

FICHE DE COMMUNICATION

RHINAU - PASSE A POISSONS - AVIS SUR L'IMPACT DE L'OUVRAGE VIS-A-VIS DE LA SURETE

Chantier/opération/projet	Référence H-30575707-2021-000127
Date 06/12/2021	Rédacteur Grégory COUBARD

DIFFUSION			
	<i>Pour information : I</i>	<i>Pour action : A</i>	<i>Pour observations : O</i>
Structure / Service	Destinataire		
ML-GC	Jérôme SAMBARINO		
ML-GC	Pierre VENZON		
ML-AMOA	Romain ROUSSELET		
DT-GOS	Nicolas LEBRUN		
DT-GOS	Leslie MARTIN		
DT-GOS	Elsa DUBOIS		
DT-MT	Jean-Robert COURIVAUD		
DT-GOS	Florence RECH		

Objet Avis sur l'impact du projet de passe à poissons à Rhinau sur la sûreté de la digue centrale présente entre le canal de force motrice et le garage aval des écluses

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le projet de passe à poissons sur l'aménagement de Rhinau engendre des modifications au niveau de la digue centrale comprise entre le canal de force motrice et le canal de navigation à l'aval de l'écluse.

La vue en plan ci-dessous permet d'illustrer ces modifications et les différentes parties d'ouvrage projetées :

- A. Prise d'eau pour le débit d'attrait de la passe à poissons
- B. Sortie piscicole
- C. Canal de liaison
- D. Bassins de montaison amont

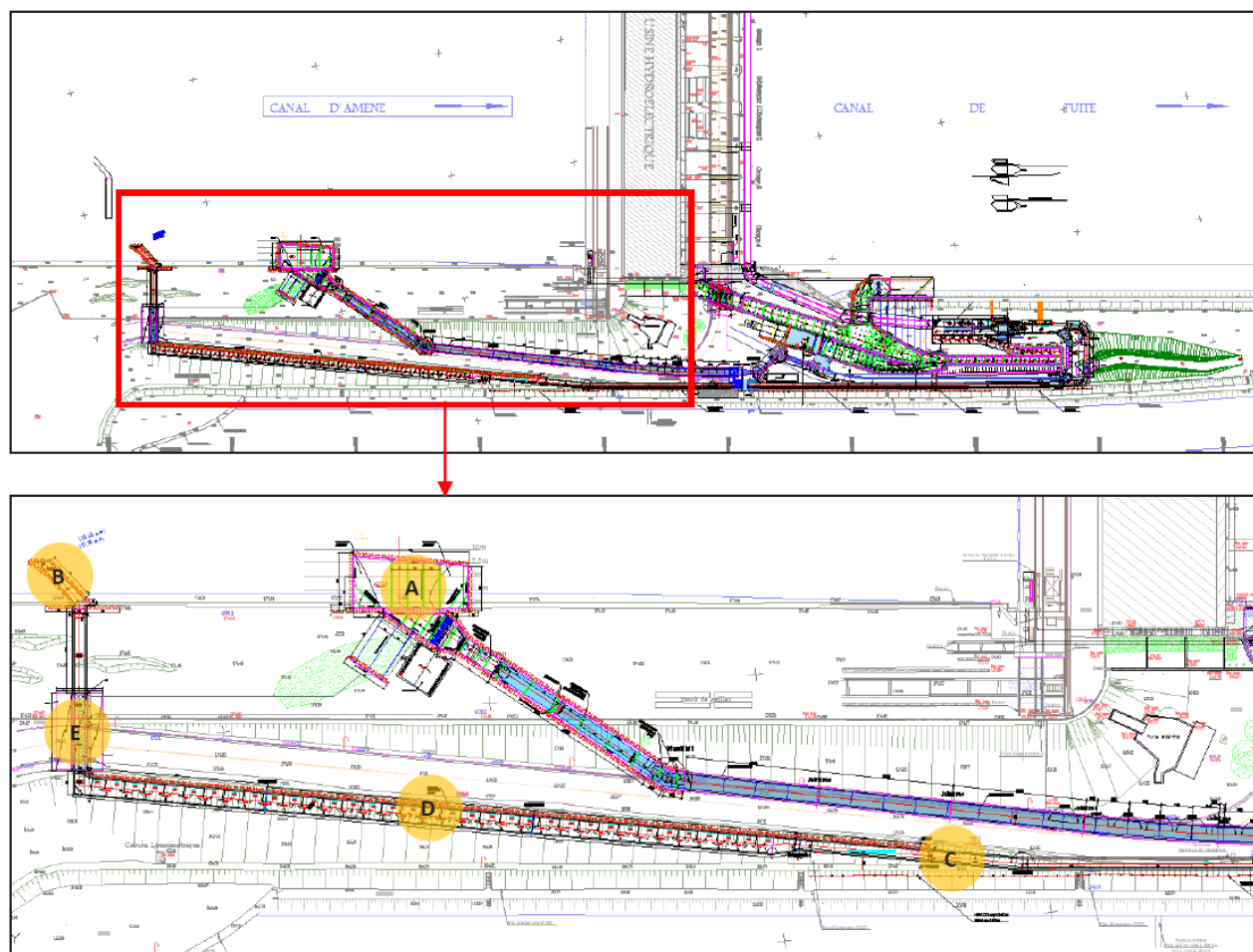


Figure 1 : Vue en plan des ouvrages projetés

Ces ouvrages projetés peuvent avoir un impact sur le niveau de sûreté de la digue centrale.

L'objet du présent document est d'analyser l'incidence de ces nouveaux ouvrages sur la sûreté globale de la digue centrale.

Remarque :

L'analyse menée ici ne porte que sur les modifications apportées par le projet de passe à poissons. Elle ne concerne pas les parties d'ouvrage déjà existantes et non impactées par la passe à poissons. Une analyse de sûreté complète de l'ensemble des ouvrages est programmée et sera réalisée dans le cadre de l'EDD 2024.

2. IDENTIFICATION DE L'IMPACT SURETE DES OUVRAGES PROJETES

Les modes de rupture d'une digue en remblais sont les suivants :

- Cisaillement statique (cercles de glissement au niveau du talus aval et éventuellement amont)
- Cisaillement en situation sismique
- Liquéfaction en situation sismique
- Erosion interne suivant quatre phénomènes :
 - o Suffusion
 - o Erosion de contact
 - o Erosion de conduit ou de fissure
 - o Erosion régressive
- Erosion externe

A l'exception du mécanisme d'érosion externe, tous ces modes sont influencés par le comportement hydraulique au sein de la digue (vitesses d'écoulement et ligne d'eau).

Les impacts potentiels des ouvrages projetés sont les suivants :

Ouvrage projeté	Impact potentiel	Modes de rupture concernés
Prise d'eau Sortie piscicole	Modification significative du comportement hydraulique de la digue	Tous à l'exception de l'érosion externe
Ouvrages traversants	Zones d'écoulement préférentielles le long des ouvrages traversants	Erosion interne de conduit et/ou érosion régressive de conduit
Bassins de montaison amont	Modification de la géométrie du talus aval	Cisaillement statique Cisaillement dynamique
Bassins de montaison amont	Écoulement / lâcher d'eau en cas de rupture	Erosion externe

3. ANALYSES DES IMPACTS IDENTIFIES

3.1 MODIFICATION DU COMPORTEMENT HYDRAULIQUE DE LA DIGUE

La création de nouvelles structures de prise d'eau (pour le débit d'attrait) et de sortie piscicole modifie la géométrie de la digue dans sa partie amont (côté canal de force motrice). Ces ouvrages peuvent donc modifier le comportement hydraulique de la digue en diminuant l'étanchéité amont.

L'étanchéité amont actuelle de la digue est assurée par des dalles en béton de 20 cm d'épaisseur et de fruit 2,5/1 dans le canal de force motrice. Ces dalles s'épaississent et se redressent pour devenir un mur à proximité directe de l'usine de Rhinau. Un effet de colmatage par des matériaux fins peut également exister.

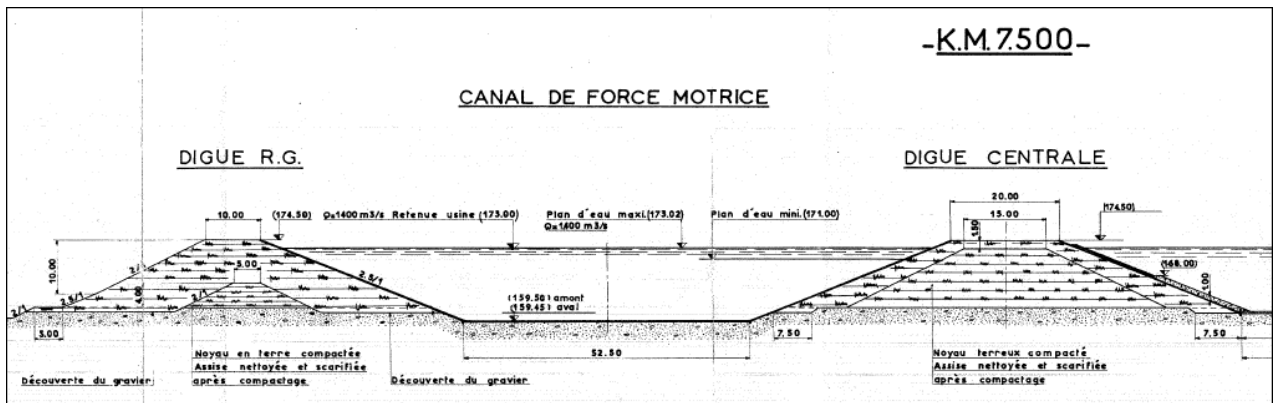


Figure 2 : Géométrie globale des digues du canal de force motrice

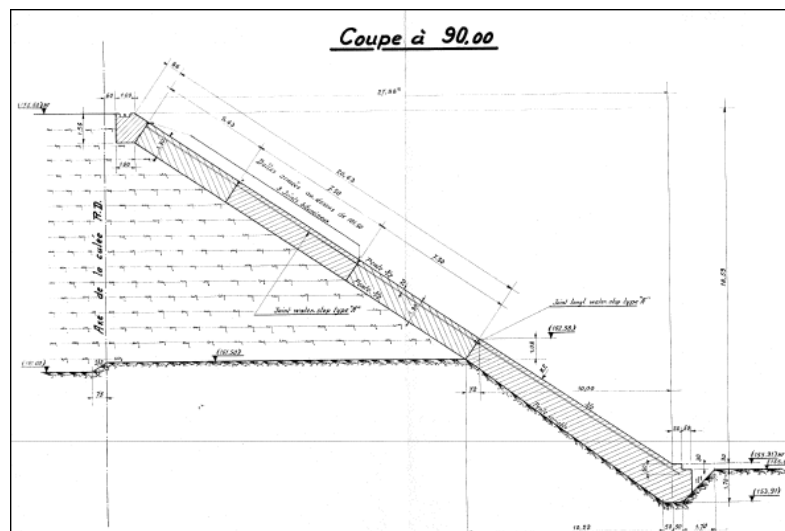
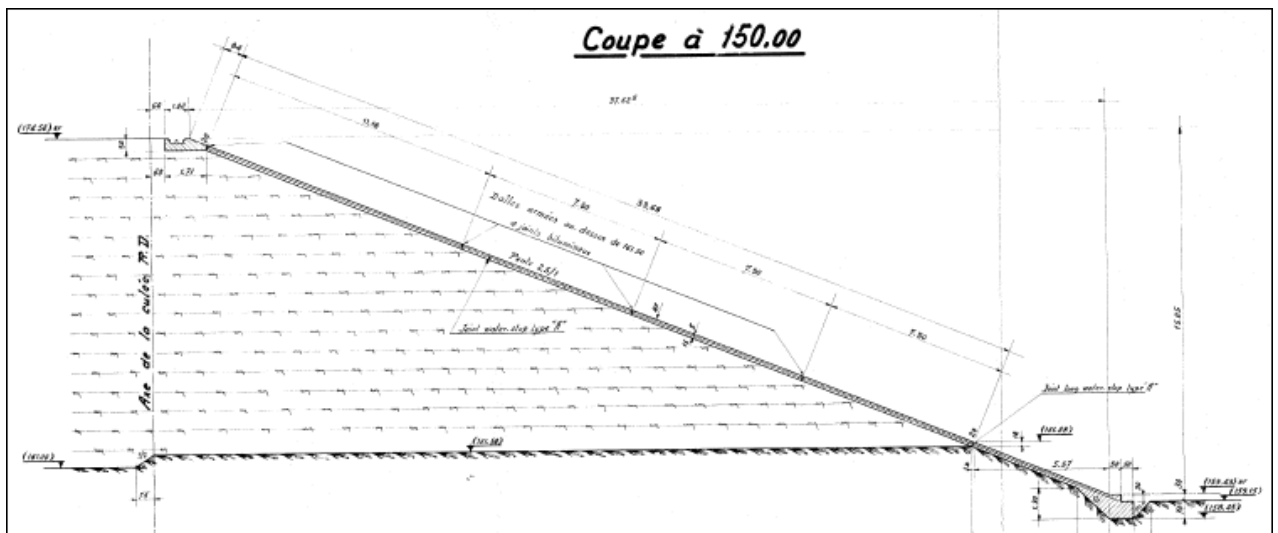


Figure 3 : Coupes du talus de la digue coté canal de force motrice à 150 et 90 m à l'amont de l'usine

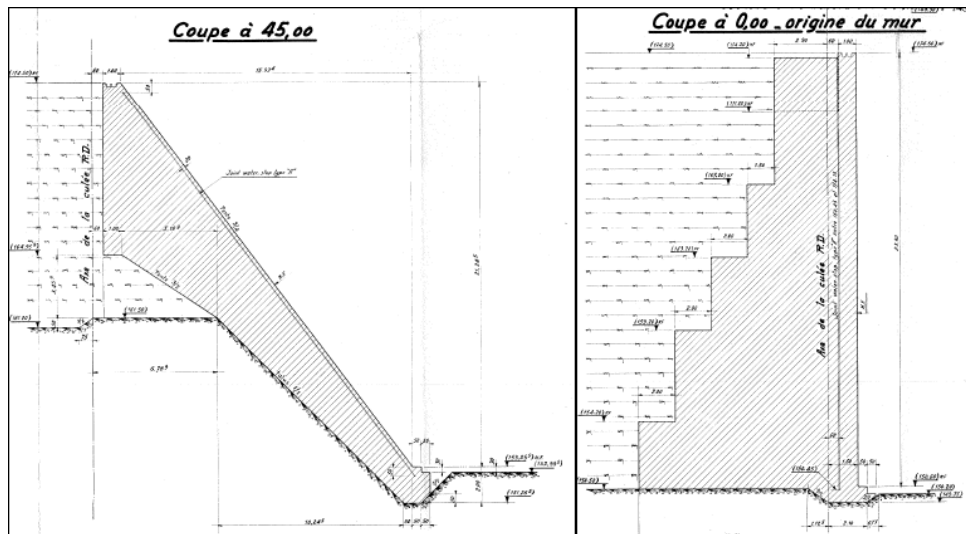


Figure 4 Coupes du talus / mur de la digue coté canal de force motrice à 45 m de l'usine et au droit de celle-ci

Au niveau de la prise d'eau projetée pour le débit d'attrait, d'après les plans de projet, les dalles amont ont une épaisseur variable comprise entre 40 et 90 cm pour un fruit compris entre 7/4 et 3/2.

Au niveau de la sortie piscicole, les dalles ont une épaisseur de 20 cm pour un fruit de 2,5/1.

D'après les plans disponibles, l'étanchéité entre les dalles situées directement à l'amont de l'usine (cf. coupes ci-dessus) est assurée par des joints Waterstop. Plus à l'amont, l'étanchéité est assurée par des joints bitumineux souvent manquants ou endommagés.

Un piézomètre est présent à proximité direct des ouvrages projetés (piézomètre DC 256.440G) et donne un niveau piézométrique moyen de 160,20 NN. Le piézomètre situé légèrement en amont des ouvrages projetés (piézomètre DC 256.340G) donne un niveau moyen de 160,80 NN.

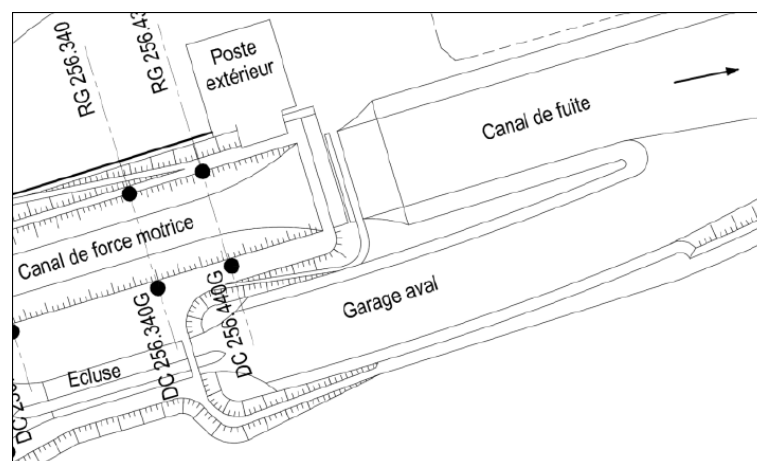


Figure 5 : Implantation des piézomètres existants à proximité des ouvrages projetés

Le niveau amont normal d'exploitation du canal de force motrice en exploitation est de 173,30 NN pouvant varier entre les cotes 172,80 NN et 173,40 NN.

Le niveau à l'aval de la digue centrale au niveau du garage aval des écluses peut varier entre 159,80 NN et 160,80 NN.

Le niveau actuellement mesuré au piézomètre DC 256,440G correspond donc au niveau du garage aval des écluses et atteste donc d'un excellent rabattement des sous-pressions et d'une grande étanchéité des dalles amont du canal de force motrice.

Lors des travaux, le piézomètre DC 256.440G situé juste à l'amont de la prise d'eau risque d'être endommagé et sera remplacé par un autre piézomètre DC 256.420G situé 20 m à l'amont entre les deux structures projetées (« Piezo A » sur la figure suivante). Par ailleurs, deux autres piézomètres (notés B et C sur la figure suivante) seront mis en place.

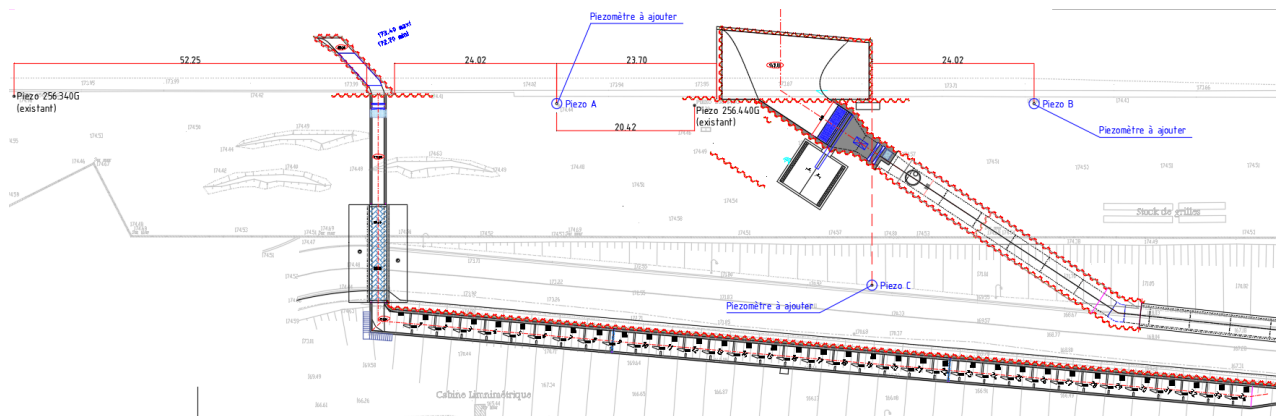


Figure 6 : Vue en plan des ouvrages projetés et des piézomètres (existant et à réaliser)

Le séquencage de réalisation de la prise d'eau et de la sortie piscicole projetées prévoit :

- La réalisation d'un rideau de palplanches dit de sûreté à l'abri des dalles amont le long du canal de force motrice sur une distance de 33 m environ pour la prise d'eau et de 15 m pour la sortie piscicole. Les palplanches seront battues jusqu'à la cote 163,00 NN.
- La réalisation d'une enceinte à batardeau avec :
 - o Découpe des dalles amont uniquement sur le tracé des palplanches
 - o Battage des palplanches jusqu'à la cote 163,00 NN
 - o Reconstitution de l'étanchéité entre les palplanches et les dalles amont par mise en œuvre d'un béton immergé
- Poursuite des travaux à l'abri de l'enceinte.

Les extraits de plans suivants permettent de visualiser la géométrie des ouvrages projetés dans la zone amont.

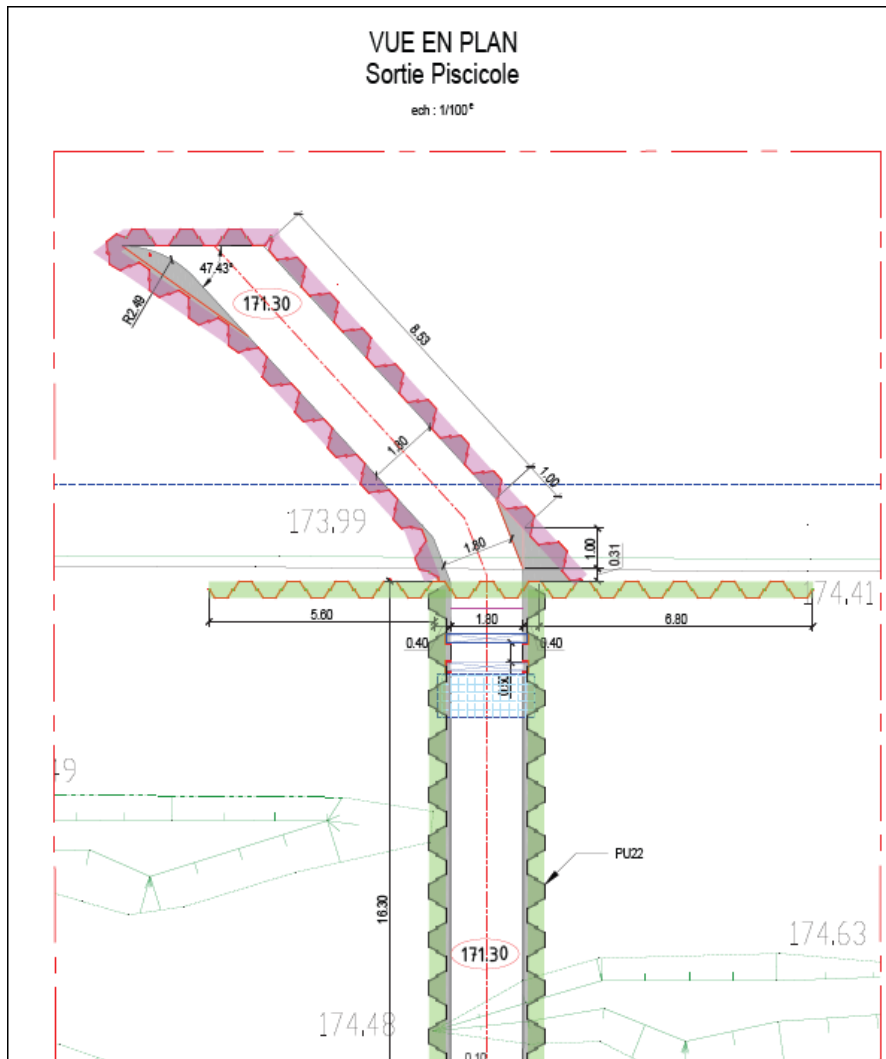
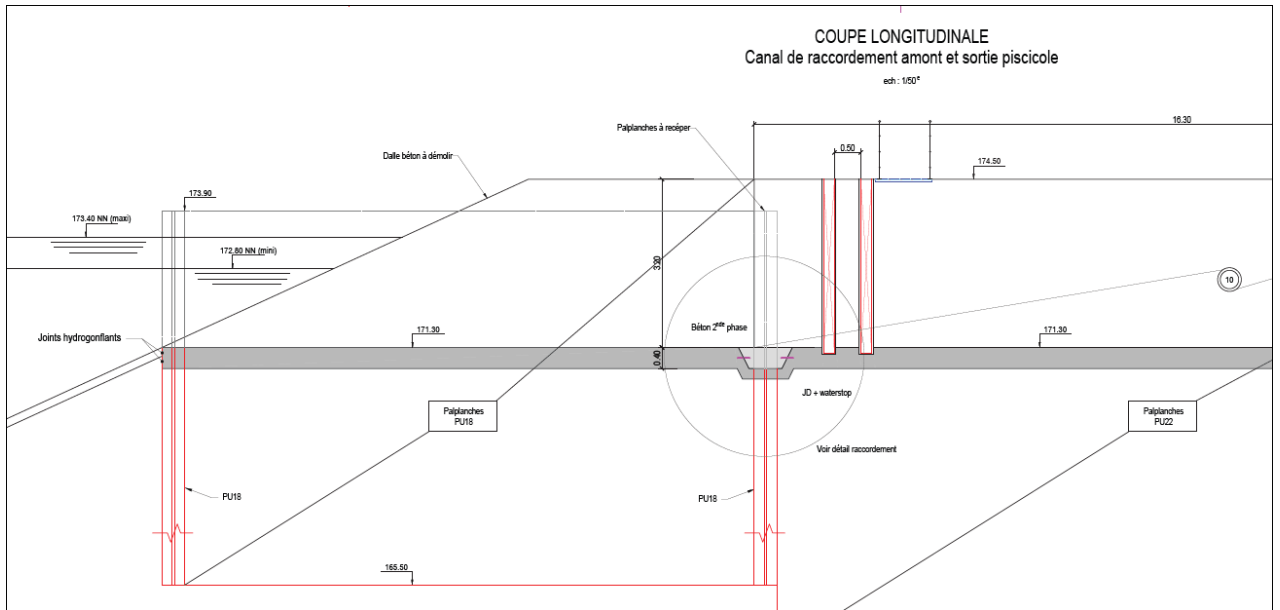


Figure 8 : Vues longitudinale et en plan de la sortie piscicole projetée

L'analyse des plans et du séquençage de réalisation met en évidence des dispositions constructives adaptées permettant d'assurer une bonne étanchéité des ouvrages. Les piézomètres en place à proximité des ouvrages permettront de détecter d'éventuelles anomalies et de lancer des actions correctives d'étanchéification locale le cas échéant.

Par ailleurs, la largeur en crête de la digue centrale au droit des ouvrages est très importante (20 m environ), une légère augmentation de la piézométrie amont actuelle aurait donc une influence modérée sur les vitesses d'écoulement, la ligne d'eau au sein de la digue centrale et la stabilité du talus aval.

Pour toutes ces raisons, une modification significative du comportement hydraulique de la digue centrale du fait de la réalisation des ouvrages de la passe à poissons est jugée très peu probable.

Le suivi de la piézométrie lors des travaux et en phase de mise en eau des ouvrages permettra de le confirmer et de qualifier les nouvelles structures.

3.2 OUVRAGES TRAVERSANTS / EROSION INTERNE DE CONDUIT ET/OU EROSION REGRESSIVE

Les ouvrages de prise d'eau et de sortie piscicole se poursuivent dans la digue centrale et constituent des ouvrages traversants.

Ces ouvrages traversants peuvent potentiellement favoriser l'initiation de deux des quatre mécanismes d'érosion interne : l'érosion de conduit et l'érosion régressive de conduit.

L'érosion de conduit se développe dans les vides déjà présents dans un sol (défaut initial de type fissure ou conduit). L'eau circulant dans ce conduit développe des contraintes d'entraînement suffisantes pour arracher et transporter les particules des parois. Ce type d'érosion se développe surtout dans les sols cohésifs (cohésion suffisante pour maintenir un conduit) mais peut également se produire pour des sols pulvérulents (sans cohésion) le long ou sous des ouvrages traversants.

L'érosion régressive de conduit peut se produire pour des digues en matériaux cohésifs (maintien d'un toit de conduit) fondées sur des matériaux sableux mais pourrait également se produire pour des sols pulvérulents dont le toit du conduit est maintenu par une structure (ouvrage traversant). Le conduit se forme alors depuis l'aval et progresse vers l'amont (érosion régressive) à l'interface entre la digue argileuse et la fondation sableuse (ou entre la fondation et l'ouvrage traversant).

La différence entre ces deux types d'érosion est :

- Un conduit préexistant pour le premier et s'agrandissant du fait d'écoulement
- Un conduit non préexistant pour le second, se créant depuis l'aval et remontant progressivement vers l'amont.

La méthodologie habituelle d'analyse du risque d'érosion interne s'appuie sur le référentiel EDF-CIH lui-même cohérent avec le bulletin technique 164 de la CIGB. Elle repose sur l'évaluation de l'occurrence et des conséquences de l'érosion interne en vérifiant six étapes successives :

- **Situations** : Quelles sont les situations de chargement auxquelles peut être soumis l'ouvrage et qui sont susceptibles d'entraîner l'apparition d'une érosion interne ?
- **Localisation** : Quelles sont les profils de l'ouvrage où l'érosion interne aurait le plus de chance de s'initier dans le remblai, la fondation et le long des structures traversantes ?
- **Initiation** : Avec quel mécanisme l'érosion interne peut-elle s'initier ou s'est-elle déjà initiée ?
- **Continuation** : L'érosion interne peut-elle être stoppée par le système de filtration ?
- **Progression** : Une fois l'érosion interne initiée et non arrêtée par un filtre, peut-elle poursuivre son développement jusqu'à la formation d'un renard ?
- **Détection** : L'ouvrage dispose-t-il d'une surveillance adaptée pour détecter l'initiation ou à défaut la progression de l'érosion interne avant qu'elle ne dégénère en rupture ?

Pour les deux ouvrages traversants, la situation de chargement correspond au canal de force motrice à son niveau maximal soit 173,40 NN et au garage aval à son niveau minimum soit 159,80 NN.

3.2.1 Erosion de conduit

Les matériaux composant la digue centrale sont des matériaux sablo-graveleux peu ou pas cohésifs. De ce fait l'unique localisation d'une érosion de conduit envisageable se situe sous les ouvrages (radier ou conduite).

L'initiation peut se produire en cas de présence d'un conduit initial sous les ouvrages (compactage insuffisant, tassement) et si une continuité hydraulique amont-aval peut se produire.

Les dispositions constructives dans la zone amont présentées au paragraphe précédent mettent en évidence la présence d'un double rideau de palplanches au niveau des ouvrages de prise d'eau et de sortie piscicole (cf. Figure 7 & Figure 8). Par ailleurs les ouvrages traversants sont également isolés latéralement par des rideaux de palplanches (cf. figure ci-dessous).

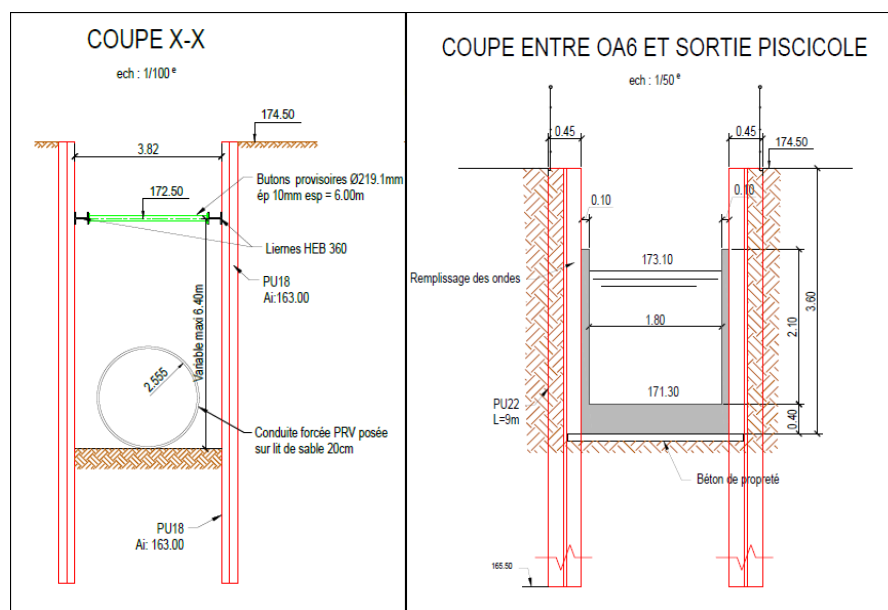


Figure 9 : Rideaux de palplanches présents au niveau de la conduite forcée du circuit hydraulique et du canal piscicole

Ces dispositions constructives permettent d'écarter le risque d'initiation d'une érosion interne de conduit au niveau des ouvrages traversants.

Par ailleurs, l'auscultation qui sera mis en place constitue une bonne barrière de défense pour la détection de phénomènes d'érosion interne.

3.2.2 Erosion régressive de conduit

Ce type d'érosion est défini dans le bulletin technique 164 de CIGB (cf. figure ci-dessous) comme pouvant se produire entre une digue cohésive (argileuse) pouvant tenir un toit et une fondation sableuse.

Par extension, ce type d'érosion pourrait se produire sous un ouvrage traversant (maintenant un toit) au sein d'une fondation sablo-graveleuse.

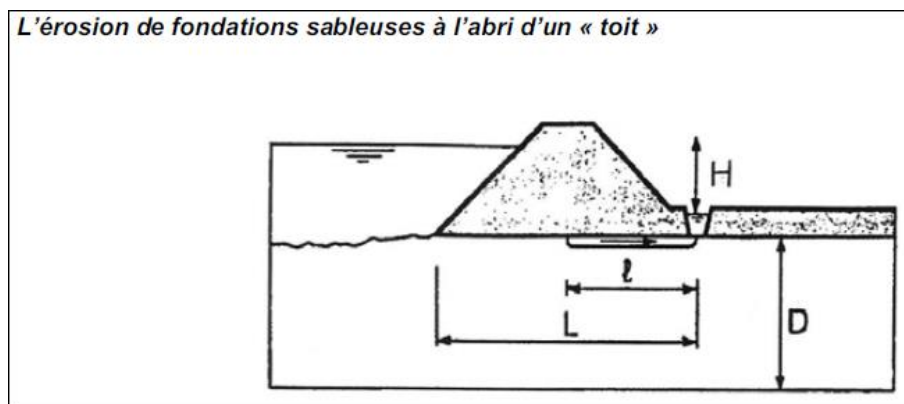


Figure 10 : Illustration de l'érosion régressive de conduit définie dans le bulletin 164 de la CIGB

Pour l'ouvrage piscicole, la localisation de l'initiation serait en partie haute de talus aval (cf. figure ci-dessous).

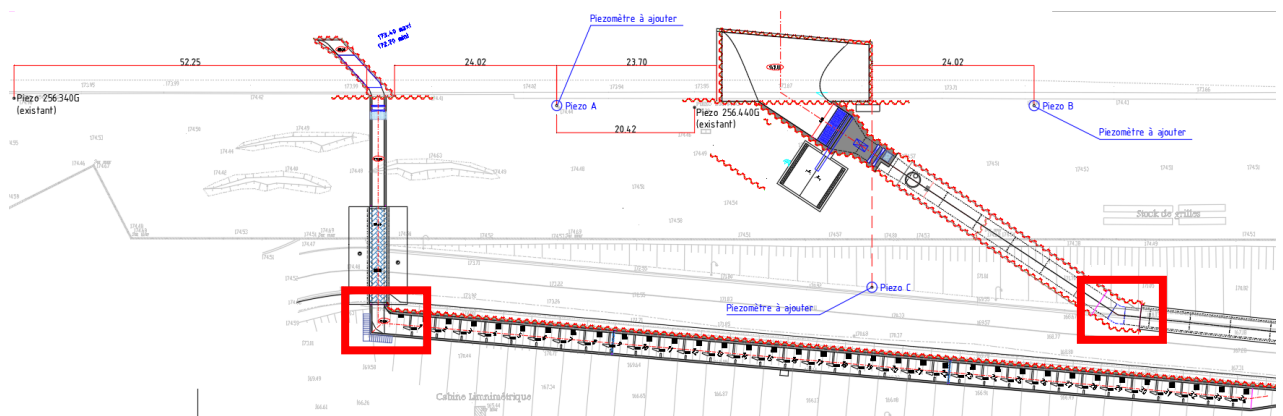


Figure 11 : Localisation de l'initiation des érosions régressives potentielles (à gauche au niveau pour le canal piscicole / à droite pour le circuit hydraulique)

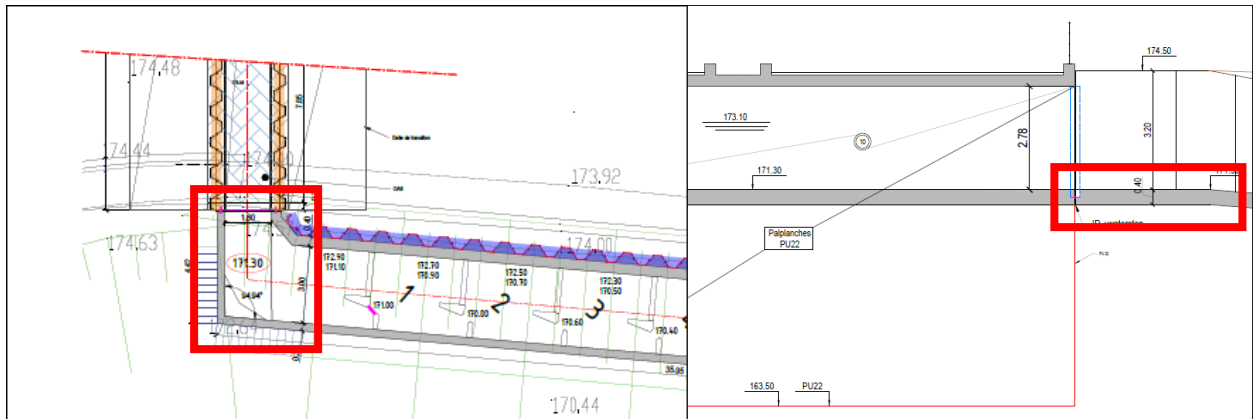


Figure 12 : Localisation détaillée de la localisation de l'initiation de l'érosion régressive de conduit potentielle pour l'ouvrage piscicole

Pour le circuit hydraulique, la localisation serait en partie basse du talus aval au niveau de la riserme aval.

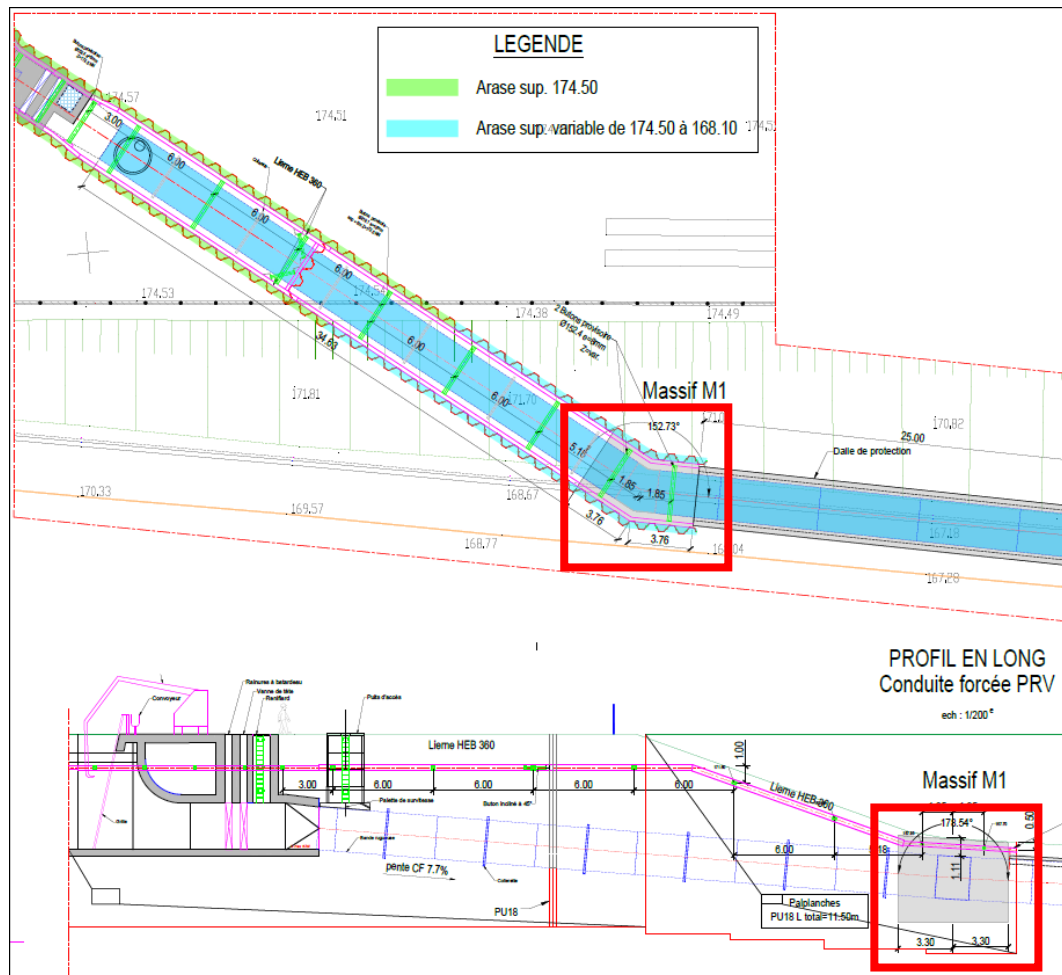


Figure 13 : Localisation détaillée de la localisation de l'initiation de l'érosion régressive de conduit potentielle pour le circuit hydraulique

Les méthodes d'analyse développées pour l'estimation du risque d'initiation de l'érosion régressive de conduit ne sont pas parfaitement adaptées à cette configuration.

Toutefois, de manière à avoir de premiers ordres de grandeurs, il est proposé d'utiliser la règle de Lane. Cette règle consiste à vérifier que la longueur de percolation notée L_p est supérieure à une grandeur correspondant à la charge hydraulique combinée à un coefficient dépendant de la nature du terrain :

$$L_p = L_v + \frac{L_h}{3} \geq c_p \cdot \Delta H$$

Avec : L_v : Longueur des cheminements verticaux

L_h : Longueur des cheminements horizontaux,

ΔH : différence de charge hydraulique

C_p : coefficient de percolation dépendant de la nature du terrain selon le tableau suivant :

Nature du terrain	C
Sables fins et limons	8,5
Sables fins	7
Sables moyens	6
Gros sables	5
Petits graviers	4
Gros graviers	3
Mélange de graviers et de gros galets	2,5
Argile plastique	3
Argile consistante	2
Argile dure	1,8

L'application de cette règle (propre à des matériaux de fondation homogène) est très probablement conservatrice. Elle permet néanmoins de porter un premier avis sur l'érodabilité potentielle de la fondation.

Pour cette application :

- Un coefficient c_p de 4 est pris en compte (matériau sablo-graveleux),
- Un défaut d'étanchéité amont est considéré (ΔH = niveau amont du canal de force motrice à 173,30 NN – le niveau bas des structures aval à 170,90 NN pour le canal piscicole et environ 168 NN pour le circuit hydraulique),
- Les palplanches ne sont pas prises en compte, celles-ci engendrent une longueur verticale supplémentaire de cheminement hydraulique qui peut être estimée à 8 m (2 x 4 m) environ pour le circuit hydraulique et 10 m (2 x 5 m) pour l'ouvrage piscicole.

Sous ces hypothèses extrêmement conservatrices, le critère de Lane est respecté pour les deux ouvrages traversants :

Ouvrage traversant	L_v (m)	L_h (m)	L_p (m)	ΔH (m)	$\frac{L_p}{c_p \cdot \Delta H}$
Canal piscicole	0,4 m	≈ 42 m	14,4 m	2,4 m	1,50
Circuit hydraulique	≈ 10 m	≈ 70 m	33 m	5,3 m	1,56

Tableau 1 : Résultats du critère de Lane

Remarque : Dans la réalité, la piézométrie amont (actuellement de 160,20 NN) sera très probablement inférieure aux cotes de localisation de l'initiation potentielle d'érosion régressive (170,90 NN pour le canal piscicole et environ 168 NN pour le circuit hydraulique). Le risque d'érosion régressive de conduit est donc extrêmement improbable.

3.3 BASSINS DE MONTAISON EN TALUS AVAL

Les bassins de montaison amont projetés seront localisés en partie haute du talus aval de la digue centrale et modifieront donc légèrement sa géométrie. Par ailleurs, en cas de rupture, ces structures peuvent devenir un agresseur de la digue par relâchement d'eau et érosion externe.

En ce qui concerne la modification de la géométrie, celle-ci sera mineure. La méthodologie d'une analyse de stabilité statique ou dynamique d'une digue prévoit que les cercles de glissement étudiés concernent une partie significative de l'ouvrage.

La digue centrale a une largeur en crête de 20 m, les cercles de glissement recherchés doivent donc comprendre une part significative de cette largeur soit à minima 5 m de largeur en crête. Les cercles passeront donc autour de l'ouvrage (dont les dimensions sont environ de 3 x 3 m²) et ne le concerneront pas directement.

Par ailleurs, la mise en place d'un rideau de palplanches en phase de construction aura même tendance à renforcer le talus aval de la digue.

Pour toutes ces raisons, la présence des bassins de montaisons projetés aura une influence minimale sur la stabilité statique et dynamique du talus aval.

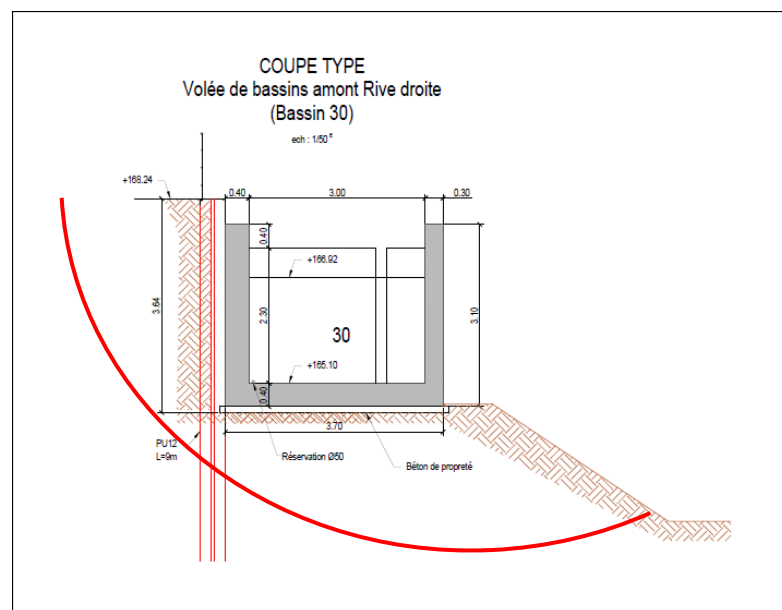


Figure 14 : Coupe type des bassins de montaison amont et allure d'un cercle de glissement global recherché

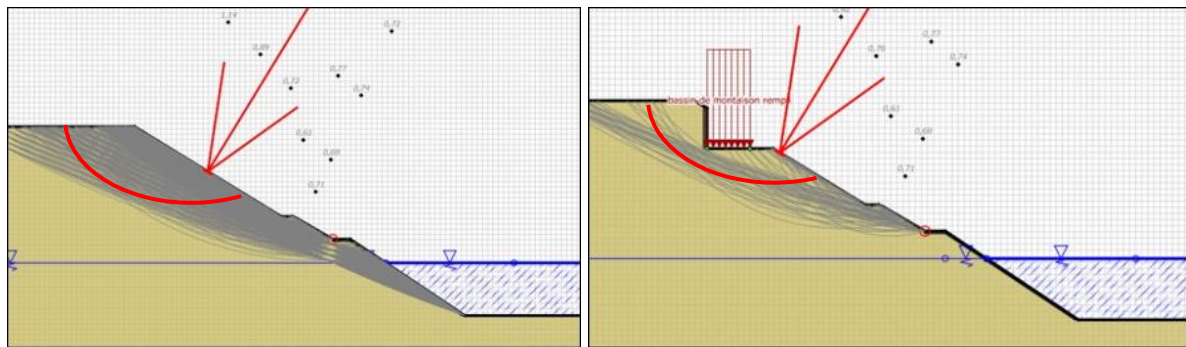


Figure 15 : Modification de la géométrie du talus aval avec la présence des bassins de montaison amont et allure d'un cercle de glissement global recherché

En revanche, dans l'environnement direct des bassins, il est possible que des cercles de glissement locaux et notamment en situation sismique ne déstabilise l'ouvrage.

Le bureau d'étude en charge du dimensionnement des ouvrages a bien vérifié la stabilité externe au séisme des bassins vis-à-vis de la capacité de portance conformément aux EC7 et EC8-5 :

Vérification de la stabilité selon l'EC7 (norme NF 94-261 et NF 94-281) et l'EC8-5

Données pour la vérification de la stabilité

V (terre excavée) 4,7m³/ml

B= 2.5m
 ple* = 2.5MPa
 φ = 34°
 De= 0.0m
 Kp= 1.00

tan(β) 0.67
 β 33.69°
 d 1.25m

NOTA : le volume des terres excavée « V » et la distance de la fondation par rapport au bord du talus sont calculés en considérant une pente de talus de 3H/2V, soit un angle β≈33.69°.

V(terre excavée) = (H / tan(β) * H)/2
d = H / tan(β) - B

Vérification de l'excentrement du chargement / renversement

Combinaison	V (kN/ml)	H (kN/ml)	M/O (kN.m/ml)	e (m)	A' (m ² /ml)	1-2e/β	1-2e/β > 1/2
Séisme pesant (bassin rempli)	99.3	38.4	41.1	0.41	1.67	0.7	10.0 OK
Séisme pesant (bassin vide)	89.0	36.0	38.6	0.43	1.63	0.7	9.8 OK
Séisme allégeant (bassin rempli)	65.1	34.8	36.4	0.56	1.38	0.6	8.3 OK
Séisme allégeant (bassin vide)	58.4	32.4	34.0	0.58	1.34	0.5	8.0 OK

Vérification de la portance

Combinaison	V (kN/ml)	H (kN/ml)	M/O (kN.m/ml)	e (m)	A' (m ² /ml)	β _d (rad)	i _a	i _b	q _{net} (MPa)	R ₀ (kN/ml)	V - R ₀ (kN/ml)	R _{0,d} (kN/ml)	V-R ₀ ≤ R _{0,d}
Séisme pesant (bassin rempli)	99.3	38.4	41.1	0.41	1.67	21.11	0.28	0.30	0.21	93.75	5.58	249.95	44.81 OK
Séisme pesant (bassin vide)	89.0	36.0	38.6	0.43	1.63	22.01	0.26	0.30	0.19	93.75	-4.78	225.94	V<R ₀ OK
Séisme allégeant (bassin rempli)	65.1	34.8	36.4	0.56	1.38	28.10	0.14	0.30	0.10	93.75	-28.60	103.27	V<R ₀ OK
Séisme allégeant (bassin vide)	58.4	32.4	34.0	0.58	1.34	29.04	0.13	0.30	0.09	93.75	-35.40	89.13	V<R ₀ OK

Vérification du critère de glissement

Combinaison	V (kN/ml)	H (kN/ml)	R _{0,d} (kN/ml)	H ≤ R _{0,d}
Séisme pesant (bassin rempli)	99.3	38.4	67.67	OK
Séisme pesant (bassin vide)	89.0	36.0	60.62	OK
Séisme allégeant (bassin rempli)	65.1	34.8	44.39	OK
Séisme allégeant (bassin vide)	58.4	32.4	39.76	OK

⇒ La stabilité externe de l'ouvrage est vérifiée en situation sismique.

Figure 16 : Extrait de la note de dimensionnement Arcadis de référence IH.RHINA.PAP.C.000.*.11022 A

Il serait toutefois intéressant de compléter ce calcul de portance par un calcul des cercles de glissements locaux tels que qu'illustrés sur la figure suivante :

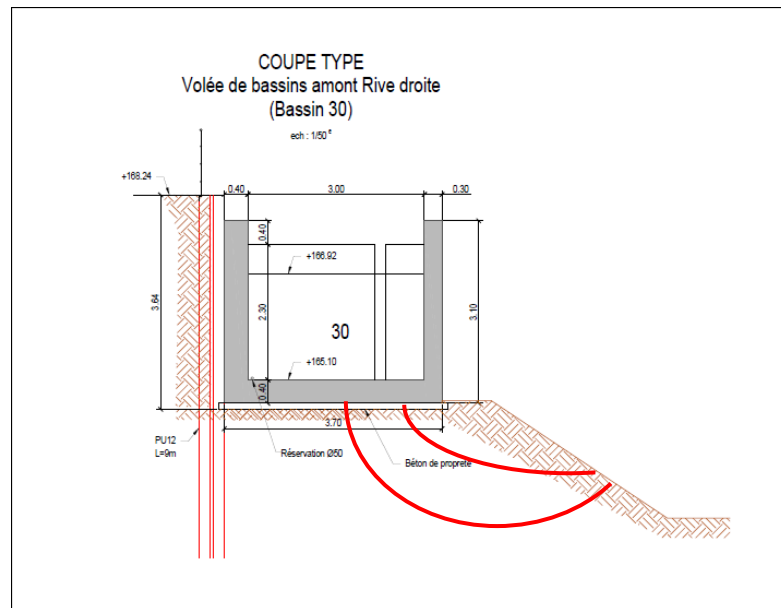


Figure 17 : Type de cercles à rechercher localement pour le défaut de portance des bassins (notamment en situation sismique)

Le risque de rupture locale par défaut de capacité portante (notamment au séisme) des bassins de montaison amont a été étudié et écarté conformément aux EC7 et EC8-5.

Toutefois, il serait intéressant de confirmer ce résultat par un calcul des cercles de glissement locaux tels que décrits sur la figure ci-dessus.

4. CONCLUSION

L'incidence sur la sûreté des ouvrages projetés dans le cadre de la réalisation d'une passe à poissons sur l'aménagement de Rhinau a été analysée de manière préliminaire dans ce document (une analyse plus complète sera réalisée dans le cadre de l'analyse de sûreté globale des digues adossée à l'EDD 2024 de l'aménagement de Rhinau).

Les risques ayant été identifiés dans la présente analyse sont les suivants :

Ouvrage projeté	Impact potentiel	Modes de rupture concernés
Prise d'eau Sortie piscicole	Modification significative du comportement hydraulique de la digue	Tous à l'exception de l'érosion externe
Ouvrages traversants	Zones d'écoulement préférentielles le long des ouvrages traversants	Erosion interne de conduit
Bassins de montaison amont	Modification significative de la géométrie du talus aval	Cisaillement statique Cisaillement dynamique
Bassins de montaison amont	Écoulement / lâcher d'eau en cas de rupture	Erosion externe

Les risques de modification significative du comportement hydraulique de la digue, d'érosion interne de conduit sous les ouvrages traversants et d'instabilité au cisaillement statique et dynamique du talus aval sont considérés comme minimes ou très faibles.

Le risque d'érosion externe par rupture d'un bassin de montaison en talus aval apparaît très faible puisque la démonstration de la portance des terrains en situation sismique a été menée suivant les Eurocodes 7 et 8-5. Il est toutefois recommandé de confirmer cette démonstration par un calcul des cercles de glissements locaux.



CHANGER L'ENERGIE ENSEMBLE

Page d'approbation

RHINAU - PASSE A POISSONS - AVIS SUR L'IMPACT DE L'OUVRAGE VIS-A-VIS DE LA SURETE

Réf. : H-30575707-2021-000127

Indice : A Date : 08/12/2021 Accessibilité : Interne DPIH

Rédacteur(s) :

- COUBARD Gregory - 08/12/2021

Vérificateur(s) :

- COURIVAUD Jean-Robert - 08/12/2021

Approbateur(s) :

- RECH-PORCHER Florence - 08/12/2021

EDF SA
22-30 avenue de Wagram
75382 Paris Cedex 08 – France
Capital de 1 549 961 789,50 euros
552 081 317 R.C.S Paris

www.edf.fr

© EDF -2021. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation.

H-30575707-2021-000127 A approuvé le 08/12/2021 CONSULTABLE EN GED