



1  
© MACCAFERRI

# LE MATELAS RENO, 60 ANS D'INNOVATION

AUTEUR : ALEXANDRE PLASTRE, DIRECTEUR TECHNIQUE, FRANCE MACCAFERRI

**LE MATELAS RENO PLUS (MRP), DERNIÈRE INNOVATION TECHNOLOGIQUE DE MACCAFERRI DANS LE DOMAINE DES APPLICATIONS HYDRAULIQUES, EST LE FRUIT DE L'ÉVOLUTION AU COURS DES ANNÉES DU MATELAS RENO DÉVELOPPÉ AU DÉBUT DES ANNÉES 60. IL EST DOTÉ DE TOUTES LES ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES LUI PERMETTANT D'ÊTRE PLUS ROBUSTE, PLUS DURABLE ET PLUS ÉCONOMIQUE QUE N'IMPORTE QUELLE AUTRE SOLUTION À PERFORMANCE HYDRAULIQUE COMPARABLE. UNE CAMPAGNE RÉCENTE D'ESSAI DE PERFORMANCES HYDRAULIQUES (2019-2020), COUPLÉE À DES ESSAIS PLUS ANCIENS (1984) A PERMIS DE CARACTÉRISER AVEC PRÉCISION LES PERFORMANCES HYDRAULIQUES DES STRUCTURES.**

## HISTORIQUE

L'histoire de Maccaferri a débuté en 1879 à Lavino (région de Bologne en Italie) où la "ditta Maccaferri", spécialisée dans la production d'objets en fer forgé est fondée. Ce n'est qu'en 1893 que l'entreprise artisanale s'industrialise et invente le gabion, cette structure en grillage double torsion remplie de pierre. D'abord utilisés de façon sporadique dans le domaine des travaux publics, les gabions sont plus largement utilisés après les 2 guerres mondiales pour réaliser des ouvrages de soutène-

ment dans les infrastructures routières principalement.

Ce n'est qu'en 1960 qu'un gabion de faible épaisseur et de grande surface est fabriqué pour une application en milieu hydraulique afin de protéger les berges du fleuve Reno contre l'érosion. Le Matelas Reno est né : il est composé d'une base en grillage double torsion, de cloisons en grillage appelées diaphragmes et d'un couvercle en grillage permettant de fermer la structure. À la suite de terribles inondations à Florence en 1966 (figure 2),

**1 - Vue générale -  
Protection de  
berges à Roque-  
bilière.**

**1 - General view -  
Protection of  
the banks at  
Roquebilière.**

il est très largement utilisé pour protéger les nouvelles digues du fleuve Arno, ce qui marque le début de leur utilisation massive dans les applications

contre l'érosion hydraulique, en protection de berges, de déversoirs, de flancs de canaux. Ils sont d'abord utilisés de façon empirique, puis Maccaferri investit en 1984 dans une campagne d'essai de caractérisation des performances hydrauliques des structures en gabions et matelas Reno. L'objectif de cette campagne est de définir la rugosité des structures, de définir les vitesses et contraintes tangentielles admissibles et *in fine* de déterminer le coefficient de Shields équivalent des structures gabions afin de comparer les perfor-

2- Protection des berges du fleuve Arno à Florence en Matelas Reno.

3- Schéma d'un Matelas Reno double diaphragme.

4- Photo de l'essai d'abrasion sur le fil revêtu d'une gaine polymère.

2- Protection of the banks of the Arno River at Florence with Reno mattress.

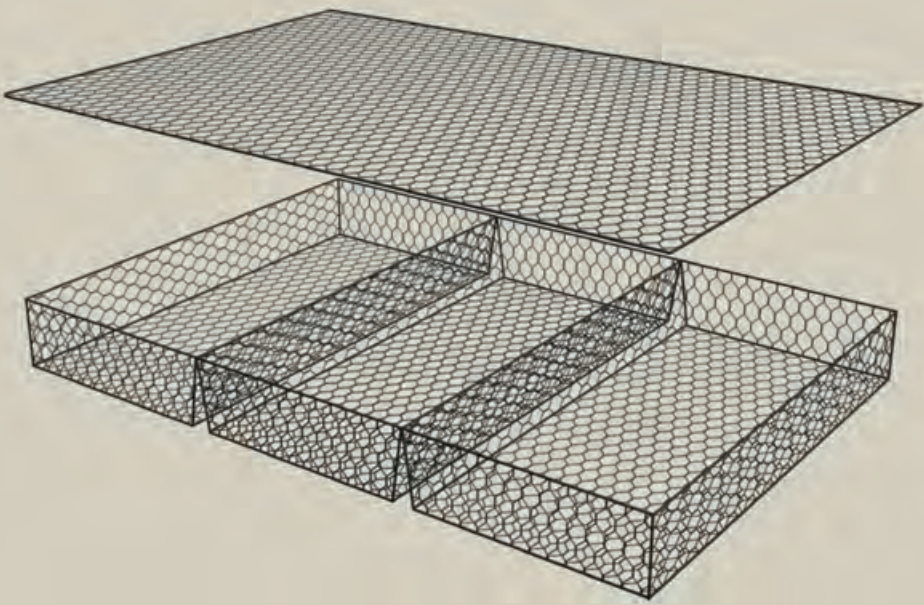
3- Diagram of a double-diaphragm Reno mattress.

4- Photo of the abrasion test on the thread covered with a polymer sheath.



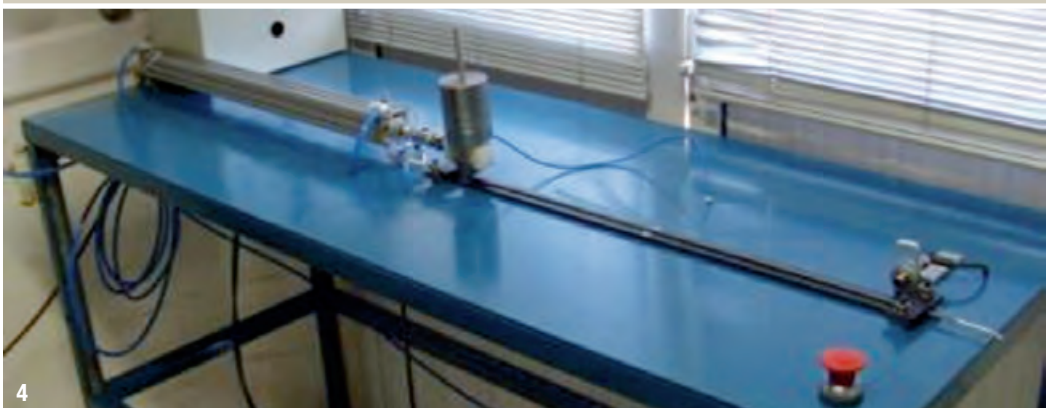
© MACCAFERRI

## SCHÉMA D'UN MATELAS RENO DOUBLE DIAPHRAGME



© MACCAFERRI

3



© MACCAFERRI

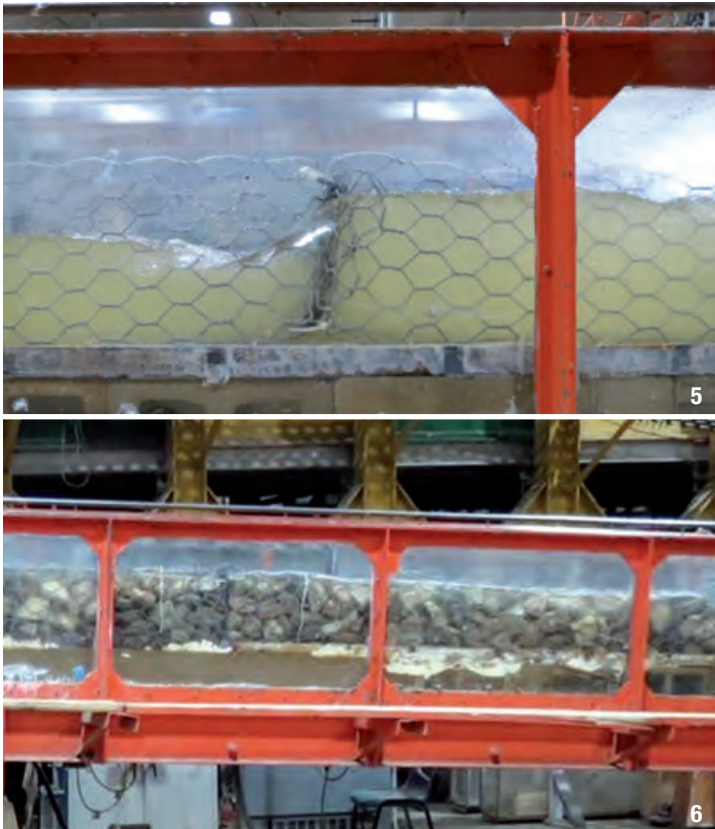
mances de ces structures par rapport à des enrochements libres. À l'issue de cette première campagne d'essai, il a pu être mis en évidence que l'utilisation de gabions permettait de réduire par un facteur de 2,5 l'épaisseur de protection nécessaire pour une performance hydraulique équivalente.

Poursuivant le développement des structures à la recherche de performances encore améliorées, Maccaferri développe en 1990 le Matelas Reno à "double" diaphragme, où les diaphragmes sont obtenus par pliage de la nappe de fond tous les 1 m, proposant des cloisons doubles dans les cellules (figure 3). Il en résulte un meilleur confinement des pierres dans les structures qui ont donc moins la possibilité de bouger dans la cage et des performances hydrauliques accrues.

### LA DURABILITÉ DU FIL

En parallèle au développement de la technologie des cages, de gros progrès sont réalisés en matière de protection du fil contre la corrosion. Si, lors de l'apparition des premiers gabions, le fil d'acier est brut, la galvanisation à chaud (Zinc) apparaît dans les années 50. C'est un premier début, qui augmente sensiblement la durée de service des structures en milieu non aquatique, mais insuffisant pour protéger le fil en milieu hydraulique sur des durées de service supérieure à 10 ans. Le revêtement organique sur fil d'acier, le PVC, fait son apparition quelques temps après. Il est extrudé autour du fil d'acier pour isoler ce dernier contre les effets de la corrosion. Dans les années 90, la galvanisation évolue et le zinc est enrichi avec de l'aluminium pour accroître la performance contre l'effet de la corrosion. Enrichie de 5% d'aluminium, la galvanisation riche (Zn 95% / Al 5%) multiplie par 3 les performances de durabilité du fil. Dans les années 2000, une galvanisation encore plus riche en aluminium (Zn 90% - 10%) améliore une nouvelle fois les performances de durabilité. Toutefois, en milieu hydraulique, la durée de service d'un ouvrage en gabion avec ce revêtement mais sans gaine organique est estimée à "seulement" 25 ans. La présence d'une gaine organique (PVC, PA6) permet d'augmenter cette durée de vie à 120 ans. D'un point de vue normatif, les performances des revêtements métalliques sont évaluées sur la base d'essais de vieillissement accéléré en atmosphères corrosives de dioxyde de soufre et de brouillard salin en laboratoire.





Pour les revêtements organiques, il est vérifié que les propriétés mécaniques (résistance à la traction mais également allongement à la rupture) des polymères ne varient pas de façon trop importante sous l'effet des rayons UV. Au-delà de la norme, d'autres essais performanciels sont contrôlés pour s'assurer que le revêtement est adapté à l'application proposée. Ainsi des essais de dureté, de résistance aux températures extrêmes (basses et hautes) et de compatibilité aux solutions chimiques acides et basiques sont également menés. En milieu hydraulique,

notamment lorsque l'écoulement est à fort charriage solide, un paramètre important est la résistance à l'abrasion du revêtement polymère. En 2019, à l'issue d'une campagne d'essai d'un an au Brésil, Maccaferri conçoit son nouveau revêtement PoliMac®, répondant aux exigences normatives, mais avec des performances mécaniques accrues, particulièrement pour la résistance à l'abrasion. Ainsi, ce revêtement de dernière génération a une résistance 10 fois plus élevée à l'abrasion que le PVC et apporte une réponse au phénomène de charriage solide. L'essai

index réalisé consiste à faire passer un poinçon de poids et dimension normalisé sur le fil et de mesurer le nombre de cycles nécessaires pour rompre la protection polymère (figure 4). À titre de comparaison, lorsque l'on applique sur un fil d'acier brut le nombre de cycles nécessaires à la rupture du revêtement PoliMac®, la section d'acier du fil est réduite de 30 %.

#### CAMPAGNE D'ESSAI HYDRAULIQUE (2019-2020)

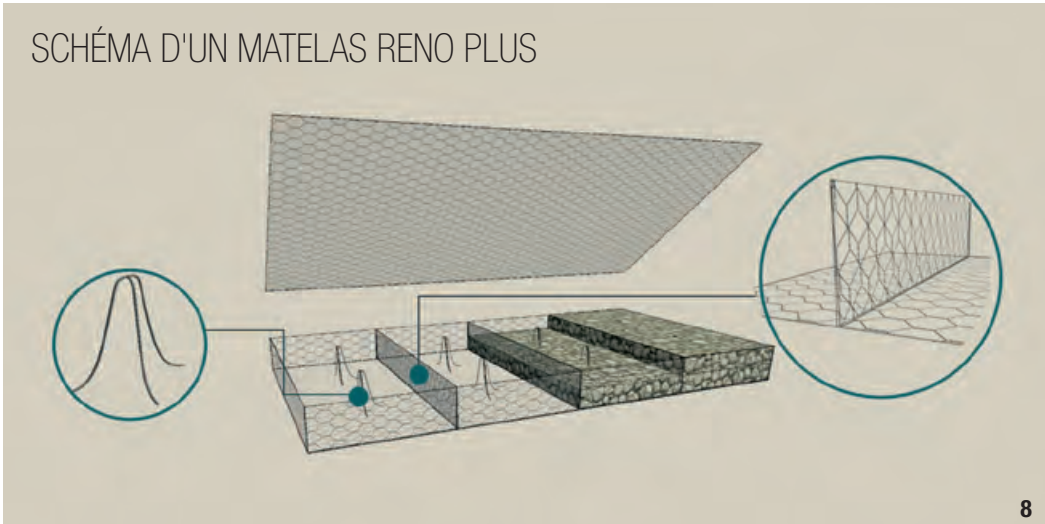
Afin d'avoir une meilleure compréhension des propriétés hydrauliques

**5- Phase 1 -  
Photo de  
l'essai en  
canal à débit  
constant avec  
la structure  
sans pierres.**

**6- Phase 2 -  
Photo de l'es-  
sai en canal à  
hauteur d'eau  
constante.**

**7- Phase 3 -  
Photo de  
l'essai à débit  
maximal.**

**8- Schéma  
d'un Matelas  
Reno Plus.**



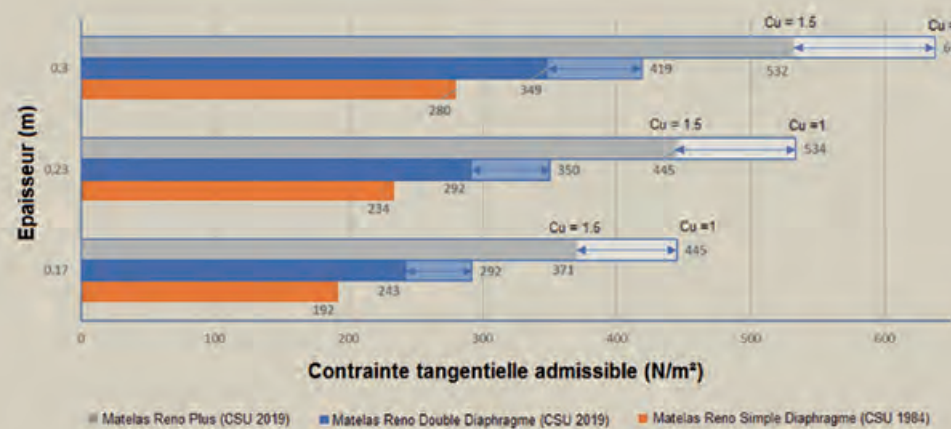
**5- Phase 1 -  
Photo of the  
test in channel  
at constant  
flow with the  
structure wi-  
thout stones.**

**6- Phase 2 -  
Photo of the  
test in channel  
at a constant  
water height.**

**7- Phase 3 -  
Photo of the  
test at maxi-  
mum flow.**

**8- Diagram of  
a Reno Plus  
mattress.**

LES CONTRAINTES TANGENTIELLES ADMISSIBLES DES MATELAS RENO



9- Graphique montrant les contraintes tangentielles admissibles des Matelas Reno.

10- Matelas Reno Plus à débord avant remplissage pour le pont Simone Veil à Bordeaux.

11- Matelas Reno Plus à débord après remplissage pour le pont Simone Veil à Bordeaux.

9- Graph showing the acceptable tangential stresses for Reno mattresses.

10- Reno Plus mattress with overhang before filling for Simone Veil Bridge in Bordeaux.

11- Reno Plus mattress with overhang after filling for Simone Veil Bridge in Bordeaux.

des Matelas Reno, une nouvelle campagne d'essai physique sur des matelas à échelle réelle a été lancée en 2019-2020 à l'Université de l'État du Colorado (CSU) à Fort Collins (États Unis).

Le laboratoire d'essais hydrauliques dispose d'un canal de 60 cm de largeur et de 20 m de longueur ayant une inclinaison maximale de 8 % (utilisé lors des phase 1 & 2) et un autre de 90 cm de largeur et de 10 m de longueur pouvant être incliné à une pente allant jusqu'à 50 % (utilisé lors de la phase 3). L'objectif de ces essais était d'évaluer l'influence de différents paramètres entrant dans la confection d'un Matelas Reno pour rendre ce dernier le plus performant possible. Le déroulement des essais s'est produit en 3 phases distinctes :

→ **Phase 1** : une série d'essais sur les structures en Matelas Reno seule, sans remplissage de pierre, afin de voir l'influence de l'espacement des diaphragmes et du type de couvrecle sur la distribution des vitesses dans les matelas et donner une indication sur le potentiel de dissipation d'énergie apportée par la structure métallique (figure 5).



12

© MACCAFERRI

→ **Phase 2** : une série d'essais sur les structures en Matelas Reno, remplies de pierres ayant un diamètre moyen différent (75 mm et 100 mm) et ayant un coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) de 1 (matériau mono-granulaire) et de 1,5 (granulométrie étalée). Lors de ces essais, à débit constant, la hauteur d'eau était mesurée. Plus cette dernière était élevée et plus la disposition des pierres était performante pour dissiper l'eau dans la structure et réduire l'érosion sous la cage (figure 6).

→ **Phase 3** : une série d'essais sur les structures en Matelas Reno soumises aux écoulements maximums pour déterminer les contraintes tangentielles maximales admissibles (figure 7).

Les phases 1 et 2 ont mis en évidence les observations principales suivantes :

- La réduction de l'espacement des diaphragmes dans la cage (passage de 1 m à 50 cm) n'a pas d'impact significatif sur la distribution de l'écoulement dans les cellules ;
- La mise en œuvre de pierres de petites dimensions et de granulométrie resserrée ( $C_u = 1$ ) permet d'avoir un écoulement plus réduit à travers le matelas.

La phase 3 a été paramétrée en se basant sur les configurations les plus performantes obtenues lors des phases 1 et 2. Par ailleurs, il a été décidé de tester l'influence d'un tirant préfabriqué reliant le couvercle à la base, le X-tie®, l'objectif étant d'encre mieux confiner les pierres dans les cellules. Disposé à raison d'une unité par m<sup>2</sup> de Matelas Reno à double diaphragme, ce tirant va améliorer considérablement les performances des structures et donner naissance au Matelas Reno Plus (figure 8).

Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM D6460, qui encadre la méthodologie d'essai pour tester les performances de structures de protection contre l'érosion du sol sous-jacent. Pour que l'essai soit concluant, il faut que, pendant une durée de 30 minutes, l'écoulement de débit constant n'entraîne pas le sol présent sous la protection mais également que la protection ne subisse pas de rupture/dégradation de nature à ne plus remplir sa fonction dans le temps.

**12- Protection de berges à Roquebilière.**

**13- Protection de berges à Saint-Martin-de-Vésubie.**

**12- Protection of the banks at Roquebilière.**

**13- Protection of the banks at Saint-Martin-de-Vésubie.**



© MACCAFERRI

## HISTORIQUE DU MATELAS RENO

- 1960** - Invention du Matelas Reno.
- 1966** - Protection des berges du fleuve Arno à Florence.
- 1984** - 1<sup>ère</sup> Campagne d'essai au laboratoire de l'université du Colorado à Fort Collins (USA).
- 1990** - Invention du Matelas Reno à double diaphragme.
- 2018** - Invention du revêtement organique PoliMac®, ultra résistant à l'abrasion.
- 2019 - 2020** - 2<sup>e</sup> Campagne d'essai au laboratoire de l'université du Colorado à Fort Collins (USA).
- 2020** - Invention du Matelas Reno Plus.

À l'issue des 30 minutes, le débit peut être incrémenté pour obtenir une contrainte tangentielle plus élevée. L'opération est répétée jusqu'à ce que l'un des deux critères seuils soit atteint. La contrainte tangentielle admissible est alors déterminée sur la base du débit maximal supporté pendant 30 minutes par la protection.

Afin de simuler au mieux la réalité, un géotextile de filtration non tissé de 200 g/m<sup>2</sup> a été installé entre le sol et les Matelas Reno. Pour éviter des effets de bords parasites, un joint en mousse polyuréthane a été mis en place à l'interface entre le bâti du canal et le Matelas Reno.

Les essais réalisés ont mis en évidence que plusieurs facteurs entraient en considération dans la contrainte tangentielle admissible des structures en matelas gabions. Au-delà des paramètres semblables aux protections en enrochement que sont le poids volumique des pierres et leur diamètre moyen, les facteurs suivants ont également une influence remarquable (figure 9) :

- L'épaisseur du matelas, qui définit le nombre de couches de pierres disposées dans les structures. En effet plus le nombre de couches de pierres est élevé et plus la résistance de la structure est importante ;
- L'uniformité des pierres de remplissage : plus le fuseau granulaire est resserré et plus la dissipation d'énergie est importante. Le passage d'un  $C_u = 1,5$  à un  $C_u = 1$  augmente la résistance des structures de 20 % ;
- La présence d'un double diaphragme augmente de 25 % la résistance par rapport à un matelas à simple diaphragme ;

→ La présence de tirants verticaux préfabriqués X-ties® dans les cages (Matelas Reno Plus) augmente le confinement des pierres dans les cages et améliore les performances des structures de 50 %.

La campagne d'essai de 2019-2020 a ainsi permis d'enrichir la base de données établie à la suite d'essais réalisés en 1984 et conforter les observations de terrain sur l'efficacité du double diaphragme. À même épaisseur, le Matelas Reno Plus est 90 % plus résistant que le matelas Reno à simple diaphragme.

Ces avancées techniques rendent la solution encore plus pertinente, car elles réduisent les épaisseurs des protections, ce qui diminue les quantités de matériaux à produire, à transporter et à mettre en œuvre. Il en résulte des économies substantielles et une réduction importante de l'empreinte carbone sur chantier.

APPLICATIONS

Les premières applications ont eu lieu dès le début de l'année 2021, dans des contextes où la résistance et la durabilité des structures étaient un enjeu majeur. Parmi les chantiers, la construction du pont Simone Veil à Bordeaux, dont les 8 piles de pont fondées dans le lit de la Garonne ont été protégées de l'affouillement par des Matelas Reno Plus à débords de 30 cm d'épaisseur. La surface de pose étant en milieu aquatique, les matelas ont été pré-remplis sur la berge avec



14- Protection de berges à La Bollène en Vésubie.

14- Protection of the banks at La-Bollène en Vésubie.

l'insertion d'un géotextile placé sous la cage mais également en débord sur un ou plusieurs côtés pour assurer la continuité de la protection lors de la pose du matelas adjacent. Les cages sont alors manutentionnées à l'aide d'un palonnier soulevant la cage au moyen de suspentes de levage intégrées dans la structure lors du remplissage (figures 10 et 11). Les matelas ont ici un rôle de protection contre

l'affouillement autour des piles qui est généré par la turbulence de l'écoulement en raison de la contraction de la section hydraulique. Habituellement réalisé avec des gabions de 50 cm d'épaisseur, le recours à des matelas Reno Plus de 30 cm a pu être justifié sur la base de ces derniers essais et a permis de réduire de 40 % le volume de pierres utilisé. Dans la vallée de la Vésubie, sévèrement touchée par la tempête Alex, de nombreuses infrastructures routières ont été affectées par la crue torrentielle. La route principale d'accès à la vallée a été emportée en plusieurs endroits et la route menant au site du Boréon en amont de Saint-Martin-de-Vésubie a été presque intégralement détruite. Pour rétablir ces axes straté-

giques, la Métropole de Nice a mobilisé les entreprises de la vallée pour entreprendre tous ces chantiers en un temps réduit. De nombreux ouvrages de soutènement ont été réalisés avec des techniques différentes suivant les sites et les matériaux disponibles. Les blocs d'enrochements déplacés par le torrent ont été utilisés principalement pour réaliser des sabots en pied de talus dans les zones fortement sollicitées. Les matériaux charriés par la rivière ont pu être réutilisés. Ils ont été criblés et concassés pour être mis en œuvre en couche de forme, en remblai structural ou en pierre à gabions. Parmi les solutions retenues, des murs de soutènement en remblai renforcés dont les parements ont été confortés par des gabions placés en façade et une protection du pied des ouvrages contre l'affouillement par le recours à des Matelas Reno Plus de 30 cm d'épaisseur. Cette technique a été retenue pour plusieurs raisons, la résistance hydraulique aux écoulements, la durabilité du fil PoliMac® face à l'abrasion dans un contexte torrentiel (pentes longitudinales entre 2,5 et 5 %), la compatibilité avec les matériaux disponibles sur site en raison du transport solide ainsi que la rapidité d'exécution. Utilisés sur 4 chantiers dans la vallée, ils permettent en outre de maintenir le monolithisme des ouvrages, les cages pouvant être liées par agrafage aux techniques en sol renforcées à parement gabions mises en place (figures 12, 13 et 14). □

PONT SIMONE VEIL À BORDEAUX

ANNÉE DE RÉALISATION : 2021

MAÎTRE D'OUVRAGE : Bordeaux Métropole

MAÎTRE D'ŒUVRE : Egis

ENTREPRISE MANDATAIRE : Bouygues Travaux Publics France

SURFACE DE MATELAS RENO PLUS À DÉBORDS : 5 000 m²

CHANTIERS EN VÉSUBIE

ANNÉE DE RÉALISATION : 2021

MAÎTRE D'OUVRAGE : Métropole Nice Côte d'Azur

MAÎTRE D'ŒUVRE : Métropole Nice Côte d'Azur

ENTREPRISE MANDATAIRE : Sibtp

SURFACE DE MATELAS RENO PLUS : 6 000 m²

ABSTRACT

**THE RENO MATTRESS, 60 YEARS OF INNOVATION**

ALEXANDRE PLASTRE, FRANCE MACCAFERRI

The article describes the technological changes in Reno mattresses over the last 60 years, focusing in particular on the recent test campaign to characterise the tangential stresses acceptable by the structures and define the configurations providing the best performances. Examples are presented of projects where technological changes in the structures can reduce the volumes of materials to be employed. □

**EL COLCHÓN RENO, 60 AÑOS DE INNOVACIÓN**

ALEXANDRE PLASTRE, FRANCE MACCAFERRI

El artículo presenta las evoluciones tecnológicas del colchón Reno a lo largo de los últimos 60 años, centrándose en particular en la reciente campaña de ensayos para caracterizar las tensiones tangenciales admisibles por las estructuras y definir las configuraciones que aportan las mejores prestaciones. Se presentan ejemplos de obras donde los avances tecnológicos en las estructuras permiten reducir los volúmenes de materiales utilizados. □