

## LA TECHNOLOGIE DES PRATI ARMATI®<sup>1</sup> : ESPÈCES HERBACÉES AUX RACINES PROFONDES QUI RENFORCENT LE SOL ET CONTRIBUENT AU PROTOCOLE DE KYOTO<sup>2</sup>

Les PRATI ARMATI® sont une nouvelle Technologie éco-compatible de renforcement, pour la protection du sol, la lutte à l'érosion et à la désertification, la rénaturalisation de zones dégradées, qui utilise un mélange d'espèces herbacées – dont beaucoup sont autochtones - qui arment le sol en profondeur et créent une épaisse couverture végétale qui réduit sensiblement l'infiltration des eaux météoriques, cause principale d'éboulis et glissements.

Cette nouvelle Technologie de consolidation végétale du sol présente les caractéristiques suivantes :

### Caractéristiques botaniques et agronomiques

- espèces herbacées pérennes
- rustiques
- naturelles (non OGM)
- beaucoup d'entre elles autochtones
- non infestant
- plantes fourragères

### Caractéristique des racines

- remarquable vitesse de pousse (jusqu'à 2 mètres dans des sols désagrégés en 18 mois, voir photo à côté)
- grande profondeur des racines (quelques mètres dans des sols désagrégés)
- densité radicale élevée
- racines fines (au diamètre compris entre 0,1 et 3 mm) et homogènes
- résistance moyenne à traction des racines jusqu'à 205 MPa (20,5 kg/mm<sup>2</sup>)



### Caractéristiques physiologiques

- adaptabilité à tout type de sol (des sols fins limoneux argileux jusqu'aux caillouteux sableux; elles poussent aussi sur des roches faibles et altérées)
- adaptabilité à conditions pédoclimatiques extrêmes (pH: 4 / 11; température: -45°C / +60°C)
- résistance exceptionnelle à la sécheresse, au sel, à l'immersion et au feu, avec une grande capacité de repousser après les incendies
- plantes pionnières, capables de végéter même dans des sols pauvres de substances organiques et nourrissants ou dans des sols pollués, en favorisant la rénaturalisation
- efficacité photosynthétique élevée (**plantes C4**) qui contribue à une majeure soustraction de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère

### Propriétés hydrologiques:

- évapotranspiration profonde

<sup>1</sup> PRATI ARMATI® = gazons renforcés

<sup>2</sup> Les plantes PRATI ARMATI® absorbent de l'atmosphère plus de 30% de CO<sub>2</sub> en plus par rapport aux plantes les plus communes, et contribuent aux crédits établis par le **Protocole** de Kyoto

- imperméabilisation du versant
- protection de la formation de fissures et crevasses

### **Synergies et possibilité de les accoupler aux ouvrages civiles et de génie biologique et mitigation de leur impact sur l'environnement et le paysage**

- ouvrages en béton armé
- nappes pare éboulis
- gabions et protection des berges en rocher cyclopes
- géogrilles, géotextiles, paillis en fibres naturelle,
- structures de renforcement en perche et pieux en bois
- drainages et fossés de protection

***C'est l'ensemble des caractéristiques ci-décrites qui font des PRATI ARMATI® une Technologie unique.***

### **Avantages techniques, de réalisation et économiques**

Cette Technologie de renforcement végétal du sol qui utilise des espèces herbacées aux racines profondes permet de résoudre les problèmes liés à l'érosion et, souvent, élimine complètement (avec de grandes avantages pour les Clients et les Entreprises qui réalisent les travaux) les matériels, les travaux et les coûts dus à:

- terrain végétal ajouté (puisqu'elles poussent même sur des sols complètement stériles comme les argiles grises),
- paillis en fibres naturelle, géogrilles, géotextiles, etc.
- parachevant des versants (qui doivent être préférablement délivrés rugueux et avec une surface irrégulière),
- hydro-semailles traditionnelles, enrichies avec des fibres, etc. (qui ne résout pas le problème de l'érosion, même si accouplés à d'autres matériels).

On réduit dramatiquement la **durée des travaux** et **risques liés à ces travaux (voir les lois sur la sécurité)** et on élimine les coûts d'entretien successif.

### **Avantages environnementales et d'image**

Il s'agit d'une Technologie complètement naturelle qui permet d'obtenir très rapidement la complète rénaturalisation des lieux et d'éviter les lourds impacts sur l'environnement qui caractérisent les géogrilles, géotextiles, paillis en fibres, etc.

Le mélange est composé pour la plupart des **plantes C4**, particulièrement efficaces dans la soustraction de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (elles absorbent de l'atmosphère plus de 30% de CO<sub>2</sub> en plus par rapport aux plantes le plus communes), **en contribuant ainsi aux crédits fixés par le Protocole Kyoto** et, en particulier dans le cas des travaux routiers, à la réalisation d'infrastructures compatibles avec l'environnement.



*Provincia de Terni: SP 111 à Orvieto (TR).  
Le versant éboulé au Décembre 2004*



*Mai 2006: le versant parfaitement renforcé et redevenu vert*

## Les applications

La Technologie de renforcement végétal peut s'appliquer à :

- escarpements routiers, autoroutiers, ferroviaires;
- berges des torrents, canaux, fleuves, lacs, versant près de la mer;
- consolidation et protection de versants sujets est éboulis et glissement;
- restauration et rénaturalisation des caves, mines, décharges, sites pollués.

Les photos qui suivent montrent des exemples des domaines d'application.



Escarpement routier – Grand éboulis à Ancona



Escarpement routier –  
Communauté Montagnard de Santerno (BO)



Escarpement ferroviaire Italferr – Aulla (MS)



Berge du fleuve Noncello  
Génie Civile de Pordenone



Bord à coté de la mer – Autorité du Port de Genova



Berge d'un canal d'irrigation - Pavia



Escarpement réalisé pour Sidief, société de  
la Banca d'Italie - Como



Escarpement routier - Provence de Terni



Laiterie Mauri - Lecco



Décharge à Ozieri (SS)



Mine d'argile à Sciacca (AG)



Lieu pollué par des hydrocarbures  
(La Spezia)

## La Technologie de mise en œuvre

La Technologie de mise en œuvre, prévoit un système de chantier simple et rapide avec la dispersion sur la surface à traiter avec un mélange d'eau, de particuliers engrais, colles naturelles, enrichisseur du sol et un mélange approprié de semences techniques aux caractéristiques ci-décrites.

Il s'agit d'hydro-semailles techniques qui se déroule avec des machineries particulières (voir photo a gauche), douées de citernes de 1.000 à 10.000 litres, placées sur des véhicules, 4x4 ou même chenillés. Pour franchir des dénivellations élevées ou pour des chantiers difficilement accessibles, on emploie des tuyaux longs jusqu'à 300 m (voir photos au centre et est droite).



Castelviscardo (TR)



Trento

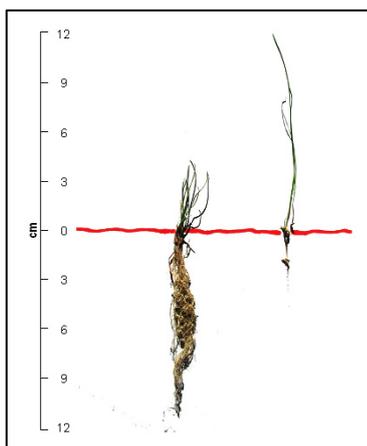


Trento

Pour des surfaces très vastes ou inaccessibles on peut aussi utiliser des hélicoptères.



Il est fondamentale de ne pas confondre cette nouvelle Technologie de renforcement végétal du sol avec les hydro-semailles traditionnelles qui utilisent des mélanges de graminées et légumineuses qui n'ont rien à voir avec les caractéristiques exceptionnelles ci-décrites, pour ce qui concerne en particulier:



- la profondeur des racines (quelques mètres dans des sols désagrégés, contre les quelques dizaines de centimètres des traditionnelles espèces herbacées);
- la résistance moyenne à la traction des racines (jusqu'à 205 MPa contre 10-30 MPa des traditionnelles espèces herbacées);
- la rapidité de la poussé des racines (jusqu'à dix fois supérieure aux traditionnelles espèces herbacées).

*Confrontation entre une des graminées utilisées pour ce type d'ouvrage de consolidation (à gauche, avec sa petite racine déjà profonde et articulée) et une graminée traditionnelle (à droite, avec une racine insignifiante). Toutes les deux ont 3 semaines*

Dans les pages suivantes, on présente des approfondissements sur les principaux aspects techniques qui caractérisent cette Technologie de renforcement végétal du sol.

## Les PRATI ARMATI® et le Protocole de Kyoto

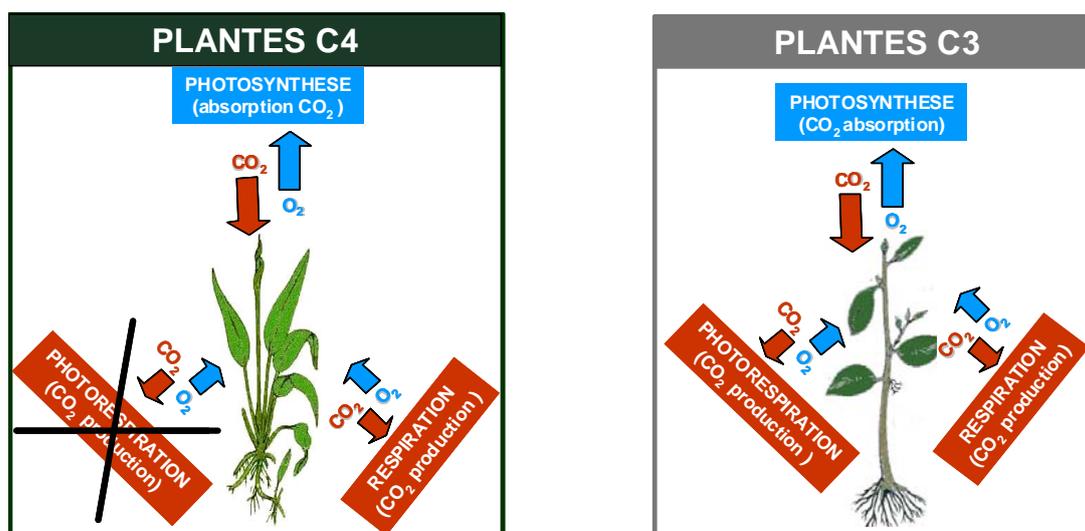
La Technologie des PRATI ARMATI® emploie pour la plupart des **plantes herbacées C4** qui présentent une photosynthèse modifiée par rapport aux plus communes plantes C3 (plus de 90% des espèces de la planète sont des plantes C3).

Dans la photosynthèse des plantes C3 la CO<sub>2</sub> est incorporée dans un composé à 3 atomes de carbone. Dans ces plantes on a soit la respiration soit la photo-respiration, laquelle peut réduire la photosynthèse jusqu'au 50%. La photosynthèse est désactivée par des températures et luminosités très élevées.

Les plantes C4 présentent une photosynthèse *modifiée* où la CO<sub>2</sub> est incorporée dans un composé à 4 atomes de carbone.

**Les plantes PRATI ARMATI® C4 sont beaucoup plus efficaces que les plus communes plantes C3** grâce à:

- absence de photo-respiration et donc une photosynthèse plus efficace par rapport aux plantes C3
- perte d'eau limitée: résistance élevée aux climats les plus arides
- tolérance élevée aux sols salins
- poussée rapide, même dans des conditions prohibitives pour le C3
- la photosynthèse n'est pas désactivée par des températures et luminosités très élevées



**Les plantes PRATI ARMATI® C4 absorbent plus de 30% de plus de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère par rapport aux plantes les plus communes, et contribuent aux crédits fixés par le Protocole de Kyoto**

**La résistance à traction des racines et la hausse du Facteur de sécurité (Fs)**

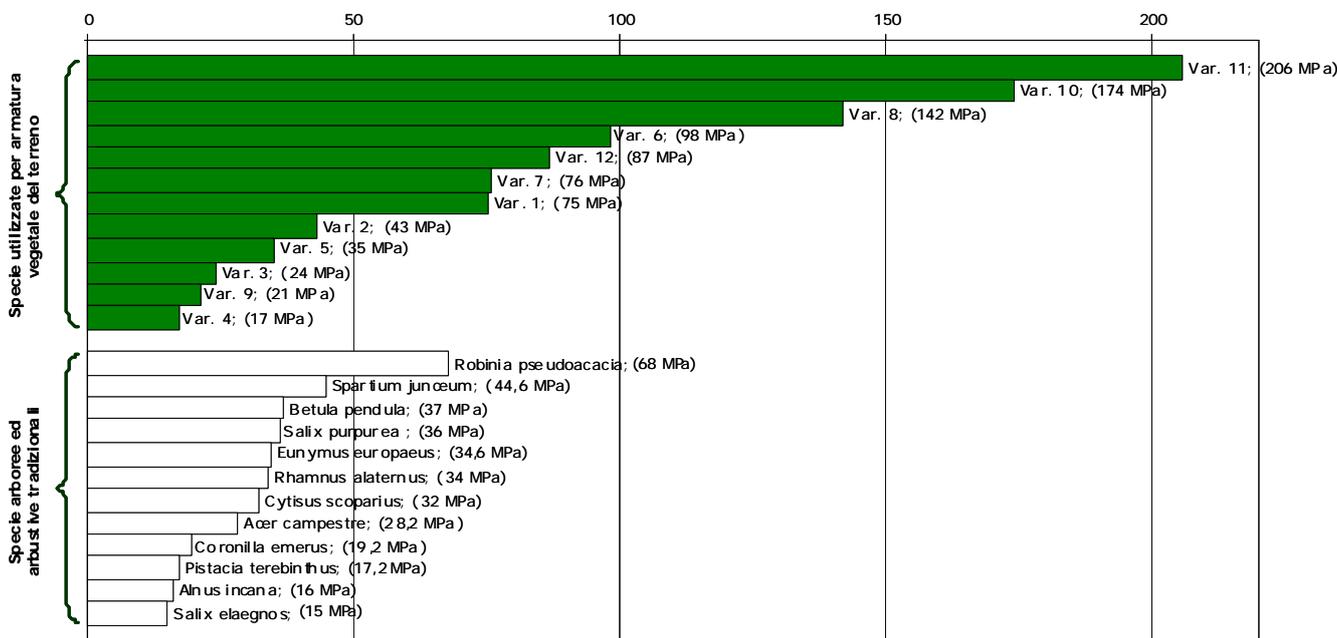
Le but principale du consolidation du terrain avec des espèces végétales est celui d'augmenter la résistance à rupture des versants en érosion et sujets à éboulis superficiels, avec la hausse du *Facteur de sécurité (Fs)* du sol, c'est-à-dire le rapport entre tout ce qui concourt à soutenir le versant (cohésion, composant poids normal à la surface de glissement, résistance des racines), et tout ce qui crée l'instabilité (saturation, composant poids tangentiel à la surface de glissement, etc.). Le plus le Fs est élevé, le plus le sol devient stable.

La capacité de renforcement des particulières espèces herbacées utilisées dans cette nouvelle Technologie retient le sol et lui confère la résistance à traction des racines. Les racines, très nombreuses, ont un diamètre limité (d'environ 0,1 mm jusqu'à environ 3 mm), une section constante tout le long de leur développement et une résistance mécanique élevée, et elles assurent un renforcement profond du sol, n'ayant pas d'égale en nature.

L'efficacité des diverses espèces végétales dans la hausse du Fs varie principalement en fonction de la résistance mécanique des racines et de l'area de radication.

Les tests de traction, conduites auprès de l'Institut de Hydraulique Agronome de l'Université de Milan ont permit de vérifier la valeur de résistance à traction très élevée des racines entre les 12 espèces qui composent le mélange des **PRATI ARMATI®**.

L'exceptionnalité des valeurs moyennes de résistance à traction (en vert) est surtout évidente en comparaison avec les données disponibles pour certaines plantes arbustives et arborescentes (en blanc). Depuis les tests effectués auprès de l'Université de Milan, les espèces herbacées utilisées pour les ouvrages de renforcement végétal, présentent des valeurs exceptionnelles de résistance moyenne à la traction, atteignant les 205 MPa (avec des piques à 468 MPa, pareils à la résistance d'un acier de qualité moyenne).



Valeurs de résistance à traction de certaines espèces utilisées pour le renforcement végétale du sol et de certaines espèces arbustive et arborescentes (Bonfanti 2004)

**Le software développé pour calculer la hausse de l'effort de coupure et du facteur de sécurité des terrains armés avec les racines**

L'observation et la quantification des aspects physiques et mécaniques qui caractérisent les espèces utilisées ont permis de développer un software qui, en partant des paramètres choisis par l'utilisateur (type de sol, pente, cohésion, poids de volume du sol, profondeur de radication, etc.), fournit la valeur de la hausse de la résistance à coupure du sol enraciné. Le calcul donne comme résultat soit l'effort de coupure ajouté soit le facteur de sécurité pour une pente indéfinie.

La distribution linéaire de l'effort de coupure ajouté par rapport à la profondeur dérive de la formulation initiale de Waldron, 1977, ensuite modifiée par Bonfanti et Bischetti, 2001:

$$\Delta S_r = 1.15 \left( \int_{\phi_1}^{\phi_2} (T_r(\phi) \cdot F_d(\phi)) d(\phi) \right) \frac{A_R}{A}$$

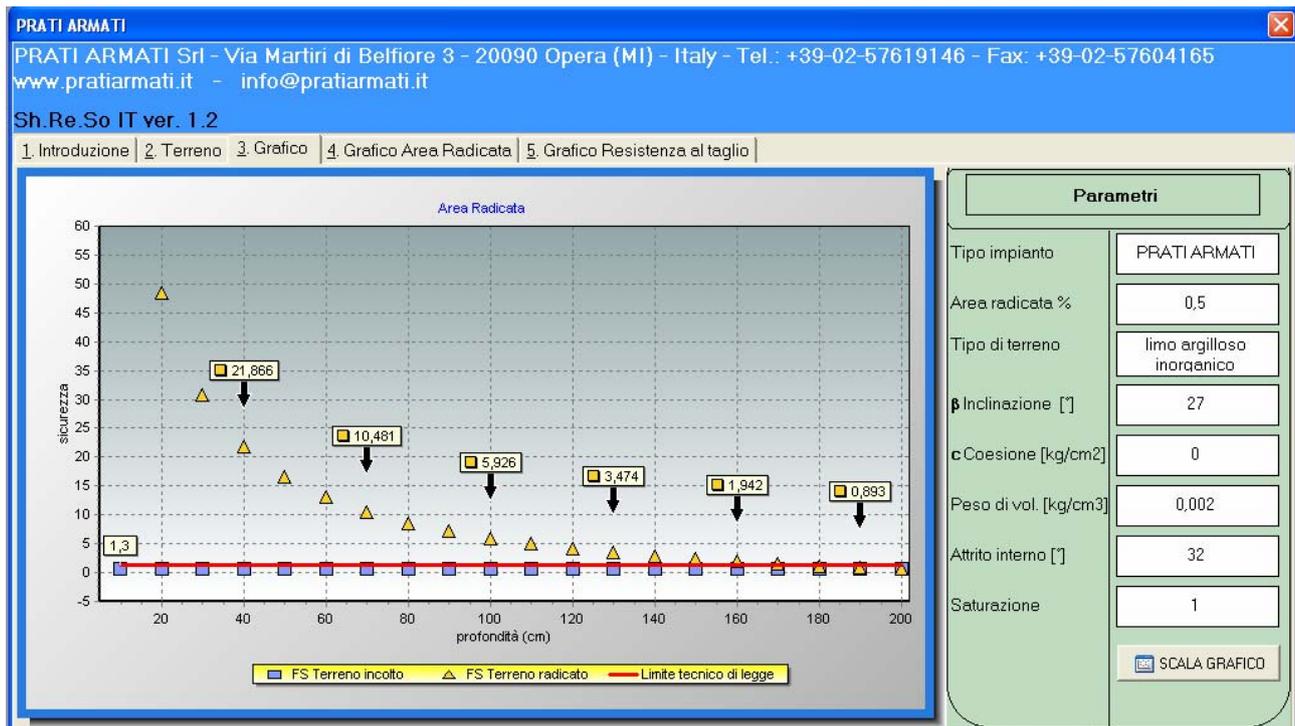
$\Delta S_r$  incremento di resistenza al taglio fornita al terreno dalla presenza delle radici  
 $T_r(\phi)$  funzione del valore di resistenza a rottura per trazione delle radici  
 $F_d(\phi)$  funzione di distribuzione dei diametri delle radici  
 $A_R/A$  rapporto di area effettivamente radicata sull'area totale

Pour douze d'espèces entre celles utilisées dans le mélange on a testé à traction de nombreuses racines, on a mesuré les diamètres, on a vérifié la profondeur de radication, en obtenant enfin exactement les paramètres nécessaires pour la formule ci-jointe.

L'intégration dans le software de cette fonction avec celle qui décrit le comportement en profondeur de l'area de radication (pour laquelle on fait l'hypothèse d'une chute linéaire), permet de caractériser en total le volume de sol enraciné.

Cet instrument permet donc l'évaluation des résultats qu'on peut obtenir en utilisant cette nouvelle Technologie de renforcement végétale du sol en termes de hausse de l'effort de coupure et du facteur de sécurité (Fs). Les résultats du programme peuvent être aussi utilisés comme input dans les plus traditionnels et complexes modèles géotechniques de stabilité.

On montre ici les résultats obtenus avec le software pour un exemple où l'on fait une comparaison entre le sol avec consolidation végétale (ligne jaune) et le même type de sol non cultivé (ligne bleue). Le graphe rend évident que la contribution des racines pousse remarquablement la ligne du facteur de sécurité dans une région du graphe caractérisée par l'équilibre.



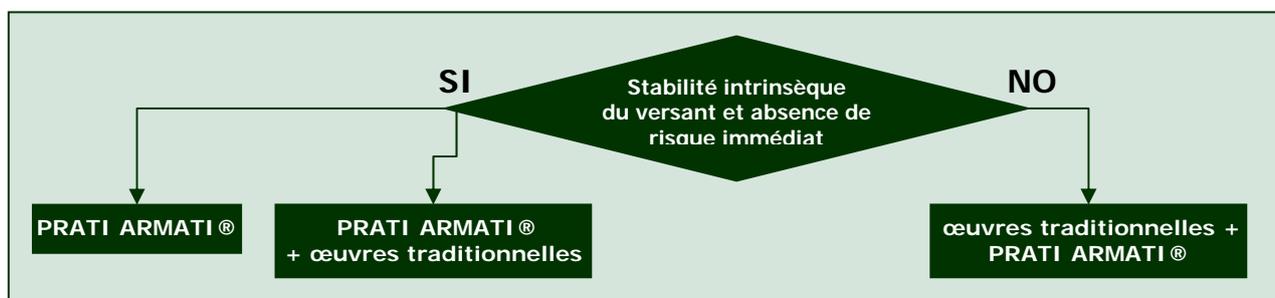
La hausse du facteur de sécurité du sol armé avec des racines (ligne jaune)

### Accouplement avec les ouvrages traditionnelles

Un des aspects les plus intéressants du consolidation végétale du sol avec les **PRATI ARMATI®** est que dans certains cas cette Technologie complète, intègre et améliore les ouvrages traditionnelles (civiles ou du génie biologique), en agissant en synergie avec celles-là car elle:

- en complète la fonction de protection du sol, en agissant d'une façon distribuée sur toute la surface à renforcer;
- protège les ouvrages traditionnelles;
- réduit leur impact sur l'environnement, en restituant au paysage un aspect naturel et reverdi.

Comme montré dans le schéma suivant, au cas où l'érosion superficielle se passe sur des versants intrinsèquement stables et en absence de risque immédiat, le consolidation végétale du sol peut substituer efficacement les ouvrages traditionnelles de renforcement dans la lutte à l'érosion superficielle. Cela avec d'évidents bénéfices économiques et d'ouvrage (mineurs temps et coûts) et avec un impact positif sur l'environnement grâce à l'effet de rénaturalisation opéré par cette nouvelle technologie.



Critères pour un correct accouplement avec les ouvrages traditionnelles

Dans d'autres cas, au contraire, il vaut mieux accoupler synergiquement cette nouvelle Technologie verte avec les ouvrages traditionnelles (civiles ou du génie biologique), comme le montrent les exemples suivants, où l'accouplement est réalisé avec des terres renforcées, des gabions et des structures de renforcement en perche de bois.



Florinas (SS)



Castelviscardo (TR)



Lumezzane (BS)

### Propriétés hydrologiques

Le Prof. Giovanni Calabresi<sup>3</sup>, dans la relation présentée au Meeting du 5 décembre 2006 sur ces nouvelles technologies organisé avec le soutien de la Province de Terni, a :

“... La végétation est un des éléments qui influence l'équilibre d'un versant et sa susceptibilité au glissement. Les effets de végétation sur les conditions d'équilibre des versants sont les suivants:

- transfert de résistance à travers les racines

<sup>3</sup> Professeur en Géotechnique auprès de la Faculté d'Ingénierie de l'Université de Rome “La Sapienza” – voir relation et programme ci-joints.

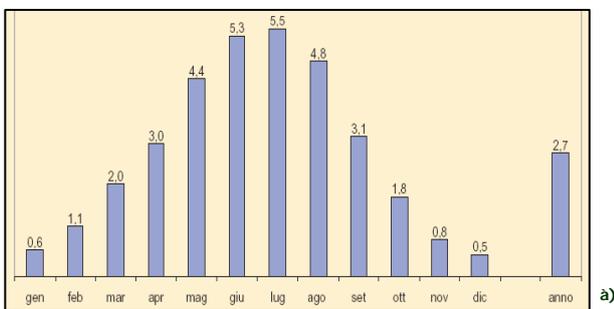
- augmentation de l'évaporation des pluies
- diminution du degré de saturation du sol
- diminution de la pression interstitielle
- diminution de l'infiltration

...”

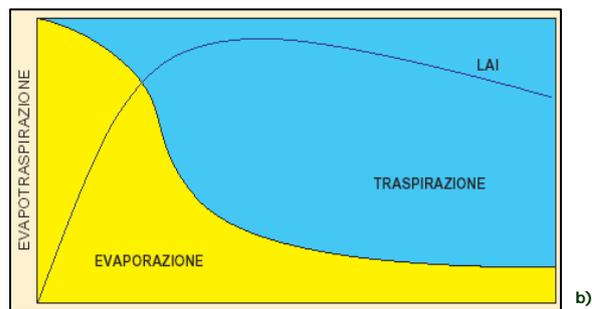
Évapotranspiration

Une des propriétés hydrologiques les plus intéressantes pur ces types d'application est l'évapotranspiration des plantes (effet joint de l'évaporation du sol et de la transpiration des feuilles) qui réduit le contenu d'eau dans le sol, en retardant et réduisant la saturation. Cela limite la pression dans les pores du sol, en évitant la perte de cohésion dans les sols fins (limoneux et argileux).

L'évapotranspiration, dans le cas standard d'un gazon de graminées traditionnelles de 12 cm d'hauteur, a été quantifiée en environs 5 mm d'eau par jour en été (c'est-à-dire 5 l/m<sup>3</sup> par jour), comme illustré dans le graphique a).



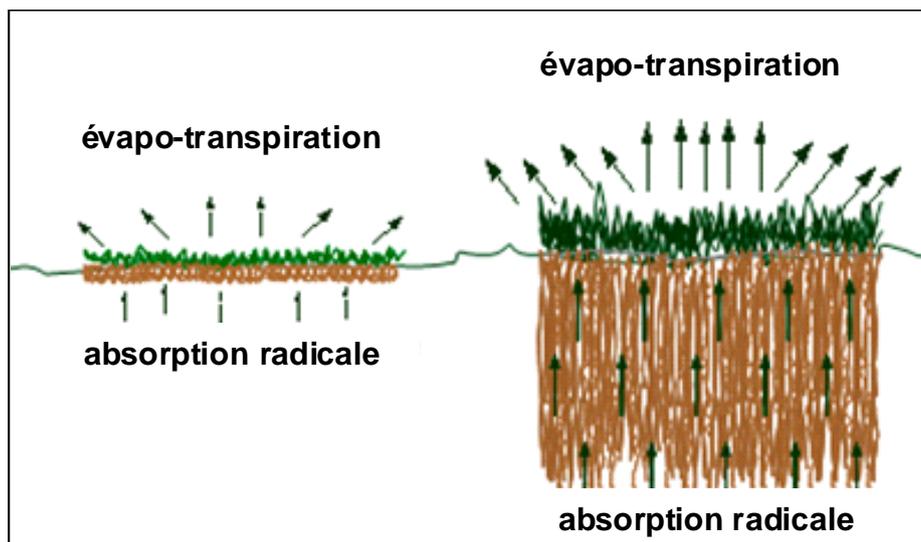
L'évapotranspiration d'un gazon traditionnel (Ermes Agricoltura)



Rapport entre l'évaporation et transpiration in relation a l'indice de couverture des feuilles (LAI) (Ermes Agricoltura)

Dans le graphique b), on montre le rapport entre l'évaporation du sol et la transpiration des feuilles au cours du temps, en relation a l'indice de masse foliaire, LAI (m<sup>2</sup> de feuilles /m<sup>2</sup> de sol). Le fait que ce soit la transpiration des feuilles qui prévale quand le gazon s'est développé, est très important, car c'est exactement celui-là l'effet d'une couverture végétale épaisse comme celle des **PRATI ARMATI®**. En effet, là où la végétation est absente ou pauvre, pendant la saison sèche, le sol est intéressé par système de fissures qui provoque, une augmentation de l'infiltration d'eau dans les plaines et, sur les versants, aussi une aggravation de l'érosion avec des éboulis et des glissements plus ou moins grands du terrain.

Dans le graphique suivant on montre un gazon traditionnel (à gauche), où le captage de l'eau arrive à environs 30-40 cm, correspondant à la profondeur maximale des racines. Dans le cas des **PRATI ARMATI®** au contraire (à droite), l'évapotranspiration est significativement majeure, grâce soit a l'apparat foliaire beaucoup plus développé (selon les espèces sélectionnées la couverture végétale arrive jusqu'à 50-150 cm d'hauteur), soit à la majeure profondeur et densité des racines, qui consente le captage de l'eau tout le long du profile radicale jusqu'à quelques mètres de profondeur.

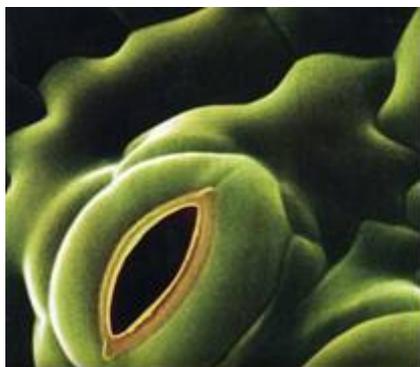


Evapotranspiration d un gazon traditionnel (à gauche) et des PRATI ARMATI® (à droite)

Une estimation prudente de la transpiration, considérée égale à celle d'un gazon traditionnel (même si pour les espèces herbacées à radication profonde elle peut être jusqu'à 10 fois plus grande), arrive à environ  $5 \text{ l/m}^3$  par jour, c'est-à-dire 50 tonnes d'eau par jour par hectare en été.

La transpiration des plantes c'est le plus active le plus d'eau il y a dans le sol. Dans les périodes de sécheresse, les plantes sont capables de fermer leurs stomates (dans la photo qui suit au microscope électronique) De cette façon elles peuvent survivre en conditions de manque d'eau sans dessécher excessivement le sol. Cela s'applique en particulier aux espèces des **PRATI ARMATI®** qui, grâce à leurs racines très développées, peuvent repérer l'eau qui se trouve en profondeur.

La photo suivante, se référant à un chantier réalisé dans le centre de l'Italie avec cette nouvelle Technologie, montre très clairement cette attitude: les mêmes plantes dans certaines zones sont en repos végétatif à cause du manque d'eau (plantes jaunâtres). Dans d'autres zones, où il y a des venues d'eau localisées, elles sont en train d'évapotranspirer et elles sont donc luxuriantes (zones plus vertes). Après l'arrêt végétatif, avec l'arrivée des pluies, les plantes des **PRATI ARMATI®** récupèrent leur activité végétative et reverdissent complètement. Cela généralement ne se passe pas pour les espèces utilisées pour la hydro-semilles traditionnelle qui, à cause des racines peu développées, ne peuvent pas survivre à de longues périodes de sécheresse. Le même s'applique aux plantes arbustives et arborescentes, souvent utilisées pour les interventions de renaturation, surtout dans les premières périodes après la mise en ouvrages.



Stoma végétal



Castelviscardo (TR) – Giugno 2006

### Écoulement superficiel et réduction de l'infiltration

Une autre caractéristique hydrologique très importante des **PRATI ARMATI®**, est l'épaisse couverture végétale qui intercepte les pluies, même intenses, en réduit l'énergie cinétique et évite l'érosion superficielle, en protégeant le versant de l'érosion.

Dans les images qui suivent on peut bien voir que, dans toutes les saisons, l'épaisse partie aérienne se replie en cas de précipitation très intenses, et favorise l'écoulement superficiel et donc l'écoulement des eaux météoriques ou de flux d'eau même impétueux.



Orvieto (TR)



Appiano (BZ)



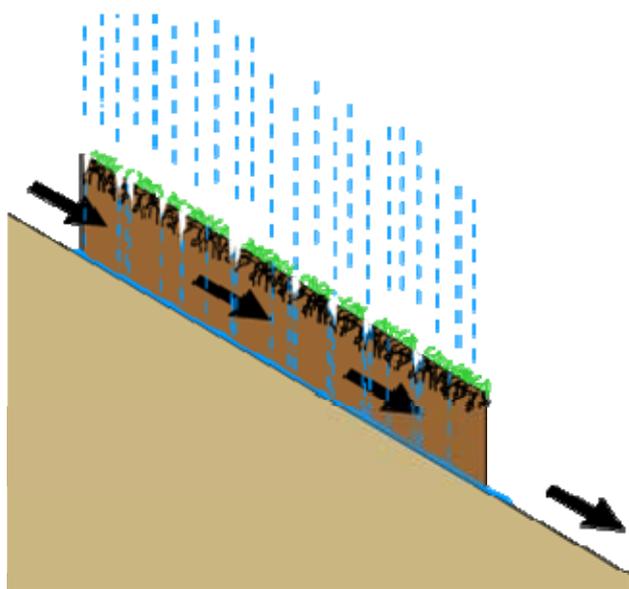
Cittadella (PD)



Cittadella (PD)

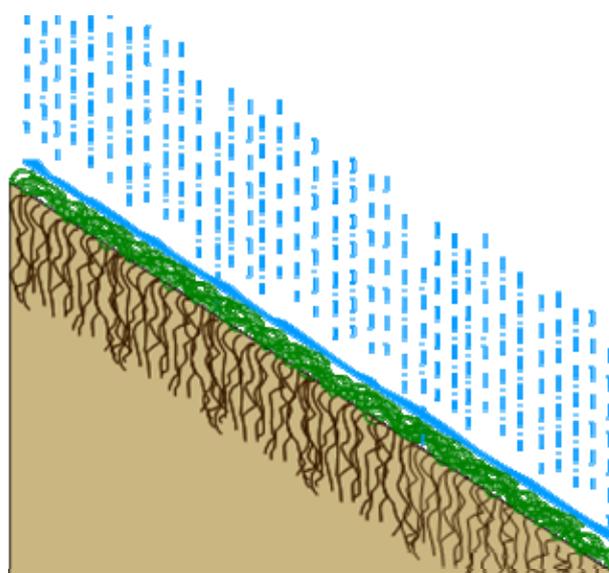
On a donc des effets combinés de stabilisation du versant: s'une partie une rapide et drastique réduction de l'érosion superficielle et de l'autre une nette diminution de l'infiltration des eaux météoriques dans le sol, cette dernière étant la cause principale d'éboulis et glissements sub-superficiels, illustrés dans les schémas qui suivent.

**Schéma A**



Hydro-semilles traditionnelle avec apport de terrain végétal

**Schéma B**



Consolidation végétale sur le sol tel quel

Dans le **schéma A** on a la situation suivante:

- Les espèces utilisées dans l'hydro-semilles traditionnelles présentent des racines peu profondes, avec une basse résistance à la traction, qui ne garantissent pas de remarquables hausses de l'effort de coupure et du facteur de sécurité du sol. En outre le dessèchement se produisant en été à cause de la réduite profondeur des racines, empêche le développement de la couverture végétale à protection du versant, favorisant ainsi l'infiltration.
- En cas d'abondantes précipitations, on a donc une érosion superficielle, une significative infiltration, un degré élevé de saturation du sol, l'augmentation de la pression *interstitielle* et la création de plans de glissement entre des matériaux de type différent ou non homogène. En particulier, dans l'exemple montré dans le schéma, on a un substrat argileux, avec une basse perméabilité, et une couche superficielle plus désagrégé et altéré (ex. terrain végétale), comme il se passe suivant dans les systèmes traditionnelles de renforcement des versants. Cette situation, à cause de l'infiltration, favorise la création d'un plan d'écoulement et donc la possibilité de glissement ou éboulement des couches superficielles.

Au contraire (**schéma B**), les particulières espèces des **PRATI ARMATI®**, grâce à la radication profonde et à l'exceptionnelle résistance à la sécheresse, garantissent toujours une complète couverture végétale du sol. En outre cette Technologie peut être appliquée à presque tous les types de sol (des sols fins limoneux argileux jusqu'aux caillouteux sableux; elles poussent aussi sur des roches faibles et altérées), même sur des terrains pratiquement stériles, sans besoin d'apporter du sol végétal, en évitant donc la possible création de plan de glissement.

Dans toutes les périodes de l'année, on aura donc une complète protection du versant, avec:

- Arrêt de l'érosion et du ruissellement superficiel.
- Diminution de l'infiltration, grâce à l'écoulement superficiel de l'eau favorisé du dense chaume végétal qui se replie en cas de fortes précipitations.
- Augmentation de l'évapotranspiration profonde.
- Diminution du degré de saturation du sol.
- Diminution de la pression interstitielle.
- Augmentation de la cohésion.
- Transmission au sol de la résistance à rupture à travers les appareils radicaux.

Au fin de la correcte réglementation des eaux superficielles, l'épaisse couverture végétale de ce type d'installations, en se repliant sur elle-même, favorise l'écoulement superficiel et donc la récolte de l'eau aux pieds des versants, où l'ont peut enfin l'intercepter et réglementer avec des canaux et fossés de protection. Cela est bien illustré dans la photo suivante, qui se réfère à un ouvrage réalisé à Orvieto pour la Provence de Terni, sur des pentes très raides.



Orvieto (TR)



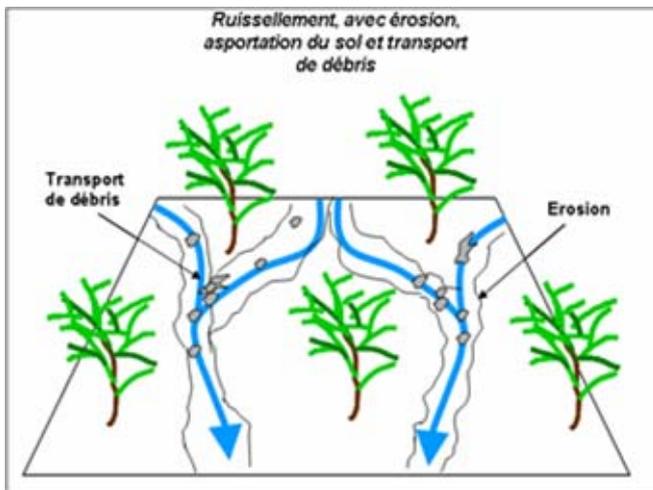
Particulier du canal

Dans ce sens la couverture végétale réalisée avec ce type d'ouvrages ressemble aux toits des huttes (réalisés eux-mêmes avec la partie épigée de plantes herbacées), qui permettent l'écoulement de l'eau apportée par des précipitations même très intenses, en imperméabilisant l'habitation.



Enfin, même au cas de pluies légères, l'excessive infiltration est réduite ou évitée grâce à l'évapotranspiration de l'eau in excès, décrite dans les pages précédentes.

Ce type d'ouvrages pour la protection des versants est beaucoup plus efficace que d'autres interventions de génie biologique prévoyant l'utilisation d'espèces arbustives ou arborescentes. Ces dernières (voire schéma à gauche), ne garantissent pas la complète couverture végétale du versant. Par conséquent, entre les plantes se produit un fort ruissellement, avec érosion et emportement du sol désagrégé. La photo de droite met très bien en évidence cet effet.



## Rénaturalisation

Un autre élément d'intérêt est l'effet de rénaturalisation que l'on peut obtenir avec la Technologie des **PRATI ARMATI®**, aux cas où le Client ne veuille pas éviter le successif développement d'espèces arbustives et arborescentes, par exemple dans le lit des fleuves, où la présence d'espèces d'haut tronc représente un problème très sérieux d'entretien. Dans ces cas la rénaturalisation peut être évitée avec des interventions de désherbe systématique avant les semailles et de successives interventions spécifiques de contrôle des mauvaises herbes.

Où cela ne constitue pas un problème, au contraire, les interventions de renforcement végétal du sol peuvent favoriser la rénaturalisation. Les espèces herbacées à radication profonde, qui permettent une couverture rapide et protègent les versants de l'érosion, se portent comme des plantes pionnières, capables de se développer même sur des terrains très pauvre en substances organiques et éléments nourrissants. Elles favorisent donc la successive poussées des plantes arbustives et arborescentes sur un sol devenu consolidé et fertile. Ce procès de rénaturalisation, qui se peut définir comme un *relais écologique*, prévoit les phases suivantes:

- les espèces herbacées à croissance rapide renforcent rapidement le terrain, le fertilisent et améliorent la structure organique du sol;
- dans le temps, les semences apportés par le vent, des oiseaux ou d'autres animaux, ou bien des semailles ou de petites plantes installées même au cours de la mise en ouvrages, peuvent s'affranchir facilement sur un renforcé, sans être remportées par l'érosion continue;
- après quelques années les espèces arbustives et arborescentes se développent luxurieuses, en intégrant complètement le site restauré et rénaturalisé dans l'environnement et le paysage.

La rénaturalisation peut être donc facilitée et accélérée en apportant des semences d'espèces locales au même temps de l'hydro-semailles ou bien successivement, aussi avec la mise en ouvrages de petites plantes avant ou après les semailles.



Sciaccia (AG): consolidation et rénaturalisation d'une cave d'argile



Trento: rénaturalisation d'une langue d'origine glaciale stérile dans une ex-cave



Province de Bolzano: renforcement et rénaturalisation avec le développement d'arbres locaux

## Pas envahissantes

Les espèces herbacées utilisées dans les ouvrages de renforcement végétal avec les **PRATI ARMATI®** ne présentent aucun problème d'envahissement. On définit ici des mauvaises herbes les espèces qui se propagent de façon virulente et incontrôlée et qui n'ont aucune utilité.

Le manque d'envahissement est largement démontré sur tous les chantiers réalisés avec cette Technologie, où il y a une nette démarcation entre la zona renforcée et celle qui n'a pas été traitée. Même après des années il ne se passe aucun genre d'envahissement (voire photos suivantes).



Ancona



Appiano (BZ)



Florinas (SS)

### **Espèces autochtones**

Cette nouvelle Technologie utilise un mélange avec des dizaines d'espèces, entre graminées et légumineuses, dont beaucoup sont autochtones, provenant soit des Pays Européens soit du reste du monde. Les espèces, variétés et provenances employées dans chacune des ouvrages sont identifiées selon les caractéristiques pédo-climatiques du site et de particulières exigences du Client.

Au cours de l'installation on peut aussi ajouter des semences d'espèces herbacées, arbustives ou arborescentes locales, pour favoriser la successive rénaturalisation du site.

### **Résistance au feu**

Les espèces employées pour la consolidation végétale du sol ont une élevée capacité de repousse après les incendies (voir photo de gauche).

Dans la photo de droite on peut voir au contraire l'effet de destruction d'un incendie sur une géo-grille en plastique reverdie avec une hydro-semence traditionnelle.

En plus certaines espèces, dans des conditions pédo-climatiques appropriées, sont verdoyantes pendant l'été, en prévenant ainsi le développement et la propagation des incendies.



La repousse après un incendie



Géogrilles et hydro-semences traditionnelle après un incendie

### **Résistance à la sécheresse**

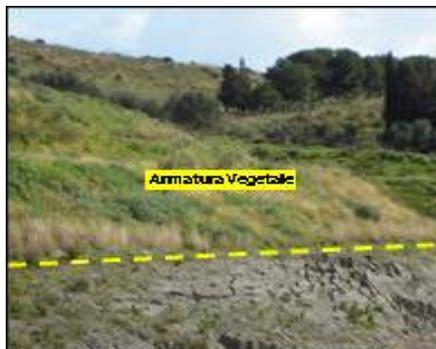
Normalement la mise en œuvre de consolidation végétale du sol n'a pas besoin d'aucun apport d'eau. Cela étant indispensable pour le renforcement et la rénaturalisation d'escarpements routiers, autoroutiers, ferroviaires, caves, mines et décharges, et plus en général dans des zones où il n'est pas possible de réaliser d'ouvrages d'irrigation.

La remarquable capacité des espèces des **PRATI ARMATI®** de survivre à la sécheresse dérive soit de la profondeur de l'appareil racinaire, qui peut trouver l'humidité toujours présente dans les couches profondes du sol, soit de la physiologie des plantes que l'on utilise.

Les plantes, comme tous les systèmes naturels, sont capables de se régler: quand le sol présente un haut taux d'humidité, elles extraient l'eau en excès des couches profondes, en provoquant l'évaporation et améliorent les propriétés géotechniques du sol. En été l'évaporation se réduit remarquablement, grâce à la capacité des plantes de fermer leurs stomates (montrés à la microscopie électronique dans les pages précédentes)

Dans la photo de gauche on voit le chantier réalisé en Mars 2004 à Sciacca (Sicile), sur des argiles gris-azures, exposé aux vents du sud, avec des températures torrides en été. L'installation est parfaitement réussie sans aucun apport d'eau.

La photo de droite se réfère à la décharge de déchets urbains de la Chilivani Ambiente à Ozieri (Sardaigne) où les irrigations, au début prévues pour tout l'été, ont été complètement suspendues dès la fin du moi de Juin. Néanmoins, le chantier est très bien survécu à la sécheresse de l'été en Sardaigne et au mois de Novembre il était parfaitement reverdi.



Sciacca (AG): ex cave de argile



Décharge à Ozieri (SS)

### **Résistance au sel**

Le mélange comprend des espèces très rustiques, qui tolèrent d'élevées concentrations de sel, jusqu'à environ 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (environ 1/5 de la concentration présente dans la mer).

Les images suivantes montrent des exemples d'escarpements qui se trouvent au bord de la mer: à gauche l'installation réalisée pour la Commune de Ancona en 2002; au centre une installation réalisée en 2004 pour la Commune de Castelsardo (Sardaigne), qui se trouve directement face à la mer, dans un site très exposé aux vents de Mistral; à droite, l'installation réalisée pour le Port de Genova en 2002.



Ancona



Castelsardo (SS)

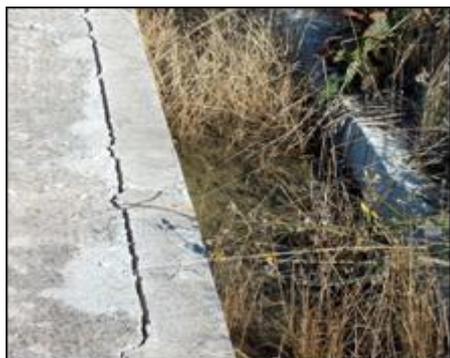


Port de Genova

### **Manutention**

Une fois la couverture végétale bien développée, l'installation de **PRATI ARMATI®** n'a aucun besoin d'entretien, pas même de faucher les herbes, en éliminant de cette façon tout coût de gestion pour le Client. En plus les installations de renforcement végétal du sol contribuent à garder dans le temps l'efficacité des ouvrages civils, comme les canaux et les drainages, en réduisant ultérieurement les coût d'entretien.

Les photos qui suivent se réfèrent à un chantier réalisé sur le grand éboulis de Ancona (centre Italie), et montrent: à gauche un canal engorgé, dans une zone qui n'est pas protégée par l'installation de consolidation végétale; à droite un canal parfaitement propre, dans une zone limitrophe, traitée avec cette nouvelle Technologie.



Ancona – canal engorgé dans la zone non traitée avec les PRATI ARMATI®



Canal parfaitement propre dans la zone protégée par les PRATI ARMATI®

### **Résistance a l'immersion**

Les espèces **PRATI ARMATI®** présentent en outre une remarquable résistance à l'immersion et peuvent donc être utilisées pour le renforcement des berges de bassins, fleuves ou torrents.

On montre à ce propos des images d'un chantier réalisé à Pordenone, pour le Génie Civil, Ministère des Travaux Publics, Magistrat des Eaux, le long de la berge du fleuve Noncello, affluent du Meduna, berge qui s'était effondrée à cause des inondations.

Réalisé entre les années 1998 et 2000, en accouplant avec une correcte planification le consolidation végétale du sol aux espèces herbacées à radication profonde et d'autres ouvrages de génie biologique (structures de renforcement en perches de bois et drainages en pierres), l'installation a résisté soit à plusieurs inondations saisonnières soit aux graves inondations du novembre 2000 et 2002, qui avaient fait enregistrer une hausse du niveau de l'eau de plus de 20 mètres, la complète immersion de la végétation et niveau de l'eau d'environ 2 mètres au dessus du plan de campagne. Ces phénomènes se sont prolongés pour environ 4 jours et les portées sont augmentées de 200 à 1400 m<sup>3</sup>/sec.

Les images suivantes montrent aussi la zone qui n'a pas été traitée, qui s'est effondrée à cause des événements ci-décrits, en reculant d'environ 10 mètres et entraînant les arbres d'haut fût. Cela démontre clairement l'efficacité de ce type d'intervention qui, au contraire, a empêché toute érosion et glissement.



Les travaux sur les berges



Hydro-semailles



L'ouvrage après 1 an environs



Le chantier sous l'inondation du Nov. 2002



Un arbre traîné par le glissement dans la zone non traitée



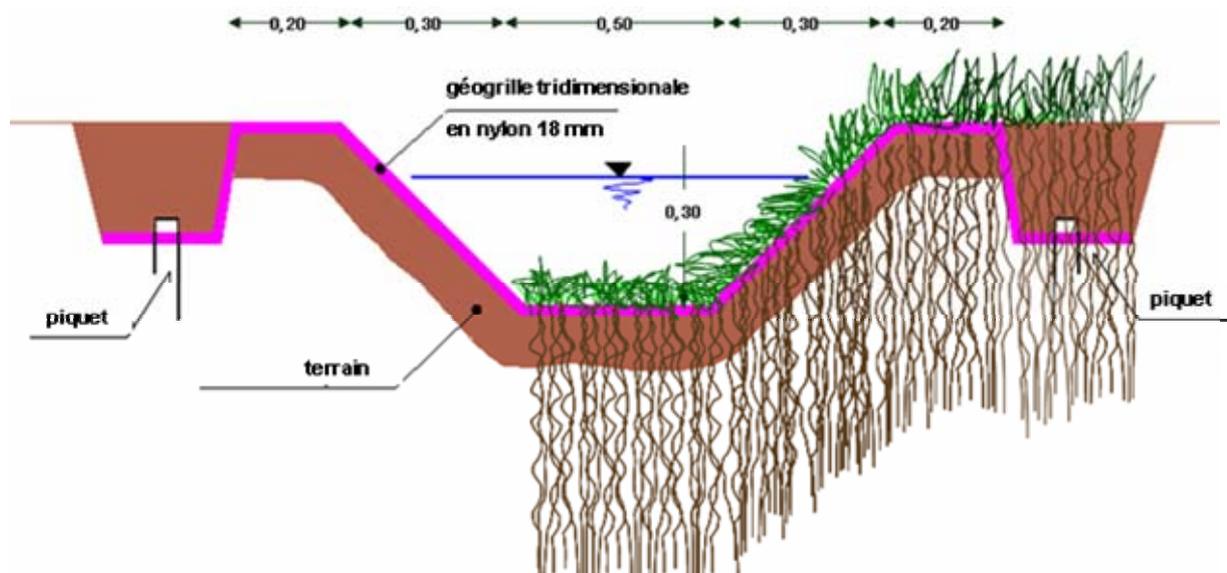
Particuliers de la zone non renforcée et éboulis, avec des arbres déracinés et glissement du berge de plus de 10 mètres



Vue d'ensemble du chantier renforcé 2 ans après l'intervention

### Protection de canaux et fossés de protection

Pour garantir la correcte canalisation des eaux pluviales ou la protection des canaux il est possible d'accoupler cette Technologie avec par exemple la géogrille tridimensionnelle en nylon de 18 mm, enterrée et reverdie avec ce type de couverture végétale, comme le montre le schéma suivant. L'installation de consolidation végétale raccroche en profondeur la géogrille, la protège sur la surface grâce à la masse foliaire qui intercepte et ralentit les flux, et garantit donc des résultats plus rapides et durables dans le temps. Cela permet le meilleur ancrage de la géogrille et la protection du canal même en cas de flux d'eau qui atteignent et dépassent des vitesses de 5/6 m/sec.



La réalisation de ce type de canaux prévoit les opérations suivantes:

- excavation du canal
- mise en œuvre de la géogridle tridimensionnelle
- enterrement latéral de la géogridle et fixage avec des piquets
- remplissage de la géogridle avec le terrain excavé
- couverture végétale (incluse dans les travaux décrits au chapitre précédent)

Compte-donné de la rusticité des espèces ci-décrites, dans ce cas il n'est pas nécessaire d'apporter du terrain végétal pour remplir la géogridle. Au contraire on peut utiliser le même terrain obtenu avec l'excavation du canal.

Par rapport aux géogridles et aux autres matériels disponibles en commerce, on préfère la géogridle en nylon pour les supérieures prestations techniques et la majeure durée dans le temps.

L'efficacité de cette nouveaux type couverture végétale dans la protection des canaux en terrain renforcés avec les con le géogridles (et donc d'élever leur résistance à la vitesse des flux, qui passe à 5-6 m/sec contre les 2,5 m/sec des simples géogridle enterrées) est démontré dans l'exemple ci-dessous, référé à une intervention réalisée pour la Commune de Ancona.

A gauche l'on montre un canal renforcé avec une géogridle reverdi avec des méthodes traditionnelles. Le manque d'efficace contre l'érosion est démontré par le puits placé aux pieds du canal de drainage, presque complètement engorgé par les débris (photo en bas à gauche).

Les photos à droite se réfèrent au contraire à une zone limitrophe, traitée avec la couverture végétale **PRA TI ARMATI®**. Dans ce cas le canal de drainage est totalement protégé par l'épaisse couverture végétale qui arrêl complètement l'érosion: voire le puits situé aux pieds du canal de drainage, parfaitement propre après environs 2 ans de l'intervention (photo en bas à gauche).

Canal avec géogrille en plastique et hydro-semailles traditionnelle



Canal avec géogrille en plastique et PRATI ARMATI®

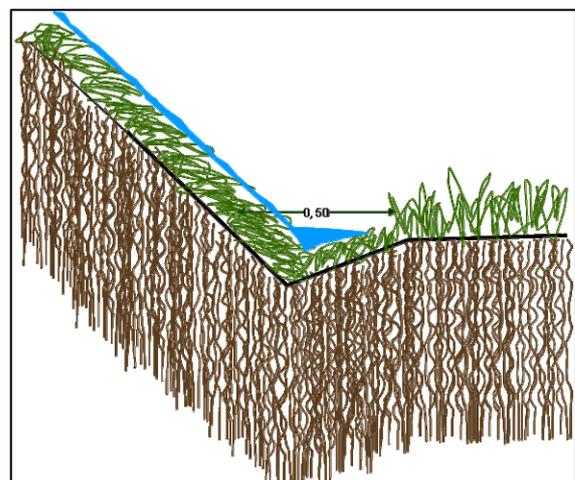


Ce type de consolidation végétale est associable à toutes les techniques traditionnelles de génie biologique réalisées à protection des canaux et cours d'eau, qui prévoient l'utilisation de structures en bois, rochers cyclopes ou gabions ou même la mise en œuvre de blocs de ciment à reverdir.

Les **PRATI ARMATI®** en effet protègent les autres ouvrages, en agissant en singerie avec elles.

Dans certains cas, où il n'y a pas des situations critiques de vitesse d'écoulement (non supérieures à 1,5 m/sec, au moins jusqu'à que l'installation de consolidation végétale ne soit pas complètement développée) on peut aussi réaliser avec cette Technologie des simples fossés de protection au des petits canaux reverdis, comme dans le schéma ci-joint.

Il s'agit d'un type d'installation qui permet de minimiser les coûts et la complexité de l'intervention, en réalisant des bords renforcés et reverdis ou des simples fossés de protection reverdi avec la Technologie ci-décrite (voir les schémas suivants). L'épaisse couverture végétale, unie à l'action de l'apparat radicale caractérisé par la remarquable profondeur et la résistance à traction très élevée, garanti, une fois développée, la protection optimale du berge o du fossé et leur conservation dans le temps.



Les photos suivantes montrent deux exemples d'applications hydrauliques: un canal près de Brescia (Italie du Nord) combiné à des perches en bois et un canal près de Matera (Italie du Sud), en combinaison avec des ouvrages hydrauliques (seuils).



*Octobre 2001: bergée d'un canal éboulé après une inondation auprès de Brescia*



*Le site renforcé avec les PRATI ARMATI en Mai 2002*



*Novembre 2006: hydro-semailles de PRATI ARMATI accouplées à des ouvrages de renforcement hydrologiques (seuils) dans l'Italie du Sud*



*Le site renforcé et reverdi en Mai 2007. La végétation est pliée selon le courent après une inondation*