

## **MUR EN SOL RENFORCÉ DE GRANDE HAUTEUR DANS LA MINE D'OR DU TASIAST EN MAURITANIE**

### ***MECHANICALLY STABILIZED EARTH RETAINING WALL WITH GREAT HEIGHT IN THE TASIAST GOLD MINE IN MAURITANIA***

Bekoin Francis Guillaume TANO, Sébastien GASTAUD, Alexandre PLASTRE  
*France MACCAFERRI, Valence, France*

**RÉSUMÉ** – Cet article présente l'utilisation de géogrilles de renforcement associées à un module de renforcement de sol à parement gabion pour la construction des murs en aile d'un broyeur de minerais. Il s'agit d'un concasseur primaire particulièrement haut (32m50) construit dans le cadre de l'extension de la mine d'or du Tasiast en Mauritanie. La construction de cet ouvrage exceptionnel a été possible grâce à l'utilisation de géogrilles de haute ténacité Paralink® en fibres PET recouvertes d'une gaine PE. Les caractéristiques mécaniques des géogrilles, celles du parement ainsi que celles du remblai technique ont été soigneusement dimensionnées afin de répondre aux contraintes géométriques et techniques du chantier. La phase de travaux a également nécessité une attention particulière à travers la formation des équipes de chantier ainsi que le contrôle permanent des différentes étapes du chantier  
Mots-clés : sol renforcé, géogrille, gabion, mine

**ABSTRACT** – This paper presents the use of reinforcement geogrids combined with a mechanically stabilized earth system with gabions for the construction of a mining crusher retaining wall. This particularly high (32m50) wall was built for the expansion of the Tasiast gold mine in Mauritania. The construction of such special work was made possible through the use of high strength Paralink® geogrids made of PET fibres protected by a PE coating. The mechanical properties of these geogrids, of the gabion facing and of the backfill were carefully selected following a proper design. During the works, special attention was given to the training of the worksite teams and to the supervision of the various steps of the works; so as the retaining walls were successfully built.

Keywords: Mechanically stabilized earth retaining wall, geogrid, gabion, mine

### **1. Contexte du projet**

La mine à ciel ouvert du Tasiast, qui est la plus grande mine d'or de Mauritanie, est située à 300km au nord de Nouakchott et à 160km au Sud Est de Nouâdhibou dans le massif de l'Adrar (désert mauritanien, Figure 1). Un projet d'expansion de cette mine en deux phases (2016-2018 et 2018-2020) prévoit de passer la capacité de traitement de l'usine de 8.000 t/j à 30.000t/j. Pour accompagner cette augmentation de production, il a été nécessaire de construire plusieurs infrastructures et équipements supplémentaires (concasseurs, etc.).

C'est ainsi que dans cette extension initiée en 2016, l'exploitant du site a souhaité faire construire un mur de concasseur primaire de plus de 30 m de hauteur. Pour une telle hauteur et au vu des charges en tête du mur (dumpers chargés à plus de 90 t), la construction d'un mur de soutènement classique en béton aurait engendré des coûts très importants. Pour faire face à ce défi technico-économique, la technique de renforcement de sol à parement minéral vertical Terramesh® System, a été utilisée pour la construction du mur. Cette technique de remblai renforcé est un système modulaire développé dans les années 1980 qui associe un gabion de façade à une nappe de renfort en grillage continu du parement. La partie gabion assure un parement soigné à l'ouvrage tandis que le renfort grillagé permet un renforcement du remblai arrière et la tenue du massif. En complément du grillage, des géogrilles de renfort à haute ténacité et de faible fluage de type Paralink® sont associées au grillage sur une longueur définie par les calculs afin d'apporter le renforcement nécessaire au remblai. La suite de cet article précisera les détails techniques de cette solution, les principes de dimensionnement ainsi que quelques modalités de mise en œuvre.



Figure 1. Localisation de la mine d'or du Tasiast

## 2. Le système modulaire de sol renforcé avec parement gabions

La Figure 2 présente les différentes composantes du système modulaire de sol renforcé utilisé pour la construction du mur de soutènement du concasseur.

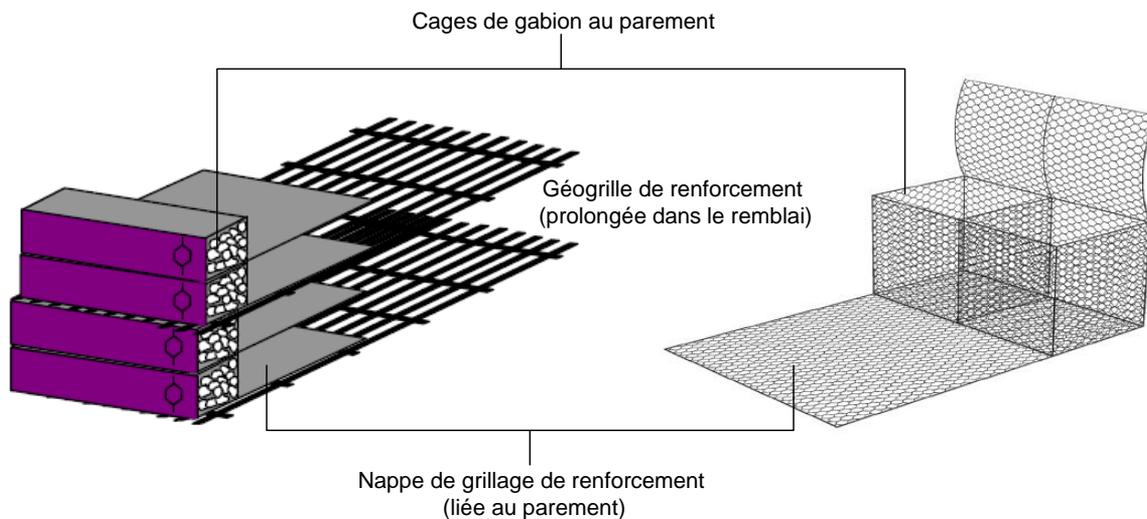


Figure 2. Principe du système modulaire de sol renforcé avec parement gabions

Ce système, utilisé pour la réalisation d'ouvrages de soutènement en remblai renforcé, comprend :

- le parement en gabions : il donne un aspect architectural à l'ouvrage et permet de confiner le remblai technique à l'arrière du parement. Le grillage constitutif est à maille hexagonale 8x10 double torsion (indémaillable) avec des fils d'acier revêtus d'un alliage Zinc95% /aluminium 5% de classe A et encapsulé dans une gaine en PVC de 1mm d'épaisseur sur le diamètre. Cette protection du fil, particulièrement résistante à la corrosion permet d'accroître la durée de vie de l'ouvrage ;
- la nappe de grillage de renforcement : en continuité du parement, la nappe de grillage de 3 m de longueur permet de renforcer le remblai technique à l'arrière du parement par mobilisation des efforts de cisaillement. En outre, puisqu'elle est physiquement liée au parement, la nappe de grillage permet d'ancrer le parement dans le remblai technique et d'assurer ainsi une continuité mécanique entre le parement et le remblai technique. En effet grâce à ce lien physique, les efforts de cisaillement mobilisés le long de la nappe de grillage peuvent s'opposer aux efforts de poussée

agissant sur le parement. Il est à noter que pour des raisons de durabilité, le grillage constitutif de cette nappe est de même nature que celui des cages gabion.

- la nappe de géogrille : cette nappe de renforcement supplémentaire permet de renforcer les zones du remblai technique non couvertes par le renforcement primaire (nappe de grillage). Les géogrilles utilisées sont des structures planes monodirectionnelles constituées de bandes réalisées avec un noyau de filaments en polyester haute ténacité, parfaitement alignés et gainés dans un revêtement de protection en polyéthylène. Utilisées depuis plus de 40 ans, ces géogrilles présentent des facteurs de réduction les plus faibles du marché (rapport entre la résistance à la traction nominale – sortie usine et la résistance de calcul à long terme en tenant compte des paramètres réduisant ses performances). Les résistances en traction nominales de ces géogrilles peuvent dépasser les 1000 kN/m.

### 3. Conception et dimensionnement

#### 3.1. Conception

La mission géotechnique a mis en évidence la présence d'un substratum volcanique altéré présent entre 2 et 6m sous le terrain naturel. Compte tenu de la descente de charge importante de l'ouvrage, la fondation de l'ouvrage a été calée à 2m sous le niveau le plus pessimiste du substratum, soit près de 8m sous le niveau du terrain naturel.

La conception (parement, type de renfort) du remblai renforcé était laissée au libre choix du fournisseur qui devait respecter un cahier des charges drastique : assurer la stabilité, pour la durée de service de la mine (25 ans), d'un mur de 32,50m de hauteur présentant un parement strictement vertical au niveau de son raccordement avec l'ouvrage de génie civil du mur de concasseur primaire. Chaque mur en aile présente une longueur de 45m et la hauteur décroît progressivement jusqu'à 14,50m, le niveau de fondation restant constant. Les murs se raccordent à l'ouvrage en béton avec un angle à 135 degrés, puis sont disposés perpendiculairement à la plateforme de déchargement des dumpers.

La Figure 3, qui présente la coupe transversale du remblai renforcé, met en évidence la conception qui a été retenue avec un parement proche de la verticale. On peut également y distinguer plusieurs zones de renforcement selon l'espacement entre les nappes de renforcements (0,5m ou 1m) et selon le type de géogrille (300 kN/m ou 400 kN/m). Les justificatifs techniques pour le dimensionnement ayant conduit à cette conception sont détaillés dans la section suivante.

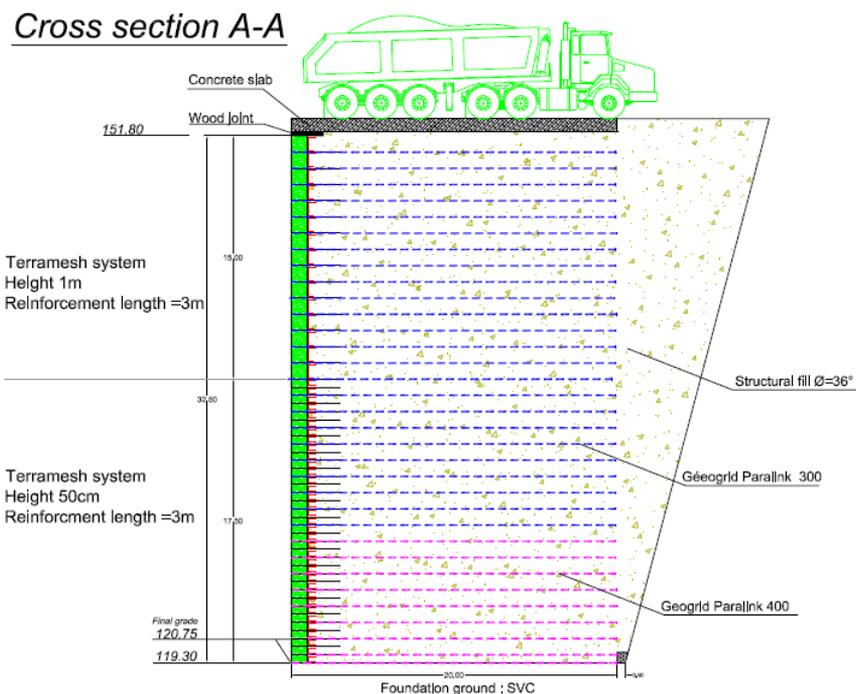


Figure 3. Coupe transversale du remblai renforcé utilisé

### 3.2. Dimensionnement

Le dimensionnement de l'ouvrage a été réalisé au moyen du logiciel de stabilité de pente Macstars afin de définir la longueur, l'espacement et le type de renfort (Figure 4) nécessaires pour assurer les stabilités externes (glissement et poinçonnement), internes, mixte et générales. Les vérifications de stabilité ont été réalisées selon la norme française NFP 94-270 d'application des Eurocodes 7 pour les remblais renforcés.

Par ailleurs, la maîtrise d'œuvre étant d'origine canadienne, la détermination de la contrainte admissible s'est effectuée selon la méthode de Vesic (très utilisée en Amérique du Nord) qui sur les caractéristiques géomécaniques ( $\gamma$ ,  $c$  et  $\phi$ ) du sol de fondation alors que l'approche française se base généralement sur des données pressiométriques ou pénétrométriques.

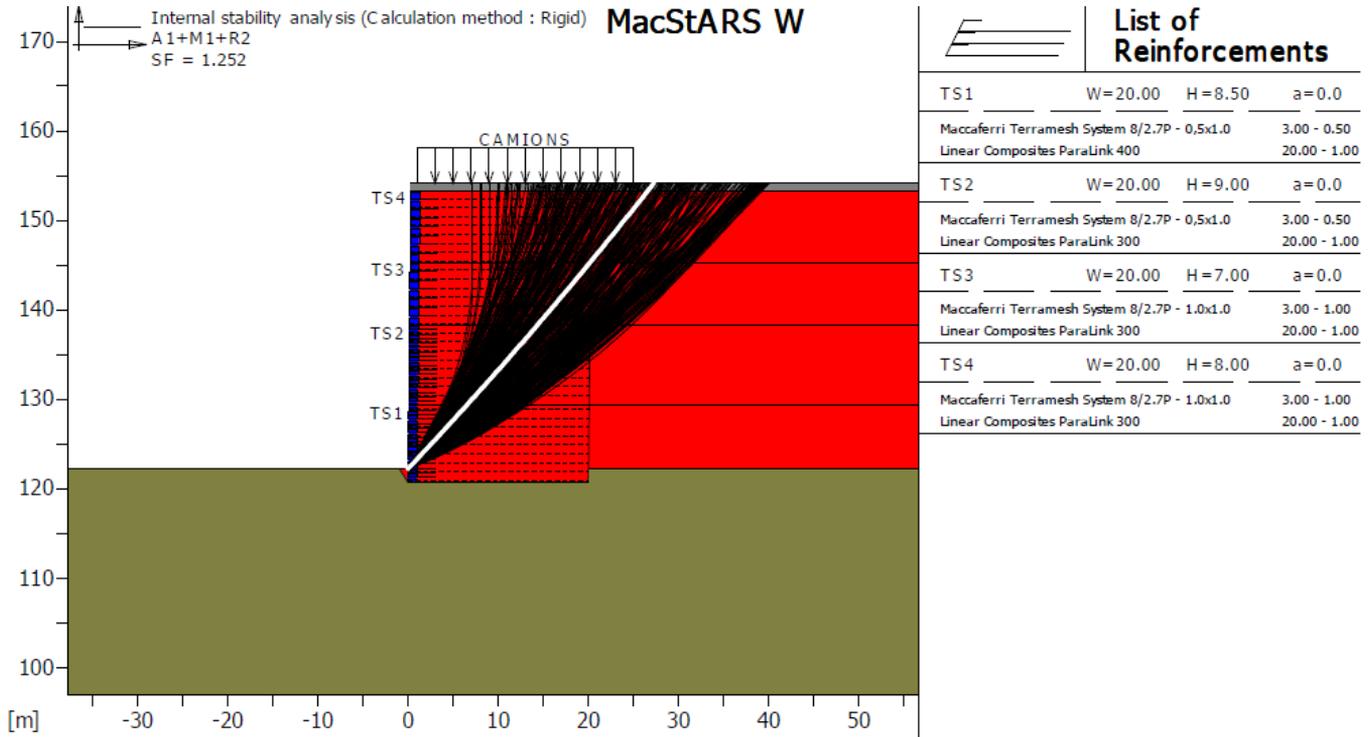


Figure 4. Calcul de stabilité NF P 94-270 avec le logiciel selon la norme.

En ce qui concerne les matériaux utilisés pour le remblai structural, ces derniers ont été soigneusement sélectionnés afin d'assurer la stabilité du massif et le bon compactage de chacune des couches de remblai. En effet, la construction d'un tel ouvrage (grande hauteur, parement vertical), nécessite la mise en place d'un remblai structural de bonne qualité tant du point de vue granulométrique que mécanique afin d'interagir au mieux avec les nappes de renforcement. Ainsi, après analyse de plusieurs types de matériaux disponibles sur le site, le choix s'est porté vers un matériau latéritique présentant les caractéristiques indiquées dans le tableau 1. Toutefois, conformément à la norme NFP 94-270, l'influence de la cohésion a été négligée dans les calculs.

En outre conformément à la NF P 94-325-1, les pierres utilisées pour le remplissage des cages gabion étaient non évolutives et présentaient une granulométrie bien précise (Tableau 1). Il est à noter que les cages ont été remplies avec des pierres extraites du site et concassées sur site. Près de 4000t de pierres ont ainsi été nécessaires pour remplir les cages. En considérant une concentration moyenne d'or de 5g/t de pierres extraites, le mur comprendrait environ 20kg d'or !

Tableau 1. Caractéristiques granulométriques et mécaniques du remblai structural sélectionné

Granulométrie	Passant à 80 $\mu$ m	Masse volumique	Cohésion	Angle de frottement
0/50	9%	2,0 t/m <sup>3</sup>	10 kPa	37 degrés

Les calculs de justification et de dimensionnement ont conduit à une longueur de renforcement de 20 m au sein du remblai structural et à une densité de renforcement plus importante en partie inférieure du remblai. Associées aux modules de renforcement à parement gabions prolongés par une nappe de

grillage de 3 m, des géogrilles de 20m de longueur ont donc été utilisées. Un espacement vertical de 1 m a été retenu pour ces géogrilles. Sur les 24m supérieurs, une géogrille de 300 kN/m a été utilisée alors qu'une géogrille plus résistante de 400 kN/m a été utilisée à la base du massif.

Aussi, des modules de hauteur 1m ont été installés sur les 15m supérieurs, alors que sur la partie inférieure des modules de 50cm ont été employés (Figure 3). En effet, les cages ayant une hauteur de 50cm présentent un meilleur comportement à la compression et se déforment moins que les cages ayant une hauteur de 1m. Pour renforcer la résistance à la compression de la cage, des tirants préfabriqués en acier de 3mm de diamètre, reliant la face avant à la face arrière du parement gabion ont été mis en place dans la partie inférieure de l'ouvrage, lorsque la hauteur au-dessus des blocs concernés dépassait 15m de hauteur. Des redans de 5cm/2m de hauteur ont également été mis en place pour apporter un léger fruit à la façade.

## 2. Exécution de l'ouvrage

La réalisation d'un ouvrage de soutènement d'une telle ampleur nécessite sûrement une mise en place soignée des structures et un strict respect d'une procédure travaux. Ainsi dans le cadre de ce projet, nous avons réalisé une procédure travaux complète pour assister l'entreprise dans l'ensemble des étapes de réalisation de l'ouvrage. Conformément aux procédures de travaux, l'exécution de l'ouvrage a nécessité plusieurs interventions de techniciens spécialisés afin de sensibiliser les ouvriers aux règles de l'art du montage des structures gabions, du positionnement et de la mise en tension des géogrilles de renfort et de la mise en place du remblai technique.

En effet, le parement en gabion doit être mis en œuvre selon la norme NFP 94-325-1 qui définit les étapes de remplissage de la cage. Il convient notamment d'assurer la bonne ligature de l'ensemble des cages entre elles au niveau des arêtes communes, de mettre en place des « tirants », fils d'acier reliant la face avant à la face arrière pour limiter les déformations du parement et d'assurer une mise en œuvre appareillée du parement (positionnement soigné des pierres à la main pour limiter les tassements interne des pierres dans la cellule). La ligature des cages a été réalisée au moyen de fils en acier galvanisés et plastifiés. Au préalable les géogrilles avaient été disposées sur le plan de pose depuis la façade jusqu'à l'arrière du massif. Elles se retrouvent ainsi « pincées » entre les modules de gabions. Chaque couche de géogrille était tendue avant la mise en place du remblai sus-jacent (Figure 5).

Pour la sécurité des ouvriers, des garde-corps ont été installés sur les parements en gabions déjà remplis. Lors de leur mise en place, les ouvriers étaient équipés de harnais avec des systèmes stop chutes.

À l'interface entre le remblai et le parement, un géotextile de filtration (Figure 5) est mis en place pour éviter la migration de fines du remblai dans le gabion.



Figure 5. Mise en tension d'une géogrille avant la mise en place du remblai

Le remblai latéritique a été soigneusement mis en œuvre, à raison de 2 passes de 25cm pour les cages de 50cm de hauteur et de 3 passes de 30/35cm pour les cages de 1m de hauteur. Le remblaiement a commencé par le milieu, puis à l'arrière du remblai et enfin contre le parement. Le remblai était régulièrement arrosé pour assurer sa mise en œuvre à la bonne teneur en eau (Figure 6).



Figure 6. Arrosage du remblai technique avant compactage

À l'arrière du parement, un compacteur plus léger (plaque vibrante) a été utilisé pour éviter les déformations du parement alors qu'un compacteur de type V3 a été utilisé pour le reste du massif. A la fin de chaque passe de compactage, le remblai devait atteindre une portance de 80 MPa par essai à la plaque. Enfin, la formation des équipes et le contrôle régulier sur chantier ont été des étapes primordiales dans la bonne réalisation de l'ouvrage. Les différentes interventions des techniciens

spécialisés ont permis aux ouvriers de bénéficier d'astuces de chantier afin de faciliter la mise en œuvre, d'assurer un meilleur rendu esthétique et de rehausser le niveau de sécurité. Des plans de contrôle ont été établis afin de suivre la progression du montage, de vérifier la qualité de la réalisation et d'assurer la stabilité du massif sans que des déformations excessives n'interviennent. Le montage de l'ouvrage a nécessité la participation d'une cinquantaine d'ouvriers pendant 3 mois, ce qui a exigé une vigilance particulière pour éviter les risques de chute. Il en résulte un ouvrage exceptionnel de par sa hauteur et de par le niveau d'exigence technique requis. Cet ouvrage, qui constitue à ce jour à notre connaissance le plus haut ouvrage de soutènement réalisé en Afrique francophone dans le secteur minier, a été possible grâce à l'association pertinente des géogrilles PET gainés PE au module de renforcement à parement en gabions.



Figure 7. Vue d'ensemble des ailes du mur de soutènement du concasseur primaire en fin de chantier

### 3. Conclusions

Dans le cadre de l'extension de la plus grande mine d'or de Mauritanie (Mine de Tasiast), un concasseur primaire de plus de 30 m de hauteur a été installé. La mise en place de cet équipement a été rendue possible grâce à la construction des murs de soutènement en aile réalisés par le biais du système modulaire de renforcement Terramesh system®. Constitué de cages de gabion au parement prolongées par une nappe de grillage, ce système modulaire de renforcement a été utilisé en association avec les géogrilles de haute ténacité Paralink® en fibres PET recouvertes d'une gaine PE.

Cet ouvrage en remblai renforcé particulièrement haut a fait l'objet d'un dimensionnement rigoureux selon les normes en vigueur afin de répondre aux contraintes géométriques et techniques du chantier. Aussi, la mise en œuvre soignée du module de sol renforcé à parement en gabion, celle de la géogrille et enfin celle du remblai technique ont permis la bonne réalisation de cet ouvrage exceptionnel qui constitue à notre connaissance l'ouvrage de soutènement le plus haut en Afrique francophone dans le secteur minier.

### 4. Références bibliographiques

- NF P 94-325-1 (2004) Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Ouvrages en gabions en grillage métallique à maille hexagonale double torsion - Partie 1 : ouvrages hors site aquatique, 24 pages.
- NF P 94-270 (2009) Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massifs en sol cloué, 186 pages.

