

# CONCEPTION ET SUIVI DE TRAVAUX D'OUVRAGES DE PROTECTION DES BERGES DE LA SEINE

## **DESIGN AND FOLLOW UP OF RESTORATION WORKS OF THE RIVERBANK OF THE SEINE**

Jean-Frédéric OUVRY<sup>1</sup>, Olivia AUTRAND<sup>2</sup>, Anne Laure GUILLERMIN<sup>3</sup>, Anne-Sophie ROUEN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Antea Group, Olivet, France

<sup>2</sup> Antea Group, Arcueil, France

<sup>3</sup> Antea Group, Lyon, France

<sup>4</sup> Antea Group, Caen, France

**RÉSUMÉ** – Un mur poids en gabions de 4 m de hauteur a été conçu et dimensionné, avec un dispositif anti-affouillement de type matelas Reno en pied du mur. Un remblai compacté a été mis en œuvre à l'arrière du mur de gabions jusqu'au profil de berge existant. Ce dispositif a pour objectif de stopper l'érosion des berges sur le site situé en bordure de Seine.

**ABSTRACT** – A gabion wall of 4 m high was designed and sized with a Reno mattress at the foot of the wall to prevent scouring. A compacted backfilling was implemented at the back of the wall up to the existing riverbank. The aim of this structure is to prevent erosion of the riverbank of the site located along the Seine River.

## **1. Introduction**

Le site se situe sur la commune de Le Trait (76), en bordure de Seine.

Les berges en limite du site présentent une érosion plus ou moins marquée suivant les secteurs. Le perré initialement présent a été détruit. Les enrochements présents en partie basse de la zone constituent les restes de l'assise du perré. Cette dynamique d'érosion accentuée par le marnage de la Seine provoque l'entraînement des matériaux présents sur la berge dans la Seine. Il convenait donc de reconstituer le talus initialement présent afin de redonner sa forme initiale à la berge et procéder à un renforcement du talus de façon à ce qu'il résiste au phénomène d'érosion.

## **2. Données disponibles**

### **2.1. Synthèse des connaissances géologiques**

D'après la carte géologique et les informations fournies par la Banque de données du Sous-Sol, le contexte géologique au droit de la zone d'étude est le suivant :

- les alluvions modernes qui tapissent le fond de la plaine alluviale récente, ils correspondent à l'extension des plus grandes crues. Dans la vallée de la Seine, ces alluvions modernes sont particulièrement bien développées et peuvent avoir une puissance supérieure à 20 m. Elles sont composées de silts, de sables, de graves et d'argile. On y trouve également des lits de tourbe de 2 à 4 m de puissance. Le plus souvent, ces alluvions ne reposent pas sur le substratum

géologique mais sur les alluvions antérieures de « basse terrasse » que le cours actuel de la Seine n'a pas recréusées entièrement ;

- les alluvions anciennes qui sont généralement constituées par une grave argileuse. On y trouve également des sables, des graviers et galets hétérogènes ;
- le substratum crayeux du Crétacé supérieur.

Compte tenu du contexte historique du site, une épaisseur de remblais est présente au-dessus des alluvions modernes.



Figure 1. Photo du site avant travaux

## **2.2. Contexte géotechnique**

Des sondages ont été réalisés au droit du site dans le cadre de phases d'investigations précédemment réalisées et notamment :

- 2 sondages pressiométriques descendus à environ 12 m de profondeur à partir de la partie haute de la zone ;
- 1 sondage carotté descendu jusqu'à une profondeur de 20 m ;
- 2 sondages au pénétromètre dynamique descendus jusqu'à 15 m de profondeur par rapport au niveau du terrain naturel à partir de la partie haute de la zone ;
- 5 piézomètres implantés dans le secteur. Ils ont été descendus jusqu'à une profondeur de 7,0 m à 7,7 m environ à partir du haut du talus ;
- 5 fouilles à la pelle mécanique menées jusqu'à environ 1,5 m à 3,2 m de profondeur au droit de la zone de marnage.

Des essais en laboratoire ont également été réalisés sur les échantillons intacts prélevés dans le sondage carotté.

Suite à ces reconnaissances, deux modèles géotechniques ont pu être établis, le premier modèle correspondant à la zone de marnage et le second correspondant au talus situé à l'arrière de la zone.

Tableau 1 : Synthèse géotechnique au niveau de la zone de marnage

| Horizons                                   | Cote toit<br>m NGF         | Cote base<br>m NGF | Epaisseur<br>m | $E_M$<br>MPa | $P_{LM}^*$<br>MPa | qd<br>MPa   | $\gamma_h$<br>kN/m <sup>3</sup> | $C'$<br>kPa | $\phi'$<br>° | GTR              |
|--|----------------------------|--------------------|----------------|--------------|-------------------|-------------|---------------------------------|-------------|--------------|------------------|
| Remblais                                   | Niveau TN                  | 1,8 à 2,7          | 0,5            | -            | -                 | -           | -                               | -           | -            | -                |
| Limons sableux                             | Niveau TN à -0,5 niveau TN | -0,6               | 2,6            | 2,5          | 0,18              | Proche de 0 | 18,0                            | 0*          | 33*          | A1               |
| Tourbe                                     | -0,6                       | -2,6               | 2,0            | 3,2          | 0,3               | 1           | 18,0                            | 0*          | 28*          | F12-A2<br>F12-B5 |
| Limons sableux gris avec passages tourbeux | -2,6                       | -12,0              | 9,4            | 3,5          | 0,4               | 1,5         | 18,0                            | 0*          | 33*          | A1               |
| Alluvions anciennes / Sable                | -12,0                      | >-12,0             | -              | 5,0*         | 0,6*              | 4,0         | 18,0                            | 5*          | 35*          | -                |

NOTA (\*) : Certaines caractéristiques mécaniques ont été estimées à partir de notre connaissance de ce type de matériau.

### 2.3. Contexte hydrogéologique

L'aquifère intéressant le projet dans la zone d'étude est la nappe superficielle dans les formations alluviales à dominante limoneuse.

La Seine est fortement soumise aux marées, avec des variations de plus de 4 m entre la marée haute maximale et la marée basse maximale. Les variations piézométriques subissent l'influence de ces marées de la Seine.

Un suivi des eaux souterraines et des niveaux piézométriques a été réalisé à l'aide de capteurs de pression sur le site. Sur la base des données issues de ce suivi, un niveau de marée haute à +3,5 m NGF et un niveau de marée basse à -1,3 m NGF ont été considérés.

En bordure de berge, à marée haute, le niveau de la nappe est identique à celui de la Seine. A marée basse, il suit la topographie existante.

On note que le niveau de la nappe augmente à environ une trentaine de mètres en arrière des berges pour atteindre des cotes voisines de +4,75 m NGF.

### 2.4. Contexte sismique

En référence au décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français, le site du projet est classé en zone d'aléa très faible (accélération inférieure à 0,7 m/s<sup>2</sup>).

D'après l'EUROCODE 8, le profil stratigraphique du site correspond à la présence d'un profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide (sol de classe E).

### 2.5. Données topographiques et bathymétriques

Un relevé topographique de la zone d'étude daté de 2009 était disponible et a été utilisé pour le dimensionnement des ouvrages.

### 3. Justification des choix et des solutions techniques

La solution proposée par Antea Group pour le renforcement des berges est une solution de type mur poids en gabions, situé globalement au niveau de l'ancien perré du site, avec remblaiement à l'arrière du mur et mise en place de drains dans le remblai. Cette solution a l'avantage de redonner au site la géométrie initiale des berges. De plus, le mur poids en gabions présente une certaine souplesse et permet de protéger dans le temps les berges reconstituées du phénomène d'érosion.

Le contexte géotechnique a mis en évidence la présence d'alluvions fines sur une épaisseur importante contenant notamment des passées tourbeuses d'épaisseur non négligeable. Ces sols présentent la particularité d'être compressibles. La structure souple des gabions a alors l'avantage de pouvoir absorber les tassements et les déformations qui se développeront suite à la mise en œuvre et à l'application de la charge du remblai et du mur poids en gabions lui-même.

#### 3.1. Justification de la stabilité générale du mur poids en gabions

##### 3.1.1. Méthode de calcul

Les calculs de stabilité effectués dans le cadre de cette étude ont été réalisés avec le logiciel TALREN 4 version 2.0.3, par la méthode de calcul dite à la rupture.

##### 3.1.2. Hypothèses géotechniques générales

- *Piézométrie*

Pour tenir compte du contexte hydrogéologique du site, une nappe libre fictive est modélisée dans les profils d'étude.

Le niveau d'eau à l'arrière du mur est rabattu compte tenu de la présence de drain en pied du remblai technique.

Le niveau de la Seine a également été modélisé. Deux situations ont été retenues, marée haute avec un niveau à +3,5 m NGF et marée basse avec un niveau à -1,3 m NGF.

- *Surcharges*

Aucune surcharge définitive n'a été modélisée.

- *Nature et géométrie des couches de sol modélisées*

Les couches de sol sont modélisées sur la base des synthèses géotechniques en intégrant la géométrie du projet.

Les différents types de sol et matériaux modélisés sont les suivants :

- Sol 2 : Limons sableux ;
- Sol 3 : Tourbe ;
- Sol 4 : Limons sableux gris avec passages tourbeux ;
- Sol 5 : Sable.

- *Caractéristiques mécaniques des couches de sol modélisées*

Les caractéristiques mécaniques retenues pour les couches de sol modélisées sont les suivantes :

Tableau 2 : Caractéristiques des couches de sol modélisées

| Sol n° | Nature                               | $\gamma_h$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | C'<br>(kPa) | $\varphi'$<br>(°) |
|--------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------|-------------------|
| 1      | Remblai technique                    | 18                                 | 5           | 35                |
| 2      | Limon sableux                        | 18                                 | 0           | 33                |
| 3      | Tourbe                               | 18                                 | 0           | 28                |
| 4      | Limon sableux avec passages tourbeux | 18                                 | 0           | 33                |
| 5      | Sable                                | 18                                 | 5           | 35                |
| 6      | Gabions                              | 15,6                               | 25          | 35                |

Les caractéristiques mécaniques prises en hypothèse sont inférieures aux caractéristiques mécaniques obtenues par les essais en laboratoire qui semblaient surestimées. Elles ont été fixées sur la base de la connaissance d'Antea Group de ce type de matériaux.

De la cohésion a été prise en compte dans le remblai technique. L'hypothèse faite est que le remblai mis en œuvre sera de bonne qualité, fait en matériau d'apport et que la cohésion sera notamment due à la bonne imbrication des différents éléments entre eux. Cette qualité a par ailleurs été vérifiée durant le chantier.

### 3.1.3. Résultats

Les calculs effectués fournissent des coefficients  $F_s$  supérieurs à 1,5 pour les deux profils, en situation de marée haute et marée basse. Les profils étudiés sont donc stables à long terme.

### 3.1.4. Etude de sensibilité sur les paramètres pris en compte

Compte tenu des incertitudes sur les paramètres pris en compte dans les calculs et notamment sur les caractéristiques mécaniques des matériaux, une étude de sensibilité a été réalisée en réduisant certaines caractéristiques mécaniques.

Des calculs ont également été réalisés en prenant en compte un risque de colmatage des « drains chaussette » et en tenant compte d'une surcharge en tête du mur en gabions.

Les profils étudiés restent stables à long terme.

## 3.2. **Justification de la stabilité externe et de la stabilité interne du mur en gabions**

La stabilité externe et la stabilité interne du mur en gabions ont été vérifiées.

Les calculs ont été menés pour les situations normales et pour les situations accidentelles suivantes :

- Décrue rapide avec une différence de niveau d'eau de 2,5 m entre l'amont et l'aval ;
- Séisme avec un niveau d'eau moyen à 1,10 m / base du mur.

D'après ces notes de calcul et sur la base des hypothèses prises en compte, la stabilité du mur est assurée.

### **3.3. Justification de la capacité portante du sol de fondation du mur en gabions**

Les estimations de portance sont réalisées à partir des essais pressiométriques, suivant les règles du CCTG – Fascicule 62 – Titre V. La contrainte de référence aux ELS appliquée par le mur de gabions a été prise égale à 57 kN/m<sup>2</sup>. Celle-ci est donc inférieure à la contrainte de calcul aux ELS égale à 65 kN/m<sup>2</sup> (sous condition d'acceptabilité des tassements prévisionnels).

### **3.4. Calcul du tassement sous le mur en gabions**

Le calcul de tassement sur support homogène dû à une charge uniformément répartie a été réalisé selon le DTU 13.12 et donne le résultat suivant : pour une surcharge au sol de l'ordre de 65 kN/m<sup>2</sup>, le tassement total est estimé à environ 15 cm. Cet ordre de grandeur de tassement peut être absorbé par une structure souple telle que les gabions.

## **4. Réalisation des travaux**

### **4.1. Généralités**

Les travaux ont été réalisés du 15 mai au 30 septembre 2012 par une entreprise spécialisée dans un contexte où la sécurité du chantier était un élément prédominant.

Un des grands enjeux du chantier était également l'asservissement des durées de travaux à la marée, ce qui limitait considérablement les horaires de travail au droit du mur, les travaux de nuit étant de plus interdits.



Figure 2. Terrassement de la plage et mise en place des matelas « Reno »

### **4.2. Travaux de terrassement**

Les travaux ont été réalisés par zone depuis le haut de la zone de telle sorte à terrasser, poser le géotextile de séparation entre les terrains existants et le remblai d'apport et remblayer sur les trente premiers centimètres sur une même zone pendant une marée.

La cote de l'arase des terrassements au niveau du mur gabion a permis la mise en œuvre d'une couche minimale de 0,5 m de remblai technique qui a servi d'assise au futur mur poids.

Un remblai technique (matériau 0/80) a été mis en œuvre entre le talus existant (au préalable repris) et le mur poids en gabions par passes de 35 à 50 cm parallèlement à la mise en œuvre du mur de gabions.

Afin de drainer les eaux d'infiltration dans le remblai (marnage de la Seine), des nappes drainantes en géosynthétiques de type SOLPAC de 5 m de large et espacées de 2,5 m ont été posées au sein de la 1<sup>ère</sup> couche de remblai sur 30 cm de matériau de cette 1<sup>ère</sup> couche afin de disposer d'une assise propre.

#### **4.3. Création d'un dispositif anti-affouillement en pied du mur en gabions**

Afin de protéger le mur contre les phénomènes d'affouillement (baisse du niveau des alluvions en pied de mur), des matelas Reno ont été mis en œuvre. Il s'agit d'une structure similaire à celle des gabions constituant le mur mais qui présente une épaisseur plus faible (0,3 m).

Cette protection a été disposée sous l'ouvrage gabion et devant le mur sur une longueur égale à environ deux fois la profondeur d'affouillement prévisible, soit sur une longueur d'environ 6,0 m au total (soit 2,5 m sous le mur et 3,5 m devant le mur) permettant la protection contre un affouillement potentiel de 1,75 m.

S'agissant d'une structure souple au même titre que les cages gabions, le matelas et les cages forment un ensemble homogène se déformant de la même manière en réaction aux tassements du sol support.

#### **4.4. Mise en œuvre du mur poids en gabions**

Le linéaire total de mur était de 111,0 m environ.

La cote de la tête du mur est de +4,5 m NGF (identique à celle du perré existant au Nord). La hauteur du mur est de 4,0 m avec une base du mur située à une cote de +0,5 m NGF.

Les modules de gabions sont de 1,0 m de hauteur. La base de l'ouvrage présente une largeur de 2,5 m, le deuxième rang une largeur de 2,0 m, le troisième rang une largeur de 1,5 m et le rang de tête une largeur de 1,0 m. Le mur présente des gradins extérieurs de 0,5 m et sont remplis par des cailloux de calcaire dur 90/130 mm.

Un géotextile anti-contaminant a été mis en place à l'interface gabions/remblai technique afin d'éviter le passage des fines à travers le mur. Il a été mis en place à la fois à l'arrière du mur sur toute sa hauteur et sous le mur.

L'ancrage du mur dans le terrain existant a été réalisé grâce à un retour (cf. figure 3).



Figure 3. Mise en place du mur poids en gabions

#### 4.5. Jonctions avec les terrains existants

En amont comme en aval du mur, les jonctions entre l'ouvrage et les terrains existants ont été réalisées en enrochement percolés.

Aux deux extrémités, un géotextile a été mis en place puis les enrochements déposés avant que le béton ne soit coulé. Des barbacanes ont également été mises en œuvre au sein des enrochements percolés.



Figure 4. Mise en place des enrochements percolés et vue des travaux terminés

## 5. Conclusions

Depuis la fin des travaux, une surveillance semestrielle de l'ouvrage est réalisée. Aucun désordre (figures d'érosion/tassement) n'est observé sur le remblai technique, mise à part la prolifération de végétation qui fait l'objet de débroussaillage. Le matelas Reno a été peu à peu recouvert de vase, aucun affouillement n'est observé. Le drainage du remblai par les drains chaussettes est observable visuellement. Deux levés topographiques des différents lits du mur ont été réalisés et n'ont pas montré de déformations majeures. Ainsi, l'ouvrage dans son ensemble répond aux objectifs fixés.