 - Végétation arbustive sur le talus du canal de dérivation du PK 29,900 à 30,090 gênant l'inspection visuelle ;
 - Suivi dans le temps des berges en enrochements sur le canal de dérivation de la digue ouest à la suite de l'abattage des arbres ;
 - Le besoin d'avoir une meilleure gestion du grand gibier dans le Polder en raison des dégâts sur les remblais et l'enherbement ;
 - Quelques terriers peu critiques (remblai zoné) sur l'ouvrage ;
- Ouvrages hydrauliques dits « OH » :
 - Sous-dimensionnement notable des enrochements en aval des OH2 et 3 assurant l'essentiel de la vidange du Polder, ce qui affirme les constats de la mise en eau de janvier 2016 ;
 - L'absence de dispositifs pare-embâcle sur OH2 et 3, notamment pour les flottants de taille significatifs comme les troncs et grumes ;
 - L'absence de consignes de manœuvre sur les ouvrages et d'affichage du niveau d'ouverture des vannes pour assister l'exploitant lors de la vidange du Polder ;
 - L'absence de numérotation des jeux de batardeaux destinés à chaque OH ;
- PCC du Polder : affichage de la maintenance sur le groupe électrogène sur site ;
- Auscultation et mesures :
 - Dispositifs de mesure du niveau d'eau adapté (capteurs et échelles manuelles) mais aucun affichage de la cote maximale de remplissage du Polder sur les ouvrages ;
 - Nécessité de développer et de suivre le dispositif d'auscultation de la digue ceinture en réalisant des campagnes topographiques des bornes hectométriques et de créer un système de suivi piézométrique des digues.

En lien avec la synthèse de la visite, il avait été recommandé de réaliser :

- Les travaux forestiers sur les ouvrages :

- ☐ Travaux d'abattage, de dessouchage des arbres dans le talus amont et de reprise du talus de la digue ceinture du PK 28,980 à 29,580 ;
- ☐ Travaux d'abattage des arbres le long du canal de dérivation entre les PK 29,900 à 30,090 ;
- ☐ Travaux d'abattage des quelques peupliers de gros diamètre en pied de risberme des digues ouest et nord ;
- La fiabilisation des ouvrages de vidange OH2 et OH3 par la pose d'une protection de berge aval plus résistante (technique à définir) et la mise en place d'un pare-embâcle pour les flottants lourds. Ce pare-embâcle peut être constitué de pieux de type palpieux espacés de 1 à 2 m en amont de l'ouvrage ;
- L'amélioration de l'affichage des consignes de manœuvre et d'exploitation qui est à approfondir pour rappeler les étapes critiques de manœuvre et éviter les défaillances humaines sur chaque ouvrage mobile ;
- Enfin, le test de mise en eau de janvier 2016 met en avant la forte remontée de nappe en aval de la digue ceinture avec l'apparition de résurgences. En raison de ces événements, nous recommandons à l'exploitant de l'ouvrage :
 - ☐ D'alimenter la consigne de surveillance de l'ouvrage en relatant que le périmètre de surveillance est à élargir lorsque les niveaux de la Moder sont bas (comme en janvier 2016 et lors de la présente VTA) ;
 - ☐ De mieux transcrire l'évolution de ces événements lors des mises en service (heure d'apparition, évolution en débit ou en surface, puis l'heure d'arrêt) ;
 - ☐ D' étoffer le dispositif d'auscultation de la digue ceinture par des mesures piézométriques pour mieux analyser le comportement de l'ouvrage lors des mises en eau et le niveau de sûreté de la digue.

3.9.5 VTA SAFEGE 2025

Une VTA du Polder a été réalisé les 30 juin et 01 juillet 2025 par SAFGE (Consulting) après l'essai de remplissage de 2025. La visite a notamment contenu l'essai d'amorçage des siphons et des manœuvres sur les OH2 et 3 (vidange). La VTA concluait à l'impossibilité d'utiliser l'ouvrage dans l'état pour l'écrêtement des crues. au bon état général de l'ouvrage et à sa capacité à poursuivre l'exploitation de manière courante.

L'inspection visuelle des ouvrages ainsi que les essais de manœuvre ont aboutis aux remarques principales liées directement aux désordres observés dans la digue ceinture pendant l'essai.

3.10 Travaux sur l'ouvrage en 1994

3.10.1 Généralités

Lors de la première mise en eau du Polder en 1992, des résurgences en pied de digue, accompagnées d'un entraînement de matériaux, ont été observées sur la digue Ouest et la digue Nord.

En réponse à ces phénomènes, le Service de Navigation de Strasbourg a mandaté le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg pour réaliser une étude géotechnique et formuler un avis technique afin de proposer des solutions (cf. §3.2.2).

Suite à cet avis, les travaux réalisés ont consisté en :

- Mise en place d'une risberme drainante sur la digue Ouest à partir de l'OH5, ainsi que sur l'ensemble de la digue Nord ;
- L'installation de trois rideaux de palplanches sur trois zones (une sur la digue Ouest et deux sur la digue Nord).

3.10.2 Risberme drainante

Les archives retrouvées au PPC ont révélé que la risberme drainante aval a été réalisée par l'entreprise SAVARIAU à partir de l'année 1993. Dans le cadre de ce même marché, la digue Nord a été ainsi confortée par la mise en place d'une protection de pied côté Polder.

Le confortement réalisé a consisté à créer une risberme aval, arasée à la cote 117,00 m NN, en pied de digue. Le remblai présente une épaisseur variable en fonction du terrain naturel. La coupe type présente une largeur de 10 m et une pente de 4 % depuis la digue vers le contre-canal ou la Moder, selon la configuration. Au-delà des 10 m, le remblai est taluté à 2,5/1.

D'après le CCTP, le remblai utilisé provient du poste de criblage de la société WILLERSINN. Des matériaux criblés 16/32 et 32/60 ont été employés pour obtenir un mélange homogène, avec une proportion respective de 2/5 et 3/5.

La risberme drainante a été ajoutée depuis l'OH5 (PK 29.900) jusqu'à l'extrémité de la digue Nord (PK 32.200). Au début du linéaire, une zone de transition s'étend sur 140 m, avec une largeur de risberme variable avant d'atteindre les 10 m de la géométrie type.

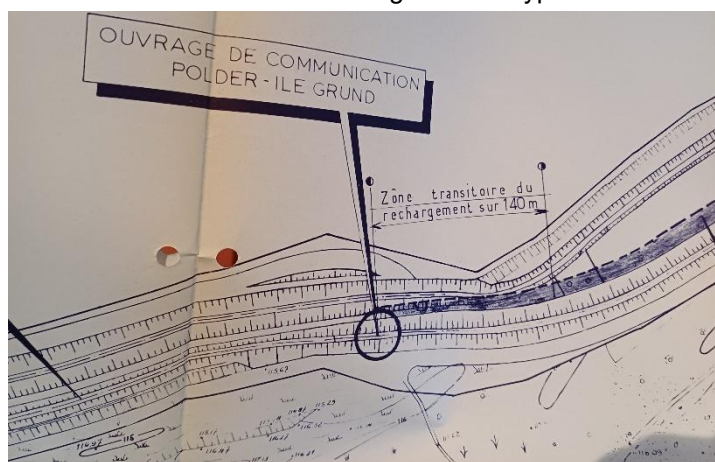


Figure 27 : Transition de la risberme drainante ajoutée

Le pied amont (côté Polder) de la digue Nord a été renforcé sur une longueur de 400 m, environ entre les PK 31.440 (OH2) et PK 31.900. La protection consiste en l'ajout d'un placage sur une hauteur verticale de 0,50 m, avec un développement en pied de 1,40 m. Selon le CCTP, l'épaisseur du tapis est de 0,50 m.

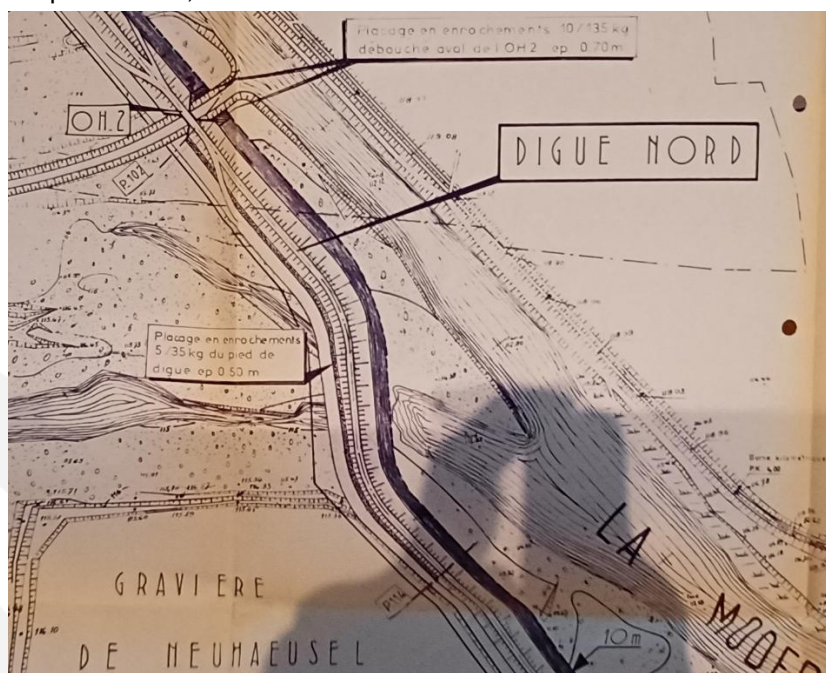


Figure 28 : Localisation du rechargement du pied côté Polder

3.10.3 Rideaux de palplanches

Les archives au PPC ont révélé que la digue a été équipée de palplanches lors de l'ajout de la risberme drainante. En effet, ces travaux ont été réalisés par l'entreprise DURMEYER à partir de la fin de l'année 1993, mais la date d'achèvement reste inconnue.

Chaque zone a été équipée de palplanches de type PU12 nuance 390SP, d'une hauteur variable entre 6,20 et 8,00 m. Au total, 380 ml de palplanches ont été installés le long de la digue. Chaque zone présente une configuration géométrique différente en fonction de la position du rideau.

La raison de l'installation des rideaux sur ces trois zones reste inconnue.

Le tableau suivant présente les caractéristiques de chaque zone :

Tableau 18 : Caractéristiques des zones équipées de rideau

Zone	Longueur du rideau	Hauteur de palplanches	PK Début (approximatif)	PK Début (approximatif)
A	72 ml	6,20 m	29.480	29.550
B	130 ml	7,80 m	30.700	30.830
C	178 ml	8,00 m	31.840	32.020

La localisation a été extraite du plan d'implantation des archives.

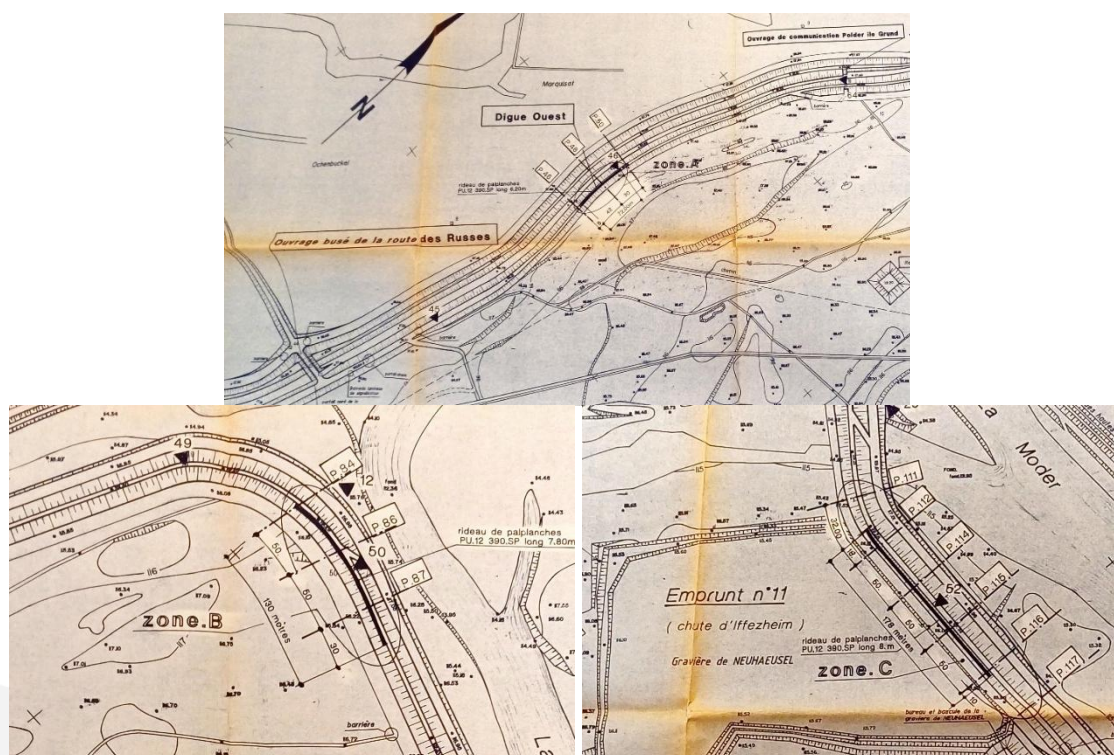


Figure 29 : Localisation des rideaux de palplanches – Source : Plan d'implantation de palplanches (Archives VNF)

○ Coupe type de la Zone A

Sur cette zone, le rideau est constitué de palplanches PU12 de 6,20 m. Il a été enfoncé en crête, à 1,50 m de l'arête amont de la digue (coté Polder). En dehors du décapage, une tranchée d'environ 1,00m de largeur et 0,50 m de profondeur a été réalisée.

D'après les profils en travers de la zone, le rideau a finalement été arasé à une cote variable entre 118,20 m NN, avec un ancrage à 112,00 m NN.

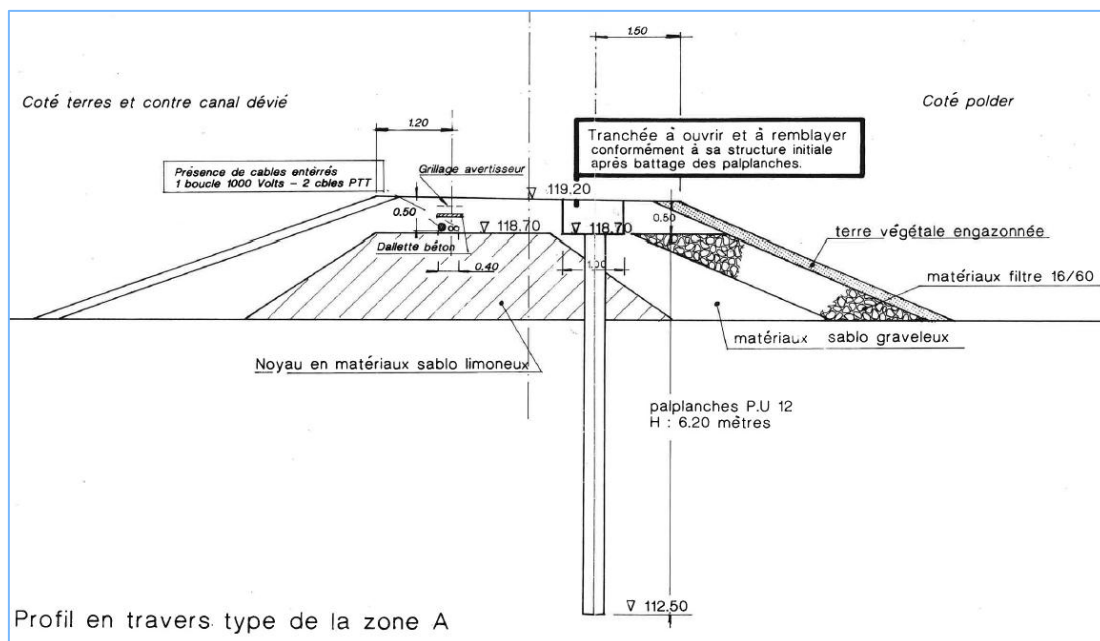


Figure 30 : Coupe type de la Zone A

○ Coupe type de la Zone B

Sur cette zone, le rideau est constitué de palplanches PU12 de 7,80 m. Il a été enfoncé dans le talus amont (côté Polder), à une distance variable de l'arête amont de la digue, comprise entre 0,50 et 1,00 m. En dehors du décapage, une tranchée d'environ 1,00 m de largeur et 0,20 m de profondeur (selon le CCTP des archives) a été réalisée dans le talus avant le battage des palplanches, afin de les enfoncer plus profondément.

Il est à noter que dans cette zone, les câbles des OH sont positionnés en crête amont (à 1,20 m de l'arête amont selon la coupe), ce qui pourrait expliquer l'implantation du rideau dans le talus.

D'après les profils en travers de la zone, le rideau a finalement été arasé à une cote variable entre 117,70 et 117,97 m NN, avec un ancrage compris entre 109,90 et 110,17 m NN.

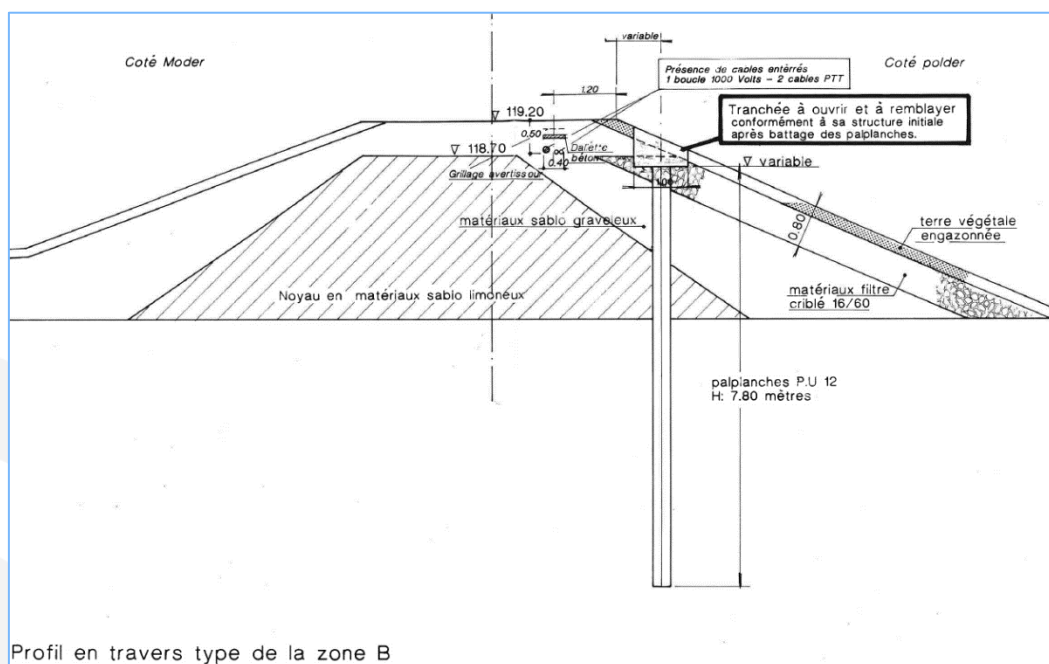


Figure 31 : Coupe type de la Zone B

○ Coupe type de la Zone C

Sur cette zone, le rideau est constitué de palplanches PU12 de 8,00 m. Il a été enfoncé dans le talus amont (côté Polder), à une distance de 2,50 m. En dehors du décapage, une tranchée d'environ 1,00 m de largeur et 0,20 m de profondeur (selon le CCTP des archives) a été réalisée dans le talus avant le battage des palplanches, afin de les enfoncer plus profondément.

Il est à noter que dans cette zone, les câbles des OH sont positionnés en crête amont (à 1,20 m de l'arête amont selon la coupe), ce qui pourrait expliquer l'implantation du rideau dans le talus.

D'après les profils en travers de la zone, le rideau a finalement été arasé à une cote variable entre 116,98 et 117,07 m NN, avec un ancrage compris entre 108,98 et 109,07 m NN.

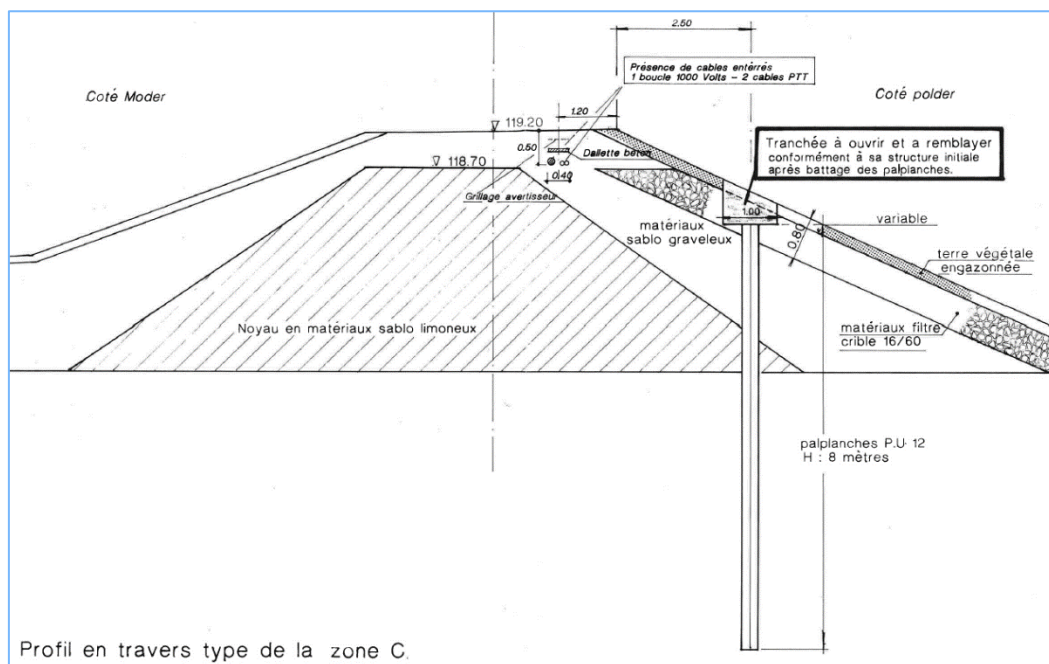


Figure 32 : Coupe type de la Zone C

3.11 Exercice de remplissage 2025

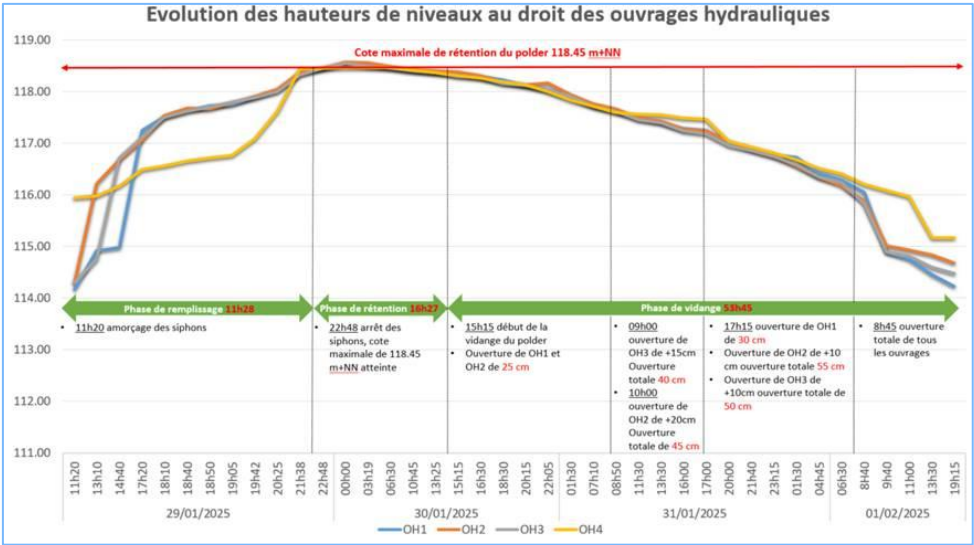
Selon les conditions hydrauliques du Rhin ($Q > 1700 \text{ m}^3/\text{s}$ à Kehl-Kronenhof), l'exercice de remplissage du Polder a été activé le 29 janvier à 11h28 avec l'amorçage des siphons.

On sait que le niveau d'eau initial dans le Polder et par extrapolation dans la Moder (vannes des OH ouvertes) était de l'ordre de 114,20 à 30 m NN. Le débit de la Moder était modéré (cf. 3.6).

Le remplissage est atteint le soir même à 22h48, soit une durée de 11h28, ce qui est cohérent avec le temps caractéristique de remplissage (12h).

L'exploitant a réalisé une tournée d'inspection des ouvrages dont la digue ceinture vers 17h le 29/01 (avant la tombée de la nuit). Le 30/01 vers 8h, l'exploitant a réalisé une nouvelle inspection des digues et a fait le relevé des désordres numérotés 1 à 26 sur les digues Ouest et Nord.

Pour cette raison, il a été décidé le 30/01 après-midi de lancer la vidange du Polder. La vidange totale s'est étirée sur près de 52h, soit 2 fois plus lentement qu'en 2016 (26h environ).



4. DIAGNOSTIC VISUELLE

4.1 Inspection visuelle

Les digues ouest et nord ont fait l'objet de deux visites à la suite de l'exercice respectivement les 03 et 13 février 2025.

Le Polder était vide lors des deux inspections.

4.1.1 Digue Ouest

De manière générale, il n'a pas été recensé de désordres sur les talus et la crête de la digue ouest.

Secteur des anomalies 1 à 6 – PK 29,600 à 29,650

Sur ce secteur, le linéaire présente une berme amont et longe le canal de dérivation en pied aval.

Le site comporte 6 sorties de fuites sans transport de sédiments sur le talus du canal de dérivation. Les sorties sont localisées à environ 1 m du niveau d'eau du canal lors de la visite ou 1,5 m sous la risberme aval, mais étaient à fleur d'eau lors de l'exercice. Il est estimé qu'au remplissage nominale du Polder, il s'exerce une charge hydrostatique relative d'environ 2,5 m.



Figure 33 : Anomalies 1 à 5 – Vue générale



Figure 34 : Sortie de la fuite n°1

La zone de désordre correspond probablement à la connexion d'un ancien bras entre le Rhin et la Moder. Il n'apparaît pas à proximité de végétation ligneuse ou de terriers. Les talus de l'ouvrage n'affichent pas d'instabilité. La crête ne possède pas de point bas.

Ces phénomènes, sans transports de fines, n'apparaissent pas critique mais affiche bien l'absence de véritable barrière étanche en fondation. Cependant, il n'y pas d'enjeux de filtration (pas de transport) qui pourrait conduire à la progression de l'érosion.

Secteur des anomalies 7 et 8 – PK 29,780 et 29,795

Pour ces anomalies, la configuration du barrage est identique au précédent.

L'anomalie 7 correspond à un dépôt de sable en berge du canal de dérivation. Ce dépôt devait être immergée lors de l'exercice. L'anomalie 8 est une fuite sans transport de matériaux avec un positionnement équivalent au secteur précédent.



Figure 35 : Anomalie 7 – Dépôt de sable



Figure 36 : Anomalie 8 – Fuite sans transport

Le phénomène semble donc similaire au précédent avec des écoulements en fondation du barrage. Il ne paraît pas y avoir de transport de sédiment sur ce secteur. Le dépôt du désordre n°7 pourrait être antérieure (secteur déjà sollicité en 2016).

Secteur des anomalies 9 à 11 – PK 30,150 à 30,185

La configuration du barrage évolue en aval de l'OH 5. La risberme amont est encore présente. À l'aval, le canal de dérivation s'éloigne du pied. Une risberme filtrante-drainante d'environ 10 m de large est présente en pied aval.

Le désordre 9 correspond à une fuite qui aurait pu conduire au démarrage d'un sand boil.

Les désordres 10 et 11 sont deux tumuli formés en limite de la risberme aval avec les géométries suivantes :

- Désordre 10 : 90 x 15 cm (Øx h) ;
- Désordre 11 : 160 x 80 x 10 cm (L x l x h).

Les tumuli sont constitués d'un sable fin (0-2 ou 0-4 mm) sans cohésion (pas ou peu de fraction limoneuse).

Au sein du tumulus, un léger conduit vertical est formé. La profondeur est de 10-20cm. Il est difficile de distinguer s'ils se prolongent ou non. Une inspection caméra pourra affiner ce paramètre.



Figure 37 : Anomalie 10 – Tumulus de sable



Figure 38 : Anomalie 11 – Tumulus de sable

En rapport avec les mesures thermométriques, les écoulements proviennent bien de la fondation du barrage et non à travers le noyau. À ce stade, Solexperts n'a pas défini d'ordre de grandeur de vitesse d'écoulement. Mais pour le transport du sable, une vitesse de l'ordre de 1 cm/s est nécessaire.

Ces phénomènes avec transports de fines apparaissent moyennement importants (quelques kilogrammes de matériaux). Il est pour le moment difficile de savoir si les matériaux érodés proviennent du pied direct, de sous la risberme ou de sous le noyau.

Secteur des anomalies 12 à 14 – PK 30,410 à 30,510

La configuration du barrage est identique aux anomalies 9-11.

L'anomalie 12 au PK 30,410 est une fuite sans transport de matériaux, sur le talus de la risberme aval. Lors de l'inspection du 13/02, un autre tumulus a été découvert au PK 30,415 dans la forêt en pied. Ce dernier n'a pas pu être mesuré avec la végétation. Il est décalé d'environ 2 m du pied de la risberme.

Les désordres 13 et 14 sont deux tumuli en pied de la risberme aval :

- Désordre 13 – PK 30,410 : tumulus de 50 cm de diamètre sur une hauteur 10 cm ;
- Désordre 14 – PK 30,435 : tumulus de 50 de diamètre sur une hauteur de 5 à 10 cm.

À savoir, que sur l'ensemble du linéaire, il existe des petits tumuli de faible importance.



Figure 39 : Anomalie 12 – Tumulus supplémentaire dans la forêt



Figure 40 : Anomalie 13 – Tumulus de sable

Ces phénomènes avec transports de fines apparaissent faiblement importants (faible quantité de matériaux). Il est pour le moment difficile de savoir si les matériaux érodés proviennent du pied direct, de sous la risberme ou de sous le noyau.

Secteur des anomalies 15 et 16 – PK 30,640 à 30,675

Les anomalies 15 et 16 sont respectivement un petit tumulus au PK 30,640 et une fuite sans transports de matériaux au PK 30,675. Autour des désordres, des petits tumuli sont également présent dans la partie forestière, au-delà de la risberme aval.



Figure 41 : Anomalie 15 – Tumulus



Figure 42 : Anomalie 16 – Fuite sur le talus de la risberme aval

4.1.2 Digue Nord

De manière générale, il n'a pas été recensé de désordres sur les talus et la crête de la digue Nord.

Secteur des anomalies 17 à 19 – PK 30,750 à 30,810

La configuration du barrage est particulière sur cette zone. Le remblai dispose toujours d'une risberme aval de largeur 10 m en tête, mais le pied aval correspond directement à la berge de la Moder. Cette dernière, en extrados de virage, semble déjà en érosion active sur la berge. Une bathymétrie apparaît utile pour comprendre les mécanismes sur ce tronçon.

L'anomalie n°17 au PK 30,750 correspond à affaissement, une forme de fontis, dans la berge de la Moder, au-delà de la berme de pied. Il mesure 3 m de long pour 1,8 m de large et environ 1 m de profondeur. L'affaissement doit correspondre à une fuite vers la Moder. Il est également possible que l'effondrement soit en lien avec l'érosion de la rivière ou le basculement des saules en berge. On y distingue facilement la nature des sols de type sableux fins.



Figure 43 : Anomalies 17 – Affaissement



Figure 44 : Anomalie 18-19 – Position avec la risberme aval

Les anomalies 18 et 19 sont liées. Il s'agit de deux fuites sur la berge de la Moder, au-delà de la risberme aval. Ces fuites, probablement associés à la géométrie ou l'affouillement de la berge, ont conduit à faire glisser la berge vers la Moder sur un linéaire de 20 à 30 m environ. Le rejet en tête du glissement est de l'ordre 90 cm. Le sable visible après la fuite n°18 peut provenir de la fuite mais est semblable aux matériaux de la berge.

Les désordres en termes de fuite sont importants, mais la quantité de matériaux érodée est difficile à évaluer. Le glissement n'est pas critique pour la digue, car au-delà du pied.



Figure 45 : Anomalies 19 – Glissement avec fuite



Figure 46 : Anomalie 18 – Exutoire de la fuite et plage de sable en berge

Secteur des anomalies 20 à 23 – PK 31,340 à 31,360

La configuration de la digue est classique sur la digue nord, avec la risberme aval de largeur 10 m, et la Moder distante de 20 à 40 m du pied de digue.

La zone d'anomalie est localisée entre les ouvrages de vidanges (OH2 et 3) au droit d'une dépression en aval. Il doit s'agir d'un ancien bras de la Moder et/ou du Rhin.

Les anomalies sont concentrées sur le même chemin d'écoulement (profil en travers de la digue) mais avec des points de sorties différents par rapport au pied de l'ouvrage :

- Le petit tumulus n°20 est localisé à quelques mètres du pied de la risberme aval ;
- Les tumuli 20 à 23 sont plus éloignées à environ 15 m de la risberme aval dans la dépression.

Les tumuli formés ont des diamètres de 1 à 2 m avec une hauteur de dépôt d'environ 20 à 30 cm. La quantité de matériaux érodée est difficilement quantifiable mais importante.

La charge hydraulique relative entre le Polder et la sortie des tumuli est de l'ordre de 4 m, avec un cheminement d'écoulement de 35 à 45 m, sous l'ouvrage.



Figure 47 : Anomalies 21 à 22 – Tumulus dans la dépression



Figure 48 : Anomalie 23 – Tumulus

Ces désordres sont très importants en termes de concentration et de matériaux érodés. Pour autant, il est difficile d'identifier d'où ils ont été arrachés : dans les alluvions au-delà du pied de la digue ou sous le remblai de la digue ?

Secteur des anomalies 24 et 25 – PK 31,730 à 31,800

La configuration de la zone est similaire aux désordres 20-23 avec la Moder et la présence d'une grande annexe hydraulique ou dépression en pied aval. En plus, côté Polder, il existe une ancienne gravière. Cette configuration peut fortement raccourcir les cheminements hydrauliques en fondation.

Le désordre n°24 est une fuite en pied de la risberme (dépression en eau en pied direct). Il n'apparaît pas d'érosion sur la zone. En revanche, les castors sont très présents sur cette zone. Plusieurs arbres sont coupés ou attaqués par le(s) rongeur(s).

Le n°25 est un tumulus de sable dans la forêt, proche de la dépression en eau. Il est localisé à 5 m du pied de la risberme aval. Il mesure 80 cm de diamètre pour 15 cm de haut. À proximité, un chablis de peuplier présente également des traces de dépôts de sable.



Figure 49 : Anomalie 24 – Fuite au droit de la dépression



Figure 50 : Anomalie 25 – Tumulus



Figure 51 : Chablis avec traces de dépôts de sable proche de l'anomalie n°25

Secteur de l'anomalie 26 – PK 32,120

La zone de l'anomalie 26 est une section courante de la digue nord, avec la Moder qui s'éloigne du pied de digue (environ 100 m).

Les deux tumuli sont présents en pied de la risberme aval avec des diamètres de 100 et 150 cm pour hauteur faible de 5 cm. Ils sont localisés directement à côté du tumulus apparu lors de l'exercice de janvier 2016.

La quantité de matériaux déposée apparaît assez modeste (quelques kilogrammes au plus).

Les mesures thermométriques attestent d'un écoulement en fondation superficielle à 5-6 m sous la crête, soit environ 1m sous le TN aval (hors risberme).



Figure 52 : Anomalie 26 – Vue générale en pied de risberme aval



Figure 53 : Anomalie 26 – Zoom sur le tumulus à proximité de celui de 2016

4.2 Analyse préliminaire des phénomènes

Dans l'ensemble, les désordres de fuites ou de tumulus proviennent d'écoulement transitant dans la fondation de l'ouvrage. Cette fondation n'a, a priori, pas fait l'objet d'un écran étanche dans les alluvions sablo-graveleuse du Rhin, hormis sur les 3 zones connues en 1993.

La plupart des zones d'anomalies correspondent à d'ancien bras ou dépression du Rhin et de la Moder, ce qui atteste d'une fondation plus tourmentée ou perméable, et d'un cheminement d'écoulement assez court grâce aux dépressions présentes parfois aux pieds du remblai.

La présence de fuite sans transports de matériaux est assez peu critique pour le remblai de la digue. En revanche, les désordres avec transports de matériaux soulèvent la question de la zone d'arrachement du sable : en pied de l'ouvrage (peu critique), sous la risberme aval, ou sous le remblai. Enfin, la quantité de sable érodée reste assez importante pour les zones 9-11, 18-19, 21-23 et 26. Ces éléments orientent les cheminements préférentiels à analyser pour l'érosion interne.

5. STABILITE DES TALUS

L'analyse de la stabilité s'appuie sur les investigations topographiques et géotechniques décrites ci-avant.

Les situations de projet sont choisies pour représenter les différentes situations auxquelles l'ouvrage pourrait être soumis.

Les analyses sont menées à l'aide du logiciel GEOSTUDIO et les modules SEEP (hydraulique des sols) et SLOPE (stabilité des talus).

La justification de la stabilité du barrage s'appuie sur les documents de référence suivants :

- Arrêté Technique Barrage (ATB) du 06 août 2018 fixant les prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages ;
- Les recommandations CFBR pour la justification des barrages et des digues en remblai de 2015.

5.1 Hypothèses et situations de projet

5.1.1 Les situations de projet

Les situations du projet sont des conditions physiques représentant les conditions réelles auxquelles l'ouvrage est soumis et qui se produisent au cours d'une certaine durée pendant laquelle les distributions de toutes les données (actions, résistances) sont considérées comme constantes. Elles correspondent à des chargements pour lesquels l'ouvrage est susceptible de se trouver durant sa vie : mise en eau, vidange et séisme.

L'ensemble des situations du projet sont définies dans le tableau ci-dessous :

Tableau 19 : Situations de projet

Catégories de situations	Situation	Commentaires	Etats limites
Situation exceptionnelle de crue	Polder à RN	Surcharge d'exploitation en crête	Glissement du talus aval
Situation rare ou transitoire	Vidange du Polder	Surcharge d'exploitation en crête	Glissement des talus amont et aval
Situation extrême sismique	Polder vide	Charge sismique SES	Glissement des talus amont et aval
Situation normale d'exploitation	Polder vide	Surcharge d'exploitation en crête	Glissement des talus amont et aval

5.1.2 Les actions

Les actions se répartissent en trois catégories :

- Les actions permanentes ;
- Les actions variables ;
- Les actions accidentelles.

Les **actions permanentes** sont le poids propre du remblai et les charges d'exploitation. Les forces de gravité pouvant avoir, selon les zones, un effet favorable ou défavorable sur la stabilité, l'estimation de la valeur caractéristique du poids volumique est une estimation par valeur inférieure dans le cas d'effet favorable.

Les **charges d'exploitation** désignent les charges venant de l'exploitation de l'ouvrage. Dans notre cas, il s'agit de la charge des engins d'entretien. Il est donc retenu une surcharge de 20 kN/ml sur la crête de l'ouvrage (recommandation de base CFBR).

L'action variable de l'eau est évaluée dans les différentes situations de projet. Cette action définit la répartition du champ des pressions interstitielles qui joue un rôle dans la stabilité des digues.

De manière sécuritaire, nous retenons une charge hydraulique permanente sur l'amont de l'ouvrage, avec la cote maximale de remplissage (RN) de l'ouvrage :

- Cote maximale de remplissage (RN) : 119,02 m NGF (118,45 m NN).

A noter, qu'avec un remplissage en 12h du Polder et général un maintien du remplissage d'au moins 24h, le régime permanent est largement capable de s'établir dans la fondation et le remblai.

La condition aval varie selon le profil. Les charges hydrauliques suivants sont retenus :

Figure 54 : Conditions hydrauliques aval

Profil	Condition aval	Remarque
Profil 1 – Zone A de palplanches	115,50 m NGF	Canal de dérivation en aval*
Profil 1 – Désordres 1 à 8	114,50 m NGF	
Profil 2 – Désordres 9 à 16	-	TN à l'aval
Profil 3 – Désordres 17 à 19	115,50 m NGF	Moder en aval*
Profil 3 – Désordres 17 à 19	114,50 m NGF	
Profil 4 – Désordres 20 à 23	114,50 m NGF	Moder en aval
Profil 5 – Désordres 24 à 26	115,50 m NGF	Annexe hydraulique en aval*
Profil 5 – Désordres 24 à 26	114,50 m NGF	

***Deux niveau d'eau ont été retenus afin de réaliser une analyse de sensibilité de l'effet de la condition aval sur les résultats (cf. §0). Le niveau d'eau en fonctionnement normale est volontairement pessimiste par rapport aux données du barrage d'Iffezheim (pas de retour d'expérience).**

La vidange de l'ouvrage a été déterminée à partir du suivi des niveaux d'eau du polder lors du test de mise en eau réalisé en 2016. Ce test s'est déroulé du 11 au 15 janvier 2016, avec l'évolution suivante :

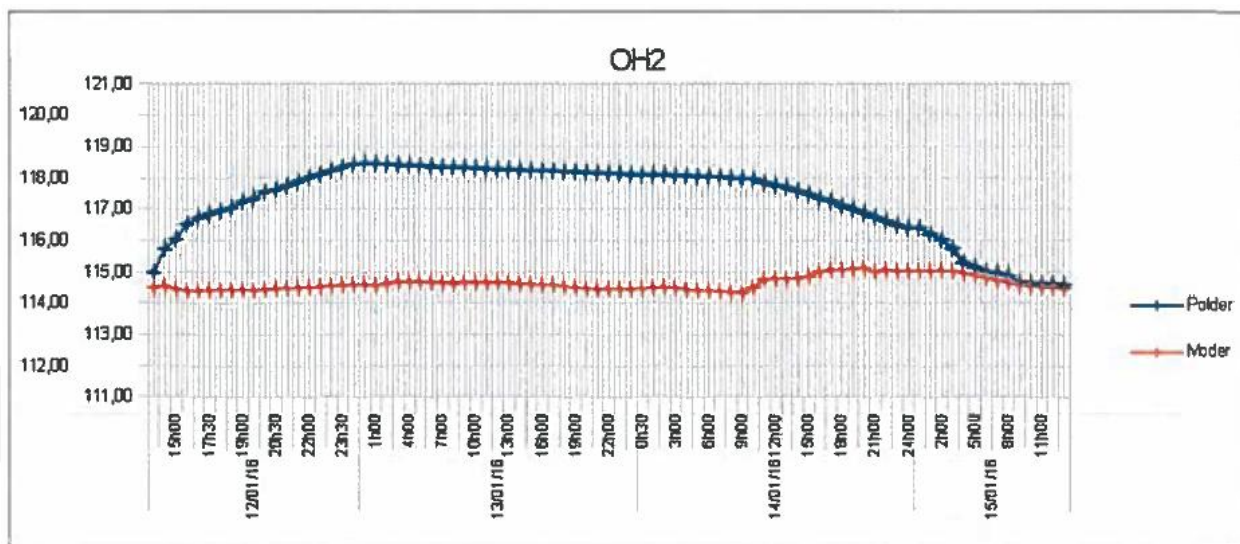


Figure 55 : Evolution des niveaux du Polder et de la Moder au droit de l'OH2 - Source : Bilan final du Test de mise en eau du 11 au 15 janvier 2016 (VNF)

La vidange normale lors des rétentions de crue est considérée également comme la vidange de sécurité (en cas d'apparition de désordres) puisque l'intégralité de la retenue est vidée en moins de 21 jours et la moitié en 8 jours.

L'**action accidentelle sismique** est définie en fonction du séisme de projet. Le barrage de classe B se situe en zone de sismicité 1 correspondant à un risque très faible. Selon « Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques » (MEDDE octobre 2014), un barrage de classe C en zone 3 est soumis à la vérification d'un Séisme d'Évaluation de la Sécurité SES. Le parti retenu a été d'utiliser les valeurs forfaitaires de l'action sismique définies ci-dessous, des barrages de classe C en zone 3.

Accélération pour le SES : zone 3 – classe C	
Accélération horizontale (m/s ²)	Accélération verticale (m/s ²)
1,4	1,3

Tableau 20 : Valeur des accélérations sismiques

Au vu des valeurs d'accélération, nous choisissons d'utiliser la **méthode pseudo-statique**. Cette méthode consiste à appliquer un effort moteur supplémentaire par l'intermédiaire de coefficients d'accélération sismique. Ces coefficients K_h ou K_v , selon qu'ils soient appliqués verticalement ou horizontalement, sont calculés à partir des accélérations précédentes et appliqués au centre de gravité du volume de terre en glissement potentiel de poids $K_h P$ ou $K_v P$.

5.1.3 Les hypothèses géométriques

L'objectif de ce modèle est d'obtenir une représentation simplifiée de la géométrie de l'ouvrage en conservant l'information pertinente pour le problème étudié. L'analyse de la stabilité s'appuie sur les profils topographiques réalisés au droit des différents désordres lors de la campagne d'investigations de 2025.

Les profils sont les suivants :

- Profil 1 : zone en amont des premiers désordres, équipée de palplanches (Zone A) ;
- Profil 2 : zone de fuites sans transport de sédiments (désordres 1 à 8) sur le talus du canal de dérivation ;
- Profil 3 : zone de sand-boils en aval de la recharge (désordres 9 à 16). Le canal de dérivation n'est pas en pied aval de l'ouvrage ;
- Profil 4 : zone de glissements (désordres 17 à 19) avec la berge de la Moder juste en pied aval de l'ouvrage. Une partie de cette section est équipée de palplanches de 7,80 m (Zone B) ;
- Profil 5 : zone de sand-boils entre le pied de l'ouvrage et la Moder (désordres 20 à 23) ;
- Profil 6 : zone de sand-boils en pied aval de l'ouvrage (désordres 24 à 26). Cette zone est localisée entre une ancienne gravière (coté Polder) et une grande annexe hydraulique ou dépression (coté aval). Une partie de cette section est équipée de palplanches de 8,00 m (Zone C).

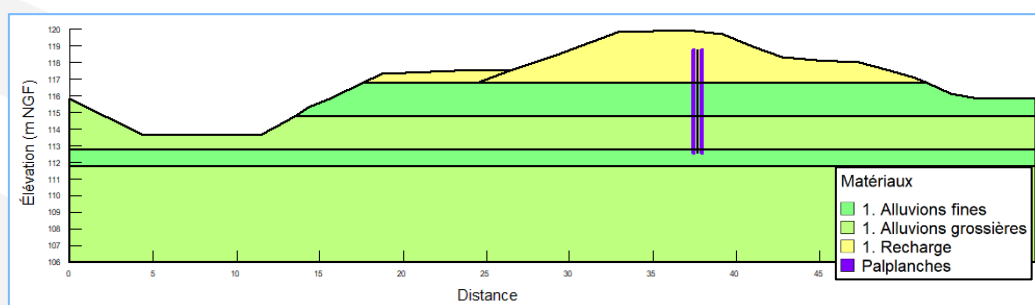


Figure 56 : Profil 1 – Zone A de palplanches

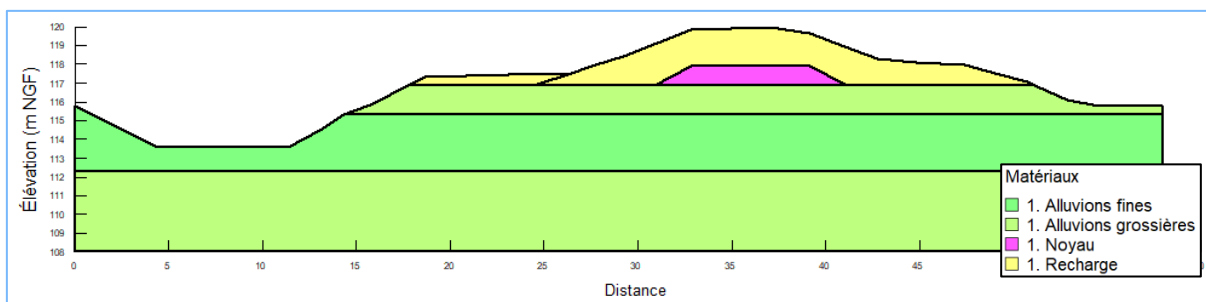


Figure 57 : Profil 2 - désordres 1 à 8

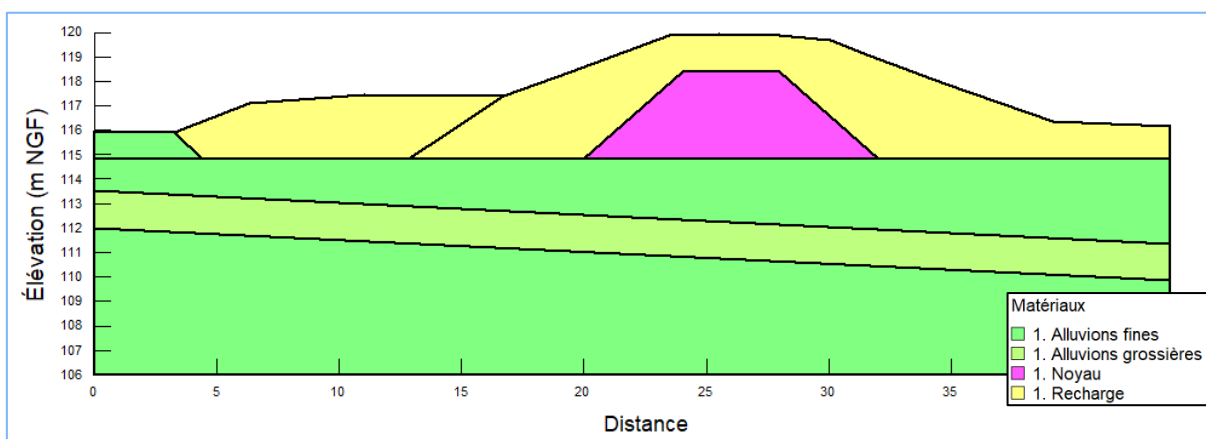


Figure 58 : Profil 3 - désordres 9 à 16

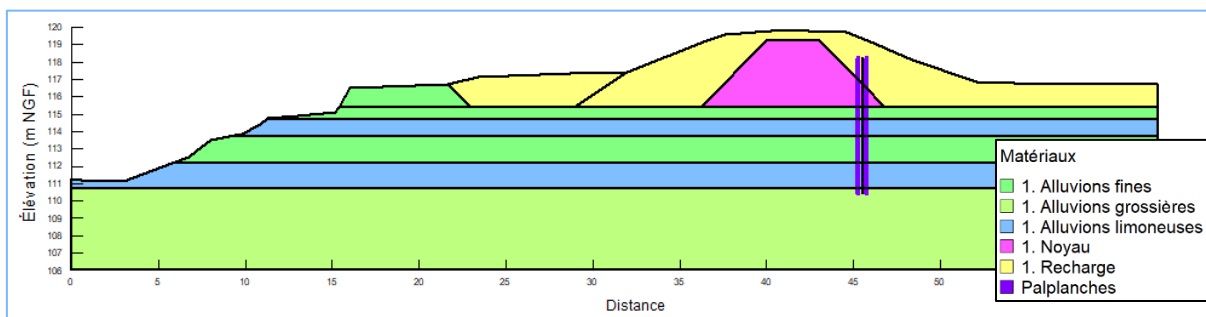


Figure 59 : Profil 4 - désordres 17 à 19

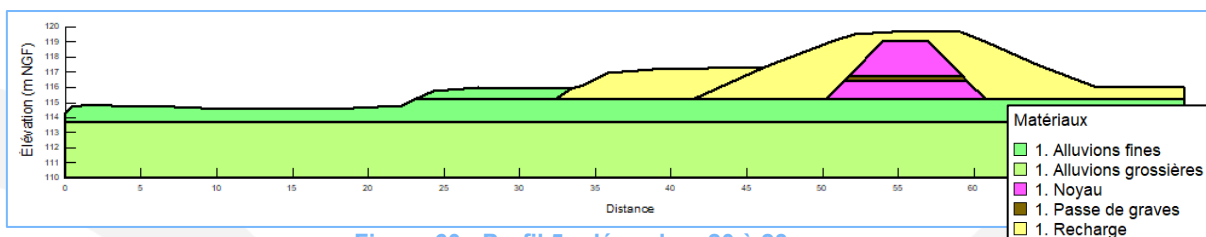


Figure 60 : Profil 5 - désordres 20 à 23

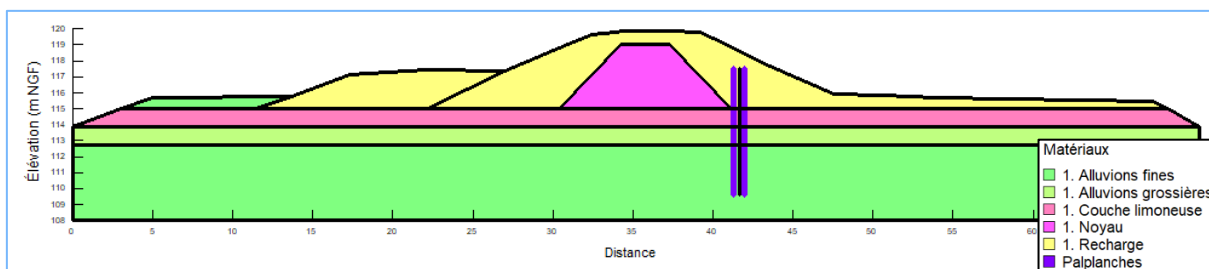


Figure 61 : Profil 6 - désordres 24 à 26

5.1.4 Les hypothèses hydrauliques

L'objectif du modèle hydraulique, est de déterminer le champ des pressions interstitielles et le champ des gradients hydrauliques au sein de l'ouvrage en fonction des conditions aux limites hydrauliques appliquées. Cela permet de poursuivre l'analyse par une étude de stabilité du barrage.

Les perméabilités sont retenues en considérant les investigations géotechniques réalisées en 2025, ainsi que les PERMEAFOR de 1993.

Tableau 21 : Caractéristiques hydrauliques des matériaux

Matériaux	Perméabilités k (m/s)
Recharges sablo-graveleuses	1.10^{-3}
Noyau sablo-limoneux	1.10^{-7}
Alluvions fines	5.10^{-4}
Alluvions limoneuses	2.10^{-7}
Alluvions graveleuses	5.10^{-3}
Couche limoneuse	1.10^{-7}
Passe graveleuse	1.10^{-3}
Palplanches	1.10^{-8}

5.1.5 Les hypothèses géotechniques

Le modèle géotechnique s'appuie sur l'ensemble des investigations géotechniques réalisées.

Le critère de comportement des matériaux retenus pour les calculs de stabilité est celui de Mohr-Coulomb. Les valeurs caractéristiques mécaniques des matériaux ont été déterminées à la suite de l'analyse des campagnes géotechniques réalisées.

Les palplanches n'interviennent pas directement dans le calcul de la stabilité du talus amont en servant seulement pour assurer l'étanchéité.

La passe graveleuse (observée sur le profil 5) n'intervient que dans le modèle SEEP. Dans l'analyse de stabilité, cette couche est assimilée au noyau sablo-limoneux.

Tableau 22 : Caractéristiques mécaniques de matériaux

Matériaux	Poids volumique γ (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)
Recharges sablo-graveleuses	20	0	38
Noyau sablo-limoneux	19	5	35
Alluvions graveleuses	21	0	40
Alluvions fines	20	2	35
Alluvions limoneuses	20	2	35
Couche limoneuse	19	15	35

5.1.6 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est effectuée sur les profils 1, 2, 4 et 6.

Cette analyse consiste à étudier l'effet de la condition hydraulique aval sur les résultats des simulations. Pour rappel, les niveaux retenus sont les suivants :

- Profil 1 et 2 :
 - ☐ Fonctionnement nominal : 115,30 m NGF ;
 - ☐ Essai : 114,50 m NGF.
- Profil 4 et 6 :
 - ☐ Fonctionnement nominal : 115,50 m NGF ;
 - ☐ Essai : 114,50 m NGF.

Le fonctionnement nominal du Polder implique une crue du Rhin, laquelle provoque une augmentation du niveau de la Moder et du canal de dérivation par effet de remous depuis l'aval du BMR d'Iffezheim.

Les conditions d'essai du Polder impliquent que le niveau de la Moder et du canal de dérivation est moyen, sans crue.

5.1.7 Coefficients partiels et de modèle

Les propriétés de résistance des matériaux sont prises en compte dans les calculs à partir de leur valeur caractéristique, à laquelle est appliqué des **coefficients partiels de sécurité** en fonction du degré d'occurrence dans une situation de projet définie. Les coefficients partiels et de modèle sont les suivants :

Tableau 23 : Coefficients partiels et de modèle

Situation de projet	Coefficient partiel γ_m sur c' et $\tan \phi'$	Coefficient partiel γ_m sur γ'	Coefficient de modèle γ_d
Situation normale d'exploitation	1,25	1	1,2
Situations rares ou transitoire	1,1	1	1,2
Situation exceptionnelle de crue	1,1	1	1,2
Situation extrême de séisme	1,0	1	1,1

La justification de la stabilité des barrages en remblai est conforme aux démarches semi-probabilistes, aux états-limites et examine successivement : les situations de projet, les actions, les résistances, les états limites et les critères de stabilité.

5.2 Résultats

5.2.1 Profil 1 – Zone A de palplanches

Pour rappel, une analyse de sensibilité a été réalisé sur le niveau aval (canal de dérivation) du profil 1. Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 24 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 1

No.	Situation	Coef. de modèle	Talus aval	Grand cercle aval	Talus amont	Grand cercle amont	Talus canal dérivation
1	RN	Fonct. Nominal	1,2	1,89	2,05	-	1,27
		Essai	1,2	1,89	2,05	-	1,37
2	Vidange	Fonct. Nominal	1,2	1,89 (0h)	2,05 (0h)	1,78 (0h)	1,27 (0h)
		Essai	1,2	1,89 (0h)	2,05 (0h)	1,79 (0h)	1,31 (0h)
3	Séisme	Fonct. Nominal	1,1	1,96	2,10	2,14	1,74
		Essai	1,1	1,96	2,10	2,14	1,70
4	Exploitation normale	-	1,2	1,61	1,75	1,70	1,28

Les résultats montrent que les talus aval et amont respectent les critères pour l'ensemble des situations analysées.

Par ailleurs, le talus du canal de dérivation respecte aussi les critères pour l'ensemble des situations analysées.

Finalement, concernant l'analyse de sensibilité, le niveau du canal de dérivation n'a d'influence que sur la stabilité de son talus du canal. En effet, la différence entre les coefficients de sécurité calculés est négligeable.

5.2.2 Profil 2 – Désordres 1 à 8

Pour rappel, une analyse de sensibilité a été réalisé sur le niveau aval (canal de dérivation) du profil 2. Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 25 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 2

No.	Situation	Coef. de modèle	Talus aval	Grand cercle aval	Talus amont	Grand cercle amont	Talus canal dérivation
1	RN	Fonct. Nominal	1,2	1,86	1,93	-	1,30
		Essai	1,2	1,86	1,93	-	1,20
2	Vidange	Fonct. Nominal	1,2	1,86 (0h)	1,93 (0h)	1,64 (0h)	1,30 (2h)
		Essai	1,2	1,86 (0h)	1,93 (0h)	1,64 (0h)	1,20 (2h)
3	Séisme	Fonct. Nominal	1,1	2,00	2,02	2,15	1,38
		Essai	1,1	2,00	2,02	2,15	1,41
4	Exploitation normale	-	1,2	1,59	1,65	1,60	1,32

Les résultats montrent que les talus aval et amont respectent les critères pour l'ensemble des situations analysées.

Par ailleurs, le talus du canal de dérivation respecte aussi les critères pour l'ensemble des situations analysées. Bien que pour la situation d'essai le critère est à la limite du coefficient de modèle, les hypothèses retenues sont pénalisantes car le canal de drainage présente un enrochement sur le talus qui contribue à la stabilité de ce dernier.

Finalement, concernant l'analyse de sensibilité, le niveau du canal de dérivation n'a d'influence que sur la stabilité de son talus du canal.

5.2.3 Profil 3 – Désordres 9 à 16

Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 26 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 3

No.	Situation	Coef. de modèle	Talus aval	Grand cercle aval	Talus amont
1	RN	1,2	1,86	2,21	-
2	Vidange	1,2	1,86 (0h)	2,21 (0h)	1,53 (2h)
3	Essai	1,1	1,94	2,40	1,82
4	Exploitation normale	1,2	1,59	2,07	1,50

Les résultats montrent que les talus aval et amont respectent les critères pour l'ensemble des situations analysées.

5.2.4 Profil 4 – Désordres 17 à 19

Pour rappel, une analyse de sensibilité a été réalisée sur le niveau aval (niveau de la Moder) du profil 4. Ainsi, le profil est analysé avec et sans les palplanches. Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 27 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 4

No.			Situation	Coef. de modèle	Talus aval	Grand cercle aval	Talus amont	Berge
1	Avec palplanches	RN	Fonct. Nominal	1,2	1,75	2,86	-	1,82
Essai			1,2	1,75	2,86	-	1,98	
2		Vidange	Fonct. Nominal	1,2	1,75 (0h)	2,86 (0h)	1,52 (0h)	1,82 (0h)
			Essai	1,2	1,75 (0h)	2,86 (0h)	1,52 (0h)	1,98 (0h)
3	Sans palplanches	RN	Fonct. Nominal	1,2	1,75	2,80	-	1,78
Essai			1,2	1,75	2,85	-	1,70	
4		Vidange	Fonct. Nominal	1,2	1,75 (0h)	2,80 (2h)	1,53 (0h)	1,78 (0h)
			Essai	1,2	1,75 (0h)	2,84 (2h)	1,53 (0h)	1,70 (0h)
5	Sans/avec palplanches	Séisme	Fonct. Nominal	1,1	1,99	3,25	2,00	2,05
			Essai	1,1	1,99	3,25	2,00	2,24
6	Sans/avec palplanches	Exploitation normale	-	1,2	1,49	2,44	1,50	1,59

Les résultats montrent que les talus aval et amont respectent les critères pour l'ensemble des situations. Par ailleurs, la berge de la Moder respecte également les critères.

Les coefficients de stabilité pour la berge et le grand cercle aval sont supérieurs pour le profil avec les palplanches à ceux sans palplanches. En effet, les palplanches permettent le rabattement de la ligne piézométrique grâce à leur ancrage dans une couche peu perméable.

Finalement, concernant l'analyse de sensibilité, le niveau de la Moder n'a d'influence que sur la stabilité de sa berge, tout en respectant les critères.

5.2.5 Profil 5 – Désordres 20 à 23

Pour rappel, le profil 5 a été analysé avec et sans la prise en compte d'une passe graveleuse dans le noyau. Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 28 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 5

No.	Situation		Coef. de modèle	Talus aval	Grand cercle aval	Talus amont
1	RN	Avec passe graveleuse	1,2	1,76	2,47	-
		Sans passe graveleuse	1,2	1,76	2,58	-
2	Vidange	Avec passe graveleuse	1,2	1,76 (0h)	2,47 (0h)	1,46 (2h)
		Sans passe graveleuse	1,2	1,76 (0h)	2,58 (0h)	1,46 (2h)
3	Séisme	Avec/sans passe	1,1	1,92	2,90	1,62
4	Exploitation normale	Avec/sans passe	1,2	1,50	2,40	1,36

Les résultats montrent que les talus aval et amont respectent les critères pour l'ensemble des situations analysées. Concernant la passe graveleuse, elle n'a pas d'influence sur la stabilité des talus.

5.2.6 Profil 6 – Désordres 24 à 26

Pour rappel, une analyse de sensibilité a été réalisée sur le niveau aval (niveau de l'annexe hydraulique) du profil 6. Ainsi, le profil est analysé avec et sans les palplanches. Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 29 : Coefficients de sécurité des situations analysées pour le profil 6

No.	Situation		Coef. de modèle	Talus aval	Grand cercle aval	Talus amont
1	Avec palplanches	RN	Fonct. Nominal	1,2	1,75	2,86
			Essai	1,2	1,75	2,86
2	Avec palplanches	Vidange	Fonct. Nominal	1,2	1,75 (0h)	2,86 (0h)
			Essai	1,2	1,75 (0h)	2,86 (0h)
3	Sans palplanches	RN	Fonct. Nominal	1,2	1,75	2,86
			Essai	1,2	1,75	2,86
4	Sans palplanches	Vidange	Fonct. Nominal	1,2	1,75 (0h)	2,86 (0h)
			Essai	1,2	1,75 (0h)	2,86 (0h)
5	Sans/avec palplanches	Séisme	Fonct. Nominal	1,1	1,83	2,86
			Essai	1,1	1,83	2,86
6	Sans/avec palplanches	Exploitation normale	-	1,2	1,40	2,38

Les résultats montrent que les talus aval et amont respectent les critères pour l'ensemble des situations analysées.

La différence entre les résultats du profil avec et sans palplanches est négligeable.

Finalement, concernant l'analyse de sensibilité, le niveau de l'annexe hydraulique n'a pas d'influence sur la stabilité des talus de l'ouvrage.

5.3 Récapitulatif

Pour chaque profil, les résultats montrent :

- Profil 1 – Désordres 1 à 8 :
 - ☐ Les talus amont et aval respectent les critères, ainsi que le talus du canal de dérivation ;
 - ☐ Le niveau du canal de dérivation a une influence uniquement sur la stabilité de la berge et pas du talus aval.
- Profil 2 – Désordres 1 à 8 :
 - ☐ Les talus amont et aval respectent les critères, ainsi que le talus du canal de dérivation ;
 - ☐ Le niveau du canal de dérivation a une influence uniquement sur la stabilité de la berge et pas du talus aval;
 - ☐ L'absence de paroi étanche (palplanches) provoque une diminution des facteurs de sécurité calculés par rapport au profil 1 (celui avec palplanches).
- Profil 3 – Désordres 9 à 16
 - ☐ Les talus amont et aval respectent les critères.
- Profil 4 – Désordres 17 à 19
 - ☐ Les talus amont et aval respectent les critères, ainsi que la berge de la Moder ;
 - ☐ Les palplanches permettent le rabattement de la ligne piézométrique, en améliorant les facteurs de sécurité calculés.
 - ☐ Le niveau de la Moder n'a pas d'influence sur la stabilité de l'ouvrage, mais seulement sur celle de sa berge.
- Profil 5 – Désordres 20 à 23
 - ☐ Les talus amont et aval respectent les critères ;
 - ☐ La passe graveleuse n'a pas d'influence sur la stabilité du talus.
- Profil 6 – Désordres 24 à 26
 - ☐ Les talus amont et aval respectent les critères ;
 - ☐ La différence entre les résultats avec ou sans palplanches est négligeable ;
 - ☐ Le niveau aval (annexe hydraulique) n'a pas d'influence sur la stabilité de l'ouvrage.

6. ANALYSE DE L'ÉROSION INTERNE

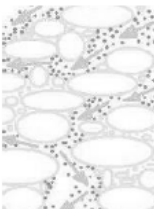
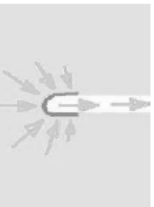
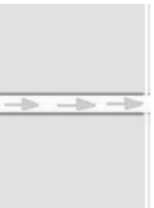
6.1 Méthode

L'état limite d'érosion interne est traité selon la méthodologie proposée dans le guide ERINOH.

Une analyse de niveau 2 est menée sur les 6 profils définis précédemment.

Plusieurs typologies d'érosion interne nécessitent d'être vérifiées :

- Érosion de conduit ;
- Érosion régressive ;
- Érosion de contact ;
- Suffusion interne.

	Suffusion interne : L'écoulement traversant un sol grossier arrache les particules d'un sol fin le long de son contact et les entraîne à travers les vides des particules grossières.
	Suffusion de contact : L'écoulement à l'interface de deux couches de sols différents, entraîne l'érosion du sol le plus fin par un écoulement parallèle à l'interface.
	Erosion régressive : L'écoulement à travers l'ouvrage entraîne des particules vers le débouché aval. Cela crée un conduit ou une perte de matière continue qui progresse vers l'amont.
	Erosion de conduit : Un défaut initial, de type fissure ou conduit, indépendant de l'érosion interne, traverse une partie du remblai. L'eau circulant dans ce conduit développe des contraintes d'entraînement suffisantes pour arracher et transporter les particules des parois.

La méthode mise en place dans le guide ERINOH, au travers de l'analyse de niveau 2, nous permet de vérifier ces 4 typologies à travers une analyse fonctionnelle et une analyse comportementale.

6.2 Suffusion interne

La suffusion interne correspond à l'entraînement des particules fines libres de se mouvoir à travers les vides des particules grossières d'un sol à granulométrie discontinue.

Un matériau est sujet à la suffusion, si et seulement si deux critères sont satisfaits :

- Un critère géométrique : les pores des grosses particules laissent passer les plus petites (sol non auto-filtrant). Ce caractère suffusif est vérifié quand les quatre conditions suivantes sont réunies :

- **Sensibilité à la ségrégation.** Les conditions granulométriques associées sont les suivantes :

- ▷ (1) $Cu = d_{80}/d_{10} > 8$;
- ▷ (2) $Cu = d_{85}/d_{15} > 9$.

Nous analysons les résultats des essais de laboratoire dans la recharge sablo-graveleuse et la fondation alluvionnaire. Les résultats du noyau, typiquement des sols classés F1 (A1), sont exclus de cette analyse compte tenu de leur teneur élevée en fines (passant à 63 μ m).

Les résultats sont les suivants :

Tableau 30 : Analyse de la sensibilité à la ségrégation

Profil	Sondage	Profondeur (m/TA)	Altitude (m NGF)	Formation	Nature	(1) Cu	(2) Cu	Passant à 63 μ m
1	SC0-1	2,20 - 3,00	117,55 - 116,75	Recharge	B3/D2 (G1)	55	43	4,6
1	SC0-1	3,00 - 3,50	116,75 - 116,25	Recharge	B5 (I1)	-	-	22,3
1	SC0-1	5,00 - 6,00	114,75 - 113,75	Fondation	D2 (G1)	40	24	3,4
2	SC1-1	1,95 - 2,60	117,80 - 117,15	Recharge	B5 (G3)	400	322	13,0
2	SC1-1	3,00 - 4,50	116,75 - 115,25	Recharge	D2 (G3)	83	40	5,4
2	SC1-1	6,00 - 6,50	113,75 - 113,25	Fondation	D2 (G1)	21	7	2,2
2	SC3-1	1,50 - 1,90	118,25 - 117,85	Recharge	D2 (G1)	95	67	4,4
2	SC3-1	3,25 - 4,50	116,50 - 115,25	Fondation	D2 (G1)	52	35	4,8
2	SC3-1	4,50 - 6,00	115,25 - 113,75	Fondation	B3 (G3)	10	5	9,0
3	SC4-1	1,50 - 3,00	118,20 - 116,70	Recharge	B5 (I1)	39	118	29,2
3	SC4-1	4,85 - 6,00	114,85 - 113,70	Fondation	B4 (G1)	55	56	2,6
3	SC4-2	0,70 - 1,10	116,60 - 116,20	Recharge	B5 (I1)	21	13	30,2
3	SC5-1	1,50 - 3,00	118,25 - 116,75	Recharge	B5 (I1)	385	296	0,4
3	SC5-1	3,10 - 4,30	116,65 - 115,45	Noyau	B5 (I1)	140	400	23,8
3	SC5-1	5,15 - 6,00	114,60 - 113,75	Fondation	D2 (G1)	43	27	32,4
4	SC9-1	5,00 - 6,00	114,70 - 113,70	Fondation	D2 (G3)	75	40	1,4
4	SC9-2	0,10 - 0,50	117,25 - 116,85	Recharge	B5 (S3 ou S4)	> 8	81	5,7
4	SC9-2	1,50 - 2,70	115,85 - 114,65	Fondation	D2 (G1)	54	38	13,7
4	SC9-2	3,00 - 4,50	114,35 - 112,85	Fondation	D2 (G1)	40	25	2,3
5	SC12-1	3,00 - 3,25	116,70 - 116,45	Recharge	D2 (G1)	53	12	1,7
5	SC12-1	4,50 - 6,00	115,20 - 113,70	Fondation	D2 (G1)	50	43	2,9
5	SC12-2	0,05 - 1,35	117,85 - 116,55	Recharge	D2 (G1)	64	45	4,2
5	SC12-2	1,50 - 3,00	116,40 - 114,90	Fondation	D2 (G1)	68	50	4,0
5	SC12-2	3,20 - 4,50	114,70 - 113,40	Fondation	D2 (S1)	37	38	4,1
6	SC13-1	6,00 - 7,50	113,65 - 112,15	Fondation	B3 (G3)	111	42	1,8
6	SC13-2	3,00 - 4,50	114,20 - 112,70	Fondation	D2 (G1)	32	31	10,2
6	SC13-2	4,50 - 6,00	112,70 - 111,20	Fondation	B1 (S2)	18	22	2,0
6	SC14-1	4,80 - 6,00	114,85 - 113,65	Fondation	D2 (G1)	50	58	1,5
6	SC15-1	5,00 - 6,00	114,75 - 113,75	Fondation	D2 (G1)	50	38	5,0

L'ensemble de sols analysés de la recharge et la fondation présentent un risque de ségrégation.

- ☐ **Sensibilité au transport de fines.** La condition granulométrique associée est la suivante :

Passant à 80 μm < 35 %

L'ensemble de sols analysés de la recharge et la fondation présentent un risque de sensibilité au transport de fines.

- ☐ **Sensibilité à l'instabilité granulométrique.** Le critère d'instabilité géométrique testé est celui de Fannin qui prend l'intersection des critères de Kenney & Lau et Kezdi en considérant les paramètres :

- ▷ F = % de poids de matériau de diamètre < d
- ▷ H = % de poids de matériau de diamètre compris entre d et 4d.

Les points (F, H) sont placés sur la figure suivante, pour F variant de 0 à 30% si la granulométrie est serrée et de 0 à 20% si la granulométrie est étalée. Si ces points sont à l'intérieur du trapèze bordé par les droites $H=F$, $H=15$ et $F=30\%$, le matériau est suffusif.

Nous étudions ce critère que pour les échantillons de la recharge et la fondation.

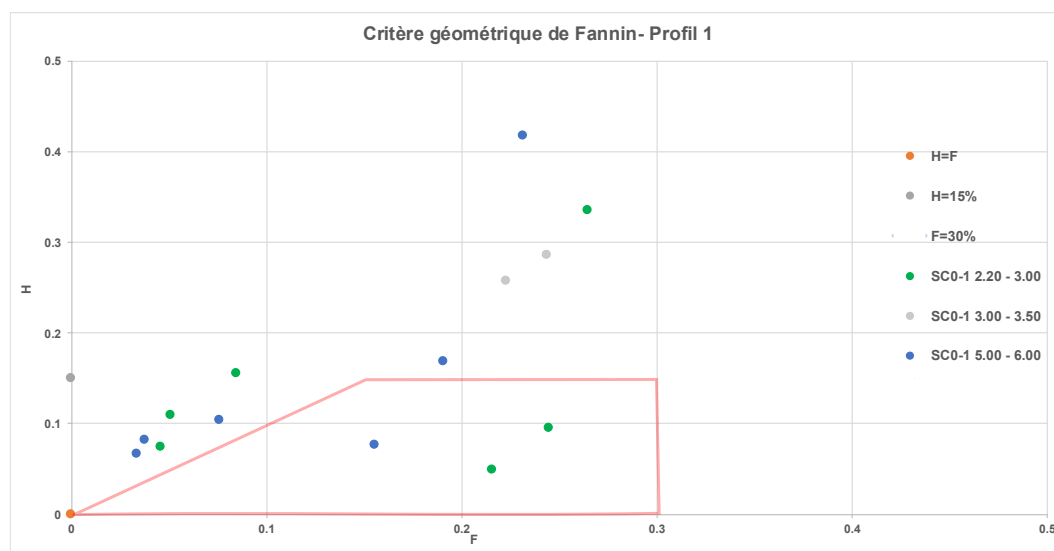


Figure 62 : Critère géométrique de Fanning - Profil 1

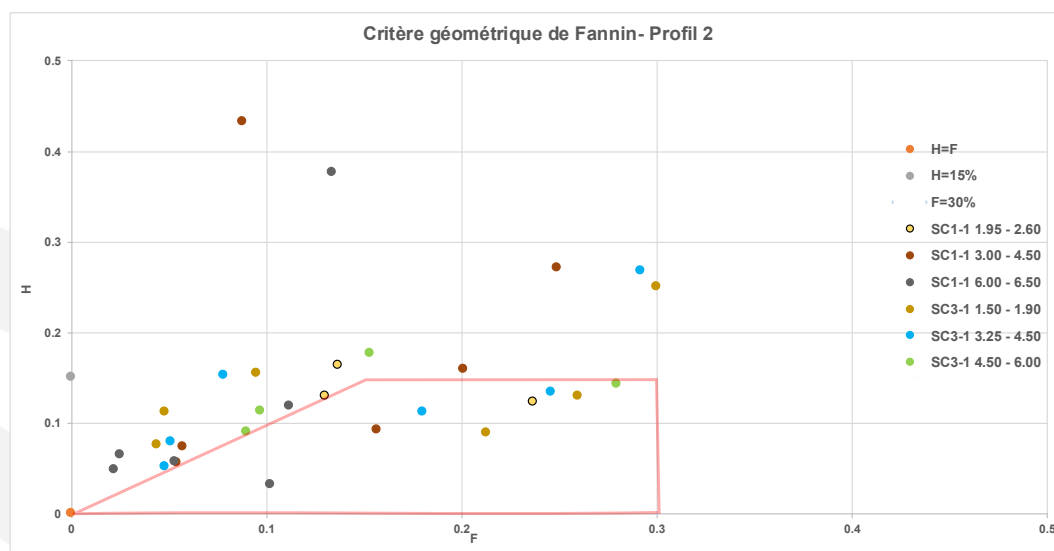


Figure 63 : Critère géométrique de Fanning - Profil 2

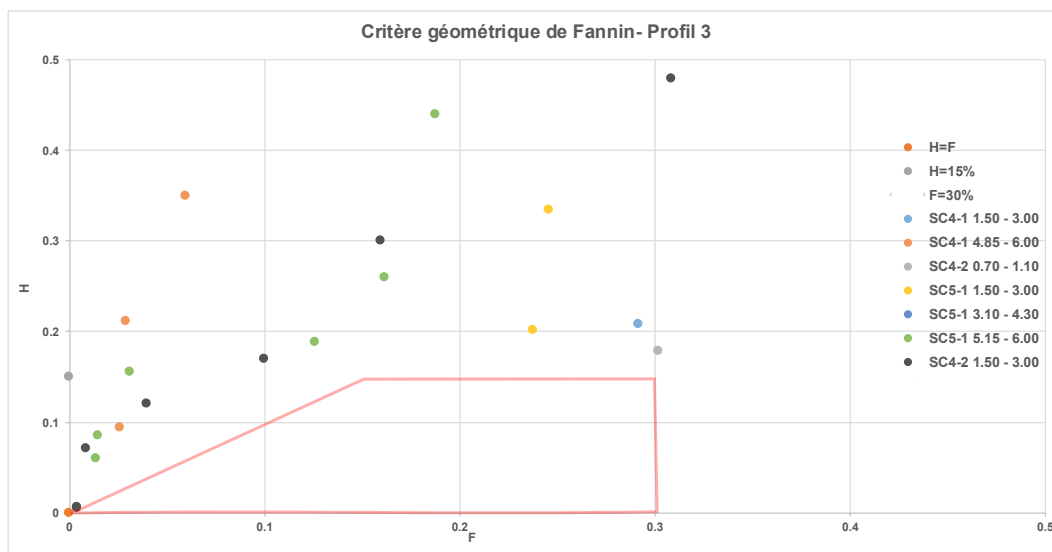


Figure 64 : Critère géométrique de Fanning - Profil 3

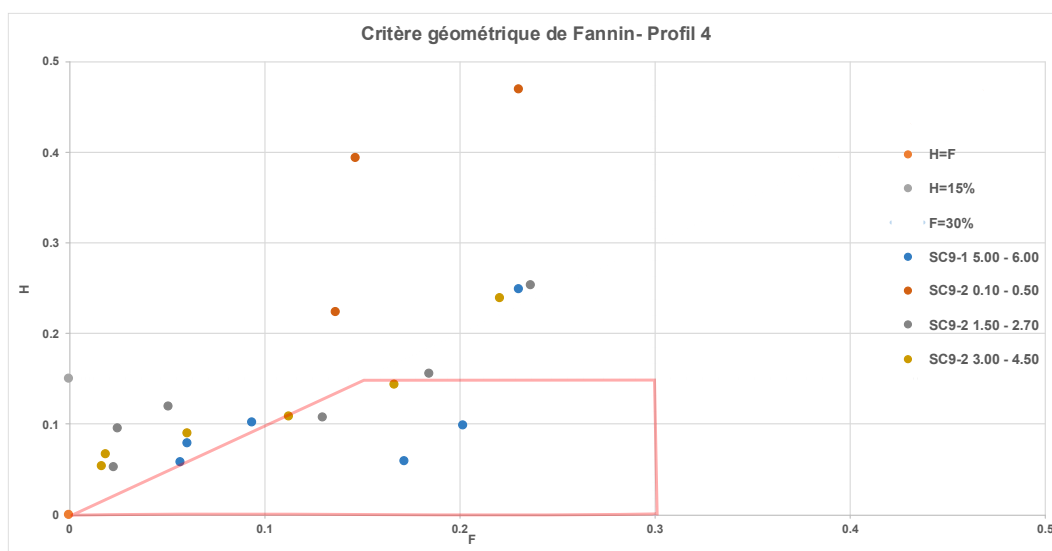


Figure 65 : Critère géométrique de Fanning - Profil 4

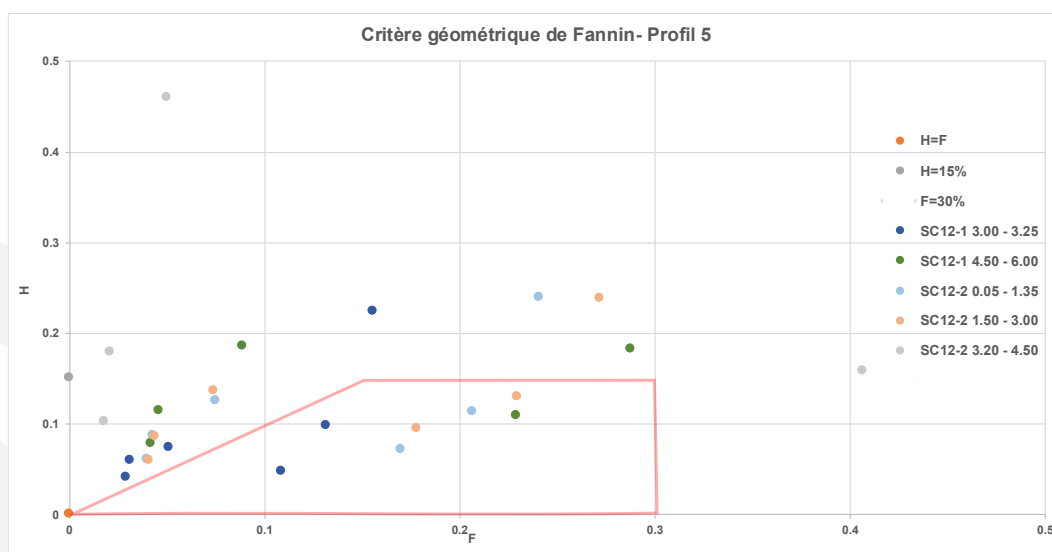


Figure 66 : Critère géométrique de Fanning - Profil 5

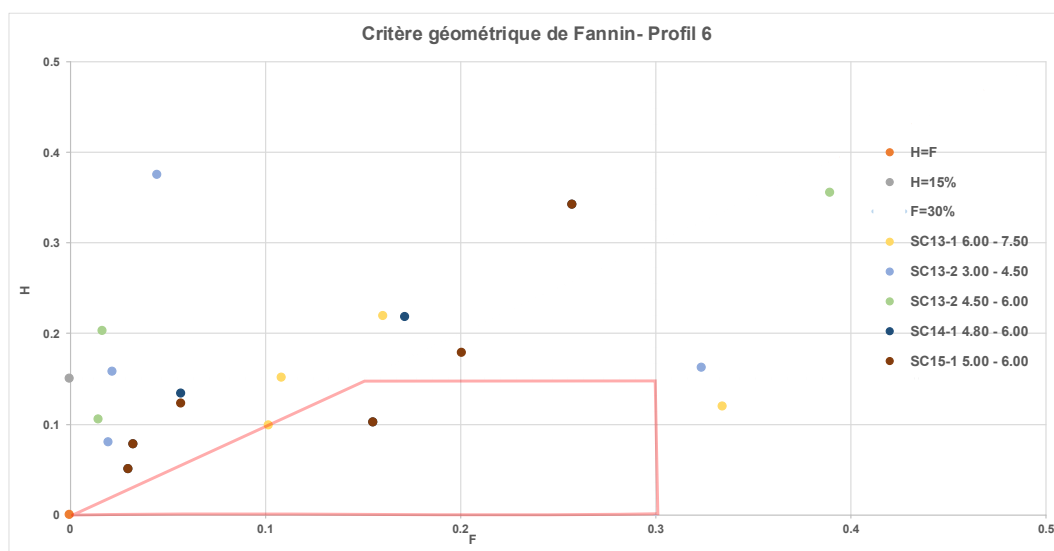


Figure 67 : Critère géométrique de Fanning - Profil 6

Sauf pour ceux du profil 3, les échantillons sont quasi tous instables selon le critère

- Un critère hydraulique : La vitesse critique de Darcy qui initie la suffusion est fonction de la perméabilité d'après Dimkic (2008). La formule est la suivante :

$$v_c = 0,01k^{0,3834}$$

Les vitesses critiques pour chaque matériau sont les suivantes :

Tableau 31 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 1

Matériau	Vitesse critique
Recharge sablo-graveleuse	7.10^{-4} m/s
Alluvions fines	5.10^{-4} m/s
Alluvions grossières	1.10^{-3} m/s
Passe graveleuse	7.10^{-4} m/s

Tableau 32 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 1

Situation	Recharge sablo-graveleuse	Alluvions fines	Alluvions grossières
RN – Fonct. Nominal	1.10^{-4} m/s	1.10^{-4} m/s	2.10^{-4} m/s
RN – Essai	1.10^{-4} m/s	1.10^{-4} m/s	2.10^{-4} m/s

Tableau 33 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 2

Situation	Recharge sablo-graveleuse	Alluvions fines	Alluvions grossières
RN – Fonct. Nominal	1.10^{-4} m/s	1.10^{-4} m/s	2.10^{-4} m/s
RN – Essai	2.10^{-4} m/s	2.10^{-4} m/s	1.10^{-4} m/s

Tableau 34 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 3

Situation	Recharge sablo-graveleuse	Alluvions fines	Alluvions grossières
RN	4.10^{-4} m/s	2.10^{-4} m/s	$3,5.10^{-4}$ m/s

Tableau 35 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 4

Situation	Recharge sablo-graveleuse	Alluvions fines	Alluvions grossières
RN – Fonct. Nominal	Avec palplanches	2.10^{-6} m/s	2.10^{-6} m/s
RN – Essai		1.10^{-6} m/s	2.10^{-6} m/s
RN – Fonct. Nominal	Sans palplanches	4.10^{-5} m/s	1.10^{-4} m/s
RN – Essai		6.10^{-5} m/s	$1,5.10^{-4}$ m/s

Tableau 36 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 5

Situation	Recharge sablo-graveleuse	Alluvions fines	Alluvions grossières	Passe graveleuse
RN + Passe graveleuse	2.10^{-4} m/s	3.10^{-4} m/s	$4,5.10^{-4}$ m/s	4.10^{-4} m/s
RN + Sans passe graveleuse	2.10^{-4} m/s	3.10^{-4} m/s	$4,5.10^{-4}$ m/s	-

Tableau 37 : Vitesses pour les différents matériaux – Profil 5

Situation	Recharge sablo-graveleuse	Alluvions fines	Alluvions grossières	Couche limoneuse
RN – Fonct. Nominal	Avec palplanches	2.10^{-6} m/s	1.10^{-4} m/s	1.10^{-4} m/s
RN – Essai		2.10^{-6} m/s	2.10^{-4} m/s	2.10^{-4} m/s
RN – Fonct. Nominal	Sans palplanches	2.10^{-6} m/s	$1,8.10^{-4}$ m/s	2.10^{-4} m/s
RN – Essai		5.10^{-6} m/s	$2,2.10^{-4}$ m/s	3.10^{-4} m/s

Cette vitesse n'est atteinte pour aucun des profils analysés.



Ce qu'il faut retenir...

Le critère géométrique est atteint sur les matériaux de la recharge (sables-graveleux) et de la fondation (alluvions) pour les **profils 1, 2, 4, 5 et 6**. En revanche, les vitesses d'écoulements selon la modélisation sous SEEP ne dépassent pas le critère hydraulique.

Le critère géométrique n'est pas atteint sur les matériaux de la recharge (sables-graveleux) et la fondation (alluvions) **du profil 3** (absence de sensibilité à l'instabilité granulométrique). Par ailleurs, les vitesses d'écoulements selon la modélisation sous SEEP ne dépassent pas le critère hydraulique.

6.3 Suffusion de contact

L'analyse des carottes affiche d'interfaces fortes entre un horizon très plus grossiers et d'autre à granulométrie plus fine :

- ☐ Profil 1 : Absence d'horizon franc. Nous réalisons quand même l'analyse avec l'échantillon classé B5 (I1) ;

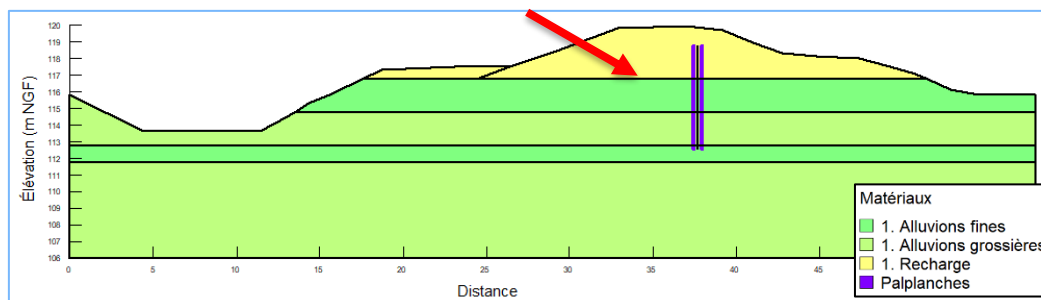


Figure 68 : Interfaces du profil 1 – Zone A de palplanches

□ Profil 2 : Noyau – Recharge et Noyau – Fondation ;

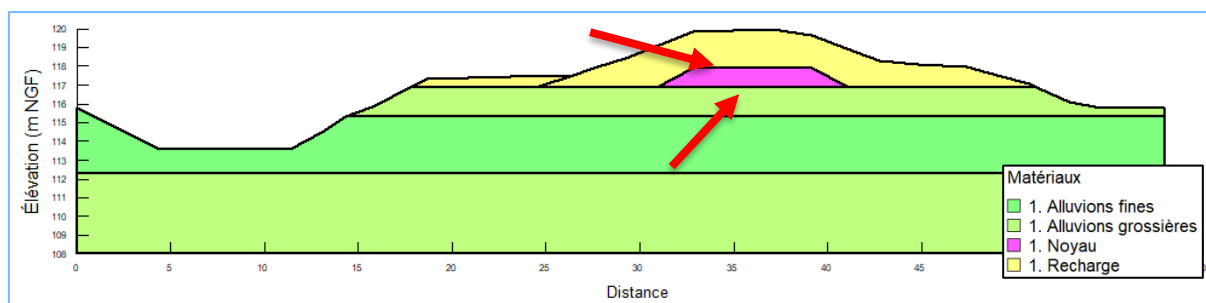


Figure 69 : Interfaces du profil 2 - désordres 1 à 8

□ Profil 3 : Noyau – Recharge, Noyau – Fondation et Alluvions fines en pied – Fondation ;

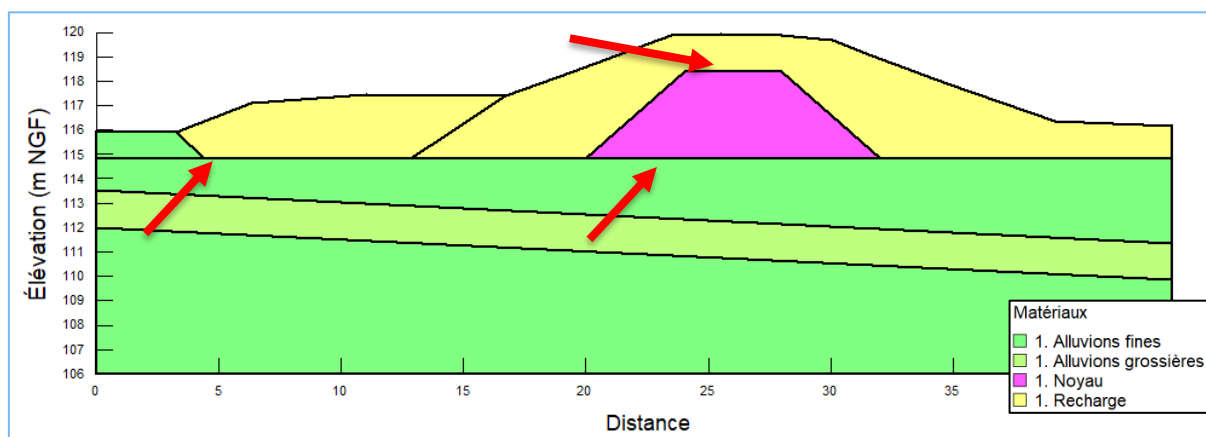


Figure 70 : Interfaces du profil 3 - désordres 9 à 16

□ Profil 4 : Noyau – Recharge et Noyau – Fondation ;

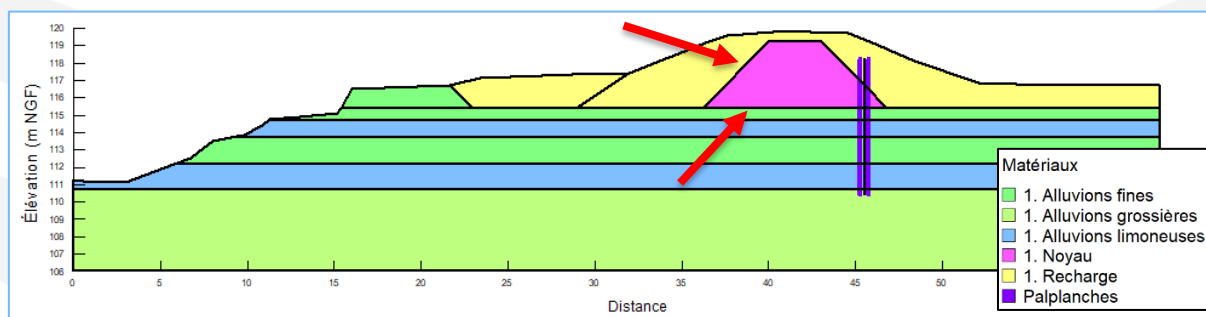


Figure 71 : Interfaces du profil 4 - désordres 17 à 19

- ☐ Profil 5 : Passe graveleuse – Noyau – Fondation ;

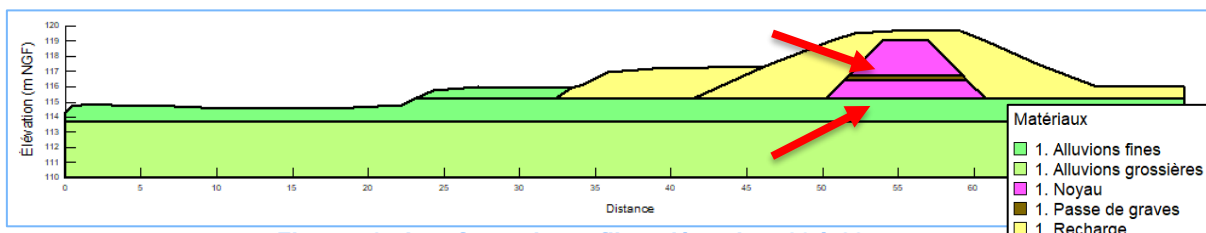


Figure 72 : Interfaces du profil 5 - désordres 20 à 23

- ☐ Profil 6 : Noyau – Fondation et Couche limoneuse – Fondation.

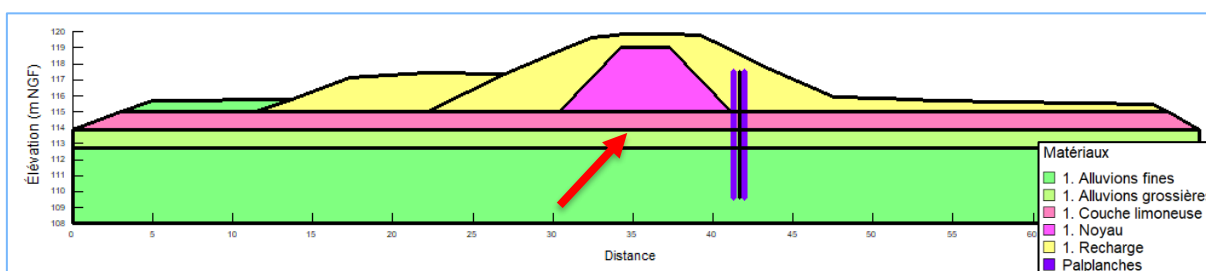


Figure 73 : Interfaces du profil 6 - désordres 24 à 26

Le guide ERINOH précise que pour l'érosion de contact, il faut vérifier les conditions de filtre entre les deux couches. Les critères à analyser sont les suivants :

- Règles de Terzaghi (1922)

Le critère de filtre qui s'applique à l'ensemble des matériaux est le suivant :

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4$$

Avec :

- ☐ D_{xx} = ouverture du tamis au travers duquel passe xx% du poids des grains constituant le filtre ;
- ☐ d_{xx} = ouverture du tamis au travers duquel passe xx% du poids des grains du sol à protéger.

- Règles de Sherard et Dunningan (1985, 1989)

Un critère de filtre est appliqué selon la nature du sol à protéger, notamment la teneur en fines. Le tableau suivant montre la classification des matériaux et le critère associé.

Sol à protéger	Critère : seuil de rétention
[groupe 1] limons fins et argiles "fine silts and clays" caractérisés par une proportion de fines passant au tamis 200 (0,08 mm) supérieure à 85 % (seuls 2 sols dispersifs ont été testés)	$D_{15} < 9 d_{85}$ (sans descendre sous $D_{15} \geq 0,2$ mm)
[groupe 2] limons et argiles sableuses et aux sables argileux et limoneux "sandy silts and clays and silty and clayey sands", caractérisés par une proportion de fines passant au tamis 200 comprise entre 40 % et 85 %	$D_{15} \leq 0,7$ mm
[groupe 3] sables et graviers comportant une faible proportion de fines "sands and sandy gravels with small content of fines", caractérisés par un passant au tamis 200 inférieur ou égal à 15 %	$D_{15} < 4 d_{85}$
[groupe 4] sol intermédiaire entre les groupes 2 et 3, c'est à dire ayant un pourcentage de fines compris entre 15 % et 40 %	$D_{15} \leq (40 - \% \text{ fines}) / (4d_{85} - 0,7) / 25 + 0,7$

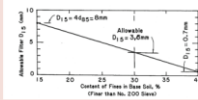


Figure 74 : Critères de filtre selon la teneur en fines - Source : Sherard et Dunningan

À préciser qu'aucun échantillon ne rentre dans le groupe 1 (teneur en fines supérieure à 85 %). Nous analysons seulement les critères du groupe 2 et 4 (noyau).

Tableau 38 : Règles de filtre – Profil 1

Sondage	Nature sol	Passant 63 μ m	D ₁₅ (mm)	d ₈₅ (mm)	Terzaghi D ₁₅ / d ₈₅ < 4	Critère Sherard	Vérifié ?
SC0-1 2,20 - 3,00	Recharge : B3/D2 (G1)	4,6	0,3	43	-	-	-
SC0-1 3,00 - 3,50	Recharge : B5 (I1)	22,3	0,063	8	0,04 / 0,06	D ₁₅ < 0,92 mm	Ok
SC0-1 5,00 - 6,00	Fondation : D2 (G1)	3,4	0,5	42	-	-	-

Tableau 39 : Règles de filtre – Profil 2

Sondage	Nature sol	Passant 63 μ m	D ₁₅ (mm)	d ₈₅ (mm)	Terzaghi D ₁₅ / d ₈₅ < 4	Critère Sherard	Vérifié ?
SC1-1 1,95 - 2,60	Recharge : B5 (G3)	13	0,09	29	-	-	-
SC1-1 3,00 - 4,50	Recharge : D2 (G3)	5,4	0,5	20	-	-	-
SC1-1 6,00 - 6,50	Fondation : D2 (G1)	2,2	2,1	45	-	-	-
SC3-1 1,50 - 1,90	Recharge : D2 (G1)	4,4	0,3	20	-	-	-
SC3-1 1,90 - 2,90	Noyau : A1 (F1)	48,3	0,003	0,33	0,27 / 1,50 / 6,36* 0,91 / 0,82 / 0,61	D ₁₅ < 0,7 mm	Non*
SC3-1 3,25 - 4,50	Fondation : D2 (G1)	4,8	0,4	44	-	-	-
SC3-1 4,50 - 6,00	Fondation : B3 (G3)	9	0,2	0,9	-	-	-

*Les règles de filtre de Terzaghi et de Sherard ne sont pas respectées pour l'échantillon de fondation SC1-1 6,00 – 6,50 m. Cependant, il faut noter qu'au droit du SC1-1, le noyau n'a pas été retrouvé. La vérification des règles a été réalisée avec l'échantillon du noyau du SC3-1.

Tableau 40 : Règles de filtre – Profil 3

Sondage	Nature sol	Passant 63 μ m	D ₁₅ (mm)	d ₈₅ (mm)	Terzaghi D ₁₅ / d ₈₅ < 4	Critère Sherard	Vérifié ?
SC4-1 1,50 - 3,00	Recharge : B5 (I1)	29,2	0,017	2	-	D ₁₅ < 0,73 mm	Ok*
SC4-1 3,00 - 4,50	Noyau : A1 (F1)	48,6	0,003	0,34	0,794 5,60	D ₁₅ < 0,7 mm	Non*
SC4-1 4,85 - 6,00	Fondation : B4 (G1)	2,6	0,27	45	-	-	-
SC4-2 0,70 - 1,10	Alluvions fines : B5 (I1)	30,2	0,063	17	0,112	D ₁₅ < 0,96 mm	Non*
SC4-2 1,50 - 3,00	Fondation : D2 (G1)	0,4	1,9	25	-	-	-
SC5-1 1,50 - 3,00	Recharge : B5 (I1)	23,8	0,027	8	-	D ₁₅ < 0,90 mm	Ok*
SC5-1 3,10 - 4,30	Noyau : B5 (I1)	32,4	0,042	4,8	0,146	D ₁₅ < 0,76 mm	Ok*
SC5-1 5,15 - 6,00	Fondation : D2 (G1)	1,4	0,7	49	-	-	-

*Les règles de filtre de Sherard ne sont pas respectées pour l'échantillon de fondation SC4-2 1,50 – 3,00 m.

Tableau 41 : Règles de filtre – Profil 4

Sondage	Nature sol	Passant 63 μ m	D ₁₅ (mm)	d ₈₅ (mm)	Terzaghi D ₁₅ / d ₈₅ < 4	Critère Sherard	Vérifié ?
SC9-1 1,50 - 3,00	Noyau : A1 (F1)	38,9	0,046	0,31	1,29 0,26 / 2,03 / 2,58	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC9-1 3,50 - 4,30	Noyau : A1 (F1)	64,7	0,002	0,18	2,22 0,44 / 3,50 / 4,44	D ₁₅ < 0,7 mm	Non*
SC9-1 5,00 - 6,00	Fondation : D2 (G3)	5,7	0,4	46	-	-	-
SC9-2 0,10 - 0,50	Recharge : B5 (S3/S4)	13,7	0,08	6,5	-	-	-
SC9-2 1,50 - 2,70	Recharge : D2 (G1)	2,3	0,63	24	-	-	-
SC9-2 3,00 - 4,50	Fondation : D2 (G1)	1,7	0,8	20	-	-	-

*Les règles de filtre de Terzaghi et de Sherard ne sont pas respectées pour l'échantillon de fondation SC9-2 (3,00 – 4,50).

Tableau 42 : Règles de filtre – Profil 5

Sondage	Nature sol	Passant 63 μ m	D ₁₅ (mm)	d ₈₅ (mm)	Terzaghi D ₁₅ / d ₈₅ < 4	Critère Sherard	Vérifié ?
SC12-1 1,50 - 3,00	Noyau : A1 (F1)	57,9	0,003	0,31	6,12* / 0,97 1,29 / 1,29	D ₁₅ < 0,7 mm	Non*
SC12-1 3,00 - 3,25	Passe graveleuse : D2 (G1)	2,9	1,9	23	-	-	-
SC12-1 3,65 - 4,50	Noyau : A1 (F1)	55,4	0,003	0,31	6,12* / 0,97 1,29 / 1,29	D ₁₅ < 0,7 mm	Non*
SC12-1 4,50 - 6,00	Fondation : D2 (G1)	4,2	0,3	43	-	-	-
SC12-2 0,05 - 1,35	Recharge : D2 (G1)	4	0,4	48	-	-	-
SC12-2 1,50 - 3,00	Fondation : D2 (G1)	4,1	0,4	20	-	-	-

*Les règles de filtre de Terzaghi et de Sherard ne sont pas respectées pour l'échantillon de la passe graveleuse observé dans le noyau.

Tableau 43 : Règles de filtre – Profil 6

Sondage	Nature sol	Passant 63 μ m	D ₁₅ (mm)	d ₈₅ (mm)	Terzaghi D ₁₅ / d ₈₅ < 4	Critère Sherard	Vérifié ?
SC13-1 3,00 - 4,50	Noyau : A1 (F1)	60,3	0,0025	0,29	0,62 1,00 / 0,93	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC13-1 4,50 - 5,80	Noyau : A1 (F1)	64,6	0,063	0,29	0,62 1,00 / 0,93	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC13-1 6,00 - 7,50	Fondation : B3 (G3)	10,2	0,18	7,5	-	-	-
SC13-2 0,80 - 1,50	Couche limoneuse : A1 (F1)	47,9	0,063	7	0,02 0,03 / 0,04	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC13-2 3,00 - 4,50	Fondation : D2 (G1)	2	0,29	8,9	-	-	-
SC13-2 4,50 - 6,00	Fondation : B1 (S2)	1,5	0,27	6	-	-	-
SC14-1 0,45 - 1,50	Noyau : A1 (F1)	50,1	0,042	0,39	0,62 1,00 / 0,93	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC14-1 3,60 - 4,25	Noyau : A1 (F1)	70,3	0,002	0,25	0,96 1,00 / 0,93	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC14-1 4,50 - 4,80	Noyau : A1 (F1)	40,2	0,045	15	0,02 1,00 / 0,93	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC14-1 4,80 - 6,00	Fondation : D2 (G1)	5	0,24	44	-	-	-
SC15-1 1,50 - 3,00	Noyau : A1 (F1)	38,6	0,006	1	0,45 1,00 / 0,93	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC15-1 3,60 - 4,50	Noyau : A1 (F1)	52,3	0,006	0,33	0,73 1,00 / 0,93	D ₁₅ < 0,7 mm	Ok
SC15-1 5,00 - 6,00	Fondation : D2 (G1)	3	0,45	47	-	-	-

Les alluvions sont essentiellement des couches sableuses ou sablo-limoneuses. Il convient donc d'utiliser la formule de Brauns :

$$U_{crit} = 0.65 * n_D \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} * g * d_{50}}$$

Avec :

- n_D la porosité du gravier ;
- ρ_s (kg/m³) la densité spécifique des particules de sable ;
- ρ_w (kg/m³) la densité de l'eau ;
- d_{50} (m) le diamètre médian (50% de passant) du sable.

Pour les échantillons qui ne respectent pas les critères de filtre, les vitesses critères d'initiation sont de :

- ☐ SC1-1 6,00 - 6,50 : 5.10⁻² m/s ;
- ☐ **SC3-1 1,90 - 2,90 : 6.10⁻³ m/s ;**
- ☐ **SC4-1 3,00 - 4,50 : 5.10⁻³ m/s ;**
- ☐ SC4-2 0,70 - 1,10 : 1.10⁻² m/s ;
- ☐ SC4-2 1,50 - 3,00 : 6.10⁻² m/s ;
- ☐ SC9-1 3,50 - 4,30 : 3.10⁻³ m/s ;
- ☐ SC9-2 3,00 - 4,50 : 6.10⁻² m/s ;
- ☐ SC12-1 1,50 - 3,00 : 4.10⁻³ m/s ;
- ☐ SC12-1 3,00 - 3,25 : 6.10⁻² m/s ;
- ☐ **SC12-1 3,65 - 4,50 : 4.10⁻³ m/s.**

À partir des vitesses critiques de Brauns, nous retenons un critère limite de 5.10⁻⁴ m/s.

Les modélisations sous SEEP affichent les vitesses d'écoulements présentés précédemment dans le chapitre de suffusion interne (cf. 6.3). **Le critère hydraulique n'est pas atteint.**



Ce qu'il faut retenir...

*Le **profil 1** ne présente pas d'interfaces marquées. Par ailleurs, le matériau classé I1 (B5) respecte les règles de filtre pour les différents contacts analysés.*

*Les **profils 2 et 4** ne respectent pas les critères de filtre (Terzaghi et Sherard) pour le contact entre le noyau, classé F1 (A1), et la fondation, classée G1 (D2).*

*Le **profil 3** ne respecte pas les critères de filtre (Terzaghi et Sherard) pour le contact entre le noyau, classé F1 (A1), et la fondation, classée G1 (D2). Par ailleurs, le critère de Sherard n'est pas respecté pour le contact entre cette même fondation et la recharge et les alluvions fines, toutes deux classées I1 (B5).*

*Le **profil 5** ne respecte pas les critères de filtre (Terzaghi et Sherard) pour le contact entre le noyau, classé F1 (A1), et la passe graveleuse, classée G1 (D2).*

*Le **profil 6** respecte les règles de filtre (Terzaghi et Sherard) sur les différents contacts et échantillons analysés.*

Finalement, bien que les critères de filtre ne soient pas respectés, le critère hydraulique permettant de justifier l'initiation de l'érosion de contact n'est pas atteint.

L'initiation de l'érosion de contact n'est pas atteinte.

6.4 Erosion régressive

- Le premier type concerne l'érosion globale. Dans le cas où la stratification géologique de la fondation côté aval comporte une couche de sol peu perméable surmontant une ou des couches de sol plus perméables, les gradients hydrauliques en pied aval, s'ils sont suffisamment importants, peuvent conduire au soulèvement massif de la couche de sol peu perméable.

Ce type de géologie n'a pas été reconnue par sondages de la campagne géotechnique. À ce titre, il n'existe pas de stratification géologique favorable pour que s'établisse un risque d'érosion régressive globale.

- Le second type concerne l'érosion locale. La nature argilo-limoneuse du remblai nécessite de vérifier que les gradients ne sont pas suffisants pour entraîner un phénomène d'érosion régressive local. Pour vérifier la condition hydraulique de ce phénomène, on utilise la théorie de LANE, qui compare le gradient critique initiant ce type d'érosion, à celui du modèle hydraulique. Selon le point de sortie de la ligne piézométrique, le gradient critique peut varier entre 0,20 (sables grossiers) et 0,30 (graves moyennes), compte tenu de la table du CEREMA ci-dessous.

Valeur du gradient critique	Nature du matériau
0.12	Sables très fins et silts
0.14	Sables fins
0.17	Sables moyens
0.20	Sables grossiers
0.25	Graves fines
0.30	Graves moyennes
0.33	Graves grossières
0.33	Argiles peu consistantes
0.5	Argiles de consistances moyennes
0.55	Argiles raides
0.62	Argiles très raides

Dans le cadre de l'étude de stabilité du barrage, nous avons analysé les gradients en pied aval pour les différents profils selon les figures suivantes :

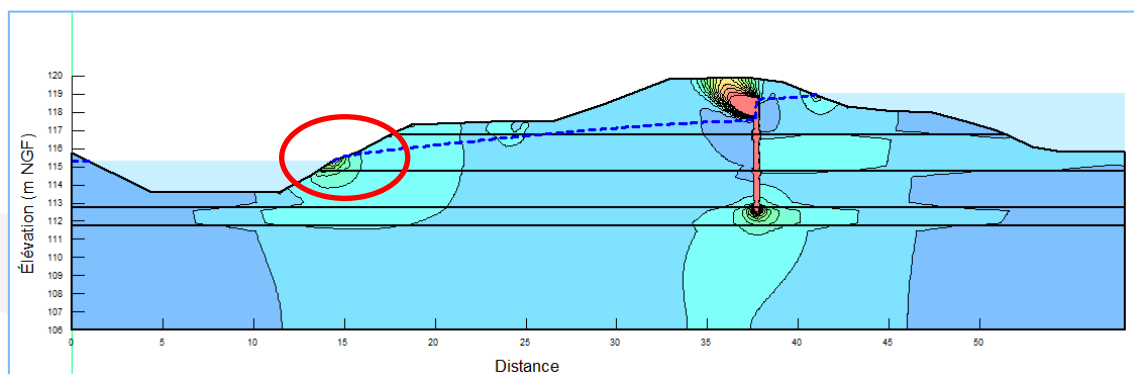


Figure 75 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 1 et 2

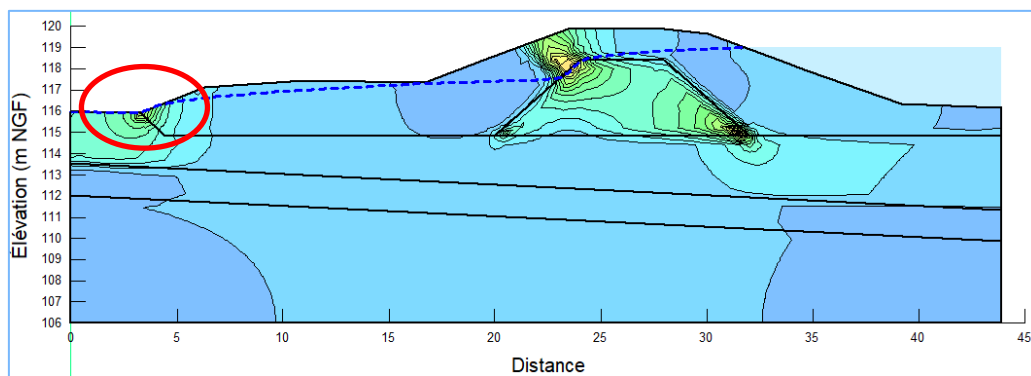


Figure 76 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 3

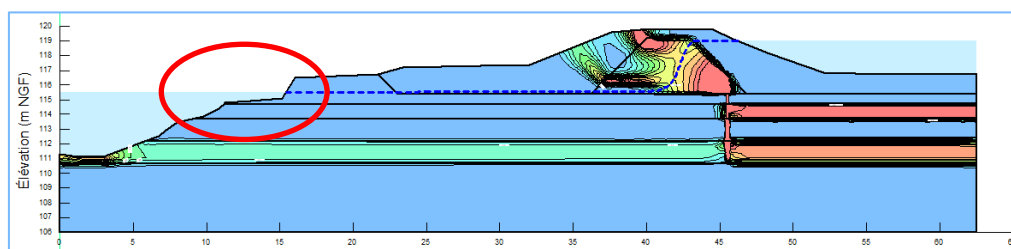


Figure 77 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 4

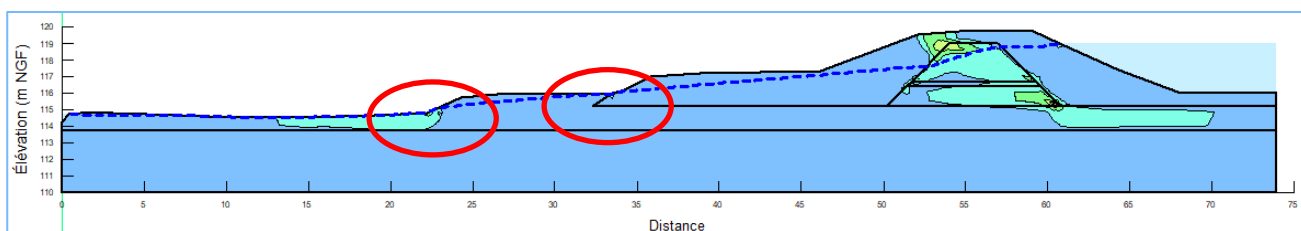


Figure 78 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 5

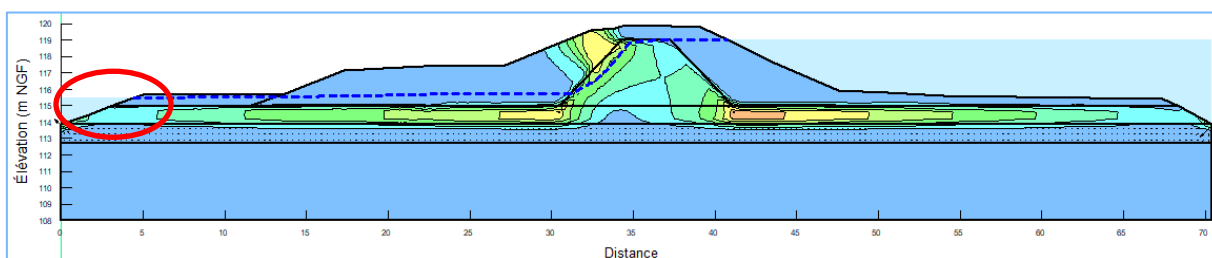


Figure 79 : Localisation de la section pour la vérification du critère de LANE – Profil 6

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 44 : Gradient en pied aval pour les différents profils

Profil	Situation	Gradient critique	Gradient calculé
Profil 1	RN – Fonctionnement Nominal	0,30	0,30
	RN – Essai	0,20	0,35
Profil 2	RN – Fonctionnement Nominal	0,30	0,30
	RN – Essai	0,20	0,45
Profil 3	RN	0,30	0,30
Profil 4 avec palplanches	RN – Fonctionnement Nominal	0,20	0,004
	RN – Essai	0,20	0,05
Profil 4 sans palplanches	RN – Fonctionnement Nominal	0,20	0,25
	RN – Essai	0,20	0,50
Profil 5	RN – Avec passe graveleuse	Recharge : 0,30 Aval : 0,20	0,20 0,35
	RN – Sans passe graveleuse	Recharge : 0,30 Aval : 0,20	0,15 0,35
Profil 6 avec palplanches	RN – Fonctionnement Nominal	0,20	0,004
	RN – Essai	0,20	0,40
Profil 6 sans palplanches	RN – Fonctionnement Nominal	0,20	0,0045
	RN – Essai	0,20	0,50

Les gradients du **profil 1** sont supérieurs au gradient critique sous les conditions d'essai du Polder (niveau haut du canal de dérivation), tandis qu'ils sont inférieurs pour le fonctionnement nominal. Il faut noter que les gradients sont les mêmes pour les deux cas, mais le gradient critique varie à cause du point de sortie de la ligne piézométrique.

Les gradients du **profil 2** sont égaux ou supérieurs aux gradients critiques. De même que pour le profil 1, selon les conditions de mise en eau du Polder, le point de sortie de la ligne piézométrique varie, affectant ainsi le gradient critique.

L'analyse des **profils 1 et 2 montre l'influence des palplanches sur les gradients des profils**. En effet, les gradients du profil 1 sont inférieurs à ceux du profil 2. Pour rappel, le profil 1 n'a pas de noyau (étanchéité assurée par les palplanches), tandis que le profil 2 présente un noyau, mais avec une épaisseur faible.

Les gradients du **profil 3** sont égales au gradient critique.

L'analyse du **profil 4 montre l'influence des palplanches sur les gradients des profils**. En effet, les gradients du profil avec palplanches sont inférieurs à ceux du profil sans palplanches. Par ailleurs, les conditions d'essai sont pénalisantes pour les gradients.

Les gradients dans la recharge du **profil 5** sont inférieurs au gradient critique, tandis que ceux à l'aval sont supérieurs. Par ailleurs, l'influence de la passe graveleuse est négligeable.

Les gradients du **profil 6 avec et sans palplanches** sont inférieurs au gradient critique pour le fonctionnement nominal du Polder. Pour les conditions d'essai, ces gradients deviennent supérieurs. En effet, les gradients sont davantage influencés par le niveau aval que par la présence ou l'absence de palplanches.

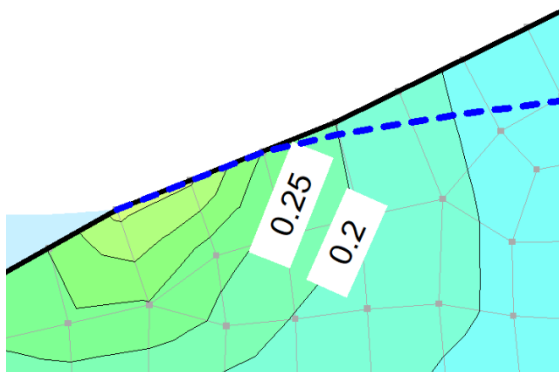


Figure 80 : Gradient hydraulique pour le Profil 1 – RN
Fonctionnement Nominal

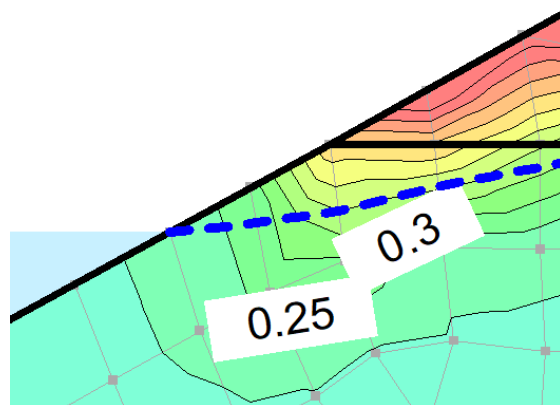


Figure 81 : Gradient hydraulique pour le Profil 1
– RN Essai

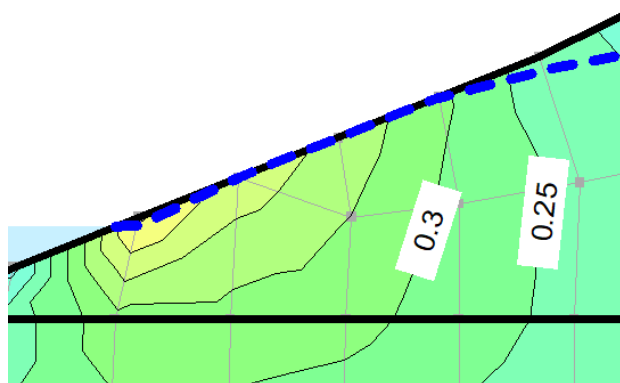


Figure 82 : Gradient hydraulique pour le Profil 2 – RN
Fonctionnement Nominal

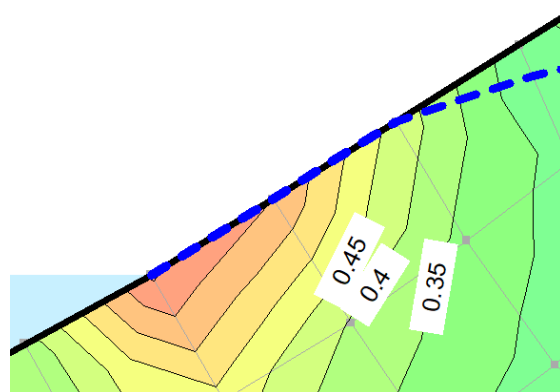


Figure 83 : Gradient hydraulique pour le Profil 2
– RN + Essai

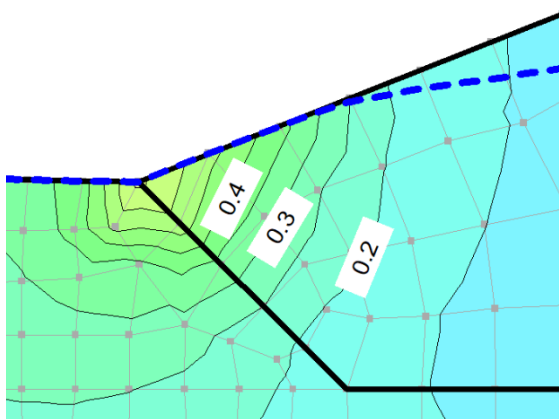


Figure 84 : Gradient hydraulique pour le Profil 3 – RN

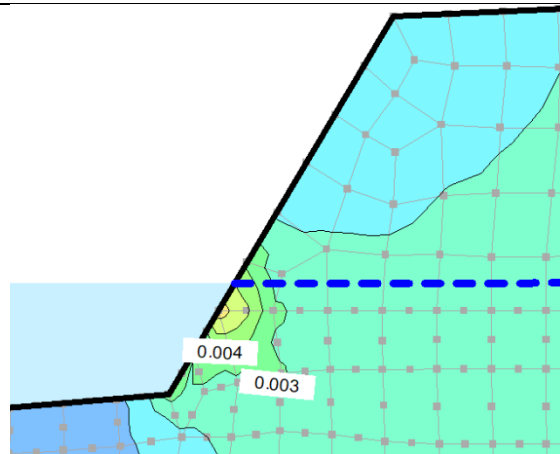


Figure 85 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 avec palplanches – RN Fonctionnement Nominal

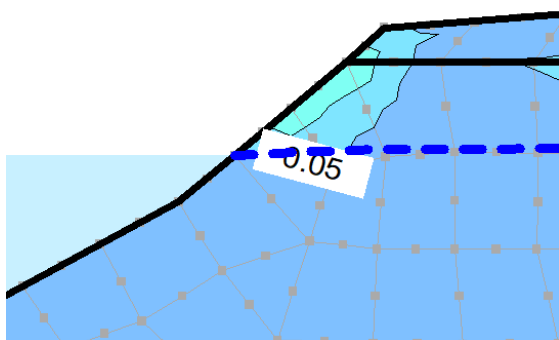


Figure 86 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 avec palplanches – RN Essai

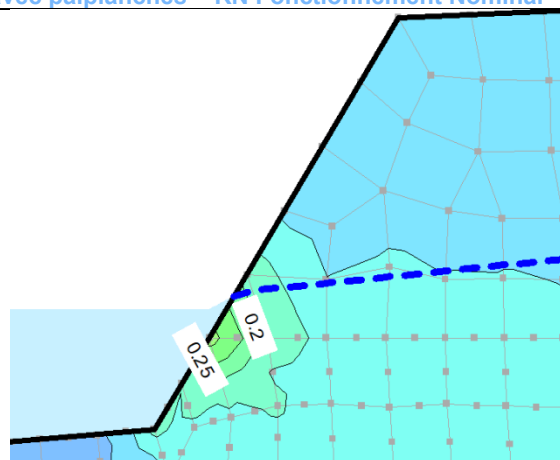


Figure 87 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 sans palplanches – RN Fonctionnement Nominal

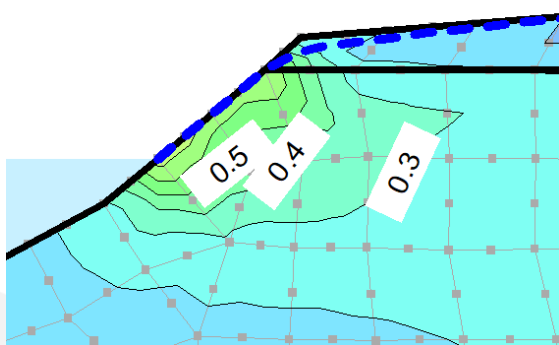


Figure 88 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 sans palplanches – RN Essai

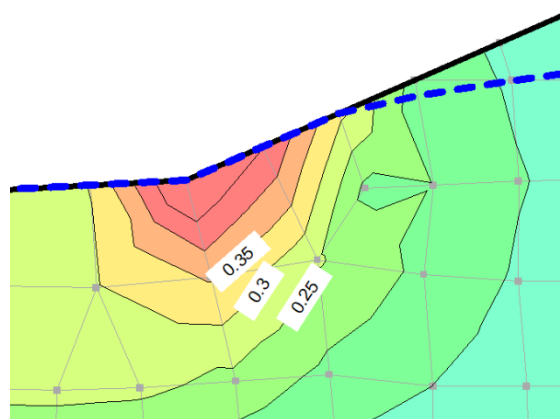


Figure 89 : Gradient hydraulique en aval pour le Profil 5 avec passe graveleuse – RN

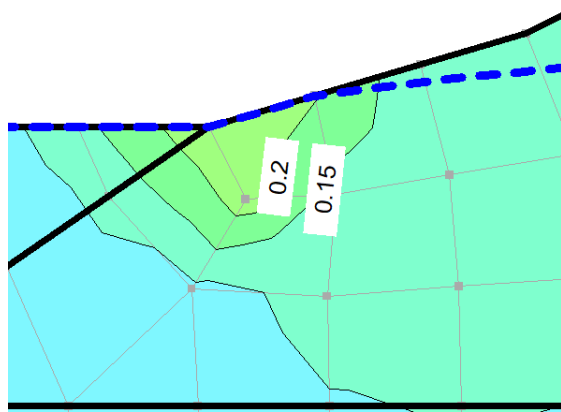


Figure 90 : Gradient hydraulique dans la recharge pour le Profil 5 sans passe graveleuse – RN

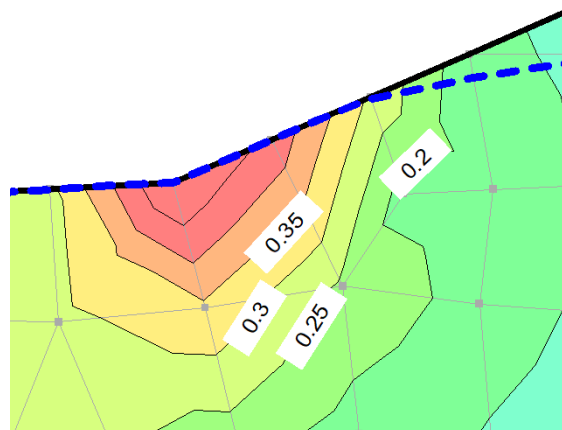


Figure 91 : Gradient hydraulique en aval pour le Profil 5 sans passe graveleuse – RN

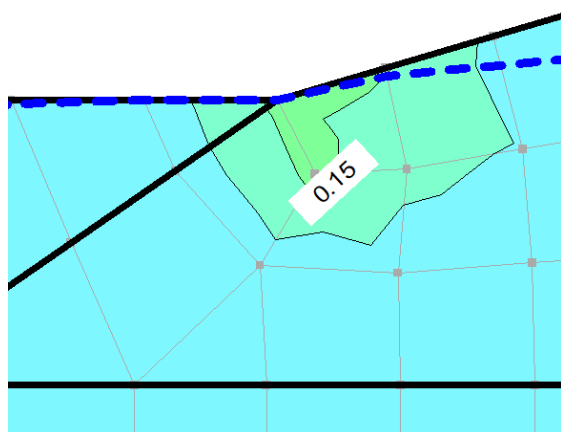


Figure 92 : Gradient hydraulique dans la recharge pour le Profil 5 sans passe graveleuse – RN

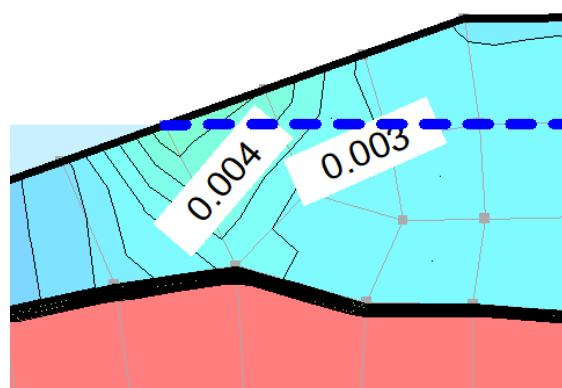


Figure 93 : Gradient hydraulique pour le Profil 6 avec palplanches – RN Fonctionnement Nominal

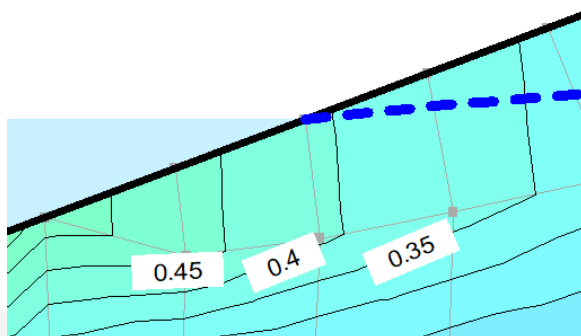


Figure 94 : Gradient hydraulique pour le Profil 6 avec palplanches – RN Essai

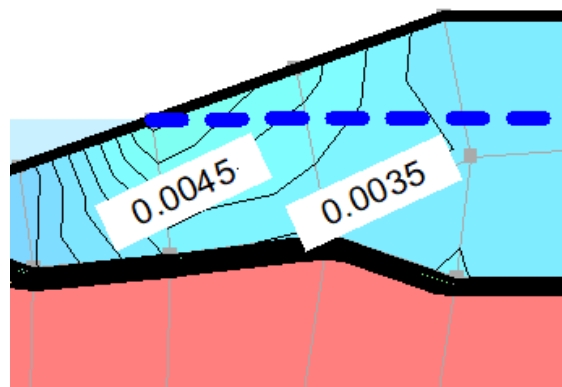


Figure 95 : Gradient hydraulique pour le Profil 4 sans palplanches – RN Fonctionnement Nominal

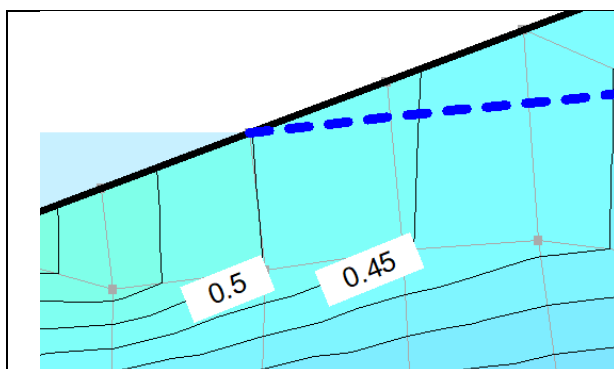


Figure 96 : Gradient hydraulique pour le Profil 6 sans palplanches – RN Essai



Ce qu'il faut retenir...

Les gradients évalués par SEEP sont inférieurs au gradient critique pour le profil 4 avec palplanches (et sous les deux conditions analysés), ainsi que pour le profil 6 avec et sans palplanches mais seulement sous le fonctionnement nominal du Polder.

Pour tous les autres cas, les gradients évalués par SEEP sont supérieurs au gradient critique et sont suffisants pour entraîner un phénomène d'érosion régressive local. Ceci corrobore les désordres observés lors de l'exercice de 2025.

L'analyse de sensibilité sur le niveau aval (conditions de fonctionnement nominale ou d'essai) pour les profils 1, 2, 4 sans palplanches et 6 montre que les conditions d'essai du Polder sont pénalisantes pour les gradients calculés par rapport à ceux du fonctionnement nominal de l'ouvrage. En effet, un niveau aval élevé limite les gradients.

6.5 Erosion de conduit

L'érosion de conduit est possible, si l'un des critères suivants de fissuration, claquage hydraulique, conduit d'érosion ou cavité est observée sur l'ouvrage :

Situations d'érosion de conduit	Critères
1. Tassement différentiel rive à rive du remblai	Le remblai n'affiche pas de tassements différentiels sur le remblai.
2. Effet voûte rive à rive dans le remblai	L'absence de données de construction ne permet pas d'écarter ce phénomène. Toutefois, l'âge de l'ouvrage limite son établissement à l'avenir.
3. Tassement différentiel de la fondation	Le remblai n'affiche pas de tassements différentiels sur le remblai.
4. Irrégularités du contact barrage-fondation	Le contact entre la fondation et le barrage présente de potentiel érosif, notamment au droit des profils 2, 3 et 4.
5. Report de charge	Sans objet
6. Contact avec les ouvrages traversant	L'ouvrage est traversé par les OH5, OH3 et OH2 mais elles ne semblent pas influencer la zone.
7. Remblai en argile peu compactée en mottes	Le remblai est constitué par des limons sablo-graveleux.

8. Remblai en graves limoneuses suffusives	La fondation est suffusive sauf pour le profil 3 (cf. suffusion interne) mais le critère hydraulique n'est pas atteint.
9. Dessiccation	Le noyau, les alluvions limoneuses (profil 4) et la couche limoneuse (profil 6) ne semblent pas être sensibles à la dessiccation, selon les teneurs en eau mesurés.
10. Couche limoneuse gelée et lessivée au dégel	Sans objet
11. Terriers d'animaux	L'inspection visuelle en a observé mais ils sont traités par l'exploitant.
12. Végétation	Il n'y a pas de présence de végétation arbustive dans le talus de l'ouvrage sur la zone.*

*A noter la présence d'une zone boisée à environ 1m du pied de la risberme de la digue ouest entre l'OH5 et le virage de la digue nord (profil 3)

*Par ailleurs, au début de la digue nord, la berge de la Moder est située au droit du pied de la risberme, avec la présence de plusieurs arbres de diamètre important (profil 4). Sur le reste du linéaire, une zone plus ou moins boisée est située à environ 1 m du pied de la risberme (profil 5 et 6).

6.6 Récapitulatif

L'analyse de l'érosion interne affiche les résultats ci-après. L'analyse met surtout en avant un risque d'érosion régressive en pied aval selon les gradients. Ce point peut être amélioré soit pas l'ajout d'une barrière filtrante sur le cheminement hydraulique, soit par une amélioration de l'étanchéité en fondation (baisse de la piézométrie interne, réduction du gradient en sortie).

	Suffusion interne	Suffusion de contact	Erosion régressive
Profil 1	- Le critère géométrique est atteint sur les matériaux de la recharge (sables-graveleux) et de la fondation (alluvions). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion interne n'est pas atteint.	- Absence d'interfaces marquées.	- Les gradients pour les deux situations sont supérieurs au gradient critique. - Les conditions d'essai sont pénalisantes pour les gradients calculés.
Profil 2	- Le critère géométrique est atteint sur les matériaux de la recharge (sables-graveleux) et de la fondation (alluvions). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion interne n'est pas atteint.	- Les règles de filtre ne sont pas respectés entre le noyau (A1/F1) et la fondation (D2/G1). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion de contact n'est pas atteint.	- Les gradients pour les deux situations sont supérieurs au gradient critique. - Les conditions d'essai sont pénalisantes pour les gradients calculés.
Profil 3	- Le critère géométrique n'est pas atteint (sols pas sensibles à l'instabilité granulométrique). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion interne n'est pas atteint.	- Les règles de filtre ne sont pas respectés entre le noyau (A1/F1) et la fondation (D2/G1). - La règle de filtre de Sherard n'est pas respecté entre la fondation (D2/G1) et la recharge/alluvions fines (B5/I1). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion de contact n'est pas atteint.	- Les gradients sont supérieurs au gradient critique.
Profil 4	- Le critère géométrique est atteint sur les matériaux de la recharge (sables-graveleux) et de la fondation (alluvions). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion interne n'est pas atteint.	- Les règles de filtre ne sont pas respectés entre le noyau (A1/F1) et la fondation (D2/G1). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion de contact n'est pas atteint.	- Seulement les gradients sous les <u>conditions de fonctionnement nominal</u> du profil avec palplanches sont inférieurs au gradient critique. - Les <u>conditions d'essai</u> sont pénalisantes pour les gradients calculés, notamment pour le profil sans palplanches.
Profil 5	- Le critère géométrique est atteint sur les matériaux de la recharge (sables-graveleux) et de la fondation (alluvions). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion interne n'est pas atteint.	- Les règles de filtre ne sont pas respectés entre le noyau (A1/F1) et la passe graveleuse (D2/G1). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion de contact n'est pas atteint.	- Les gradients sont supérieurs au gradient critique. - La passe graveleuse n'a pas d'influence sur les gradients calculés.
Profil 6	- Le critère géométrique est atteint sur les matériaux de la recharge (sables-graveleux) et de la fondation (alluvions). - Le critère hydraulique n'est pas atteint. - L'initiation de suffusion interne n'est pas atteint.	- Les règles de filtre sont respectés pour les échantillons analysés. - L'initiation de suffusion de contact n'est pas atteint.	- Les gradients sous les <u>conditions d'essai</u> du profil avec et sans palplanches sont supérieurs au gradient critique. - Les gradients sous les <u>conditions de fonctionnement nominal</u> calculés pour le profil avec et sans palplanches sont supérieurs au gradient critique. - Les palplanches diminuent les gradients seulement sous les conditions de fonctionnement nominale.

7. PROGRAMME DE TRAVAUX

A l'issue des résultats de l'érosion interne, il apparaît plusieurs zones à conforter sur le Polder de la Moder. Les confortements sont proposés en considérant que les zones sont plus au moins homogènes vis-à-vis des désordres repérés, la topographie (configuration de la digue), la géotechnique de l'ouvrage et les confortements proposés.

7.1 Profil 1 et 2 (Désordres 1 à 8)

Ces confortements sont proposés pour le linéaire entre les PK 29,100 et 29,900, soit entre la Route des Ruses et l'OH5. Ceci comprend les 72m du rideau de palplanches (Zone A) ainsi que les désordres 1 à 8 (fuites).



Figure 97 : Travaux pour les profils 1 et 2

Cette zone se caractérise par l'absence de noyau (notamment au droit du rideau de palplanches) voir une arase supérieure très basse (sondages au droit des désordres). Par ailleurs, la particularité de cette zone est la présence du canal de drainage en pied de la risberme aval.

La première partie de confortements sur l'ensemble de cette zone consiste à réaliser une recharge sur le talus du canal de dérivation afin de diminuer les gradients en pied aval, ainsi que pour mettre en œuvre une barrière filtrante (géotextile). En effet, les gradients sous conditions d'essai diminuent de 0,35/0,40 à 0,25.

Une purge de sables et graviers est réalisée jusqu'au sous le niveau d'eau courant du canal de dérivation afin de reprofiler le talus avec une pente de 2H/1V. La largeur de la risberme est peu affectée car le talutage est proche de l'actuel. Au niveau de l'eau, une bêche est réalisée afin de bloquer les enrochements.

La pose d'un géotextile filtrant avec ancrage dans les bèches en tête et en pied (recouvrement des lacs de 50 cm). Le géotextile est prolongé sous la bêche de pied pour filtrer sous les enrochements posés sur talus existant sous eau

Le matériau à mettre en œuvre est un enrochement de granulométrie 90-250mm (au stade DIAG) sur une épaisseur de 50 cm.

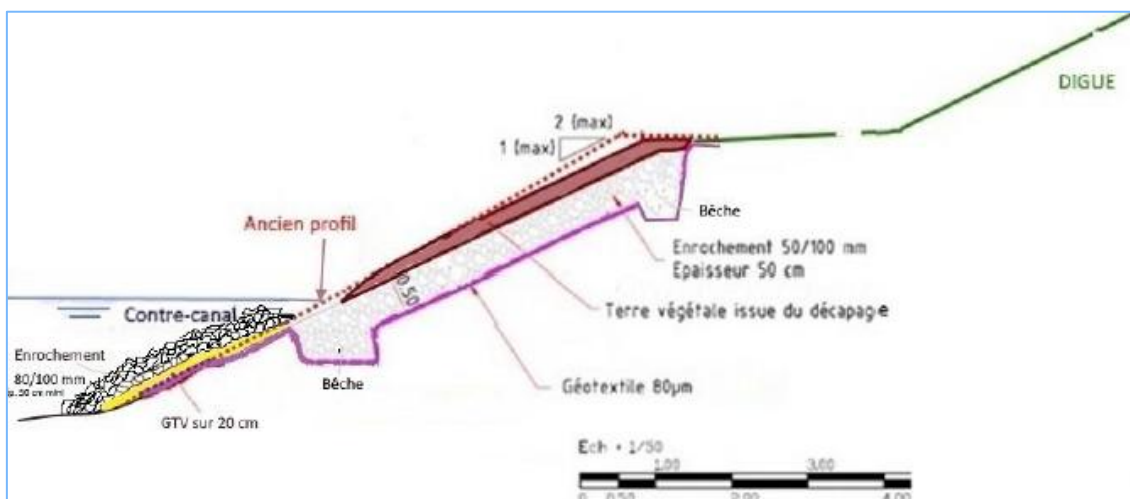


Figure 98 : Coupe type de la recharge sur le talus du canal de drainage



Figure 99 : Réalisation de la recharge filtrante sur le canal de drainage - Bief de Gambenheim 2022 (SAFEGE)

Cette recharge du talus est complétée par la prolongation et la rehausse du rideau existant à partir du PK 25,600 jusqu'au 25,900. Ceci est réalisé afin de limiter les vitesses d'écoulement à travers et sous l'ouvrage.

Les travaux sur le rideau existant consistent à la mise en œuvre d'une longrine en béton afin de rehausser l'arase à la cote 119,27 m NGF / 118,70 m NN, soit une marge de 25 cm par rapport à la RN du Polder (119,02 m NGF / 118,45 m NN). Les dimensions de la longrine sont 90x50cm (HxL) dont 20cm de recouvrement sur les palplanches. Une fouille à la pelle doit être réalisée avant les travaux afin de vérifier l'arase réelle du rideau.

Au-delà de cette zone, un rideau de palplanches est mis en œuvre en crête amont sur un linéaire de 350m. Les palplanches sont de type PU12 (même type du rideau existant) et 7m de long.

L'arase est à la cote 119,27 m NGF / 118,70 m NN (même cote de la rehausse par la longrine).
Le raccordement avec le rideau existant est réalisé par l'enclenchement à la dernière palplanche.

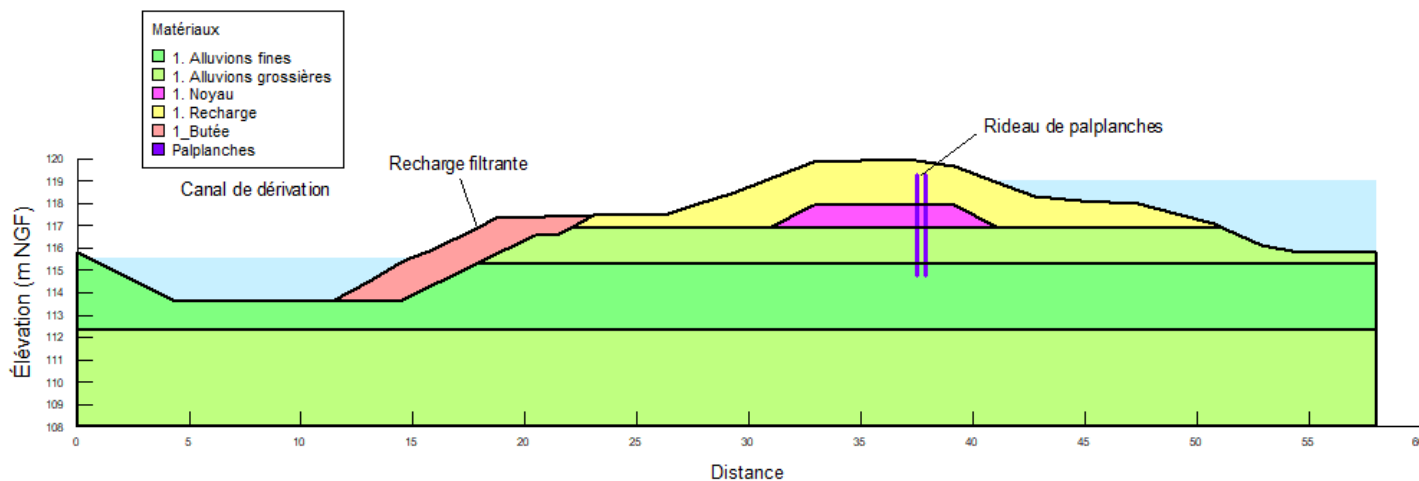


Figure 100 : Coupe type du confortement - Profil 2

Cette solution est estimée à 2 150 k€ HT au stade DIAG, avec un délai de réalisation estimée à 6 mois.

7.2 Profil 3 (Désordres 9 à 16)

Ces confortements sont proposés pour le linéaire compris entre les PK 29,900 et 30,700, soit entre l'OH5 et le virage vers la digue nord. Cela comprend les désordres 9 à 16 (sand-boils). La particularité de cette zone est l'éloignement du canal de dérivation du pied de la risberme, où une zone boisée est désormais localisée.

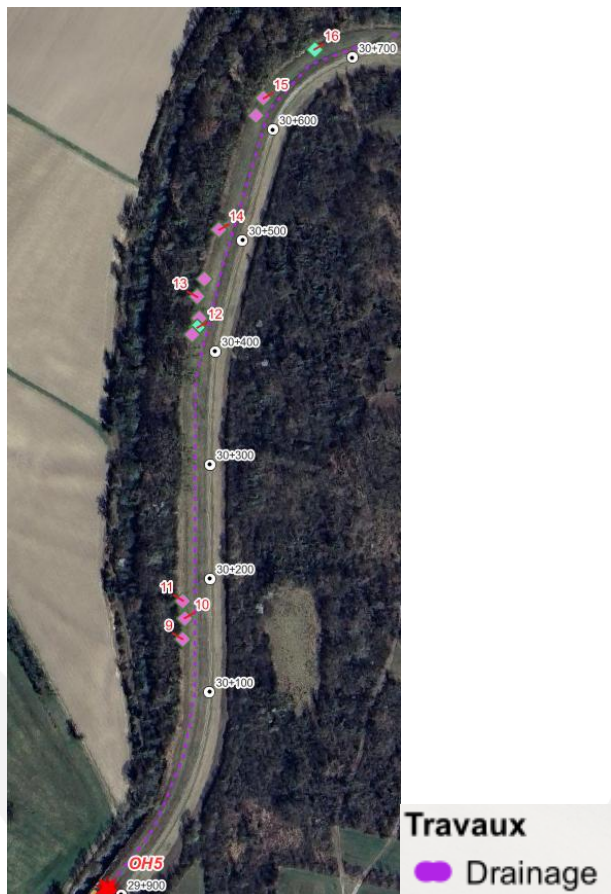


Figure 101 : Travaux pour le profil 3

Le confortement sur cette zone consiste à mettre en œuvre un drain dans la risberme aval pour capter et filtrer efficacement les écoulements à travers et sous le remblai, dont les résurgences sont observées sous forme de sand-boils dans la zone boisée en aval. En effet, cette solution permet de diminuer les gradients de 0,30 à 0,002 au-delà de la risberme aval.

Le principe est le suivant :

- Terrassement depuis le pied de la digue jusqu'à la cote 115,40 m NGF / 114,83 m NN, soit environ 50 cm au-dessous du TN aval (zone boisée) ;
- Pose d'un drain en fond fouille ;
- Création d'une recharge drainante avec les matériaux sur place (à priori de sables et graves) ;
- Pose d'un géotextile filtrant dans l'excavation. Un recouvrement du géotextile existant (travaux 1993) doit être réalisé afin de garantir la continuité de la filtration ;
- Création de l'exutoire vers la Moder ou la zone boisée.

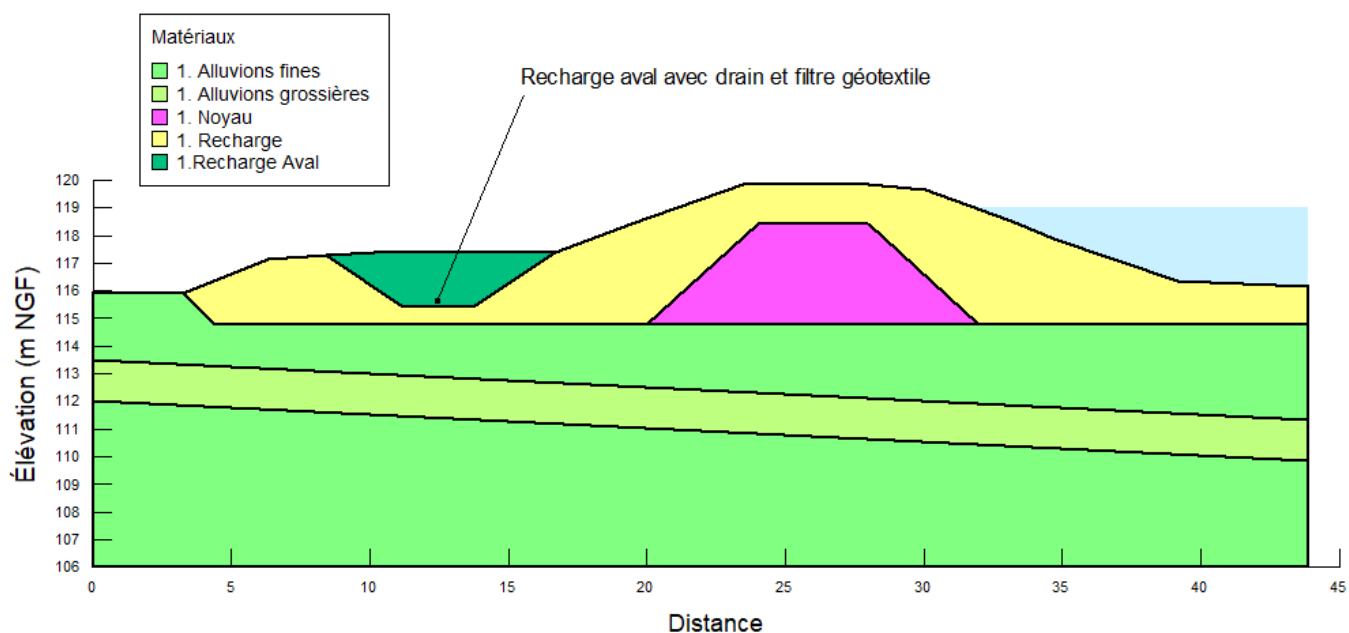


Figure 102 : Coupe type du confortement - Profil 3



Figure 103 : Réfection du drain de pied du bief d'Iffezheim en 2013 (SAFEGE)

Cette solution est estimée à 480 k€ HT au stade DIAG, avec un délai de réalisation estimée à 4 mois.

7.3 Profil 4 (Désordres 17 à 19)

Ces confortements sont proposés pour le linéaire compris entre les PK 30,700 et 31,200, soit entre le virage vers la digue nord et l'OH 3. Cela comprend les désordres 17 à 19. La particularité de cette zone est la proximité de la Moder avec la digue.

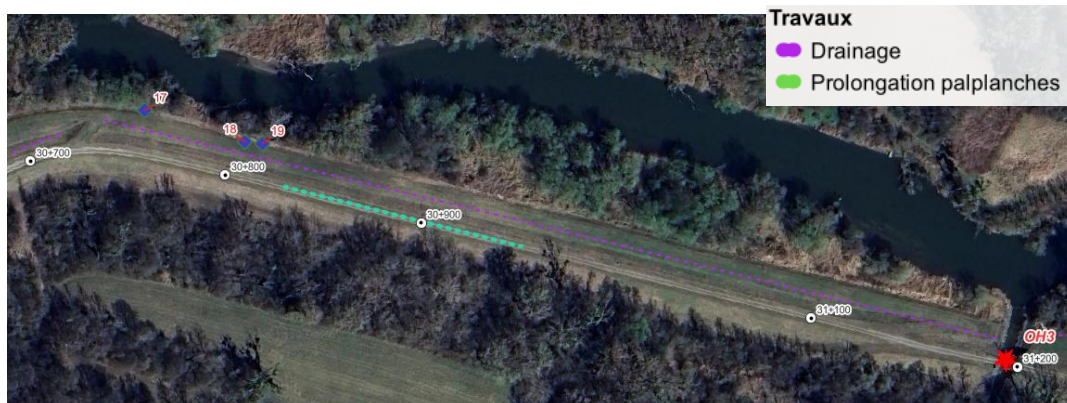


Figure 104 : Travaux pour le profil 4

Le confortement sur cette zone consiste à rehausser le rideau existant et de le prolonger vers l'aval pour éviter le contournement des écoulements.

Les travaux sur le rideau existant consistent à la mise en œuvre d'une longrine en béton afin de rehausser l'arase à la cote 119,27 m NGF / 118,70 m NN, soit une marge de 25 cm par rapport à la RN du Polder (119,02 m NGF / 118,45 m NN). Les dimensions de la longrine sont 120x50cm (HxL) dont 20cm de recouvrement sur les palplanches. Une fouille à la pelle doit être réalisée avant les travaux afin de vérifier l'arase réelle du rideau.

Entre les PK 30,820 et 30,950 un rideau de palplanches est mis en œuvre en talus amont, dans le même axe de celui existant. Les palplanches sont de type PU12 (même type du rideau existant) et 9m de long. L'arase est à la cote 119,27 m NGF / 118,70 m NN (même cote de la rehausse par la longrine). Le raccordement avec le rideau existant est réalisé par l'enclanchement à la dernière palplanche.



Figure 105 : Réalisation d'une paroi étanche en palplanches - Bief de Gamsheim 2023 (SAFEGE)

Par ailleurs, un drainage en pied est mis en place pour l'auscultation de l'ouvrage. Cependant, il sera seulement actif pendant le fonctionnement nominal du Polder. La réalisation du drain pour l'auscultation en situation d'essai implique une excavation trop profonde, avec un risque d'atteindre la nappe (pose non réalisable).

Le principe est le suivant :

- Terrassement depuis le pied de la digue jusqu'à la cote 114,70 m NGF / 114,73 m NN ;
- Pose d'un drain en fond fouille ;
- Création d'une recharge drainante avec les matériaux du site (à priori de sables et graves) ;
- Pose d'un géotextile filtrant dans l'excavation. Un recouvrement du géotextile existant (travaux 1993) doit être réalisé afin de garantir la continuité de la filtration ;
- Création de l'exutoire vers la berge de la Moder.

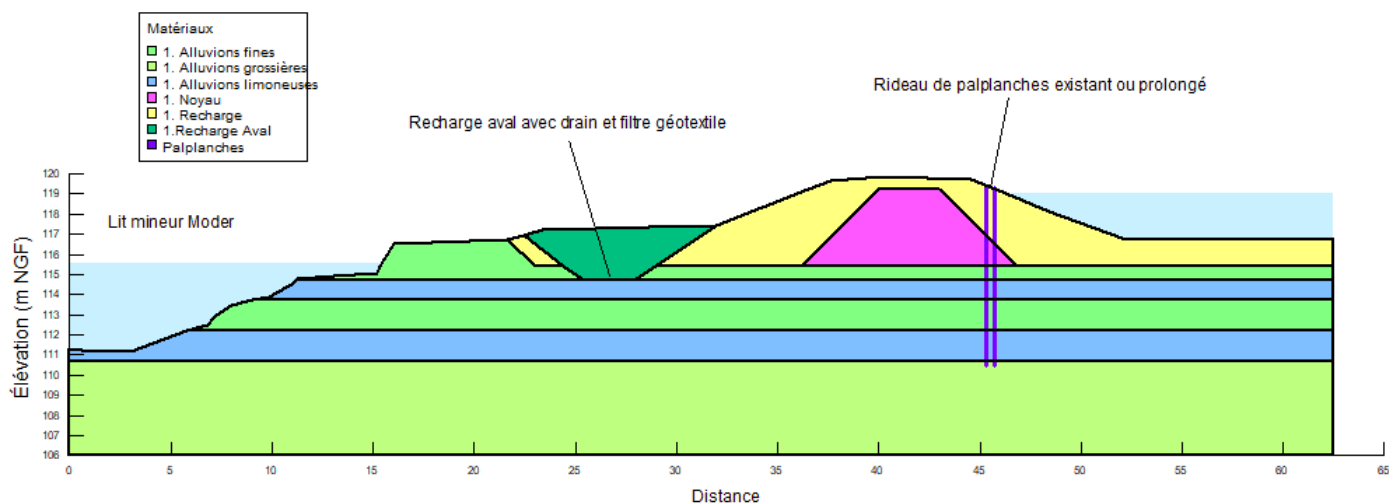


Figure 106 : Coupe type du confortement - Profil 4

Cette solution est estimée à 790 k€ HT au stade DIAG, avec un délai de réalisation estimée à 4 mois.

7.4 Profil 5 (Désordres 20 à 23)

Ces confortements sont proposés pour le linéaire compris entre les PK 31,200 et 31,450, soit entre les OH3 et OH2. Cela comprend les désordres 20 à 23 (sand-boils).



Figure 107 : Travaux pour le profil 5

Le confortement sur cette zone consiste à mettre en œuvre un drain en pied de talus pour capter et filtrer efficacement les écoulements à travers et sous le remblai, dont les résurgences sont observées sous forme de sand-boils entre la berge de la Moder et le pied de la risberme. En effet, cette solution permet de diminuer les gradients de 0,35 à 0,20.

Le principe est le suivant :

- Terrassement depuis le pied de la digue jusqu'à la cote 114,50 m NGF / 113,93 m NN, soit environ la même altitude que le TN en aval ;
- Pose d'un drain en fond fouille ;
- Création d'une recharge drainante avec les matériaux du site (à priori de sables et graves) ;
- Pose d'un géotextile filtrant dans l'excavation. Un recouvrement du géotextile existant (travaux 1993) doit être réalisé afin de garantir la continuité de la filtration ;
- Deux exutoires sont mis en place dans les berges des chenaux des OH3 et OH2.

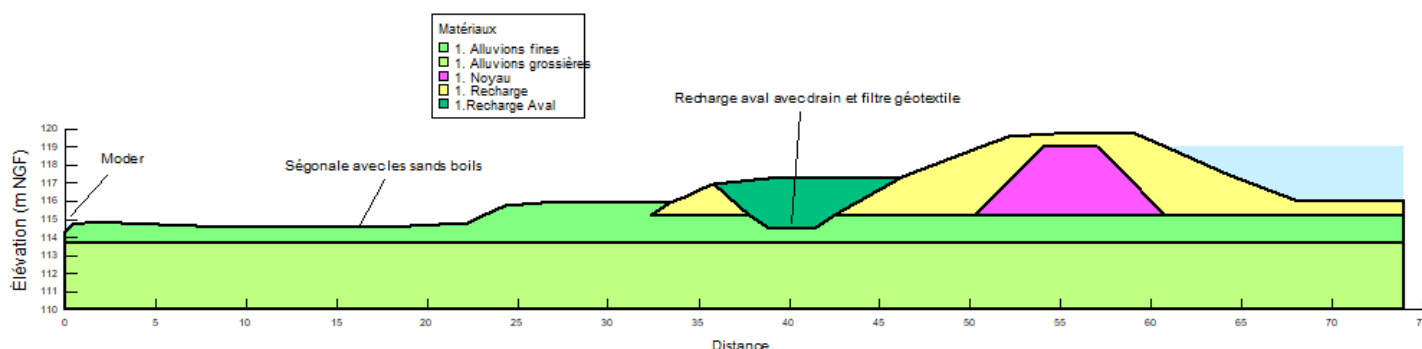


Figure 108 : Coupe type du confortement - Profil 5

Cette solution est estimée à 250 k€ HT au stade DIAG, avec un délai de réalisation estimée à 2 mois.

7.5 Profil 6 (Désordres 24 à 26)

Ces confortements sont proposés pour le linéaire compris entre les PK 31,400 et 32,200, soit entre l'OH2 et la fin de la digue nord. Cela comprend les désordres 24 à 26 (sand-boils) et notamment la zone de l'ancienne gravière (coté Polder).

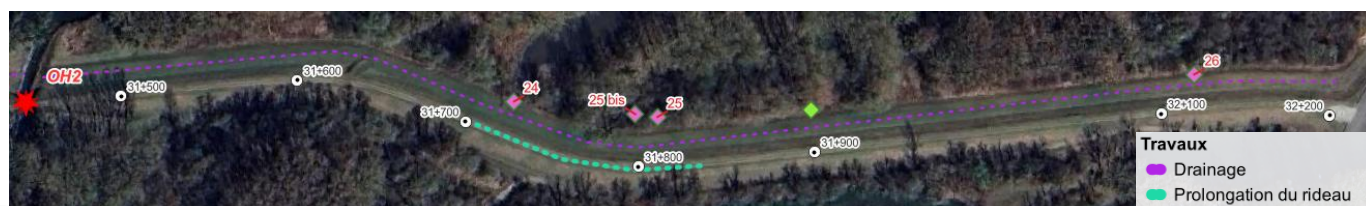


Figure 109 : Travaux pour le profil 6

Le confortement sur cette zone consiste à rehausser le rideau existant et le prolonger vers l'amont pour éviter le contournement des écoulements entre l'ancienne gravière et l'annexe hydraulique coté Moder.

Les travaux sur le rideau existant consistent à la mise en œuvre d'une longrine en béton afin de rehausser l'arase à la cote 119,27 m NGF / 118,70 m NN, soit une marge de 25 cm par rapport à la RN du Polder (119,02 m NGF / 118,45 m NN). Les dimensions de la longrine sont 170x50cm (HxL) dont 20cm de recouvrement sur les palplanches. Cette longrine dépasse environ 10cm le talus. Une fouille à la pelle doit être réalisée avant les travaux afin de vérifier l'arase réelle du rideau.

Entre les PK 31,700 et 31,850 un rideau de palplanches est mis en œuvre dans le talus amont, dans le même axe de celui existant (impossible de déplacer l'axe car la boucle électrique est en

crête amont). Les palplanches sont de type PU12 (même type du rideau existant) et 10m de long. L'arase est à la cote 119,27 m NGF / 118,70 m NN (même cote de la rehausse par la longrine). Le raccordement avec le rideau existant est réalisé par l'enclanchement à la dernière palplanche.

Par ailleurs, un drainage sous la risberme est mis en place le long du linéaire afin de capter et filtrer efficacement les écoulements à travers et sous le remblai. Cette solution (complémenté par le rideau de palplanches) permet de diminuer les gradients de 0,50 à 0,10.

Le principe est le suivant :

- Terrassement depuis le pied de la digue jusqu'à la cote 114,50 m NGF / 113,93 m NN ;
- Pose d'un drain en fond fouille ;
- Création d'une recharge drainante avec les matériaux sur place (à priori de sables et graves) ;
- Pose d'un géotextile filtrant dans l'excavation. Un recouvrement du géotextile existant (travaux 1993) doit être réalisé afin de garantir la continuité de la barrière ;
- Un exutoire est mis en place vers l'annexe hydraulique ou la zone boisée en aval.

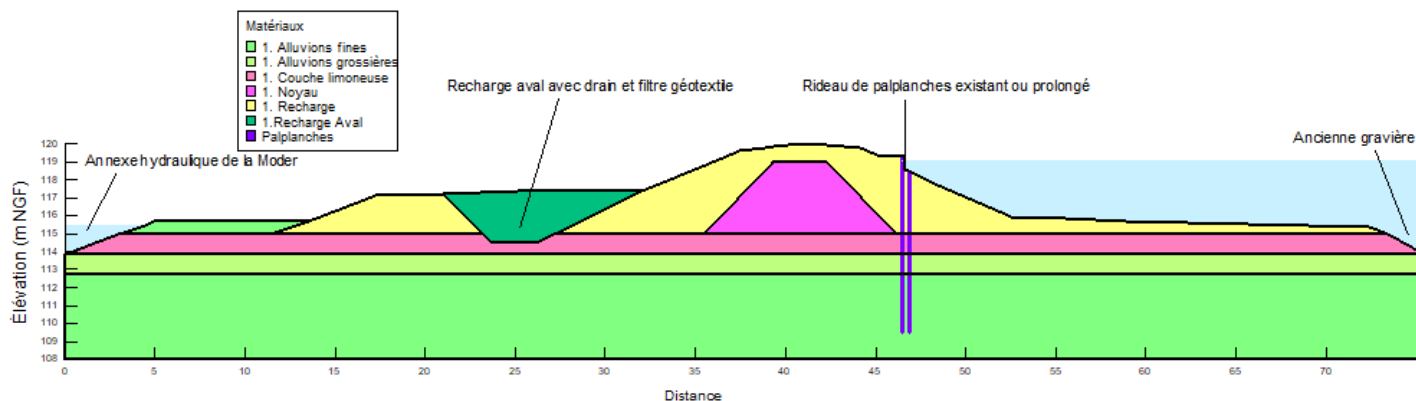


Figure 110 : Coupe type du confortement - Profil 6

Cette solution est estimée à 1 170 k€ HT au stade DIAG, avec un délai de réalisation estimée à 5 mois.

7.6 Dispositif d'auscultation

Le Polder est équipé d'instrumentation, surtout de niveau d'eau au droit des différents OH (échelle ou sonde). Des piézomètres existent au loin pour le suivi de la nappe lors de mise en eau, mais ils ne sont pas adaptés à l'auscultation de la digue ceinture à l'Ouest et au Nord. La prise d'eau par siphon est équipée de piézomètres intégrés dans le cadre du dispositif du barrage latéral du bief d'Iffezheim.

Sur la base du diagnostic, nous proposons de mettre en place les instruments suivants sur l'ouvrage :

- Comportement mécanique : Des repères de nivellement en crête tous les 100 m apparaissent suffisants, surtout avec l'âge de la structure et sa hauteur. Le réseau pourrait être relevé tous les 2 à 3 ans (2 mesures pour chaque rapport d'auscultation) et après chaque mise en eau (exercice ou rétention en crues).
- Comportement hydraulique :
 - Niveau d'eau : la VTA 2025 met en avant le non-fonctionnement des sondes de niveau d'eau (type radar) amont et aval au niveau des OH1-2-3-4. Ils convient de les remettre service, accompagnés d'échelle à lecture directe pour assurer une redondance. Les échelles coté aval des OH2 et 3 sont en rive opposée de la Moder, ce qui est difficile pour la lecture (distance) et pour leur entretien.

- Débit de drainage : la mise en place de drain avec des exutoires du PK 29.900 à 32.200 permet aussi d'installer des bacs de mesure (seuil en V et échelle manuelle). Il n'est pas recommandé la mise en place de sonde en raison de la faible fréquence de sollicitation du Polder (3 ou 4 exercices de remplissage en 35 ans, pas de crue avec remplissage). De plus, selon la configuration du seuil, il est possible que ce dernier soit ennoyé ou sous eau par le remous aval de la Moder lors des rétentions de crue nominales.
- Piézométrie : 1 réseau de piézomètres est à mettre en place pour vérifier la ligne de saturation dans le remblai lors des mises en eau. 1 profil, avec un instrument en crête aval (crépine en fondation) et un second en risberme aval (crépine en fondation), apparaît adapté à l'ouvrage zoné. La faible sollicitation du Polder ne pousse pas non plus à l'équipement de sondes, mais à la réalisation de mesures manuelles (1 fois par jour en essai ou rétention de crue, +1 mesure annuelle pour contrôle de l'état). A ce stade, nous recommandons d'équiper les implantations suivantes : PK 29.600, 30.200, 30.500, 30.750, 31.350, 31.750 et 32.100.

La mise en place du dispositif (piézomètres et repères de nivellement) est évaluée à 75 k€ HT avec :

- Les repères topographiques à hauteur de 7 k€ HT.
- Les sondes de niveaux d'eau (8 éléments, 2 par OH1-2-3-4) pèsent environ 20 k€ HT, sans tenir compte des besoins de renouvellement sur la transmission (par câble coaxiale de la boucle électrique) et la supervision (automate de télégestion, vue de supervision).
- Les 2 échelles à ajouter en aval des OH2 et 3 sont évalués à 5 k€ HT.
- Les seuils de mesure sont intégrés dans les travaux de réalisation du drain de pied.
- Les 7 profils de piézomètres sont évalués à 43 k€ HT.

7.7 Calendrier prévisionnel global de travaux

Si les travaux sont réalisés en un ensemble, il est possible d'optimiser les délais de réalisation. Le cumul ci-avant des délais par profil est de 19 mois soit plus de 1.5 an ou 2 saisons de travaux. Il apparaît raisonnable d'envisager l'ensemble des travaux sur une période de 8 mois, soit une saison favorable pour les travaux (mars à novembre), sans tenir compte à ce stade des périodes critiques avec le contexte environnemental du site (Natura 2000, APB). Pour tenir ce délai, il apparaît nécessaire de cumuler les ateliers suivants de réalisation :

- 2 ateliers pour la réalisation de la recharge sur le talus du canal de dérivation (800 ml) ;
- 2 ateliers pour la pose du drain de pied en risberme aval (2300 ml) ;
- 1 à 2 ateliers pour la mise en œuvre des rideaux de palplanches (630 ml) et des poutres de couronnement (340 ml).

7.8 Estimation financière

Au stade DIAG, l'estimation financière pour chaque profil est la suivante :

Tableau 45 : Bilan d'estimation financière

Profil	Montant (en € HT)
Profil 1-2	2 150 k€
Profil 3	480 k€
Profil 4	790 k€
Profil 5	250 k€
Profil 6	1 170 k€
Auscultation	75 k€
<u>Total</u>	<u>4 915 k€</u>

L'estimation tient compte de 20% de non métrés et d'aléas.

8. SYNTHÈSE ET SUITES A DONNER

Le Polder de la Moder a vu apparaître de nombreux désordres, essentiellement d'érosion interne (fuites avec et sans transport de matériaux, tumulus de sable, glissement de berge), lors de l'essai de rétention de crue de janvier 2025. Après vidange contrôlée et l'inspection visuelle de SAFEGE, VNF a fait le choix de retirer du service l'ouvrage le temps de faire un diagnostic approfondi de la digue ceinture.

Le présent diagnostic a donc été mené pour savoir si l'ouvrage pouvait reprendre son service normal ou de modifier les conditions des essais de rétentions crues (2016 puis 2025).

Après réalisation des reconnaissances complémentaires (topographie, géophysique systématique et géotechnique ciblée), l'analyse de la structure de la digue ceinture met en avant :

- La stabilité mécanique du remblai respecte les critères de la réglementation en vigueur.
- L'initiation de l'érosion interne est avérée notamment par érosion régressive en pied aval, en situation d'exercice (comme en janvier 2025) et de mise en service nominale (crue du Rhin supérieure à 4400 m³/s à Maxau). Les autres modes d'érosions ne sont pas critiques pour l'ouvrage (suffusion, érosion de contact, érosion de conduit).

Ainsi, le diagnostic confirme que l'ouvrage ne peut être mis en service pour les rétentions de crue, sans apparitions de nouveaux désordres sur la digue ceinture, et également pour les exercices. A noter, que le niveau d'eau réel en pied aval n'est pas bien identifiée lors des mises en service en période de crue (hypothèse prise en compte par le bureau d'étude). Un niveau d'eau aval plus élevée pourrait limiter les gradients hydrauliques en pied aval et donc limiter le dépassement des critères d'initiation d'érosion régressive.

Pour pallier ces non-conformités, il est proposé de réaliser selon les portions du linéaire l'ajout d'une barrière filtrante en pied aval plus performante (recharge filtrante de berge sur 800ml, drain sous la risberme aval sur 2300 m), accompagnée localement d'une paroi étanche de type palplanches (630 ml). La solution palplanche est privilégiée pour assurer le raccordement des nouvelles parois avec celles existantes (1993). Les parois existantes sont également rehaussées par des longrines en béton armé pour revoir l'arase supérieure de la barrière étanchéité sur 340 ml. **Ce programme de travaux atteint une enveloppe budgétaire de l'ordre de 4.9 M€ HT au stade faisabilité.**

Pour poursuivre la conception des confortements, il sera indispensable de réaliser à minima les reconnaissances suivantes :

- Investigations topographiques :
 - ☐ Levé de la section du canal de dérivation afin d'affiner les quantités de la reprise de la berge ;
 - ☐ Levé de profils en travers de la digue nord entre les OH3 et OH2 (désordres 9 à 16) afin d'affiner le profil en long du drain et des exutoires.
- Réaliser des sondages à la pelle pour retrouver l'arase des différents rideaux de palplanches existant et réaliser un relevé altimétrique.
- Réaliser des investigations géotechniques pour affiner les linéaires à équiper d'écran étanche et pour l'ancrage de la recharge filtrante sous la risberme aval.
- La réalisation d'un inventaire faune-flore apparaît indispensable pour cerner les enjeux environnementaux locaux et par conséquent la démarche réglementaire associée. Les enjeux sont assez élevés avec les zones Natura 2000 et surtout l'Arrêté de protection du biotope englobant l'ensemble de l'ouvrage.

ANNEXE 1

CARTOGRAPHIE DES SONDAGES EXISTANTS

ANNEXE 2

CARTOGRAPHIE DE L'INSPECTION VISUELLE

ANNEXE 3

LEVES TOPOGRAPHIQUES – GEOFIT 2025

ANNEXE 4

BATHYMETRIE DE LA BERGE DE LA MODER – GEOXYZ 2025

ANNEXE 5

RAPPORT G5 – GEOTEC 2026

ANNEXE 6

RAPPORT TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE

ANNEXE 7

ESTIMATION FINANCIERE

Détails des travaux à réaliser					
N°	Désignation	U	Qté	Prix unitaire en € H.T	Montant en € H.T
100	Profil 1 et 2 (Désordres 1 à 8)				
101	Forfaits généraux (études - installation de chantier - ...)	Ft	1	110 000.00	110 000.00 €
110	Travaux canal de dérivation				
111	Déblais grande masse y compris évacuation en décharge agréée	m3	15000	20.00	300 000.00 €
112	Fourniture et mise en œuvre de petits enrochements 90-250 mm	m3	15000	45.00	675 000.00 €
113	Fourniture et mise en œuvre de géotextile filtrant	m2	14000	3.00	42 000.00 €
120	Travaux de palplanches				
102	Réalisation de la longrine 90x50cm (HxL) pour le rideau existant	ml	75	300.00	22 500.00 €
103	Amenée et repli de l'atelier palplanches	Ft	1	16 000.00	16 000.00 €
104	Réalisation de la prétranchée + fermeture après travaux	ml	350	150.00	52 500.00 €
105	Fourniture de palplanches longueur 7 m	T	310	1400.00	434 000.00 €
106	Mise en fiche des profilés	ml	350	300.00	105 000.00 €
107	Fonçage des profilés, y compris surbattage du dernier mètre	m²	2700	10.00	27 000.00 €
108	Recépage des palplanches	ml	350	20.00	7 000.00 €
				Montant total en € H.T	1 791 000.00 €
100. Profil 1 et 2				Montant total +20% en € H.T	2 150 000.00 €

Détails des travaux à réaliser					
N°	Désignation	U	Qté	Prix unitaire en € H.T	Montant en € H.T
200	Profil 3 (Désordres 9 à 16)				
201	Forfaits généraux (études d'exé - installation de chantier - ...)	Ft	1	40 000.00	40 000.00 €
202	Déblais grande masse y compris stockage pour réutilisation	m3	9700	15.00	145 500.00 €
203	Fourniture et mise en œuvre de géotextile filtrant	m2	8500	3.00	25 500.00 €
204	Fourniture et mise en place d'un drain	ml	800	50.00	40 000.00 €
205	Fourniture et mise en œuvre de regard en DN1000	U	10	2000.00	20 000.00 €
206	Mise en œuvre des matériaux issus du déblais	m3	9700	10.00	97 000.00 €
207	Réalisation d'un exutoire y compris bac pour auscultation	U	5	5 000.00	25 000.00 €
				Montant total en € H.T	393 000.00 €
200. Profil 3				Montant total +20% en € H.T	480 000.00 €

Détails des travaux à réaliser					
N°	Désignation	U	Qté	Prix unitaire en € H.T	Montant en € H.T
300	Profil 4 (Désordres 17 à 19)				
301	Forfaits généraux (études d'exé - installation de chantier - ...)	Ft	1	50 000.00	50 000.00 €
310	Travaux de palplanches				
311	Réalisation de la longrine 120x50cm (HxL) pour le rideau existant	ml	75	400.00	30 000.00 €
312	Amenée et repli de l'atelier palplanches	Ft	1	16 000.00	16 000.00 €
313	Réalisation de la prétranchée + fermeture après travaux	ml	130	150.00	19 500.00 €
314	Fourniture de palplanches longueur 9 m	T	150	1400.00	210 000.00 €
315	Mise en fiche des profilés	ml	130	300.00	39 000.00 €
316	Fonçage des profilés, y compris surbattage du dernier mètre	m²	1300	10.00	13 000.00 €
317	Recépage des palplanches	ml	130	20.00	2 600.00 €
320	Travaux du drain				
321	Déblais grande masse y compris stockage pour réutilisation	m3	8500	15.00	127 500.00 €
322	Fourniture et mise en œuvre de géotextile filtrant	m2	5900	3.00	17 700.00 €
323	Fourniture et mise en place d'un drain	ml	480	50.00	24 000.00 €
324	Fourniture et mise en oeuvre de regard en DN1000	U	5	2000.00	10 000.00 €
325	Mise en oeuvre des matériaux issus du déblais	m3	8500	10.00	85 000.00 €
326	Réalisation d'un exutoire y compris bac pour auscultation	U	2	5 000.00	10 000.00 €
				Montant total en € H.T	654 300.00 €
300. Profil 4				Montant total +20% en € H.T	790 000.00 €

Détails des travaux à réaliser					
N°	Désignation	U	Qté	Prix unitaire en € H.T	Montant en € H.T
400	Profil 5 (Désordres 20 à 23)				
401	Forfaits généraux (études d'exé - installation de chantier - ...)	Ft	1	40 000.00	40 000.00 €
402	Déblais grande masse y compris stockage pour réutilisation	m3	5000	15.00	75 000.00 €
403	Fourniture et mise en œuvre de géotextile filtrant	m2	3300	3.00	9 900.00 €
404	Fourniture et mise en place d'un drain	ml	250	50.00	12 500.00 €
405	Fourniture et mise en oeuvre de regard en DN1000	U	5	2000.00	10 000.00 €
406	Mise en oeuvre des matériaux issus du déblais	m3	5000	10.00	50 000.00 €
407	Réalisation d'un exutoire y compris bac pour auscultation	U	2	5 000.00	10 000.00 €
				Montant total en € H.T	207 400.00 €
400. Profil 5				Montant total +20% en € H.T	250 000.00 €

Détails des travaux à réaliser					
N°	Désignation	U	Qté	Prix unitaire en € H.T	Montant en € H.T
500	Profil 6 (Désordres 24 à 26)				
501	Forfaits généraux (études d'exé - installation de chantier - ...)	Ft	1	80 000.00	80 000.00 €
510	Travaux de palplanches				
511	Réalisation de la longrine 170x50cm (HxL) pour le rideau existant	ml	190	400.00	76 000.00 €
512	Amenée et repli de l'atelier palplanches	Ft	1	16 000.00	16 000.00 €
513	Réalisation de la prétranchée + fermeture après travaux	ml	150	150.00	22 500.00 €
514	Fourniture de palplanches longueur 9 m	T	190	1400.00	266 000.00 €
515	Mise en fiche des profilés	ml	150	300.00	45 000.00 €
516	Fonçage des profilés, y compris surbattage du dernier mètre	m²	1500	10.00	15 000.00 €
517	Recépage des palplanches	ml	150	20.00	3 000.00 €
520	Travaux du drain				
521	Déblais grande masse y compris stockage pour réutilisation	m3	13200	15.00	198 000.00 €
522	Fourniture et mise en oeuvre de géotextile filtrant	m2	10800	3.00	32 400.00 €
523	Fourniture et mise en place d'un drain	ml	750	50.00	37 500.00 €
524	Fourniture et mise en oeuvre de regard en DN1000	U	12	2000.00	24 000.00 €
525	Mise en oeuvre des matériaux issus du déblais	m3	13200	10.00	132 000.00 €
526	Réalisation d'un exutoire y compris bac pour auscultation	U	5	5 000.00	25 000.00 €
				Montant total en € H.T	972 400.00 €
500. Profil 6				Montant total +20% en € H.T	1 170 000.00 €

CONSULTING

**SAFEGE SAS Opérant sous la
marque SUEZ Consulting
15, Rue de Copenhague
67300 SCHILTIGHEIM
Tel. : + 33 03 88 20 07 91**

