

RÉFLEXIONS D'UN MAÎTRE D'ŒUVRE SUR DIFFÉRENTS PROCÉDES D'ÉTANCHÉIFICATION D'UN CANAL DE NAVIGATION SOUS EAU ET EN EXPLOITATION

REFLECTIONS OF AN ENGINEERING DESIGNER ON DIFFERENT WATERPROOFING PROCESSES FOR A NAVIGATION CANAL UNDERWATER AND UNDER OPERATION

Pascale MASSAAD¹, Camille RENAT¹, Nathalie ROSIN-CORRE², Farid LAMRID¹, Dominique FRIOT¹

¹ Tractebel, Gennevilliers, France

² Tractebel, Lyon, France

RÉSUMÉ – Cet article présente les réflexions du maître d'œuvre sur les procédés d'étanchéification d'un canal de navigation sous eau et en exploitation, étudiés dans le cadre du projet Canal Seine-Nord Europe. Les différentes étanchéités étudiées sont des solutions de surface sur les talus et au plafond du canal ou des solutions verticales ancrées dans les formations argileuses présentes non loin du plafond.

ABSTRACT – This article presents the reflections of an engineering designer on different waterproofing processes for a navigation canal underwater and under operation, studied within the project of the Seine-Nord Europe Canal. The various waterproofing technics studied are surface solutions on the banks and on the bottom of the canal or vertical solutions embedded in the clayey horizon present not far from the bottom.

1. Introduction

L'étanchéification des canaux de navigation fait appel à des solutions techniques éprouvées qui bénéficient d'un retour d'expérience fourni lorsque la zone de travaux peut être mise à sec ou hors nappe. Lorsque le canal doit rester en eau et en exploitation, l'éventail des solutions et le retour d'expérience se réduisent.

Il nous a paru intéressant de partager les réflexions d'un maître d'œuvre sur les procédés d'étanchéification d'un canal de navigation sous eau et en exploitation, étudiés dans le cadre du projet Canal Seine-Nord Europe, maillon central du projet européen de liaison fluviale à grand gabarit entre la France, la Belgique et les Pays-Bas.

Une première partie présentera les contraintes de site et de projet. Compte tenu des forts enjeux d'alimentation en eau du canal, les exigences en termes de limitation des fuites sont très élevées. Sur la partie du linéaire étudiée, le canal reprend le tracé d'un canal existant qui doit rester navigable pendant les travaux. Ceci restreint fortement le choix des solutions d'étanchéité envisageables.

La deuxième partie détaillera les différentes solutions étudiées pour assurer l'étanchéité des talus et du plafond du canal. Les différentes typologies d'étanchéité retenues comprennent la mise en place de matelas géotextiles remplis de béton en talus et d'enrochements percolés en plafond ainsi que des berges verticalisées en palplanches.

Le projet s'inscrit dans le contexte géologique de la plaine alluviale de l'Oise. Les formations rencontrées au droit du bief comprennent les Alluvions Modernes et Anciennes de l'Oise, les Sables de Bracheux et la Craie du Sénonien qui constitue le substratum. Localement, l'horizon lenticulaire des Argiles et Lignites du Sparnacien peut s'intercaler entre les Alluvions Anciennes et les Sables de Bracheux. La présence de cet horizon argileux non loin du plafond permet de développer localement une solution alternative

consistant en des coupures étanches dans les berges prolongées jusqu'aux argiles. Cette solution sera présentée en dernière partie.

2. Objectifs et Performances

Le bief amont Montmacq-Noyon, correspond au linéaire de canal compris entre l'avant-port amont de l'écluse de Montmacq (PK 107+380) et le bassin de virement au nord du Secteur 1 du projet Canal Seine Nord (PK 117+288). Il est étanché sur la totalité de son linéaire.

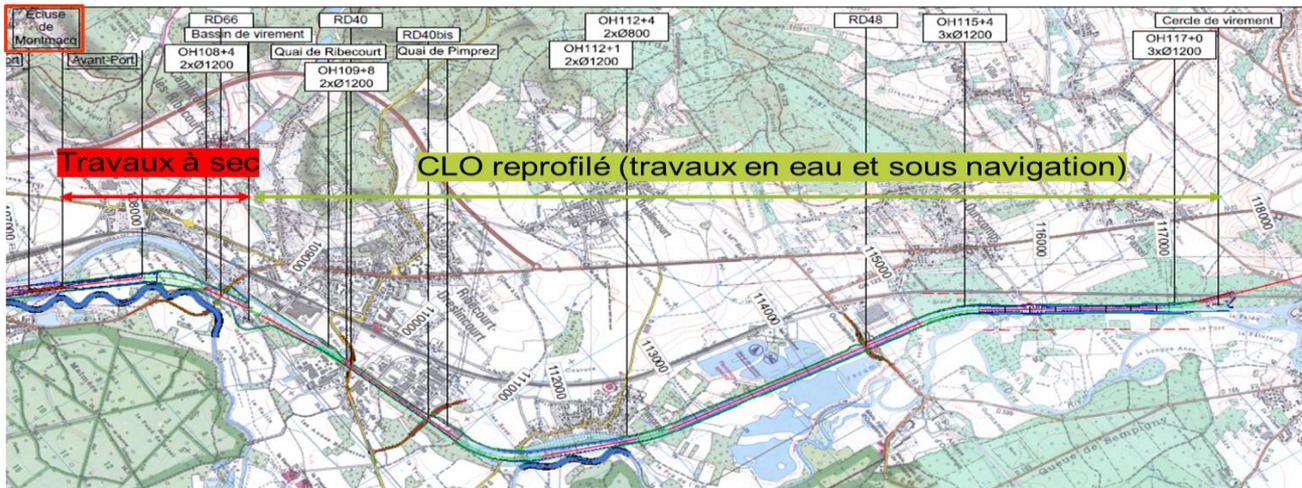


Figure 1. Périmètre à étancher

Le projet doit viser la neutralité dans ses impacts sur les zones humides et sur les régimes d'écoulement des eaux souterraines par rapport à l'état existant. Les exigences à respecter en termes d'alimentation et d'étanchéité sont fournies dans le Programme du MOA et détaillé ci-dessous :

- Alimentation en eau du canal :

« L'alimentation en eau est assurée par un prélèvement dans l'Oise au niveau de l'écluse de Montmacq hors période d'étiage et par le bassin réservoir en cas d'étiage important. Ce prélèvement permet :

- La compensation des pertes en eau du canal par infiltration et évaporation, dans la limite d'un débit de $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ dont $0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ pour l'évaporation, à $0.62 \text{ m}^3/\text{s}$ pour l'infiltration et une marge de sécurité de $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$,
- L'alimentation du bassin-réservoir uniquement en dehors des périodes d'étiage. La capacité de transfert d'eau installée à ce titre doit être de $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$. »

- Étanchéité du canal

« Le plafond du bief n°2 est rendu étanche sur sa longueur sauf dans les tronçons où la présence d'argile au plafond dispenserait d'aménager un dispositif d'étanchéité. L'étanchéité couvre en principe à la fois le plafond du canal et les talus ou parois des berges du canal. Cependant le projet doit viser la neutralité dans ses impacts sur les zones humides ou les régimes d'écoulement des eaux souterraines par rapport à l'état existant, ce qui pourrait éventuellement conduire à des aménagements spécifiques concernant l'ouvrage ou son étanchéité.

« La perméabilité imposée pour l'étanchéité équivaut à une couche de 40 cm d'épaisseur utile avec un coefficient d'infiltration de 10^{-8} m/s »

3. Contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique

La géologie rencontrée au niveau du bief amont comporte les formations suivantes :

- Des terrains de Recouvrement (Terre végétale et remblais)
- Les Alluvions Modernes de l'Oise (Fz - alluvions fines)
- Les Alluvions Anciennes de l'Oise (Fy - alluvions grossières)
- Les Argiles et Lignites du Sparnacien (e3) : Elles sont constituées de limons peu plastiques, d'argiles peu plastiques et d'argiles au sens du GTR. Les Argiles et Lignites constituent un horizon lenticulaire et n'ont, par conséquent, pas été reconnues par tous les sondages. Lorsque la formation est présente, son épaisseur est très variable, comprise entre 0,8 et 13 m avec une épaisseur moyenne de 5,2 m. Les faciès rencontrés sont peu variables, avec une majorité de limons.
- Les Sables de Bracheux (e2c) du Thanétien, formation à dominante sableuse, comportent des niveaux assez propres (plutôt vers le sommet de la couche) et des niveaux plus argileux. Leur épaisseur varie entre 5,15 et 21 m (épaisseurs rencontrées dans les sondages qui traversent l'ensemble de la formation) avec une moyenne de 14,3 m. Les faciès rencontrés sont variables, avec une majorité de sables et graves très silteux.
- La Craie blanche du Sénonien (C) qui constitue le substratum.

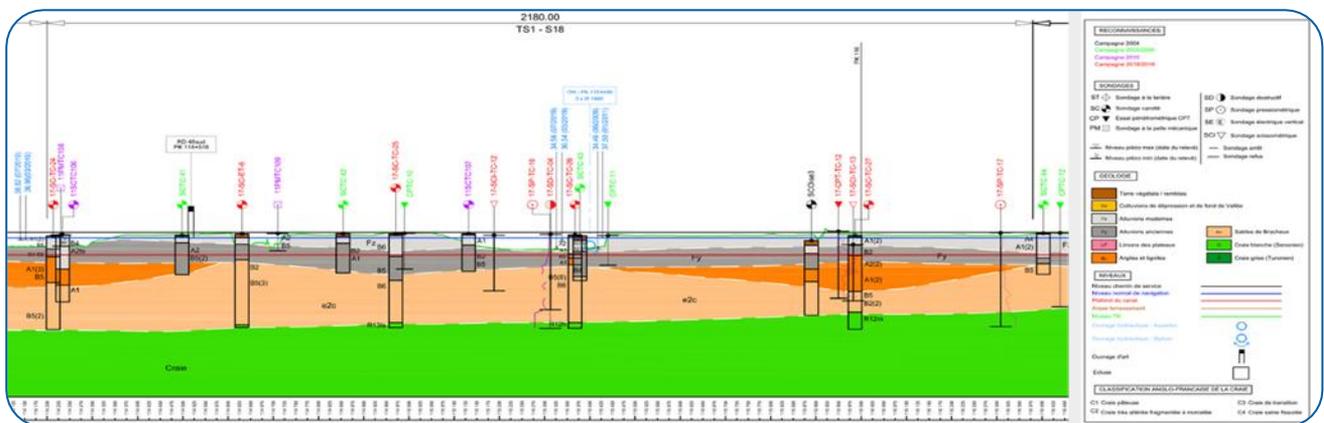


Figure 2. Profil géologique de la zone 4

La nappe alluviale est située entre le Niveau Normal de Navigation (NNN) et le plafond du canal, sauf ponctuellement dans la partie aval du bief amont où le niveau de la nappe est inférieur au plafond, quand elle est à son plus bas niveau.

Il découle des variations de stratigraphie et de niveau de nappe un découpage du bief amont en 5 zones. La zone 1 correspond à la partie aval du bief amont, située en dehors de l'emprise du Canal Latéral à l'Oise (CLO), pour laquelle les conditions hydrogéologiques favorables permettent la réalisation de travaux à sec. La zone 2 correspond à la jonction avec le CLO. Les contraintes liées à l'urbanisation de la zone imposent la réalisation de berges verticales en palplanches. Au droit des zones 3 à 5, l'emprise du canal recoupe celle du CLO que les travaux visent à élargir et approfondir. Les contraintes liées à l'urbanisation sont moindres que dans la zone 2 aussi les berges seront talutées avec un fruit de 2H/1V.

Les perméabilités retenues pour les formations du bief amont sont présentées ci-dessous :

Tableau 1. Bief Amont - Perméabilités retenues

	Zones 1 et 2		Zones 3 à 5	
	k_V	k_H	k_V	k_H
Alluvions modernes	1.10^{-5}	1.10^{-4}	1.10^{-5}	1.10^{-4}
Alluvions anciennes	1.10^{-4}	1.10^{-3}	1.10^{-4}	1.10^{-3}
Argiles et Lignites	1.10^{-6}	1.10^{-5}	1.10^{-8}	1.10^{-7}
Sables de Bracheux	5.10^{-6}	5.10^{-5}	2.10^{-5}	2.10^{-4}
Craie	1.10^{-4}	1.10^{-4}	1.10^{-4}	1.10^{-4}

4. Géométrie des berges et étanchéité du bief amont

Le plafond du canal est situé à 4,5 m sous le NNN et au-dessous du terrain naturel sur la totalité du linéaire du bief amont. Le NNN est au-dessous du terrain naturel sauf au droit de la zone 1. A partir du bassin de virement aval (jonction des zones 1 et 2), le profil est principalement en déblai avec un ajustement pour caler le chemin de halage situé à 1,5 m au-dessus du NNN ou en remblai de faible hauteur.

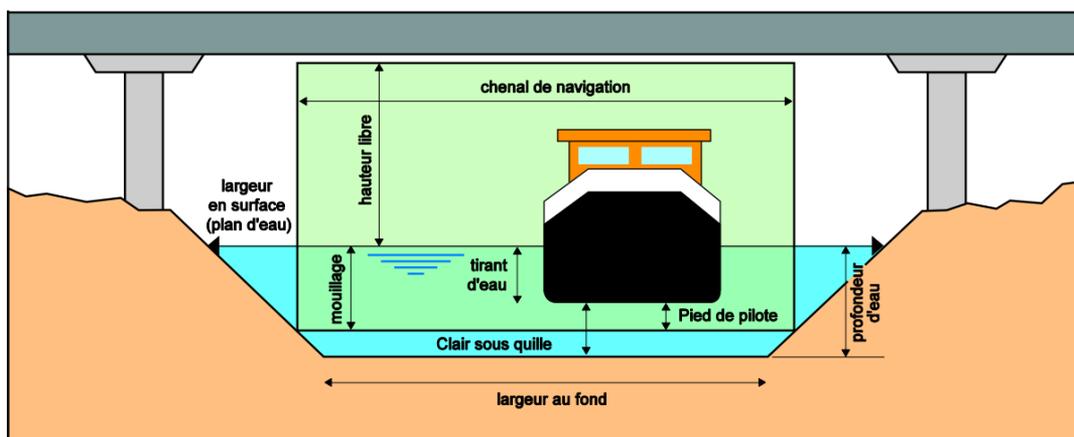


Figure 3. Coupe fonctionnelle

La solution d'étanchéité retenue dépend de plusieurs facteurs :

- la géologie (présence d'un horizon argileux peu profond sous le plafond du canal) ;
- la présence d'avoisinants qui nécessite la réalisation de berges verticalisées ;
- les conditions de mise en œuvre sous eau et sous exploitation exigeant un dispositif d'étanchéité compatible avec la performance recherchée ;
- la contrainte environnementale lorsque les fuites et l'effet de barrage ne sont pas acceptables et ne répondent pas aux exigences du programme.

Deux typologies d'étanchéité sont proposées :

- Des solutions de surface en matelas béton et enrochements percolés ;
- Des solutions verticales en palplanches ou parois étanches ancrées dans les Argiles et Lignites du Sparnacien.

4.1 Étanchéité de surface

Le dispositif d'étanchéité de surface a vocation à assurer la double fonction de :

- Structure de protection vis-à-vis de l'érosion et des chocs (ancres) ;
- Structure d'étanchéité vis-à-vis des exigences de limitation des fuites du canal.

4.1.1 Matelas béton (uniquement en talus)

Le revêtement réalisé par matelas de béton est formé de deux couches de tissu géotextile, cousues l'une à l'autre en bande continue et ensuite remplies de béton. Une épaisseur uniforme du coffrage souple perdu est assurée en disposant des fils d'écartement à des distances régulières, ce qui donne la forme d'un matelas. Les fonctions de protection et étanchéité sont assurées par le béton.

Le béton de remplissage est un béton fluide autoplaçant, coulé sous l'eau. Il a l'avantage de n'être soumis ni au retrait plastique ni au retrait de séchage. Les géotextiles formant matelas sont perméables à l'eau pour ne pas flotter et pour laisser passer la laitance du béton.

Les panneaux constituent des coffrages indépendants mais solidarités, le bétonnage se fait sur une largeur de panneau (typiquement de l'ordre de 5 m).

Les matelas de béton imperméables peuvent être prolongés en haut de talus par des matelas perméables munis de points de filtration qui permettent à l'eau derrière le matelas de s'écouler vers le canal, pour diminuer les pressions interstitielles qui se développent dans le talus, et/ou par des matelas qui présentent des reliefs en creux végétalisables.

Cette solution a été mise en œuvre notamment en Espagne, en France et en Allemagne depuis les années 1970 essentiellement comme protection contre l'érosion.

La Figure 4 montre un matelas en béton.



Figure 4. Exemple de Matelas Béton sur le talus installé en 1994 en rive droite du canal de Jonage.

4.1.2 Enrochements percolés (plafond du canal)

Il s'agit de mettre en œuvre un tapis d'enrochements scellés les uns aux autres par des matériaux à base de liants hydrauliques. Cette solution, utilisée notamment aux Pays-Bas et en Allemagne, est appliquée au plafond du canal car elle permet de s'affranchir des raccords entre matelas béton en plafond et de simplifier les raccords avec les berges verticalisées (cf. 4.2).

Pour ce faire, les vides entre les enrochements sont complètement remplis avec un produit de scellement dense (scellement intégral). Le principal coulis à base de ciment qui est utilisé pour améliorer la stabilité est le béton « colloïdal ». Le béton doit avoir une bonne fluidité et une résistance optimale à la ségrégation. Ce dernier facteur est très important pour des mises en œuvre sous eau en particulier en cas d'exposition aux mouvements des courants, de navigation notamment. Un béton normal risquerait de ségréger et de voir ses granulats les plus fins lessivés.

Le scellement doit remplir complètement toutes les porosités de l'enrochement. Il faut si possible choisir à cette fin une classe granulaire avec des vides importants. La classe de poids LMB_{5/40} définie dans le document TLW (2003) a fait ses preuves pour la réalisation de couches de couverture à scellement intégral. La classe LMB_{10/60} peut aussi être utilisée.

Les épaisseurs minimales à mettre en œuvre résultent principalement de la mise en sécurité nécessaire contre les chutes d'ancres ou pour des raisons techniques liées aux méthodes de pose. Le guide du BAW « Anwendung von hydraulisch gebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (MAV) » donne les épaisseurs minimales suivantes :

Tableau 2 : Épaisseur d'enrochements percolés selon catégorie des blocs

	CP _{90/250}	LMB _{5/40}	LMB _{10/60}
$\rho_s < 3000 \text{ kg/m}^3$	40 cm	40 cm	50 cm
$\rho_s \geq 3000 \text{ kg/m}^3$	40 cm	40 cm	40 cm

4.2 Étanchéité verticale

Les coupures étanches dans les berges prolongées jusqu'aux argiles ont été proposées dans les zones où les Argiles et Lignites du Sparnacien viennent s'intercaler entre les Alluvions Anciennes et les Sables de Bracheux lorsque cet horizon argileux se trouve non loin du plafond. L'avantage de cette technique est que sa mise en œuvre impacte beaucoup moins l'exploitation fluviale qui doit être maintenue pendant les travaux. Toutefois cette solution peut créer un effet de barrage localement. Par conséquent, elle n'est retenue que dans les zones où l'impact sur l'environnement, notamment sur les zones humides et bâtis, est négligeable.

Par ailleurs, des reconnaissances à l'avancement sont prévues lors de la réalisation de la paroi étanche afin de s'assurer d'un ancrage minimal de 1m dans les Argiles et Lignites.

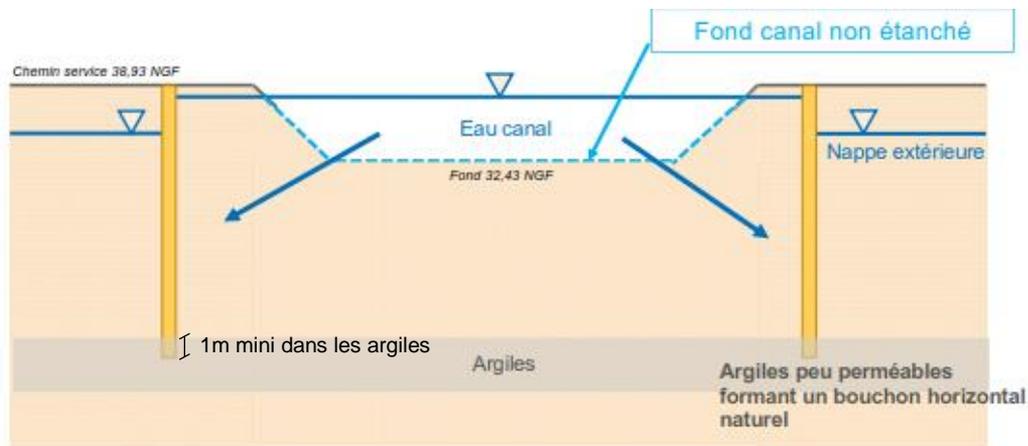


Figure 5. Principe de mise en étanchéité par écrans verticaux

Les parois étanches sont de type :

- Bétons de sol de type soil-mixing
- Palplanches (pour les zones verticalisées et les berges lagunées).

4.2.1 Béton de sol

Il s'agit d'une technique développée dans les années 1970/1980 au Japon et en Scandinavie. Le principe consiste à utiliser le sol en place comme matériau de construction auquel on ajoute un matériau d'apport (ciment, chaux, etc...) pour répondre à des objectifs particuliers (résistance, étanchéité, etc...). Le résultat est une inclusion semi-rigide de nature plus ou moins étanche selon la formulation adoptée pour le liant.

Le béton de sol permet de créer un écran vertical étanche fiché d'au moins 1 m dans la couche d'argile considérée comme peu perméable. Cette solution s'accompagne d'une protection par enrochement du talus vis-à-vis du battillage et des jets hélices. L'écran, d'une dizaine de mètres, doit avoir une épaisseur minimale de 40 cm et respecter l'exigence de perméabilité de 10^{-8} m/s demandée au programme.

4.2.2 Palplanches

Il s'agit du même principe que précédemment mais avec utilisation de palplanches réputées d'une bonne étanchéité. Ce dispositif, mis en œuvre en zone 2 (cf. Figure 6) et dans les zones de berges lagunées, joue également un rôle de soutènement.

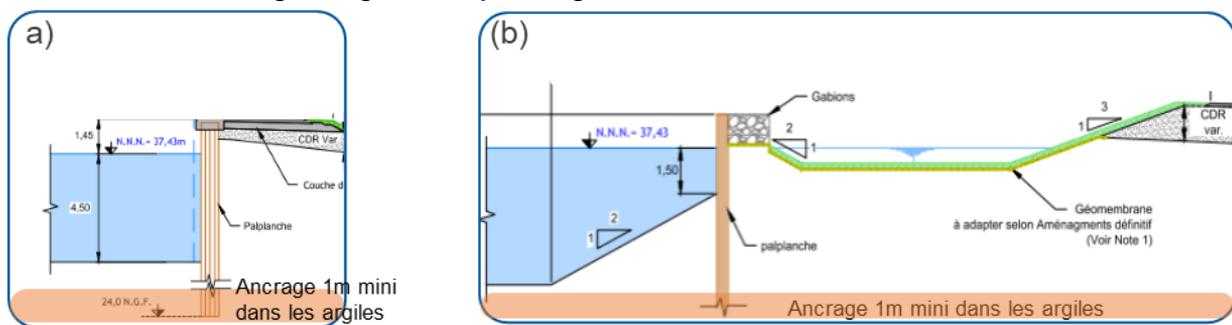


Figure 6. Coupe type d'une solution avec palplanche au droit de la zone verticalisée (a) et au droit d'une berge lagunée (b)

5. Conclusion

Les solutions d'étanchéité retenues intègrent les contraintes liées à la géologie (présence des Argiles et Lignites du Sparnacien), aux avoisinants, aux conditions de réalisation des travaux (à sec ou sous eau) et aux contraintes environnementales.

Le Tableau ci-dessous synthétise les solutions d'étanchéité retenues par le Maître d'œuvre pour les différentes zones :

Tableau 3 : Solutions d'étanchéité retenue le long du Bief Amont - Synthèse

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Contrainte travaux	Hors emprise CLO	Zone urbanisée + Sous eau + contrainte navigation	Sous eau + contrainte navigation	Sous eau + contrainte navigation	Sous eau + contrainte navigation
Horizon argileux	Non	Oui	Oui	Oui (Horizon discontinu)	Non
Solution d'étanchéité	Étanchéité de surface : Matelas béton sur les talus + enrochements percolés sur le plafond	Étanchéité verticale : Berges verticalisées en palplanches ancrées au moins 1 m dans l'argile peu perméable	Étanchéité verticale : Paroi étanche sous le chemin de service ancrées au moins 1 m dans l'argile peu perméable	Étanchéité de surface : Matelas béton sur les talus + enrochements percolés sur le plafond	Étanchéité de surface : Matelas béton sur les talus + enrochements percolés sur le plafond
Protection des berges contre le batillage	Matelas béton	Palplanches	- Palplanches sur les berges lagunées de type 2 - Enrochements ailleurs	Matelas béton	Matelas béton

6. Références bibliographiques

BAW Merkblatt (2017). Anwendung von hydraulisch gebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (MAV).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, BMVBS (2003). Technische Lieferbedingung Wasserbausteine (TLW).