



# Confortement digue fluviale

Etude comparative | France  
Analyse multicritère



# Acronymes

|                        |  |
|------------------------|--|
| <i>ACV</i>             | Analyse du Cycle de Vie  |
| <i>BRLi</i>            | Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône et du Languedoc - Ingénierie |
| <i>CFBR</i>            | Comité Français des Barrages et Réservoirs   |
| <i>CO<sub>2</sub></i>  | Dioxyde de carbone   |
| <i>CO<sub>2</sub>e</i> | Équivalent dioxyde de carbone  |
| <i>DPF</i>             | Domaine Public Fluvial   |
| <i>DREAL</i>           | Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement                  |
| <i>DROM</i>            | Département et Région d'Outre-Mer  |
| <i>EAIP</i>            | Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles   |
| <i>ELU</i>             | État Limite Ultime   |
| <i>ELS</i>             | État Limite de Service   |
| <i>F</i>               | Coefficients de sécurité   |
| <i>GES</i>             | Gaz à Effet de Serre   |
| <i>HET</i>             | Hole Erosion Test (Essai d'érosion de conduit)   |
| <i>HT</i>              | Hors Taxes   |
| <i>INIES</i>           | INformations sur les Impacts Environnementaux et Sanitaires                              |
| <i>M€</i>              | Million(s) d'euros   |
| <i>MEL</i>             | Modèle d'Équilibre Limite  |
| <i>MISS</i>            | Modèle d'Interaction Sol-Structure   |
| <i>NGF</i>             | Nivellement Général de la France   |
| <i>OH</i>              | Ouvrage Hydraulique  |
| <i>PM</i>              | Point Métrique   |
| <i>SCSOH</i>           | Service de Contrôle de la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques                             |
| <i>SDES</i>            | Service des Données et Études Statistiques   |
| <i>VNF</i>             | Voies Navigables de France   |
| <i>1D / 2D</i>         | Modélisation hydraulique unidimensionnelle / bidimensionnelle                            |

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction</b>   | <b>2</b>  |
| <b>1. Contexte</b>  | <b>4</b>  |
| 1.1. Inondations en France  | 5         |
| 1.2. Effets du changement climatique                              | 5         |
| <b>2. Objectifs de l'étude</b>                                    | <b>6</b>  |
| <b>3. Etat des lieux</b>  | <b>7</b>  |
| <b>4. Considérations techniques</b>                               | <b>8</b>  |
| 4.1. Considérations hydrauliques                                  | 8         |
| 4.2. Considérations géotechniques                                 | 8         |
| <b>5. Définition des solutions</b>                                | <b>9</b>  |
| 5.1. Confortement en remblai par recul de la digue (A1)           | 9         |
| 5.2. Confortement en sol mixé à la trancheuse (A2)                | 10        |
| 5.3. Confortement en rideau de palplanches autostable (A3)        | 10        |
| <b>6. Etude de stabilité</b>                                      | <b>11</b> |
| 6.1. Hypothèses générales pour l'étude de stabilité               | 11        |
| 6.2. Etat initial   | 12        |
| 6.3. Confortement en remblai (A1)                                 | 13        |
| 6.4. Confortement en sol mixé à la trancheuse (A2)                | 13        |
| 6.5. Confortement en rideau de palplanches autostable (A3)        | 14        |
| 6.6. Analyse de sensibilité                                       | 14        |
| <b>7. Considérations techniques complémentaires des solutions</b> | <b>15</b> |
| 7.1. Durée des travaux  | 15        |
| 7.2. Estimation du coût des travaux                               | 15        |
| 7.3. Bilan carbone  | 16        |
| <b>8. Analyse comparative qualitative des solutions</b>           | <b>18</b> |
| 8.1. Adaptation à la géométrie de l'ouvrage                       | 18        |
| 8.2. Adaptation aux propriétés géomécaniques du sol               | 18        |
| 8.3. Accessibilité  | 19        |
| 8.4. Emprises mobilisables en phase chantier                      | 19        |
| 8.5. Emprise de l'ouvrage fini                                    | 19        |
| 8.6. Vibrations et nuisances sonores générées pendant les travaux | 19        |
| 8.7. Intégration dans le paysage                                  | 20        |
| 8.8. Adaptation aux aléas climatiques                             | 20        |
| 8.9. Acceptation par les autorités                                | 20        |
| 8.10. Acceptation par les riverains                               | 20        |
| <b>9. Analyse multicritère des solutions</b>                      | <b>21</b> |
| <b>10. Conclusion</b>   | <b>23</b> |
| <b>11. Annexe 1</b>   | <b>24</b> |
| 11.1. B1-Confortement en remblai – recul de la digue (+ rehausse) | 24        |
| 11.2. B2-Confortement en palplanches autostables (+rehausse)      | 24        |
| <b>12. Références</b>   | <b>26</b> |

# Introduction

Les digues constituent depuis des siècles l'un des piliers majeurs de la gestion des risques hydrauliques. Leur présence a une incidence directe sur la sécurité de nombreuses zones exposées à des niveaux d'eau élevés. Cependant, les digues en remblais font face à un cumul de vulnérabilités structurelles et environnementales pendant leur vie. Construites pour des niveaux d'eau historiques aujourd'hui largement dépassés, elles subissent des sollicitations hydrauliques plus fréquentes et plus intenses, conduisant à un risque accru d'instabilités.

En 2025, ArcelorMittal a confié à Egis, cabinet d'ingénierie et de conseil indépendant, la réalisation d'une étude, visant à évaluer plusieurs solutions de confortement des digues, incluant notamment la solution par palplanches. Cette étude, est conduite en deux phases. La première phase est consacrée à l'analyse comparative des procédés existants, tandis que la deuxième phase repose sur le prédimensionnement de trois solutions principales:

- rideau de palplanches
- paroi au coulis (ou sol mixé à la trancheuse)
- rechargement/recalibrage avec enrochement ou remblai.

Ce prédimensionnement a permis d'estimer les coûts, les durées de chantier, la complexité de mise en œuvre ainsi que les conditions d'approvisionnement, et d'intégrer ces données à une analyse multicritère: technique, économique, environnementale (empreinte carbone) et sociale.

L'analyse est appliquée à un cas concret: le confortement des remblais du canal de la Robine, dans le lit majeur du fleuve Aude à proximité de Narbonne. Le tronçon étudié de 3,2 km de long présente des risques d'érosion interne et de surverse.

Deux scénarios ont été évalués pour les différentes solution:

**Scénario A:** Crue 1999

- A1 – confortement en remblai – Recul de la digue
- A2 – confortement en sol mixé à la trancheuse dans le corps de digue
- A3 – confortement par rideau de palplanches autostable au sein de la digue conservée

**Scénario B:** Crue 1999 avec élévation de +50 cm (prise en compte du changement climatique)

- B1 – confortement en remblai – Recul de la digue
- B2 – confortement par rideau de palplanches autostable au sein de la digue conservée

L'analyse comparative met en évidence plusieurs avantages significatifs de la solution en palplanches, notamment:

- des économies supérieures à 20 % sur les coûts d'investissement;
- une réduction des délais de construction comprise entre 37 % et 50 % par rapport aux autres solutions;
- une diminution pouvant atteindre 50 % des émissions de carbone.

Elle présente également une bonne acceptation paysagère et sociale puisque les emprises de digue existante sont conservées, ainsi qu'une bonne fiabilité d'étanchéité. Enfin, la facilité d'exécution d'une rehausse de la digue existante en remblai par la solution en palplanches autostables et la simplicité de maintenance en font une option particulièrement adaptée aux enjeux actuels de gestion durable des infrastructures hydrauliques.

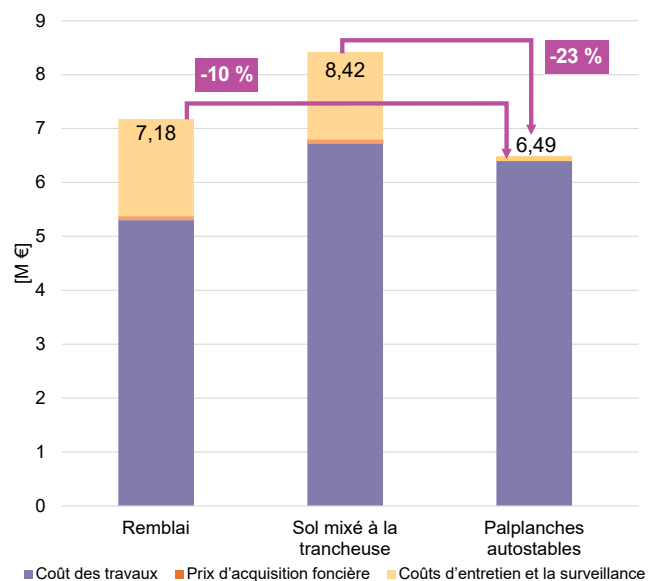


Fig. 1. Comparaison des coûts des différentes solutions de protection contre les inondations considérées dans l'étude.

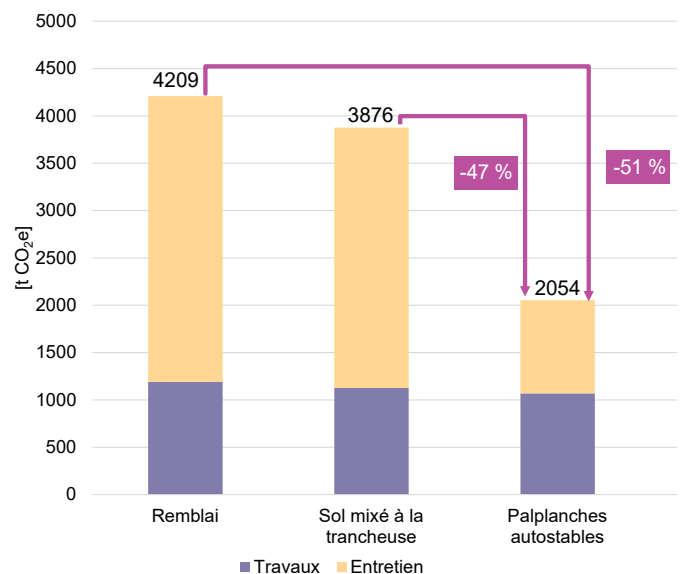
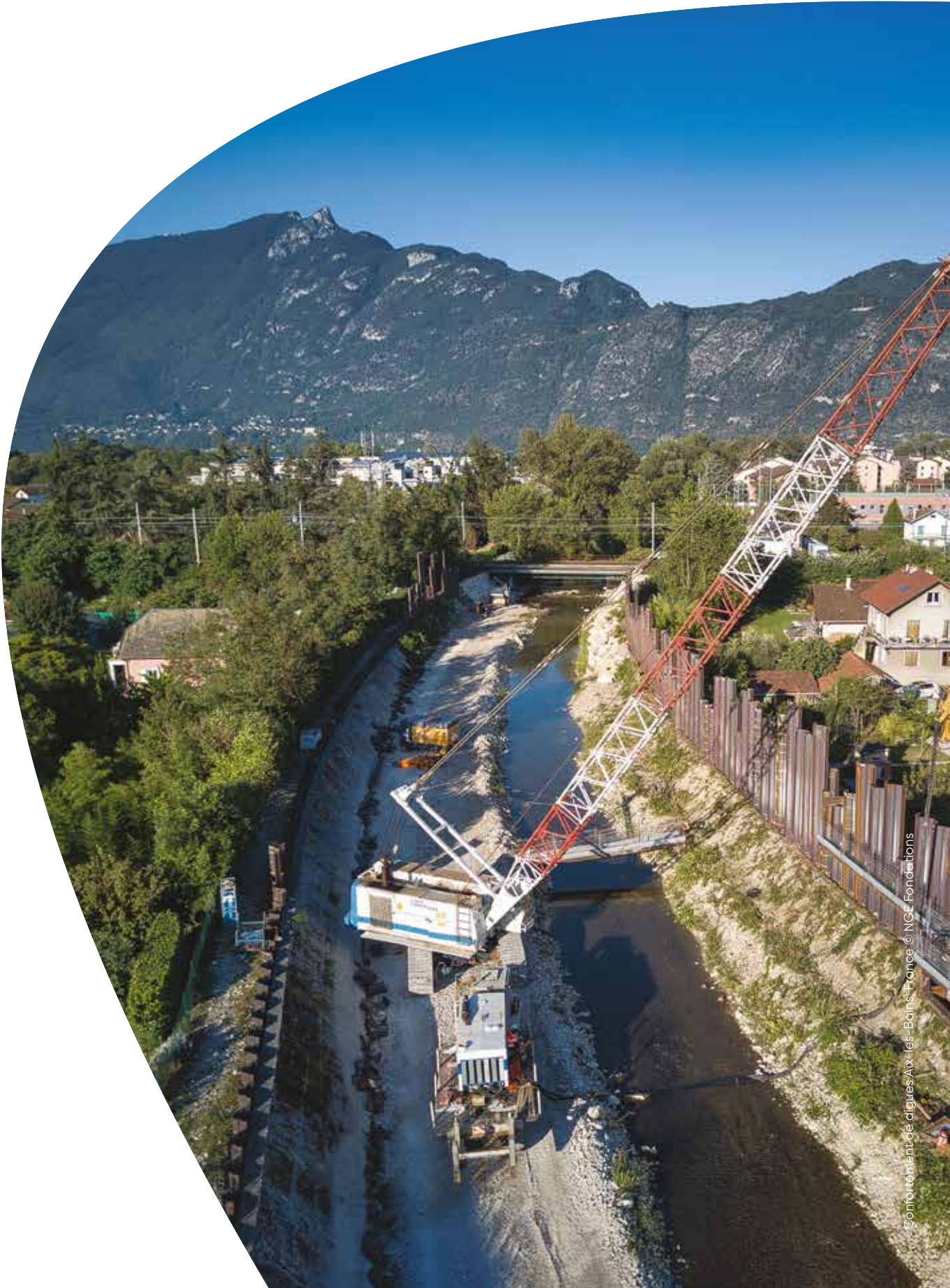


Fig. 2. Comparaison des émissions des différentes solutions de protection contre les inondations considérées dans l'étude.



Comfortement de digues Aix-les-Bains, France © NGL Fondations

# 1. Contexte

Les inondations figurent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes à travers le monde, affectant plus de deux milliards de personnes entre 1998 et 2017.

Les recherches montrent de façon récurrente que les dommages causés par les inondations ont augmenté au cours des six dernières décennies. Elles identifient le développement humain dans les zones inondables et le changement climatique comme des facteurs majeurs. [21]

Le risque d'inondation dépend entre autres de l'aléa d'inondation. Ce dernier est influencé par plusieurs facteurs climatiques et non-climatiques. Les principaux facteurs climatiques incluent la capacité de rétention d'eau de l'atmosphère, sa teneur en vapeur d'eau et les caractéristiques des précipitations intenses. Les activités anthropiques jouent également un rôle crucial, influencés par la gestion des bassins versants et l'ingénierie des rivières [16-18].

***"La solution en rideau de palplanches autostable montre des économies supérieures à 20 % sur les coûts d'investissement, une réduction des délais de construction jusqu'au 50 % et une diminution pouvant atteindre 50 % des émissions de carbone"***

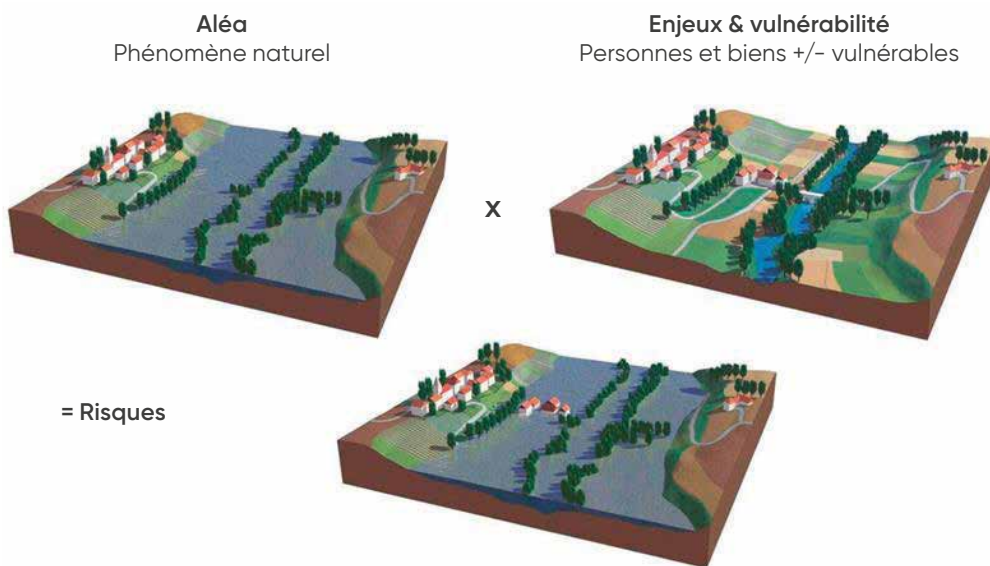


Fig. 3. Aléas, enjeux et risques: le cas des inondations. (Source: MTECT, 2004).

## 1.1. Effet du changement climatique

Les projections basées sur des modèles climatiques suggèrent une augmentation des précipitations intenses au XXI<sup>e</sup> siècle [18]. Cependant, il existe une grande incertitude quant à l'évolution future des inondations, en raison des limitations des modèles climatiques et de la variabilité naturelle du climat.

Les événements de précipitations extrêmes devraient augmenter en fréquence et en intensité, surtout en Europe du Nord et en hiver en Europe centrale, tandis qu'un signal moins clair est projeté pour la Méditerranée. Certains modèles prévoient une augmentation des fortes pluies en été en Europe centrale et orientale malgré une diminution des précipitations moyennes. Les niveaux de débit extrême pourraient devenir plus fréquents et intenses dans de

nombreuses rivières en Europe d'ici la fin du siècle, bien que le risque d'inondation puisse diminuer dans certaines régions. En particulier, dans les régions septentrionales et montagneuses, le risque d'inondations dues à la fonte des neiges au printemps pourrait augmenter en raison de la hausse des températures [16-19].

Le changement climatique est un facteur de plus en plus intégré dans les études de conception des digues. Le plus souvent, ce phénomène est pris en compte en ajoutant une marge de sécurité au niveau de protection fixé. Cette marge de sécurité peut être définie à partir de modèles climatiques, mais ceux-ci sont normalement peu fiables, complexes et coûteux.

## 1.2. Inondations en France

En 2023, le Service des Données et Études Statistiques (SDES) et l'Observatoire National des Risques Naturels ont réalisé un panorama des risques naturels en France métropolitaine et ultramarine [28]. Entre 1900 et 2021, plus de 520 événements naturels dommageables ont été recensés, dont les inondations représentent 67 % des événements entre 1900 et 2021, et 56,5 % entre 1982 et 2023.

Entre 1982 et 2022, les assureurs ont versé 49,9 milliards d'euros (en valeur 2022) d'indemnités pour les catastrophes naturelles [28]. Parmi elles, les inondations ont causé des dommages assurés à hauteur de 24,8 milliards d'euros (50 %), avec un coût annuel moyen de 604 millions d'euros. Les sécheresses ont entraîné des dommages cumulés de 20,8 milliards d'euros (42 %), soit 611 millions d'euros par an entre 1989 et 2022 [28].

De plus, en 2019, 26,7 % de la population française (environ 18 millions de personnes, dont près de 440 000 dans les DROM) résidaient dans des zones potentiellement inondables (EAIP) [28].

Seules 15 % des communes françaises, représentant environ 4 % de la population, n'ont aucun habitant dans ces zones à risque. À l'inverse, 1,1 % des communes (représentant 1,5 million de personnes) ont la totalité de leurs habitants résidant dans une zone à risque d'inondation en raison des débordements de cours d'eau [28].

Un exemple marquant de l'ampleur de ces risques est la crue exceptionnelle de novembre 1999 dans le département de l'Aude. Cet épisode a été caractérisé par des précipitations extrêmes atteignant 620 mm en 36 heures à Lézignan Corbières (soit près de 90 % de la normale annuelle) [29], provoquant 35 victimes, la destruction de plusieurs hectares de vignes et l'effondrement de 14 ponts [28]. Cet événement illustre la vulnérabilité persistante de nombreux territoires face aux inondations et la gravité des dommages qu'elles peuvent engendrer.



## 2. Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est de mener une analyse comparative de trois solutions de confortement, appliquée à une étude de cas: le rideau de palplanches autostable, le rideau de parois au coulis (équivalent ou dérivé, par exemple le confortement en sol mixé à la trancheuse) et le rechargement et/ou recalibrage en remblais ou en enrochements.

L'analyse multicritère tient en compte les aspects techniques, économiques et l'empreinte carbone, qui permettront d'établir un tableau comparatif des avantages et des inconvénients techniques de chacune des solutions. Ce tableau a pour objectif d'identifier les critères de comparaison pertinents pour l'analyse multicritère et, le cas échéant, d'en définir la pondération.



### 3. Etat des lieux

Dans la présente étude, le canal de la Robine a été retenu comme lieu d'analyse. Ce canal relie la rivière Aude à la mer Méditerranée et forme avec le canal de Jonction une branche latérale du canal du Midi. L'ensemble traverse les villes de Narbonne et Port-la-Nouvelle avant de se déverser dans la Méditerranée (Figure 4). A l'époque, le canal de la Robine jouait un rôle essentiel dans l'irrigation



Fig. 4. Localisation du Canal de la Robine.

des terres agricoles de la basse plaine, grâce à un réseau étendu de canaux de submersion. Il comportait déjà des ouvrages stratégiques comme l'écluse de garde de Moussoulens et l'écluse de Raonel pour gérer les niveaux et débits.

D'après une étude préliminaire menée par SMMAR, SMDA et VNF sur les systèmes d'endiguement dans les Basses Plaines de l'Aude, il a été déterminé que les zones résidentielles de Narbonne pourraient bénéficier d'une protection significative grâce aux digues et merlons présents sur la rive gauche du canal. Le système de protection identifié peut être subdivisé en 9 tronçons distincts. Le tronçon de linéaire objet de cette étude correspond à la digue rive gauche du canal de la Robine entre le remblai du hameau de Moussoulens et le raccordement sur le chemin «Le Pansierou» (Figure 5).

La hauteur de la crête de la digue varie de 15 m NGF en amont à 12 m NGF en aval, avec une moyenne de 14 m NGF près du domaine «La Grangette». En aval, la crête descend avec une pente d'environ 1/1000. La digue mesure environ un mètre en hauteur en amont, et entre 2 et 4 mètres sur le reste du tronçon. La largeur de la crête sans banquette est de 3 à 4 mètres, et la base mesure environ 10 mètres, atteignant 15 mètres avec banquette.

Des désordres et aménagements qui compromettent l'étanchéité de la digue en remblai sont à noter au droit de cette digue trapézoïdale: la crête de la digue présente une végétation hétérogène, avec des talus très raides montrant des signes de glissements et une absence localisée de végétation. La présence de gros arbres avec des racines

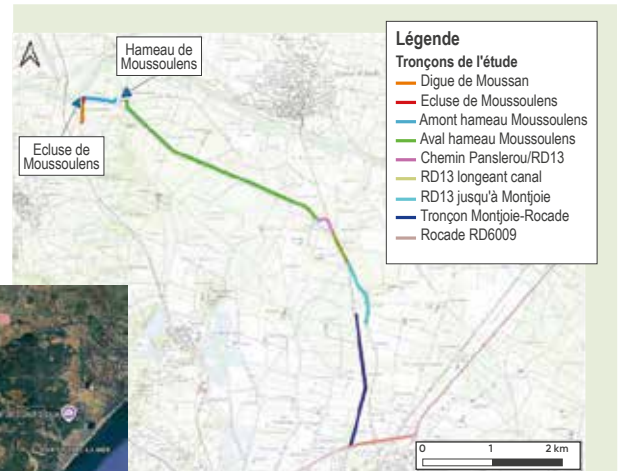


Fig. 5. Découpage de l'ouvrage d'endiguement en tronçons homogènes. (Source: état des lieux et diagnostic des remblais en lit majeur du fleuve Aude sur le DPF géré par VNF (BRLI)).

traçantes sur la crête peut augmenter le risque d'arrachement par vents forts, créant des points bas sensibles à l'érosion en cas de surverse ou des cavités sensibles à l'érosion de conduit.

Concernant la protection en cas de crue, comme illustré à la Figure 6, les

lignes d'eau simulées respectent globalement la revanche définie dans le diagnostic, montrant une capacité à gérer des niveaux d'eau supérieurs à ceux observés lors de la crue de 1999. Cependant, le point le plus bas de la banquette se situe en dessous de la revanche, révélant une vulnérabilité spécifique qui nécessite une attention particulière.

En absence de la banquette amont, la digue pourrait présenter un risque de débordement à partir d'une crue centennale. La fréquence des crues susceptibles d'entraîner un risque de rupture varie selon les zones, allant de 5 à 20 ans dans certaines régions et dépassant la crue centennale dans d'autres.

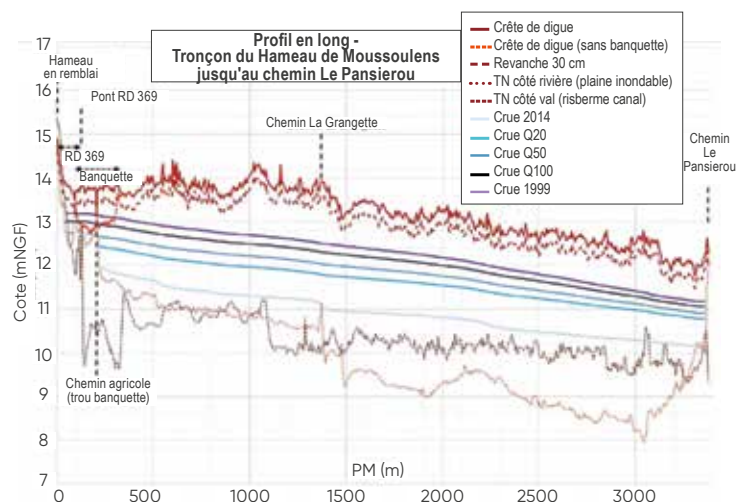


Fig. 6. Profil en long des crues de l'Aude au droit des digues et remblais du canal de la Robine. (Source: état des lieux et diagnostic des remblais en lit majeur du fleuve Aude sur le DPF Gere par VNF (BRLI)).

## 4. Considérations techniques

### 4.1. Considérations hydrauliques

Les données hydrauliques sont issues du modèle hydraulique réalisé par BRLi. Il s'agit d'un modèle 1D/2D des Basses Plaines de l'Aude calé sur la crue de 2018. Le dimensionnement des solutions considère un niveau de protection capable de retenir la cote du fil d'eau de l'Aude pour la crue exceptionnelle de 1999 avec une revanche de 30 cm.

### 4.2. Considérations géotechniques

Dans le cadre de l'étude de diagnostic des digues du Canal de la Robine, deux sondages ont été effectués. Leur localisation est présentée à la Figure 7 et les paramètres de sols sont décrits dans les Tableaux 1 et 2.



Fig. 7. Localisation des sondages géotechniques au droit de la zone d'étude.

| Nature des matériaux                                    | Epaisseur<br>(m) | Module<br>pressiométrique | Pression<br>limite | Cohésion<br>effective | Angle de<br>frottement | Poids<br>volumétrique         | Perméabilité<br>(m/s) |
|---|------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------|
|   |                  | EM<br>MPa                 | pl<br>MPa          | C'<br>kPa             | $\phi$<br>°            | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> |                       |
| Sable limoneux à quelques graviers et passés argileuses | 4,5              | 7,0 à 15,0                | 0,8 à 1,5          | 0 à 5                 | 33 à 35                | 18 à 20                       | $2 \times 10^{-5}$    |
| Argile sableuse compacte                                | >5,5             | 20 à 30                   | 2,5 à 3,0          | 10 à 15               | 18 à 25                | 20                            | $1 \times 10^{-7}$    |

Tableau 1. Principaux résultats des analyses géotechniques sur le profil 1: PM 250. Source: Etude de diagnostic, BRLi à partir de l'étude G1, Geotec.

| Nature des matériaux              | Epaisseur<br>(m) | Module<br>pressiométrique | Pression<br>limite | Cohésion<br>effective | Angle de<br>frottement | Poids<br>volumétrique         | Perméabilité<br>(m/s) |
|-----------------------------------|------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------|
|                                   |                  | EM<br>MPa                 | pl<br>MPa          | C'<br>kPa             | $\phi$<br>°            | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> |                       |
| Limon sableux à quelques graviers | 6,0              | 15 à 20                   | 0,7 à 1,0          | 0 à 5                 | 33 à 37                | 18 à 20                       | $3 \times 10^{-5}$    |
| Sable argileux à graviers         | >4,0             | -                         | -                  | 1 à 3                 | 24 à 28                | 19                            | $6 \times 10^{-7}$    |

Tableau 2. Principaux résultats des analyses géotechniques sur le profil 2: PM 1350. Source: étude de diagnostic, BRLi à partir de l'étude G1, Geotec.

## 5. Définition des solutions

Les différentes solutions de confortement sont définies et présentées ci-après. La géométrie décrite dans les figures constitue la base pour le calcul des coûts et des délais de construction. La durée de vie retenue pour les différentes solutions est de 100 ans.

### 5.1. Confortement en remblai par recul de la digue (A1)

Cette solution prévoit l'arasement de l'ouvrage existant et la construction d'une nouvelle digue en retrait à 18 m de distance (Figure 8). Ça permettrait d'assurer la continuité du système d'endiguement durant les travaux, de faciliter un séquençage fluide et rapide de l'exécution, de garantir la stabilité et la durabilité du remblai homogène, et de réduire l'influence du canal pour améliorer la robustesse globale de l'ouvrage.

Pour la construction de la nouvelle digue, il est considéré que les matériaux des digues existantes ne pourront pas être totalement réutilisés en raison de la présence de végétation

sur le corps de digue. Ainsi, seulement 40 % du sol constituant la digue actuelle pourront être réemployés pour la réalisation de l'ouvrage projeté. De plus, le volume de la nouvelle digue est plus de deux fois supérieur à celui de l'ouvrage initial. En conséquence, un apport complémentaire de matériaux sera nécessaire, notamment en utilisant les terrains agricoles situés à proximité. Pour l'extraction de ces matériaux, il sera indispensable de décapier environ 40 cm de terre végétale avant d'atteindre les horizons exploitables.

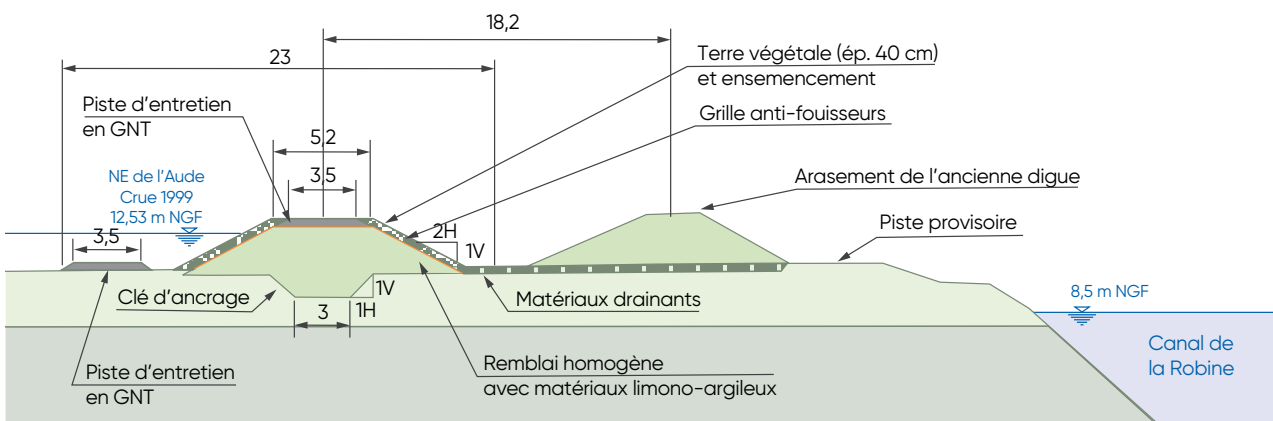


Fig. 8. Profil-type de la solution 1: recul de la digue en remblai.

## 5.2. Confortement en sol mixé à la trancheuse (A2)

Cette solution repose sur la réalisation d'un écran d'étanchéité en sol mixé (soil mixing), centré sur la crête de la digue existante (Figure 9). La technique du sol mixé consiste à mélanger le sol en place avec un matériau d'apport afin d'améliorer ses propriétés hydrauliques (réduction de la

perméabilité) et mécaniques (meilleure résistance). Elle permet ainsi de créer une barrière verticale étanche, suffisamment profonde pour limiter les écoulements internes et prévenir les phénomènes d'érosion au sein du corps de la digue.

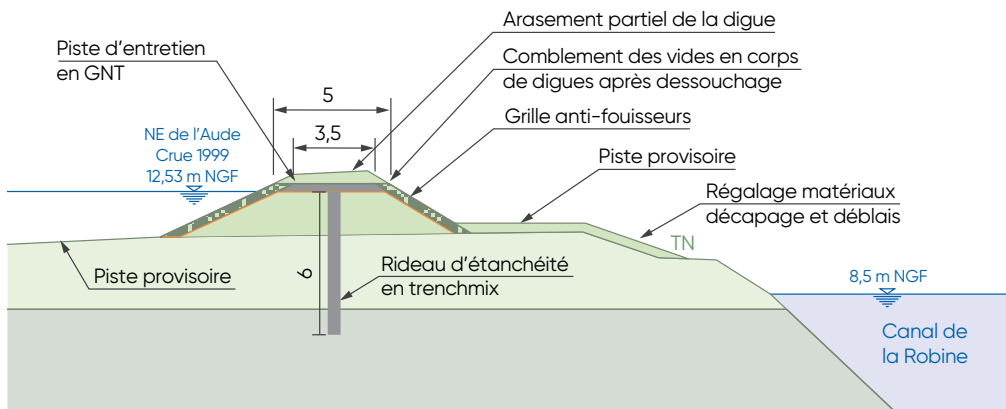


Fig. 9. Profil-type de la solution 2: Ecran d'étanchéité en sol mixé à la trancheuse au centre dans la digue.

## 5.3. Confortement en rideau de palplanches autostable (A3)

Cette solution consiste en la création d'un écran d'étanchéité en palplanches, en limite de crête côté plaine de l'Aude du profil de digue existant. Cette solution prévoit l'insertion d'un rideau de palplanches autostable dans un remblai dont la qualité est actuellement jugée insuffisante pour offrir une protection adéquate contre les inondations. L'approche proposée présente l'avantage de ne pas dépendre de la stabilité du remblai, lequel pourrait être susceptible de disparaître ou de subir une érosion en raison des inondations, des dégradations climatiques, de fouisseurs, etc. Même en cas de déformation ou de disparition du remblai, la palplanche est conçue pour être résistante et suffisante pour assurer la protection.

Ainsi, cette solution permet de minimiser les contraintes liées aux conditions d'exécution du chantier, notamment en réduisant le besoin en opérations de terrassement. De plus, elle simplifie les conditions d'exploitation, nécessitant uniquement un entretien périodique des environs de la palplanche préalablement aux visites techniques réglementaires.

Les palplanches en acier sont notamment disponibles en profils U ou Z, chacun offrant des caractéristiques structurales et des conditions de mise en œuvre spécifiques. Les profils U sont particulièrement adaptés lorsque le chantier présente des conditions de battage difficiles ou pour les cas de réutilisation, tandis que les profils Z offrent en général une capacité structurale plus élevée tout en étant plus légers, notamment grâce à une inertie accrue. Le choix du profil le plus approprié nécessite donc de considérer simultanément la fonction de l'ouvrage telles que l'étanchéité, la stabilité ou la protection externe, ainsi que les conditions de sol et le mode de mise en œuvre. Le dimensionnement consiste alors à confronter ces exigences aux propriétés mécaniques disponibles dans le catalogue des palplanches [2].

Dans certains cas, les sollicitations mécaniques suffisent à définir la section finale; dans d'autres, la stabilité mécanique étant assurée, c'est la fiche hydraulique ou le type de sol qui gouverne le choix.

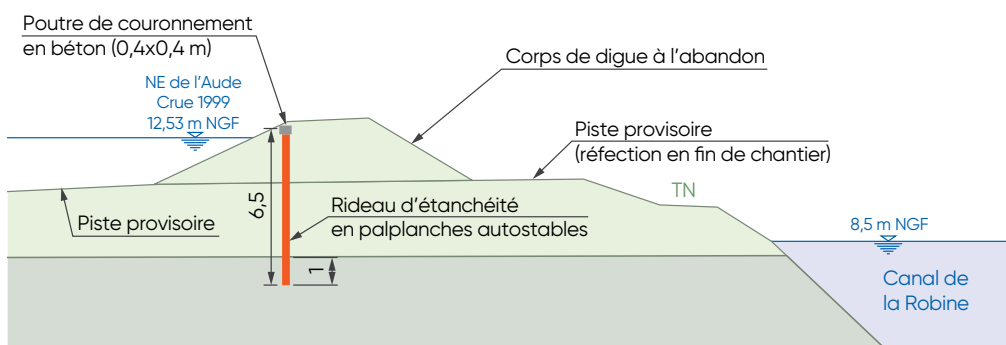


Fig. 10. Profil-type de la solution 3: Ecran d'étanchéité en sol mixé à la trancheuse au centre dans la digue.

## 6. Etude de stabilité

Afin d'étudier la stabilité d'une digue en remblai, il est nécessaire d'étudier la stabilité au glissement (stabilité au cisaillement) et les phénomènes d'érosion interne (régressive, de contact, de conduit ou la suffusion).

Pour obtenir la piézométrie dans l'ouvrage et la stabilité au glissement, l'ouvrage est modélisé sur le logiciel Plaxis qui couple l'approche hydraulique et mécanique. La vérification a été réalisée par une réduction de la cohésion et de  $\tan(\varphi)$  jusqu'à obtention d'une instabilité menant à la rupture de l'ouvrage. Dans le cas où un écran serait sollicité en flexion, une vérification de la stabilité à la butée sera menée sur K-REA, selon l'approche Eurocode 7 en vigueur, avec un modèle MEL à l'ELU et MISS à l'ELS.

Pour le phénomène d'érosion régressive, dans notre cas particulier qui concerne le suintement de l'écoulement en pied de remblai, l'état de l'art demande de vérifier que les cercles de peau en sortie d'écoulement sont stables car, tout déchaussement, même minime, de sol en sortie d'écoulement amènerait, régressivement, à une aggravation du phénomène jusqu'à la possible ruine de l'ouvrage.

Par ailleurs, il est à noter que l'érosion de conduit ne peut avoir lieu qu'à la condition qu'un conduit préexistant soit présent, dans lequel l'écoulement préférentiel s'instaure et entraîne l'érosion des sols en périphérie du conduit.

Du point de vue de la littérature, ce phénomène s'étudie théoriquement difficilement: les essais HET sont en cours de normalisation mais sont rares et coûteux.

La stratégie actuelle de l'état de l'art vise donc à s'assurer de l'absence de conduits dans le corps de digue pour empêcher l'initiation du phénomène. A ce titre, ce phénomène ne fait pas l'objet d'étude de stabilité mais de «prescriptions travaux»: purge de tous remblais impactés par des arbres et leur système racinaire, purge de tous les terriers, fauche biannuelle de la végétation pour empêcher la repousse d'arbres de haute tige, grillage anti-fouisseurs...

L'érosion de contact ne peut avoir lieu qu'au contact entre une couche graveleuse crue et un sol fin. Elle se produit, dans le pire des cas, avec des vitesses minimales voisines de  $10^{-2}$  m/s. La configuration géologique, la géométrie et la perméabilité des sols ne permettent pas l'apparition de ce phénomène qui est donc écarté du projet.

La suffusion ne peut avoir lieu que dans des sols constitués d'un squelette graveleux prédominant avec une matrice fine non prédominante. D'après la description des sols en place, les terrains présents à dominante sablo-limoneuse voire argileuse ne sont pas sensibles à ce phénomène, qui peut donc être écarté de l'étude.

### 6.1. Hypothèses générales pour l'étude de stabilité

D'après les recommandations du CFBR concernant la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, les phases normales d'entretien et surveillance, rare de crue et situation exceptionnelle de crue doivent à minima être étudiées. Par la suite, nous étudierons uniquement les deux cas jugés dimensionnants, correspondant aux deux situations suivantes:

- Exceptionnelle de crue (présente)  
Crue de 1999 (>Q100)
- Exceptionnelle de crue (future)  
Crue de 1999 + 50 cm pour le scénario «réchauffement climatique»

Des coefficients de sécurité s'appliquent aux paramètres du sol et au modèle de calcul. Ils sont résumés dans le tableau suivant:

| Situations                                  | Coefficient partiel $\gamma_m$ sur $c'$ et $\tan \phi'$ | Coefficient partiel $\gamma_m$ sur le poids volumique | Coefficient de modèle $\gamma_d$ |
|---|---|---|----------------------------------|
| <b>Normale d'exploitation</b>               | 1,25  | 1   | 1,2                              |
| <b>Rare de crue</b>                         | 1,2   | 1   | 1,2                              |
| <b>Transitoire ou rare</b>                  | 1,1   | 1   | 1,2                              |
| <b>Exceptionnelle de crue</b>               | 1   | 1   | 1,2                              |
| <b>Extrêmes de crue, sismique ou autres</b> | 1   | 1   | 1,1                              |

Tableau 3. Coefficients partiels et de modèle pour l'ELU de stabilité d'ensemble (glissement). Source: CFBR, 2015.

Pour faciliter l'analyse et éviter les erreurs de paramétrage, nous rechercherons à obtenir dans Plaxis les coefficients de sécurité suivants:

Situation exceptionnelle de crue:  $F = 1.32 (1.1 \times 1.2)$

Le profil retenu pour l'étude géotechnique est le profil dit sans banquette, celui-ci correspond au profil type de 87 % du linéaire du tronçon «Aval Hameau de Moussoulens».

Le profil géotechnique de la digue au droit du PM1350 est présenté dans Figure 11.

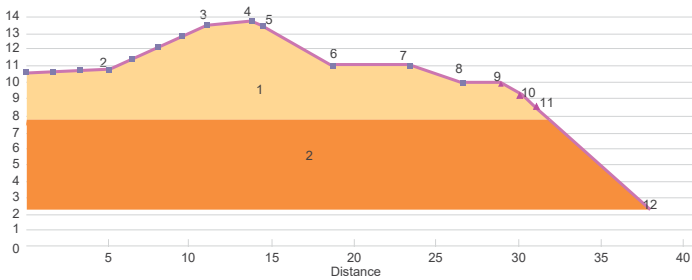


Fig. 11. Profil géotechnique de la digue au droit du PM1350.

Dans le tableau suivant les données hydrauliques au droit du profil de digue au PM1350 sont présentées.

| Situation                                     | Niveau plaine côté Aude | Niveau canal de la Robine |
|---|-------------------------|---------------------------|
|   | m NGF                   | m NGF                     |
| Exceptionnelle de crue (Crue de 1999)         | 12,53                   | 8,5                       |
| Exceptionnelle de crue (Crue de 1999 + 50 cm) | 13,03                   | 8,5                       |

Tableau 5. Caractéristiques géotechniques au droit du profil PM1350.

## 6.2. Etat initial

Les résultats du calcul de stabilité pour l'état initial en Plaxis révèlent un coefficient de sécurité de 1,17, ce qui est inférieur à l'objectif de 1,32 fixé par le CFBR. Cette valeur indique une marge de sécurité insuffisante, nécessitant des mesures correctives pour atteindre les normes requises. Les phénomènes en jeu comprennent principalement l'érosion régressive des sables sous l'action de l'écoulement, et un glissement de grande ampleur qui entre en interaction avec la berge du canal. Pour améliorer la stabilité du modèle et assurer sa convergence, il a été nécessaire d'adoucir la berge. Cela est dû au fait que, théoriquement, la raideur de la berge présente un risque de glissement de peau, probablement compensé dans la réalité par la végétalisation existante.

Les données résumées ci-dessous proviennent du rapport géotechnique préalable G1 et sont utilisées pour mener les vérifications nécessaires:

| Matériaux                 | Poids volumique      | Cohésion effective | Angle de frottement effectif | Perméabilité         |
|---------------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|----------------------|
|                           | (kN/m <sup>3</sup> ) | kPa                | °                            | m/s                  |
| Limons sableux [1]        | 19                   | 1'                 | 35                           | 3 x 10 <sup>-5</sup> |
| Limons argilo-sableux [2] | 19                   | 10                 | 22                           | 6 x 10 <sup>-7</sup> |

Tableau 4. Caractéristiques géotechniques au droit du profil PM1350.

\* Une cohésion de 1 kPa a été retenue dans le sable pour les raisons suivantes: l'absence de cohésion amène à des divergences de modèle de peau difficile à exclure alors que la terre végétale et la végétation de surface de l'ouvrage apportent une stabilité de peau non négligeable. Par ailleurs, les terriers observés sur le terrain ne peuvent être créés que dans un sol un minimum cohésif. Un sol bouillant étant impropre à la possibilité de créer des terriers.

Le site présente une particularité importante: l'interaction entre le canal et la digue. Pour évaluer correctement la stabilité des solutions proposées, il est nécessaire de séparer l'analyse de la solution de confortement de l'influence du canal. Cette dissociation permet de se concentrer sur la stabilité intrinsèque de la digue et de la berge, sans être perturbée par les facteurs externes liés au canal.

Une fois cette stabilité confirmée, nous réintégrons les influences du canal pour effectuer une évaluation globale de la stabilité du système. Cette approche méthodologique est essentielle pour garantir que les solutions proposées sont non seulement adaptées aux conditions spécifiques du site, mais aussi qu'elles assurent la sécurité structurelle de la digue. En d'autres termes, elle nous permet de vérifier que les solutions sont robustes et fiables, même lorsqu'elles sont soumises aux influences complexes du canal.

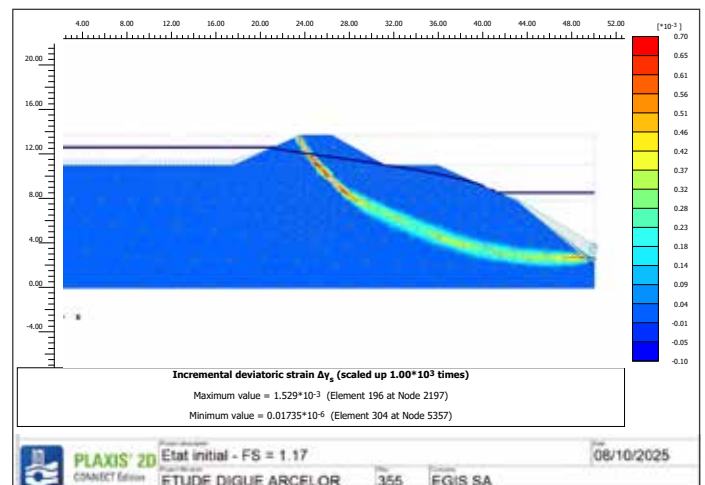


Fig. 12. Analyse de stabilité de condition actuelle de digue.

### 6.3. Confortement en remblai (A1)

Pour la berge, la marge de sécurité est insuffisante ( $F = 1,26$ ), mais son glissement n'impacte pas la digue qui a été reculée en dehors de la zone d'influence géotechnique de la berge. En reculant la digue, on cherche à améliorer sa stabilité en la plaçant en dehors de la zone d'influence géotechnique de la berge.

Pour déterminer le niveau de stabilité de la digue en elle-même, sans influence de la berge, le canal a été supprimé

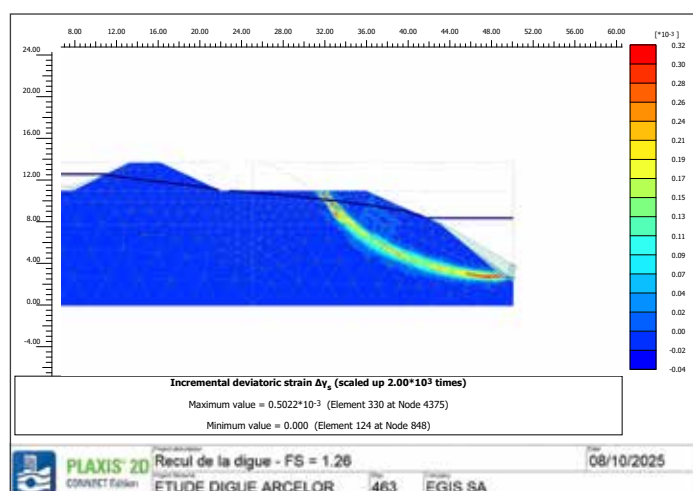


Fig. 13. Analyse de stabilité de la digue considérant la berge.

de la coupe. La marge de sécurité est suffisante ( $F = 1,66 > 1,32$ ) en prenant en compte les glissements de peau, donc il garantit l'absence d'érosion régressive. Une particularité importante du site est que le recul de la digue entraîne une réduction de la zone inondable de l'Aude. Cette modification peut avoir un impact significatif sur le comportement hydraulique du secteur, notamment en cas de crue.

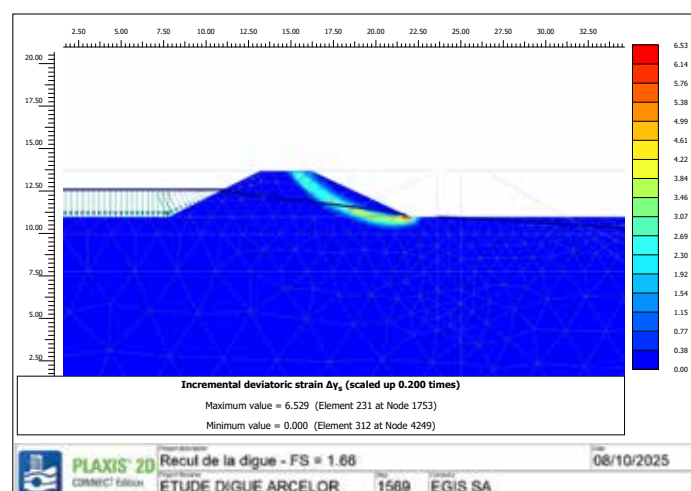


Fig. 14. Analyse de stabilité de confortement en remblai après la correction de stabilité de la berge.

### 6.4. Confortement en sol mixé à la trancheuse (A2)

La mise en place d'un écran d'étanchéité en sol mixé dans le corps de digue permet d'obtenir une marge de sécurité adéquate ( $F = 1,372 > 1,32$ ). L'ancrage de l'écran d'étanchéité dans l'argile sous-jacente réduit significativement la piézométrie en berge, renforçant ainsi sa stabilité. Néanmoins, l'écran n'est pas dimensionné pour supporter le déchaussement du remblai. Ainsi, le maintien de l'entretien de la digue est rendu essentiel, car le remblai est structurant.

Si on néglige la contribution du remblai à la stabilité mécanique, le sol mixé à la trancheuse est impossible en raison des moments à reprendre par l'écran.

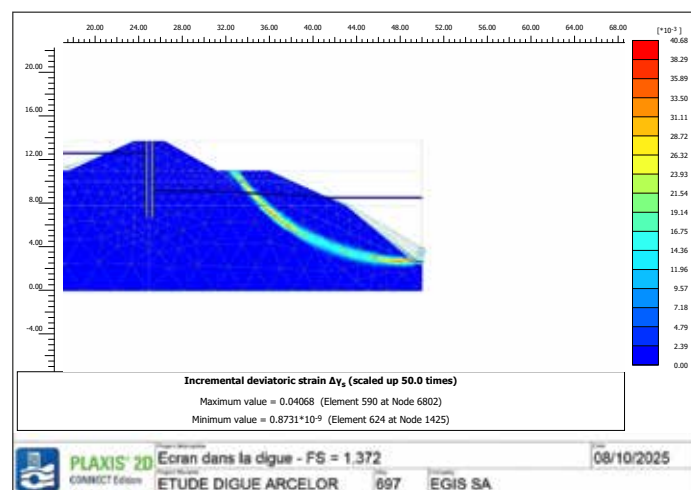


Fig. 15. Analyse sur Plaxis de stabilité de confortement en sol mixé à la trancheuse.

## 6.5. Confortement en rideau de palplanches autostable (A3)

Cette configuration consiste à installer un écran et à négliger le corps de digue afin de laisser celui-ci comme habitat écologique. De fait, le remblai devient un lieu d'accueil de la végétation et d'animaux fouisseurs. Les interventions humaines se limitent à s'assurer que l'activité environnementale n'amène pas de dégradation à l'organe qui assure l'endiguement à savoir la palplanche. Au regard des dégradations que pourrait subir le remblai contigu à la palplanche, celui-ci est négligé dans l'analyse de stabilité car susceptible de ne plus apporter une butée significative à l'ouvrage.

Si l'écran en palplanches est installé au milieu de la crête, le minimum de stabilité est assuré par la berge avec un coefficient de sécurité de 1,376. Cependant, si l'écran en palplanches est installé en limite de la crête côté inondation pour renforcer la stabilité de la digue, le facteur de sécurité est augmenté (F = 1,40). C'est cette seconde configuration qui est considérée dans l'analyse suivante.

D'un point de vue mécanique, la fiche est surdimensionnée, mais c'est la fiche hydraulique qui dimensionne l'ouvrage. Si l'on souhaite que l'écran soit entièrement autostable,

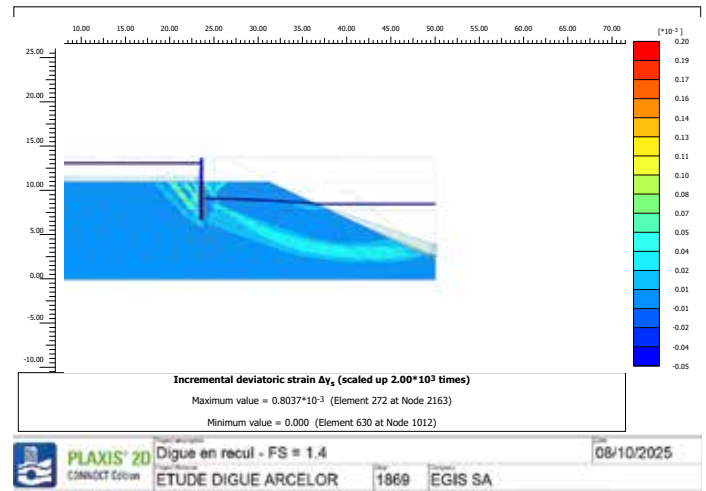


Fig. 16. Analyse sur Plaxis de stabilité de confortement en palplanche.

une AZ 12-770 serait nécessaire. Néanmoins, ce profil pourrait être difficile à ficher dans l'argile, alors un module plus élevé est choisi pour apporter plus de confort sur les conditions d'ancrage: AU 14 ou AZ 13-770.

## 6.6. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée afin d'évaluer la variation de la marge de sécurité en fonction de la cohésion, de l'angle de frottement et de la perméabilité des sables. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6.

Une cohésion de 1 kPa est considérée comme minimum car une cohésion nulle apparaît globalement impossible au regard des données géométriques disponibles (la géométrie de l'ouvrage en l'état serait injustifiable).

La perméabilité est particulièrement significative dans cette analyse: une faible perméabilité des sables amène par exemple à une élévation significative de la stabilité de la digue en remblai car elle permet d'homogénéiser le gradient et réduire la piézométrie dans le corps du remblai.

A l'inverse, ce point semble défavorable dans l'étude de la troisième solution car elle a pour effet de réduire l'effet «bouchon» de l'ancrage dans les argiles. Dans cette configuration, il est prudent de sous-évaluer la perméabilité des sables.

La solution d'écran d'étanchéité en sol mixé ne traite que les problèmes d'érosion interne, contrairement aux solutions de reconstruction de la digue en remblai et en palplanches, qui améliorent aussi la stabilité de l'ouvrage et traitent ainsi un mode de défaillance secondaire. Parmi ces options, la solution en palplanches autostables offre une amélioration de stabilité encore plus significative.

Scénario de base

|                                     |          |              |              |                         |                         |
|-------------------------------------|----------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| $C' = 1 \text{ KPa}$                | $C' = 2$ | $\phi' = 32$ | $\phi' = 38$ | $k' = 3 \times 10^{-3}$ | $k' = 3 \times 10^{-7}$ |
| $\phi' = 35^\circ$                  |          |              |              |                         |                         |
| $k' = 3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ | kPa      | °            | °            | (m/s)                   | (m/s)                   |

| Solution 1:<br>Recul de la digue en remblai  | 1,66 | 1,88 | 1,51 | 1,82 | 1,66 | 1,76 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Solution 2:<br>Ecran dans la digue (sol mixé) et conservation de la digue  | 1,37 | 1,38 | 1,35 | 1,38 | 1,41 | 1,27 |
| Solution 3:<br>Ecran en palplanche en limite de la crête côté inondation, laisser le remblai comme non structurant | 1,40 | 1,48 | 1,36 | 1,44 | 1,49 | 1,15 |

Tableau 6. Facteurs de sécurité obtenus comme résultat d'analyse de sensibilité.

## 7. Considérations techniques complémentaires des solutions

### 7.1. Durée des travaux

La durée des travaux pour chaque solution est estimée en considérant les travaux préparatoires (installations de chantier et aménagement des accès), les travaux de construction propres à la solution, ainsi que la remise en état, le raccordement aux réseaux et le repli de chantier.

La durée complète pour chaque solution est définie comme suit:

- **Solution A1:** recul de la digue en remblai - 12 mois
- **Solution A2:** confortement en sol mixé à la trancheuse dans le corps de digue - 8,5 mois.
- **Solution A3:** confortement en palplanches autostable dans le corps de digue - 6 mois.

La durée de chantier pour la solution de remblai est la plus longue. Ce délai important s'explique par l'ampleur des terrassements à réaliser, la création d'une nouvelle digue, l'arasement de l'ancienne, mais aussi par les nombreuses opérations préalables: déboisement, dessouchage, arrachage de vignes, déplacement des réseaux et mise en place d'une zone d'emprunt pour les matériaux. L'ensemble de ces étapes successives, nécessitant de gros volumes de matériaux et des travaux sensibles aux conditions météorologiques, allonge mécaniquement la durée globale du chantier.

### 7.2. Estimation du coût des travaux

Ci-après est présentée l'estimation du coût des travaux pour chaque solution, accompagnée des principales considérations retenues pour le calcul.

#### **Solution A1 - Recul de la digue en remblai**

Estimation totale: 7,18 M€ HT:

- Coût des travaux: 5,30 M€ HT
- Prix d'acquisition foncière: 75 000 € HT
- Coûts d'entretien et de surveillance (100 ans): 1,80 M€ HT

#### *Considérations:*

La solution A1, qui consiste à reculer et reconstruire entièrement la digue en remblai, présente un coût d'investissement total de 7,18 M€ HT. Ce montant inclut le coût

de la solution de sol mixé à la trancheuse réduit la durée du chantier grâce à la rapidité de mise en œuvre du rideau d'étanchéité. Elle s'explique par une limitation des terrassements et la haute productivité de la trancheuse. Bien que certaines opérations soient similaires à la solution A1 comme le déboisement, le dessouchage ou le traitement des réseaux, l'absence de reconstruction totale du corps de digue et le caractère linéaire de l'intervention permettent d'accélérer significativement l'exécution.

La solution en rideau de palplanches autostable est la plus rapide à mettre en œuvre, avec une durée d'environ 6 mois. Cette efficacité tient au fait que la digue existante est conservée comme remblai non structural et qu'aucun terrassement massif n'est requis. Le chantier se concentre essentiellement sur l'installation rapide des palplanches (environ 50 mètres linéaires par jour), suivie de quelques travaux de finition. L'absence de reconstruction du remblai et la simplicité de mise en œuvre expliquent que cette solution soit la plus courte en durée et la moins intrusive en termes d'intervention.

des travaux (5,30 M€ HT), l'acquisition foncière nécessaire en raison du recul de la digue, ainsi que les dépenses d'entretien et de surveillance estimées sur 100 ans à 1,80 M€ HT. Bien que les travaux soient parmi les moins coûteux des trois solutions, la forte emprise foncière et la maintenance importante associée à un remblai traditionnel augmentent sensiblement le coût global.

#### **Solution A2 - Confortement en sol mixé à la trancheuse dans le corps de digue**

Estimation totale: 8,40 M€ HT:

- Coût des travaux: 6,74 M€ HT
- Prix d'acquisition foncière: € 20 000 HT.
- Coûts d'entretien et de surveillance (100 ans): 1,66 M€ HT

**Considérations:**

La solution A2, affiche un coût d'investissement de 8,20 M€ HT. Celui-ci intègre un coût de travaux élevé (6,74 M€ HT), notamment en raison du procédé technique spécialisé et du coût de la barrière étanche, ainsi que d'un coût d'entretien sur 100 ans comparable à celui d'une digue en remblai, puisque l'entretien du corps de digue doit être maintenu. L'acquisition foncière, quoique limitée, contribue également au total.

**Solution A3 - Confortement en rideau de palplanches autostable dans le corps de digue**

Estimation total: 6,49 M€ HT:

- Coût des travaux: 6,44 M€ HT
- Coûts d'entretien et de surveillance (100 ans): 42 200 € HT

**Considérations:**

La solution A3, reposant sur l'installation d'un rideau de palplanches autostable, présente le coût d'investissement le plus faible: 6,49 M€ HT. Ce résultat s'explique par l'absence totale d'emprise foncière (aucune acquisition nécessaire), un coût de travaux intermédiaire (6,44 M€ HT), et surtout un coût d'entretien très réduit. Le rideau de palplanches étant structurel à lui seul, le remblai existant est laissé en place sans nécessiter de maintenance lourde. Cette combinaison en fait la solution la plus avantageuse du point de vue de l'investissement global.

On observe une différence significative entre les coûts d'entretien du rideau de palplanches autostable et ceux des deux autres solutions étudiées. Cette différence s'explique par le fait que les palplanches autostables assurent simultanément la stabilité mécanique de la digue et le traitement du risque d'érosion interne (renard hydraulique).

En revanche, les solutions fondées sur le recul de la digue et sur le confortement par sol mixé nécessitent un suivi plus important, notamment en raison du rôle structurel conservé par le remblai et de la nécessité de maîtriser le développement de la végétation sur et autour de la digue.

Concrètement, pour les solutions de recul de la digue et de sol mixé, le dispositif d'entretien et de surveillance repose sur des inspections visuelles régulières, réalisées annuellement. S'y ajoutent aussi des inspections après les crues ou les événements climatiques extrêmes, afin d'observer le comportement de l'ouvrage et d'identifier d'éventuelles dégradations.

Ces inspections sont effectuées après fauchage, par un binôme d'agents techniques formés aux différentes tâches de surveillance et d'entretien.

Les hypothèses retenues sont les suivantes:

- inspection initiale réalisée avec un avancement de 1 à 2 km/jour par binôme;
- inspection de routine et/ou réglementaire réalisée à raison de 3 à 5 km/jour par binôme;
- inspection post événement réalisée une fois tous les 5 ans.

Par ailleurs, un contrôle régulier de la végétation est requis sur et autour de la digue, sur une bande de 5 à 10 m de part et d'autre des pieds de talus. Ce contrôle comprend deux fauchages annuels: un à l'automne et un préalable aux inspections de routine.

À l'inverse, pour la solution en palplanches autostables, les coûts d'entretien et de surveillance sont réduits et se limitent aux opérations suivantes:

- inspection initiale est réalisée avec un avancement de 1 à 2 km/jour par binôme;
- inspection réglementaire réalisée tous les 6 ans, avec un avancement de 3 à 5 km/jour par binôme;
- débroussaillage mécanique préalable à l'inspection réglementaire;
- inspection post événement réalisée une fois tous les 5 ans.

**Analyse du coût des travaux**

La solution en rideau de palplanches autostable se distingue par ses coûts globaux les plus bas, en grande partie grâce à l'absence de coût d'acquisition foncière et à des coûts d'entretien réduits. Cette solution évite de retravailler le remblai de la digue, car il n'est pas nécessaire pour la stabilité de la digue, ce qui simplifie les opérations de maintenance. En revanche, la solution de digue en remblai, bien qu'ayant des coûts de travaux initiaux plus bas, entraîne des coûts d'entretien et d'acquisition foncière élevés. La solution sol mixé à la trancheuse, bien qu'efficace, présente des coûts d'investissement plus élevés, avec des coûts de surveillance réduits. Ainsi, la solution en palplanches autostables offre un compromis avantageux entre coûts de construction, d'entretien et d'investissement.

**7.3. Bilan carbone****Estimation du bilan carbone**

L'empreinte carbone et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES) s'appuient sur les principes de la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et

les normes ISO 14040, ISO 14044, ISO 14025, ISO 21931, EN 15804, et EN 17472.

Les émissions de GES de chaque solution, exprimées en équivalents dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>e), sont présentées ci-après.

## Solution A1 - Recul de la digue en remblai

Emissions totales: 4 209 t CO<sub>2</sub>e

- Émissions associées à la phase de construction: 1 191 t CO<sub>2</sub>e
- Émissions associées à la phase d'entretien: 3 018 t CO<sub>2</sub>e

Le poste le plus émissif pendant la construction (représentant 56 % du résultat) correspond à l'approvisionnement et la mise en œuvre de grillage anti-fouisseur en acier, qui permet d'atténuer les risques d'un mode de défaillance d'érosion interne causé par les animaux fouisseurs.

Les données relatives à la phase d'entretien concernent l'entretien et la surveillance de la digue, avec notamment des travaux de débroussaillage, sur une durée de 100 ans.

## Solution A2 - Confortement en sol mixé à la trancheuse dans le corps de digue

Emissions totales: 3 876 t CO<sub>2</sub>e

- Émissions associées à la phase de construction: 1 125 t CO<sub>2</sub>e
- Émissions associées à la phase d'entretien: 2 751 t CO<sub>2</sub>e

La solution A2, présente une empreinte carbone légèrement inférieure à celle de la solution A1. Le poste le plus émissif pendant la construction (représentant 52 % du résultat) correspond à l'approvisionnement et à la mise en œuvre du grillage anti-fouisseur en acier, suivi de l'écran d'étanchéité en sol mixé à la trancheuse, qui représente 25 % des émissions. Bien que les terrassements soient réduits par rapport à la solution en remblai, les opérations restent énergivores.

La phase d'entretien et de surveillance sur 100 ans représente à elle seule 71 % des émissions totales. Le corps de digue doit en effet être maintenu régulièrement en bon état, ce qui implique des opérations récurrentes de débroussaillage et de surveillance tout au long de cette période.

## Solution A3 - Confortement en rideau de palplanches autostable dans le corps de digue

Emissions totales: 2 054 t CO<sub>2</sub>e

- Émissions associées à la phase de construction: 1 069 t CO<sub>2</sub>e
- Émissions associées à la phase d'entretien: 985 t CO<sub>2</sub>e

La solution A3 a le bilan carbone le plus performant. Avec 1 069 t CO<sub>2</sub>e en phase de construction, essentiellement liées production, au transport et à la mise en œuvre des palplanches, elle évite totalement les terrassements et la reconstruction du remblai nécessaires dans les autres solutions. La gamme *EcoSheetPile™ Plus* de palplanches considérée ici est parmi les plus performantes d'un point de vue de leur impact environnemental. Elles sont produites en Europe, au Luxembourg, à partir de 100 % d'acier recyclé en four à arc électrique, alimenté avec 100 % d'électricité provenant de sources renouvelables.

Surtout, son entretien sur 100 ans est fortement réduit, atteignant seulement 985 t CO<sub>2</sub>e, puisque le remblai n'a plus de rôle structurel et ne requiert qu'un débroussaillage ponctuel. Grâce à cette conception optimisée et durable, la solution A3 présente l'empreinte carbone totale la plus faible, confirmant l'avantage environnemental des rideaux de palplanches autostables.

## Analyse du bilan carbone

Les activités les plus émissives durant la phase de construction dépendent de la solution en lieu. En général, la fabrication des matériaux constitue la principale source d'émissions. Pour le recul de la digue (option A1) ainsi que pour le confortement par sol mixé (option A2), l'élément le plus contributeur correspond à l'approvisionnement du grillage anti-fouisseur. En revanche, dans le cas du confortement par palplanches (option A3), c'est la fabrication de ces dernières qui génère la majorité des émissions. Les procédés industriels associés à ces matériaux sont particulièrement énergivores et génèrent des émissions de carbone significatives. On constate cependant que les émissions totales pendant la phase de construction restent inférieures aux deux autres solutions.

Cependant, dans le cas des digues, l'impact lié à la phase d'entretien et de surveillance dépasse généralement celui de la construction. Les émissions sont directement corrélées aux surfaces à débroussailler: plus l'emprise de la digue est large, plus les interventions annuelles (fauchages et inspections) génèrent des émissions sur l'ensemble de durée de vie de l'ouvrage. Pour certaines solutions, la maintenance représente ainsi la part majoritaire du bilan carbone global.

Le réemploi et la fin de vie n'ont pas été considérés dans l'ACV, mais il convient de rappeler le potentiel de recyclage des matériaux: les palplanches en acier sont entièrement recyclables et peuvent être réutilisées jusqu'au 10 fois (Figure 17). Les matériaux de remblai et de déblai peuvent être réemployés indéfiniment, tandis que le sol mixé à la trancheuse présente un potentiel de recyclage nettement plus faible que les deux précédents. Le recours aux matériaux usagés ou réemployés pourrait ainsi permettre de réduire davantage les émissions liées à la phase de construction, puisque les émissions de production initiale peuvent être évitées.

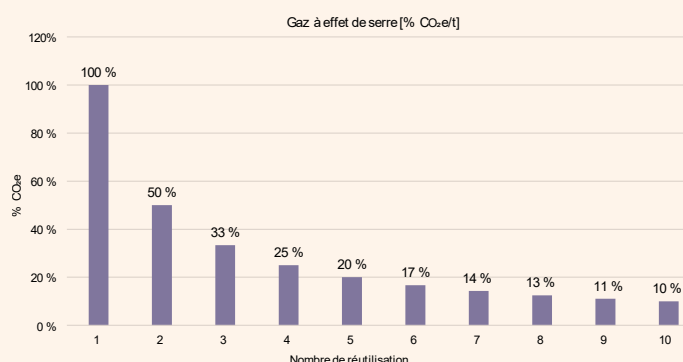


Fig. 17. Gaz à effet de serre correspondant aux palplanches en acier en considérant le nombre de réutilisations possibles.

## 8. Analyse comparative des solutions

### 8.1. Adaptation à la géométrie de l'ouvrage

Il faut considérer les propriétés du site ainsi que les caractéristiques de chaque solution en relation à la géométrie de l'ouvrage.

Les travaux de terrassement offrent une grande capacité d'adaptation à la géométrie de la digue, sauf lorsqu'il existe des corridors d'arbres entre l'ouvrage déconstruit et l'ouvrage neuf.

La solution en sol mixé présente une adaptation limitée aux sinuosités de l'alignement du système d'endiguement, principalement à cause de la trancheuse dont les angles de giration sont restreints.

Enfin, les palplanches ont des profils aux dimensions prédéfinies mais variées (forme et taille), ce qui permet une adaptation suffisante, toutefois limitée. Le choix des profils de palplanches peut être ajusté en fonction des besoins spécifiques du projet afin d'obtenir une performance optimale en termes d'adaptation à la géométrie de la digue. Aussi, les serrures qui lient les palplanches entre elles procurent un léger degré de liberté en rotation.

Dans le contexte de la présente étude de cas, le linéaire de digue n'étant pas bordé par une ripisylve, la solution de reconstruction par terrassement offre donc une performance supérieure aux deux autres alternatives.

*"Le choix des profils de palplanches peut être ajusté en fonction des besoins spécifiques du projet afin d'obtenir une performance optimale en termes d'adaptation à la géométrie de la digue"*

### 8.2. Adaptation aux propriétés géomécaniques des sols

Le terrassement en remblai assure la stabilité et la capacité portante grâce à l'apport de matériaux de qualité, mais il requiert une évaluation rigoureuse pour éviter les tassements et instabilités dans les sols faibles.

Le sol mixé à la trancheuse convient aux sols cohésifs et peu perméables, créant une barrière étanche mais exigeant une analyse détaillée des caractéristiques du sol.

Les palplanches, toutefois, s'adaptent à divers types de sols, y compris les sols meubles ou instables, grâce à leur capacité à atteindre des couches plus stables et à améliorer la portance.

### 8.3. Accessibilité

La solution de terrassement en remblai requiert un accès suffisant pour les engins de terrassement et le transport des matériaux.

La solution en sol mixé à la trancheuse nécessite que l'engin soit obligatoirement positionné en crête, avec un besoin minimal de 3,5 mètres de large pour circuler et créer l'écran d'étanchéité. Cela peut poser des contraintes dans des zones où l'espace est restreint.

En revanche, la solution en rideau de palplanches autostable peut être battue ou fichée avec un engin déporté qui n'est pas positionné en crête de digue mais plutôt en pied. C'est particulièrement intéressant lorsque la crête de digue n'est pas carrossable (largeur en crête ou portance limitées).

### 8.4. Emprises mobilisables en phase chantier

Concernant les emprises mobilisables en phase chantier, la solution en sol mixé à la trancheuse présente une emprise au sol limitée à la largeur de l'engin, car le travail se fait principalement en place, bien qu'une zone pour le stockage temporaire de liants puisse être nécessaire.

La solution palplanche a également une emprise temporaire limitée à la zone d'installation immédiate, mais peut nécessiter un espace pour le stockage des palplanches.

En comparaison, la solution de terrassement en remblai nécessite des emprises significatives pour le stockage des matériaux et le passage des engins, ce qui peut poser des problèmes dans des zones avec des contraintes spatiales.

### 8.5. Emprise de l'ouvrage fini

La solution sol mixé à la trancheuse ainsi que la solution palplanche offrent une solution avantageuse avec une emprise minimale, intégrée dans le sol existant ou le corps de digue.

La solution de terrassement en remblai, plus large, nécessite plus d'espace, ce qui peut être une contrainte dans des zones où la contrainte foncière est importante.

### 8.6. Nuisances générées pendant les travaux

La solution de confortement en remblai implique un trafic important et une longue durée de chantier, entraînant des nuisances notables en termes de poussières, de débris ainsi que des bruits et vibrations liés aux opérations de terrassement (excavation et compactage). La réduction des poussières peut être assurée par l'utilisation de systèmes d'arrosage mobile ou de pulvérisation d'eau pour maintenir les surfaces humides, bien que ces mesures puissent devenir contraignantes en période estivale en raison des restrictions d'usage de l'eau. Un nettoyage régulier des routes et des zones de travail est également nécessaire pour limiter l'accumulation de poussières.

La solution en sol mixé à la trancheuse est généralement plus rapide et moins perturbante en termes de trafic, mais génère du bruit et des vibrations. Toutefois, plusieurs technologies permettent de limiter ces nuisances, notamment l'usage d'équipements modernes et plus silencieux pour réduire le bruit lié aux opérations de mélange et de terrassement, ainsi que l'installation de barrières acoustiques temporaires autour du chantier.

La solution en palplanches, mises en œuvre par battage, génère des niveaux de bruit et des vibrations comparables à ceux produits par la solution sol mixé à la trancheuse. Toutefois, l'utilisation de technologies existantes permet aujourd'hui de réduire fortement ces nuisances. Les vibrateurs hydrauliques, par exemple, offrent une transmission d'efforts plus régulière et peuvent réduire les vibrations ressenties dans l'environnement immédiat de l'ouvrage de 20 à 50 % selon les conditions de sol. Les vibrofonçeurs à moment variable constituent une autre avancée majeure: en modulant automatiquement l'amplitude et la fréquence, ils diminuent les pics vibratoires les plus gênants, ce qui limite le risque d'impact sur les structures sensibles situées à proximité. Enfin, les presses hydrauliques, qui enfoncent les palplanches par poussée statique, permettent une installation quasiment sans vibration et avec un niveau sonore très faible, faisant de cette méthode la plus adaptée en zones urbaines sensibles ou à proximité d'infrastructures fragiles.

## 8.7. Intégration dans le paysage

Parmi les solutions proposées, la solution en rideau de palplanches autostable s'intègre le mieux au paysage. En effet, l'ouvrage est enterré dans le corps de la digue existante, permettant à la flore de se développer à nouveau

avec le temps. Un entretien minimal est prévu, comprenant seulement un débroussaillage avant les inspections réglementaires.

## 8.8. Adaptation aux aléas climatiques

Le changement climatique accentue les risques liés aux inondations, car les crues deviennent plus fréquentes et plus intenses.

Les digues en remblai sont alors soumises à de fortes pressions hydrauliques qui peuvent provoquer surcharge, érosion externe et instabilités structurelles, en particulier au niveau des interfaces entre remblai et dispositifs d'étanchéité.

Les digues sans protection spécifique sont particulièrement vulnérables à ces effets, tandis que les solutions en sol mixé à la tranchée ou en palplanches apportent une résistance renforcée, bien que leur intégrité puisse être affectée par la répétition des cycles de charge.

Parallèlement, la sécheresse prolongée engendre des phénomènes de retrait-gonflement dans les sols argileux, provoquant la formation de fissures dans le remblai. Ces fissures favorisent les infiltrations d'eau lors des pluies suivantes, augmentant ainsi les risques d'érosion interne et de dégradation structurelle. Cette vulnérabilité est exacerbée dans les digues sans rideau d'étanchéité, alors que les écrans d'étanchéité en sol mixé à la tranchée limitent ces infiltrations malgré leur sensibilité aux mouvements du sol. Les palplanches sont moins affectées directement par le retrait mais doivent être surveillées pour éviter la formation d'interstices.

## 8.9. Acceptation par les autorités

Bien que les services de l'État soient habitués aux solutions «classiques» en remblai ou en génie civil, pour lesquelles les modalités d'entretien, de surveillance et de contrôle sont établies, l'introduction d'une solution hybride telle qu'un rideau de palplanches autostable associé à un remblai non structurel peut nécessiter une attention particulière afin de démontrer la capacité du gestionnaire à assurer un suivi performant de l'ouvrage et à anticiper d'éventuelles défaillances. Toutefois, des projets de ce type sont déjà déployés en France depuis plusieurs années et constituent aujourd'hui une alternative, pleinement alignée avec les exigences de sécurité et de gestion durable des ouvrages hydrauliques.

Grâce à un plan d'entretien simplifié et un suivi plus direct, la solution en palplanches répond efficacement aux attentes

réglementaires tout en réduisant la charge opérationnelle du gestionnaire. Des échanges constructifs avec les autorités (DREAL, SCSOH) permettent de mettre en avant ses atouts – stabilité mécanique, durabilité, maintenance minimale – et d'assurer une intégration réglementaire optimale et sereine.

Enfin, la solution peut être complétée, si nécessaire, par des dispositifs innovants tels que la solution SmartSheetPile, permettant un monitoring continu de l'état de santé structurelle de l'ouvrage et de nombreux autres paramètres. Elle permet ainsi de renforcer la capacité de détection précoce et de surveillance active, pour une infrastructure résolument tournée vers l'avenir.

## 8.10. Acceptation par les riverains

L'emprise nécessaire de l'ouvrage et son impact paysager sont des facteurs qui peuvent compromettre son acceptation par les riverains. Dans ce cas, la solution en palplanches autostables présente l'impact paysager et l'impact foncier le moins important parmi les solutions proposées.

## 9. Analyse multicritère des solutions

| Notation | Niveau           |
|----------|------------------|
| 3        | Très favorable   |
| 2        | Favorable        |
| 1        | Défavorable      |
| 0        | Très défavorable |

Tableau 7. Niveaux considérés pour l'analyse multicritère.

En tenant compte des caractéristiques de chaque solution déjà présentée, une analyse multicritère est réalisée sur la base des niveaux indiqués dans le Tableau 7.

La pondération des critères suppose une répartition de 40 % pour l'évaluation financière et de 60 % pour l'évaluation technique en considérant les pratiques d'analyse de ce type de projets.

Les résultats de cette analyse sont synthétisés et présentés dans le Tableau 8.

### Les palplanches sauvent des vies !

Découvrez comment les palplanches jouent un rôle crucial dans la prévention contre les conséquences du changement climatique.



| Critère/Sous-Critère                                  | Paramètres d'évaluation  | Pondération  | A1. Remblai | A2. Sol mixé à la tranchée | A3. Rideau de palplanches autostable |
|---|--|--------------|-------------|----------------------------|--------------------------------------|
| <b>FAISABILITE</b>                                    |  | <b>5 %</b>   |             |                            |                                      |
| Adaptation de la solution à la géométrie de l'ouvrage | Compatibilité des matériaux/technique avec la conception géométrique, facilité d'intégration, besoin de modifications (sur un ouvrage existant)          | 1,7 %        | 2           | 0                          | 1                                    |
| Caractéristiques géomécaniques des terrains en place  | Propriétés géomécaniques des sols, capacité de charge, stabilité des terrains  | 1,7 %        | 2           | 1                          | 1                                    |
| Contraintes réseaux et ouvrages GC, OH... avoisinants | Identification des réseaux et ouvrages existants, interférences potentielles, besoins de coordination  | 1,7 %        | 2           | 0                          | 1                                    |
| <b>FINANCIER</b>                                      |  | <b>40 %</b>  |             |                            |                                      |
| Coût d'investissement (M€ HT)                         | Coût total d'investissement, incluant travaux, acquisitions foncières, et entretien et surveillance sur 100 ans  |              | 7,18        | 8,43                       | 6,49                                 |
| Coût d'investissement                                 |  | 40 %         | 2,71        | 2,31                       | 3,00                                 |
| <b>CONTRAINTES D'EXECUTION</b>                        |  | <b>20 %</b>  |             |                            |                                      |
| Durée du chantier (mois)                              | Estimation de la durée totale des travaux  |              | 12 mois     | 8,5 mois                   | 6 mois                               |
| Durée du chantier                                     |  | 10 %         | 1,48        | 2,04                       | 3,00                                 |
| Nuisances générées pendant les travaux                | Identification des nuisances pour les riverains et l'environnement (nuisances sonores, vibration, environnement)   | 2 %          | 2           | 1                          | 3                                    |
| Accessibilité   | Facilité d'accès aux sites de construction besoins en infrastructures temporaires  | 2 %          | 1           | 0                          | 2                                    |
| Emprises mobilisables en phase chantier               | Zones nécessaires pour les installations de chantier, pour l'exécution des travaux   | 2 %          | 0           | 1                          | 3                                    |
| Emprise de l'ouvrage fini                             | Occupation des sols par les ouvrages achevés, impacts sur l'utilisation future des terrains  | 4 %          | 0           | 3                          | 3                                    |
| <b>ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX/SOCIAUX</b>                |  | <b>10 %</b>  |             |                            |                                      |
| Environnemental (Développement de la biodiversité)    | Impacts sur la biodiversité locale, mesures de protection et de développement de la faune et de la flore   | 1 %          | 1           | 2                          | 3                                    |
| Paysager/Social                                       | Intégration des ouvrages dans le paysage, aspects esthétiques et sociaux   | 1 %          | 1           | 1                          | 3                                    |
| Acceptation par les services de l'Etat                | Obtention des autorisations nécessaires, conformité avec les réglementations   | 6 %          | 3           | 3                          | 2                                    |
| Acceptation par les riverains                         | Implication des riverains, prise en compte de leurs préoccupations et suggestions  | 2 %          | 0           | 1                          | 3                                    |
| <b>PERFORMANCE</b>                                    |  | <b>5 %</b>   |             |                            |                                      |
| Fiabilité de l'étanchéité                             | Performance des systèmes d'étanchéité, mesures de contrôle et de maintenance régulières  | 2 %          | 3           | 1                          | 2                                    |
| Défaillance secondaire traitée                        | Identification des risques de défaillance secondaire (nivellement de point bas, stabilité, etc.), solutions pour renforcer la stabilité et la durabilité | 3 %          | 1           | 0                          | 2                                    |
| <b>EMPREINTE CARBONE</b>                              |  | <b>20 %</b>  |             |                            |                                      |
| Construction (t CO <sub>2</sub> e)                    | Estimation des émissions de CO <sub>2</sub> e liées à la construction  |              | 1191        | 1125                       | 1069                                 |
| Construction (0-3)                                    |  | 10 %         | 2,69        | 2,85                       | 3                                    |
| Entretien et surveillance (t CO <sub>2</sub> e)       | Estimation des émissions de CO <sub>2</sub> e pendant la phase d'entretien et surveillance sur 100 ans   |              | 3 018       | 2 751                      | 985                                  |
| Entretien et surveillance                             |  | 10 %         | 0,98        | 1,07                       | 3                                    |
| Emissions totales (t CO <sub>2</sub> e)               | Estimation des émissions totales de CO <sub>2</sub> e sur 100 ans  |              | 4 209       | 3 876                      | 2 054                                |
| <b>Note globale</b>                                   |  | <b>100 %</b> | <b>1,95</b> | <b>1,89</b>                | <b>2,52</b>                          |

Tableau 8. Analyse multicritère de solutions de confortement de digues.

## 10. Conclusion

L'étude comparative analyse plusieurs solutions de confortement des digues vis-à-vis de l'érosion interne selon deux scénarios : A (Crue centennale de 1999) et B (Crue 1999 + 50 cm liée au changement climatique). L'analyse couvre des aspects techniques, économiques, environnementaux, sociaux. Elle tient compte aussi des estimations de coûts, de la durée des travaux et de l'empreinte carbone des solutions envisagées, fondées sur des données de marché récentes et des bases publiques comme INIES, complétées par des données fournisseurs telles qu'ArcelorMittal.

Les résultats reposent sur une analyse multicritère dont la pondération, définie conjointement par Egis et ArcelorMittal lors d'un atelier, suit les pratiques des marchés publics. Les performances finales des solutions dépendent fortement des hypothèses de calcul et de dimensionnement propres à chacune d'elles.

L'analyse multicritère met en lumière plusieurs aspects essentiels pour évaluer les solutions de confortement de digues. La faisabilité est un critère évaluant l'adaptation de chaque solution à la géométrie de l'ouvrage et aux caractéristiques géomécaniques des terrains.

Parmi les critères liés aux contraintes d'exécution figure la durée des travaux. Les palplanches permettent de réaliser le chantier le plus rapidement, en 6 mois, c'est-à-dire la moitié de la durée nécessaire pour un chantier en remblai et environ 30 % de temps en moins par rapport à une solution en sol mixé.

Les enjeux environnementaux et sociaux sont également considérés, où la palplanche se distingue par une meilleure intégration paysagère et acceptation par les riverains.

Bien que la solution en rideau de palplanches autostable présente de très bonnes performances, son acceptation par les services de l'État constitue un enjeu clé, qui peut être abordé positivement grâce à un dialogue en amont et à une prise en compte attentive des attentes réglementaires. Les échanges préalables permettront en effet de montrer que la solution répond pleinement aux exigences de sécurité et de contrôle, en particulier sur les questions d'entretien.

La performance est mesurée par la fiabilité de l'étanchéité, où la solution en remblai et celle en palplanches offre un meilleur résultat. Dans le cas de la palplanche, elle présente l'avantage, en tant que solution autostable, de ne pas dépendre de l'état de la digue pour garantir la stabilité et la durabilité.

Enfin, l'empreinte carbone est évaluée, avec la palplanche générant les émissions les plus faibles en phase de construction (1 069 t CO<sub>2</sub>e) et pendant l'entretien (985 t CO<sub>2</sub>e), démontrant son avantage environnemental.

En termes de coût d'investissement, la palplanche est la solution la plus économique avec 6,49 M€ HT. À titre de comparaison, la solution en remblai est environ 11 % plus coûteuse, tandis que la solution en sol mixé la dépasse de près de 26 %.

En conclusion, on constate de manière générale que, si l'on prend en compte l'ensemble des facteurs évoqués précédemment, ainsi que les pondérations définies pour l'analyse multicritère, le rideau de palplanches autostable présente une meilleure performance que les deux autres solutions.



# 11. Annexe 1 – Analyse du scénario alternatif: augmentation du niveau d'eau en cas de crue

En tenant compte de l'incertitude liée au changement climatique, une seconde analyse a également été réalisée. Celle-ci considère une aggravation des phénomènes pluvieux (réchauffement climatique) et retient un niveau de protection correspondant à la cote du fil d'eau de l'Aude lors de la crue de 1999, majorée de 50 cm, avec une revanche de 30 cm.

Les solutions retenues pour le scénario B sont la digue en remblai (B1) et le rideau de palplanches autostable (B2).

La solution en sol mixé à la trancheuse n'a pas été considérée, car elle est conçue uniquement comme un écran d'étanchéité et ne reprend pas les efforts mécaniques nécessaires dans le cas d'une rehausse de digue. Les résultats de l'analyse multicritère correspondante sont présentés dans le Tableau 9.

## 11.1. B1-Confortement en remblai – recul de la digue (+ rehausse)

Cette solution consiste en l'arasement de l'ouvrage existant et en la reconstruction d'une nouvelle digue en recul par rapport à l'alignement de l'ancienne.

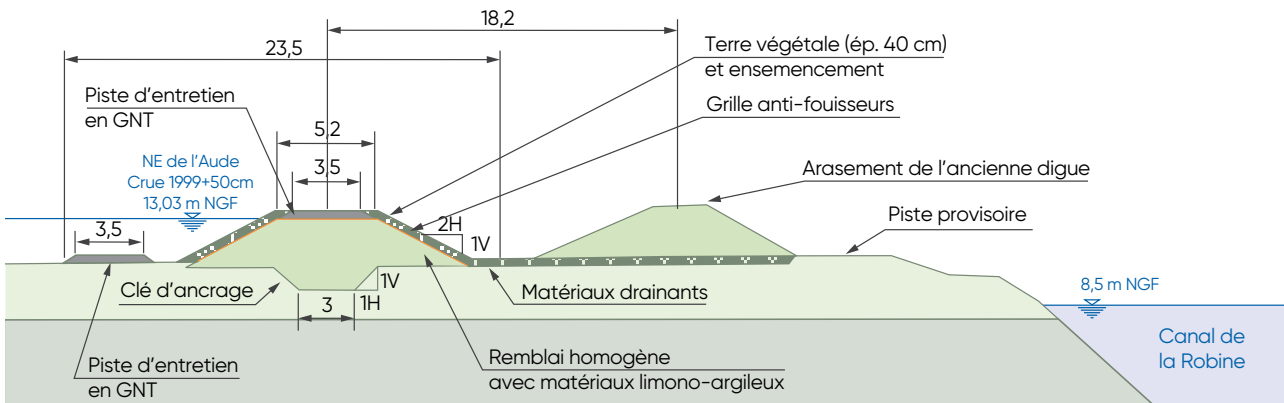


Fig. 18. Profil-type de la solution B1: recul de la digue en remblai.

## 11.2. B2-Confortement en palplanches autostables (+rehausse)

Cette solution consiste en la création d'un écran d'étanchéité en palplanche en limite de crête côté plaine de l'Aude du profil de digue existant. Pour cette solution, la digue est laissée comme non structurale (corridor écologique).

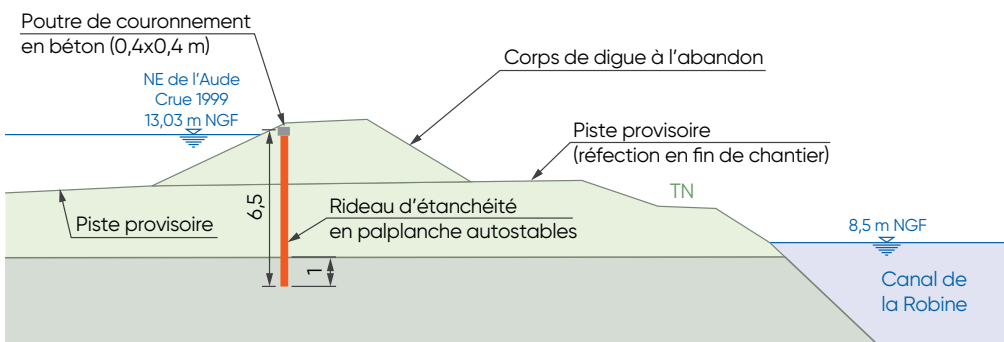


Fig. 19. Profil-type de la solution B2: écran d'étanchéité autostable en palplanches en limite de crête.

| Critère/Sous-Critère   | Paramètres d'évaluation  | Pondération | B1<br>Remblai | B2<br>Palplanche |
|--|--|-------------|---------------|------------------|
| <b>FAISABILITE</b>   |  | <b>5 %</b>  |               |                  |
| Adaptation de la solution à la géométrie de l'ouvrage                        | Compatibilité des matériaux/technique avec la conception géométrique, facilité d'intégration, besoin de modifications (sur un ouvrage existant)          | 1,7 %       | 2             | 1                |
| Caractéristiques géomécaniques des terrains en place                         | Propriétés géomécaniques des sols, capacité de charge, stabilité des terrains  | 1,7 %       | 2             | 1                |
| Contraintes réseaux et ouvrages GC, OH... avoisinants                        | Identification des réseaux et ouvrages existants, interférences potentielles, besoins de coordination  | 1,7 %       | 2             | 1                |
| <b>FINANCIER</b>   |  | <b>40 %</b> |               |                  |
| Coût d'investissement (M€ HT)  | Coût total d'investissement, incluant travaux, acquisitions foncières, et entretien et surveillance sur 100 ans  |             | 7,57          | 6,49             |
| Coût d'investissement (0-3)  |  | 40 %        | 2,57          | 3,00             |
| <b>CONTRAINTES D'EXECUTION</b>   |  | <b>20 %</b> |               |                  |
| Durée du chantier (mois)   | Estimation de la durée totale des travaux  |             | 13,5          | 5,5              |
| Durée du chantier (0-3)  |  | 10 %        | 1,48          | 3,00             |
| Nuisances générées pendant les travaux                                       | Identification des nuisances pour les riverains et l'environnement (nuisances sonores, vibration, environnement)   | 2 %         | 2             | 3                |
| Accessibilité  | Facilité d'accès aux sites de construction besoins en infrastructures temporaires  | 2 %         | 1             | 2                |
| Emprises mobilisables en phase chantier                                      | Zones nécessaires pour les installations de chantier, pour l'exécution des travaux   | 2 %         | 0             | 3                |
| Emprise de l'ouvrage fini  | Occupation des sols par les ouvrages achevés, impacts sur l'utilisation future des terrains  | 4 %         | 0             | 3                |
| <b>ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX/SOCIAUX</b>                                       |  | <b>10 %</b> |               |                  |
| Environnemental (Développement de la biodiversité)                           | Impacts sur la biodiversité locale, mesures de protection et de développement de la faune et de la flore   | 1 %         | 1             | 3                |
| Paysager/Social (Esthétique, intégration dans le paysage agricole ou urbain) | Intégration des ouvrages dans le paysage, aspects esthétiques et sociaux   | 1 %         | 1             | 3                |
| Acceptation par les services de l'Etat                                       | Obtention des autorisations nécessaires, conformité avec les réglementations   | 6 %         | 3             | 2                |
| Acceptation par les riverains  | Implication des riverains, prise en compte de leurs préoccupations et suggestions  | 2 %         | 0             | 3                |
| <b>PERFORMANCE</b>   |  | <b>5 %</b>  |               |                  |
| Fiabilité de l'étanchéité  | Performance des systèmes d'étanchéité, mesures de contrôle et de maintenance régulières  | 2 %         | 3             | 2                |
| Défaillance secondaire traitée   | Identification des risques de défaillance secondaire (nivellement de point bas, stabilité, etc.), solutions pour renforcer la stabilité et la durabilité | 3 %         | 1             | 3                |
| <b>EMPREINTE CARBONE</b>   |  | <b>20 %</b> |               |                  |
| Construction (t CO <sub>2</sub> e)   | Estimation des émissions de CO <sub>2</sub> e liées à la construction  |             | 1 263         | 1 069            |
| Construction (0-3)   |  | 10 %        | 2,54          | 3                |
| Entretien et surveillance (t CO <sub>2</sub> e)                              | Estimation des émissions de CO <sub>2</sub> e pendant la phase d'entretien et surveillance sur 100 ans   |             | 3 126         | 985              |
| Entretien et surveillance (0-3)  |  | 10 %        | 0,95          | 3                |
| Emissions totales (t CO <sub>2</sub> e)                                      | Estimation des émissions totales de CO <sub>2</sub> e sur 100 ans  |             | 4 389         | 2 054            |
| <b>Note globale</b>  |  | 100 %       | 1,86          | 2,65             |

Tableau 9. Analyse multicritère de solutions de confortement de digues: Scénario B.

## 12. Références

Standards Européens et Français, recommandations et guides utilisés pour l'étude de cas de Egis.

### Standards

|                      |   |
|----------------------|---|
| Eurocode 7           | (NF EN 1997) et ses normes d'application françaises relatif à la justification des ouvrages géotechniques.  |
| Eurocode 3           | (NF EN 1993-5) relatif aux palplanches.   |
| ISO 14040/14044      | Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre - Exigences et lignes directrices.  |
| ISO 14025            | Marquages et déclarations environnementaux - Déclarations environnementales de type III - Principes et modes opératoires.   |
| EN 15804             | Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction. |
| ISO 21931 (EN 15978) | Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul.                               |
| EN 17472             | Sustainability of construction works- Sustainability assessment of civil engineering works- Calculation methods.  |

De plus, dans le cadre de l'évaluation environnementale, la méthodologie est en accord avec la méthodologie du Ministère de la transition écologique publiée en février 2022: «Prise en compte des émissions de Gaz à Effet de Serre dans les études d'impact».

### Littérature

- [1] Aguiar, F. C., Bentz, J., Silva, J. M. N., Fonseca, A. L., Swart, R., Duarte Santos, F., & Penha-Lopes, G. (2018). Adaptation to climate change at local level in Europe: An overview. *Environmental Science & Policy*, 86, 38–63. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.04.010>.
- [2] ArcelorMittal Commercial RPS S.à.r.l. (2025) Steel Foundation Solutions - General catalogue 2025.
- [3] B. Beullac, R. Tourment, Y. Boussafir C. Chevalier, Y. Deniaud, et al. (2024) Principes et techniques de confortement et de réparation des digues. Colloque Digue, Inrae, Aix-en-Provence, France. pp.12,10.5281/zenodo.10630875. hal-0453604.
- [4] BRLi. (2022). État des lieux et diagnostic des remblais en lit majeur du fleuve Aude sur le DPF géré par VNF: Diagnostic et propositions d'aménagements.
- [5] CFBR. (2021). Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai, (Partie II – Fiches techniques. ISBN: 979-10-96371-17-4 – dépôt légal 3ème trimestre 2021.
- [6] CFBR. (2021). Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai. ISBN: 979-10-96371-17-4.
- [7] Climate Central. (2024). Analysis: Valencia floods fueled by ocean warming in the Tropical Atlantic linked to climate change. <https://www.climatecentral.org/climate-shift-index-alert/ocean-csi-spain-floods>.
- [8] Collectif IREX. (2018). ERINOH: érosion interne dans les ouvrages hydrauliques - volume 2. Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai.. ISBN13 978-2-85978-501-7.
- [9] D. Poulain, M. Sutter, R. Tourment et al. (2019). Guide Technique CFBR Méthodes et techniques de confortement des digues. Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Inondations. DOI: 10.5281/zenodo.2535489.

- [10] Duc Tran, D., van Halsema, G., Hellegers, P. J. G. J., Phi Hoang, L., Quang Tran, T., Kummu, M., and Ludwig, F. (2018). Assessing impacts of dike construction on the flood dynamics of the Mekong Delta, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 1875–1896, <https://doi.org/10.5194/hess-22-1875-2018>.
- [11] Durand, E. (2024, 18–20 juin). Aménagements fluviaux – Digues et berges: Conception, réhabilitation [Formation]. École des Ponts & Cerema.
- [12] European Environment Agency. (s.d.). River flood. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/river-flood>
- [13] France digues. Association nationale des gestionnaires des digues. (s.d.). Les digues. Définitions. Qu'est-ce qu'un système d'endiguement? – France Dignes .
- [14] G. Benito et al. (2015). Holocene flooding and climate change in the Mediterranean. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.11.014>.
- [15] Gaume, E., Borga, M., Llasat, M. C., Maouche, S., Lang, M., et al. (2016). Mediterranean extreme floods and flash floods. *The Mediterranean Region under Climate Change: A Scientific Update* (pp. 133–144). IRD Éditions. <https://hal.science/hal-01465740v2>.
- [16] Hoekstra, A.Y., De Kok, J.L. (2008). Adapting to climate change: a comparison of two strategies for dike heightening. *Nat Hazards* 47, 217–228 <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9213-y>.
- [17] Illés, Z., Nagy, L. (2022). Effect of climate change on earthworks of infrastructure: statistical evaluation of the cause of dike pavement cracks. *Geoenviro Disasters* 9, 20. <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00221-6>.
- [18] Kundzewicz, Z. W. (2015). Climate change track in river floods in Europe, *Extreme Hydrological Events (JH01 – IUGG2015)*, Proc. IAHS, 369, 189–194, 2015, DOI:10.5194/piahs-369-189-2015..
- [19] Kundzewicz, Z. W., Pińskwar, I., & Brakenridge, G. R. (2018). Changes in river flood hazard in Europe: A review. *Hydrology Research*, 49 (2), 294–302. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.016>.
- [20] Lefrou, C., Martin, X., Labarthe, J.-P., Varret, J., Mazière, B., Tordjeman, R., & Feunteun, R. (2000). Les crues des 12, 13 et 14 novembre 1999 dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn [Rapport d'inspection]. Conseil général des ponts et chaussées, Inspection générale de l'environnement.
- [21] M. Dolejš et al. (2022). On the right track of flood planning policy? Land uptake in Central-European floodplains (1990–2018). *Landsc. Urban Plan.*, vol. 228, p. 104560 doi: 10.1016/j.landurbplan.2022.104560.
- [22] Mériaux, P. Royet, P. et Folton, C. (2002). Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations. Cemagref.
- [23] Paprotny, D., Tilloy, A., Treu, S., et al. (2024). Attribution of flood impacts shows strong benefits of adaptation in Europe since 1950. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5430941/v1>.
- [24] Patouillard, S., Deniaud, Y., Beullac, B., & Tourment, R. (2024, janvier 30). Mise en perspective de la situation des digues en France par comparaison avec les ouvrages de protection contre les inondations d'autres pays dans le monde. Colloque Dignes 2024 – Systèmes et ouvrages de protection contre les inondations d'origines maritimes et fluviales. État des lieux, avancées, innovations et perspectives, Aix-en-Provence. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10592858>.
- [25] Préfet de l'Aude (2023) Dossier Départemental sur les risques majeurs dans l'Aude.
- [26] Salafranca, N., Penin, N., & Fernez, G. (2025). Etude comparative de procédés de confortement de digues fluviales en remblai contre l'érosion interne – analyse multicritère. Egis.
- [27] Schultz, B. (2008). Water management and flood protection of the polders in the Netherlands under the impact of climate change and man-induced changes in land use, *J. Water Land Dev.* No. 12, 2008: 71–94 DOI: 10.2478/v10025-009-0007-8.
- [28] Services des données et études statistiques (SDES). (2024). Aléas, enjeux, risques: quelques définitions. *Chiffres clés des risques naturels*. (Edition 2023). ISSN 2557-8138. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-risques-naturels-2023/4-aleas--enjeux--risques>.
- [29] Syndicat Mixte du Delta de l'Aude (SMDA). (2024, 2 février). CCTP – Étude du rôle des remblais du Canal de la Robine, en rive gauche des biefs de Raonel et du Gua, dans la protection contre les inondations de Narbonne – Poursuite des missions de MOE.
- [30] Thiébault, S., & Moatti, J.-P. (Eds.). (2016). *The Mediterranean Region under Climate Change: A Scientific Update*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.24549>.



Shoreham-by-Sea, Royaume-Uni © Mackley

## Avertissement

Les données et commentaires contenus dans ce catalogue sont fournis à titre d'information générale uniquement, et sans garantie d'aucune sorte. ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l. ne saurait être tenue pour responsable des erreurs, omissions ou mauvais usages des informations, quelles qu'elles soient, qu'il contient, et décline toute responsabilité résultant du caractère utilisable ou non de ces informations. Leur usage se fait aux risques de celui qui les utilise. En aucun cas ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l. ne saurait être tenue pour responsable des dommages, y compris des pertes de bénéfices, des pertes d'économies ou des dommages accessoires ou indirects, issus de l'utilisation ou de l'impossibilité d'utiliser les informations fournies. Nos gammes de palplanches sont susceptibles de modifications sans préavis.

Imprimé au Luxembourg. Imprimé sur papier FSC.

Le label FSC certifie que le bois provient de forêts ou de plantations gérées d'une manière responsable et durable (selon les principes FSC: respect des besoins sociaux, économiques, écologiques et culturels des générations présentes et futures). [www.fsc.org](http://www.fsc.org).




# EcoSheetPile™ Plus

ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l.  
Palplanches

66, rue de Luxembourg  
L-4221 Esch-sur-Alzette (Luxembourg)

E [palplanches@arcelormittal.com](mailto:palplanches@arcelormittal.com)  
[palplanches.arcelormittal.com](http://palplanches.arcelormittal.com)

 Hotline: (+352) 5313 3105

 ArcelorMittalSP

 ArcelorMittal Sheet Piling