

GICOT, O., Soltechnique, Fribourg, Suisse
GOURC, J.-P., Université de Grenoble, France
PERFETTI, J., Rhône-Poulenc Fibres, Bezons, France

LA SOLUTION GEOTEXTILE DANS L'ETUDE ET LE BILAN D'UN PROJET DE SOUTÈNEMENT
THE GEOTEXTILE SOLUTION IN THE STUDY AND THE FINAL EVALUATION OF A
RETAINING STRUCTURE PROJECT
DIE LÖSUNG GEOTEXTIL IN DER BEARBEITUNG UND DER BILANZ DES PROJEKTES
EINER STÜTZKONSTRUKTION

Lors de l'étude d'un soutènement, les incidences d'un choix techniquement et économiquement judicieux sont particulièrement importantes. La solution géotextile, d'application récente, offre de nouvelles possibilités au projeteur. Pour deux exemples pratiques, où le soutènement est en particulier lié à des problèmes de stabilité, on présente tout d'abord les résultats d'étude de solutions éprouvées, et on en tire un premier bilan. On étudie ensuite pour ces mêmes exemples la solution géotextile. On traite les problèmes de stabilité mécanique du soutènement, de géométrie, d'adaptation au milieu ambiant, de durabilité et de mise en oeuvre. En comparant les solutions de soutènement dites éprouvées à la solution géotextile, on tire enfin un bilan d'ensemble critique sur les plans technique et économique.

When studying a retaining structure, the incidences of a judicious choice, technically as well as economically, are particularly important. The geotextile solution, recently developed, offers new possibilities to the designer. At first, the results of an analysis of well-tried solutions are presented for two practical examples where the retaining structure is in particular linked with stability problems. The geotextile solution is then analysed for these same examples. The problems of mechanical stability, geometry, adaptation to the environment, durability and construction are treated. Finally, a technical and economical comparison between well-tried solutions and the geotextile solution leads to an overall and critical evaluation.

1. PREAMBULE

Les ouvrages de génie civil et plus particulièrement les ouvrages à risques engageant la sécurité des personnes et des biens comme les soutènements nécessitent des études techniques approfondies qui fourniront plusieurs solutions à un même problème. Néanmoins, le choix de l'une ou l'autre des solutions étudiées et proposées sera en relation directe avec les conditions économiques liées au projet. C'est donc sur le bilan, entre les solutions techniques et les conditions économiques de réalisation que sera effectué le choix d'une solution par rapport à une autre.

On se propose à partir de deux projets de soutènement d'examiner et de comparer pour chacun d'eux une solution faisant appel à des géotextiles à des solutions plus traditionnelles comme les parois ancrées ou la Terre Armée. On a retenu un premier cas de soutènement limité en dimensions, mais qui par les contraintes d'environnement et d'accès, semblait bien adapté à l'emploi des géotextiles. Le second cas est plus général par sa configuration géométrique et permet d'envisager plusieurs scénarios intégrant la stabilité externe de l'ouvrage. Pour les calculs de dimensionnement, on s'est basé pour les solutions traditionnelles sur les modèles couramment utilisés. Pour les solutions géotextiles, on a appliqué la démarche préconisée par l'Université de Grenoble [1].

Les diverses évaluations du montant des travaux sont liées au contexte Suisse. La présentation des bilans pour ces deux études a été rédigée de manière à attirer l'attention sur les points sensibles de ces deux projets, en particulier sur leur facilité de réalisation et sur leur comportement à long terme.

2. CAS A : SILLON D'EROSION ET INSTABILITE DE TALUS

2.1. Situation générale

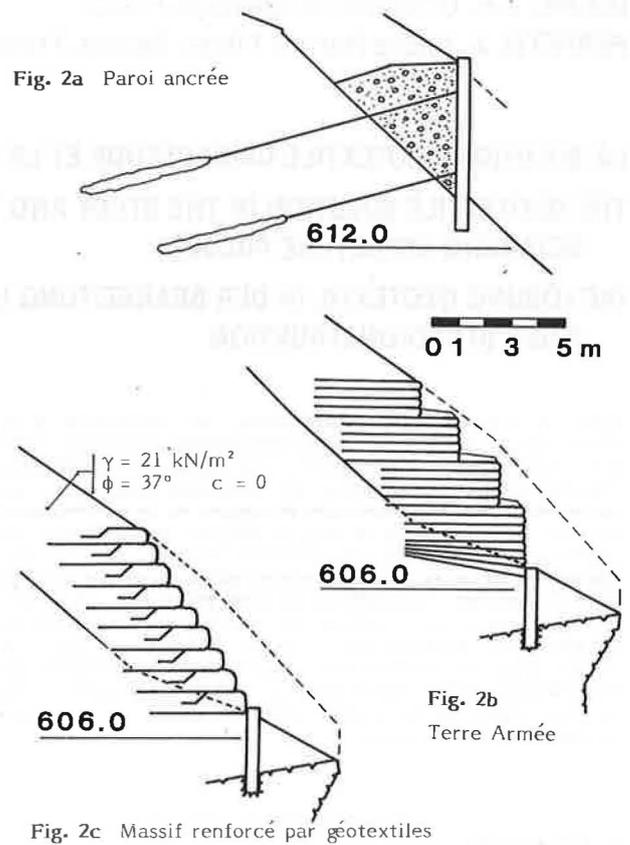
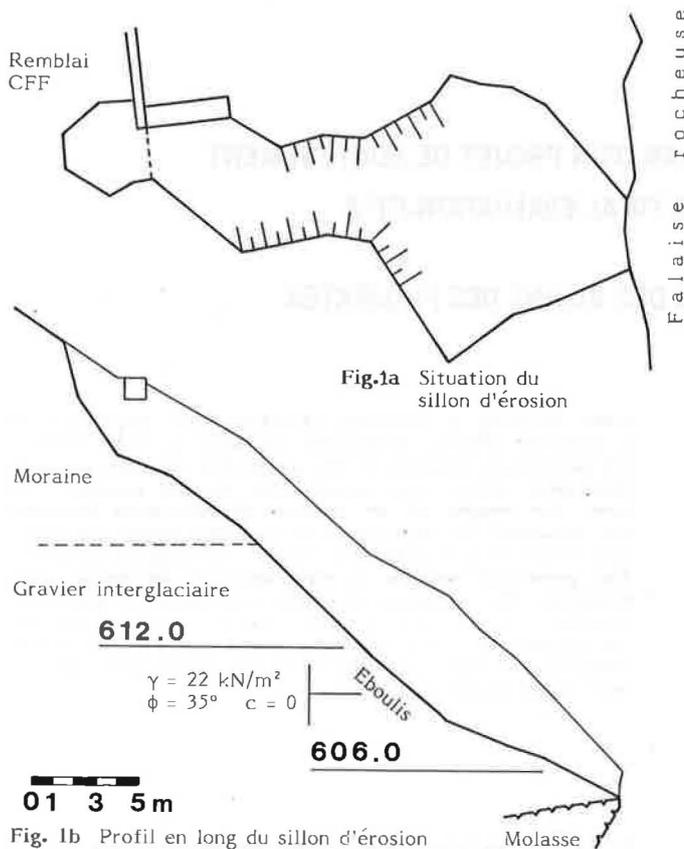
Dans une pente boisée, raide, dominant une falaise molassique et dont le sommet est occupé par un remblai supportant une ligne principale des Chemins de Fer Fédéraux Suisses (CFF), il s'est creusé au cours du temps dans la moraine et le gravier interglaciaire sous-jacent constituant la pente un sillon d'érosion étroit et profond. Cette érosion a été attribuée à l'écoulement libre dans le talus des eaux du trop-plein d'un collecteur aboutissant au pied du remblai CFF. Par effet régressif, le pied de ce remblai a été entaillé et a mis en danger la stabilité de l'ensemble du talus CFF et consécutivement de la voie de chemin de fer (fig. 1a et 1b).

L'analyse des conditions topographiques, géologiques, hydro-géologiques et géotechniques a conduit à étudier 3 variantes de solution correctives.

2.2. Solutions correctives

La **première variante** (fig. 2a) consiste à ériger à mi-pente dans la partie étroite du sillon d'érosion une paroi en béton armé de 6.50m de côté, encastrée dans les sols stables et soutenue par 4 tirants d'ancrage précontraints de 12 à 15 m de longueur, avec scellement dans les graviers interglaciaires. Pour éviter une déformation excessive de la paroi sous les efforts de précontrainte, tout en assurant le drainage à son arrière, cette paroi s'appuie sur un massif de béton poreux. En direction des voies CFF, le solde du sillon est remblayé avec une pente de 33°.

La **deuxième variante** (fig. 2b) comprend l'édification, dans la partie inférieure élargie du sillon, d'un massif de soutènement en Terre Armée. Pour des raisons topographiques, ce massif est constitué de 4 gradins dont la hauteur totale s'élève à 7.40 m. Leur longueur varie de 7.7 m à 13.0 m. Les armatures, légèrement inclinées à la base



du premier gradin pour limiter les excavations en éboulis, ont une longueur comprise entre 4.0 m et 4.5 m. En raison des difficultés d'accès au site et de la topographie capricieuse du sillon, le choix s'est porté sur un parement en peaux métalliques plutôt qu'en écailles de béton. Comme ce soutènement, proche de la falaise rocheuse, repose sur des éboulis, sa stabilité est garantie par une petite paroi en béton armé encastrée dans le rocher sain. En direction des voies CFF, le reste du vallon est remblayé avec une pente de 36°. Etant donné la nature des matériaux de remblai, le massif Terre Armée ne comprend pas de système de drainage. Par contre, les eaux de percolation sont collectées sur toute la longueur du sillon.

La troisième variante (fig. 2c) consiste à ériger, en lieu et place de la Terre Armée, un massif renforcé par des géotextiles; les autres caractéristiques du projet demeurent les mêmes. Le soutènement étudié, en forme de parallélogramme, a une hauteur de 7.0 m et une largeur de 3.7 m. Le parement avant est incliné à 58°. La longueur du massif est la même que celle de la Terre Armée. Pour la constitution du massif renforcé par géotextiles, on a choisi des matériaux d'apport gravelo-sableux. De ce fait, aucun drainage périphérique du massif n'est requis.

2.3. Dimensionnement

On ne décrira pas les méthodes de dimensionnement appliquées aux deux premières variantes. Sur le plan géotechnique, une solution classique de détermination de la poussée des terres a été adoptée pour la paroi ancrée. L'ouvrage Terre Armée a été dimensionné selon les spécifications en vigueur.

La méthode de calcul dite des blocs [1] a servi au dimensionnement du massif renforcé par géotextiles, pour lequel on a pris en considération un produit polyester, en affectant

sa résistance à la traction d'un coefficient de sécurité de 5. Les paramètres sol-géotextile suivants ont été appliqués: angle de frottement 24°, cohésion nulle. La somme des tractions mobilisées dans les nappes de géotextiles, choisies au nombre de 9, ce qui correspond à une épaisseur des couches de 0.60 à 0.80 m, s'élève selon le calcul à 66 kN/m'. Cette valeur relativement faible permet de réaliser le massif renforcé aussi bien avec un géotextile non tissé qu'avec un géotextile tissé. Les coefficients de sécurité au renversement et au glissement à la base du massif valent respectivement 13.3 et 1.5. La longueur totale de géotextile requise par mètre courant de soutènement, y compris les longueurs d'ancrage, est de 61 m.

2.4. Bilan technique

Les trois variantes étudiées comportent certaines différences qu'il faut souligner.

La paroi ancrée doit être encastrée suffisamment dans les sols en place pour éviter une mise à nu à long terme de ses bords d'appui latéraux. Cette solution permet de ne remblayer que la partie supérieure du sillon d'érosion. Bien que les versants en graviers interglaciaires soient partiellement cimentés, un risque d'instabilité à long terme demeure dans la partie inférieure du sillon.

L'édification de la Terre Armée ou du massif renforcé par géotextiles nécessite peu d'excavation et évite ainsi un remaniement des sols actuellement stables. Ces deux solutions permettent de remblayer entièrement le vallon, éliminant ainsi le risque d'instabilité à long terme de ses versants latéraux.

La durabilité de chacun des ouvrages de soutènement est liée principalement à celle de leurs éléments stabilisateurs, c.à d. respectivement des tirants d'ancrage, des armatures métalliques ou des géotextiles tissés ou non tissés. Le

comportement à long terme des tirants et des armatures métalliques enterrés fait l'objet de spécifications, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui pour les géotextiles. Dans l'état actuel des connaissances et des études conduites dans le domaine du vieillissement, il apparaît que les matériaux synthétiques, dans des conditions non exceptionnelles d'environnement, ne subissent pas d'altération capable de compromettre significativement leurs caractéristiques initiales. A noter que sous sollicitation permanente en traction et dans des conditions de température normales, certains matériaux, en particulier le polypropylène, ont tendance à fluer. Ce phénomène devra être pris en considération par l'intermédiaire des coefficients de sécurité. Il est connu que les matériaux synthétiques sont sensibles aux rayons ultraviolets. Aussi il a été prévu, compte tenu de la géométrie de l'ouvrage, de protéger le parement par végétalisation.

2.5. Bilan économique

Une estimation du coût total des trois variantes, basée sur les conditions économiques suisses à fin 1985, a donné les résultats suivants (valeurs arrondies) :

paroi ancrée :	SFr 170'000.--	100 %
Terre Armée :	SFr 170'000.--	100 %
massif renforcé par géotextiles tissés :	SFr 140'000.--	82 %
massif renforcé par géotextiles non tissés :	SFr 135'000.--	80 %

Dans l'appréciation de ces coûts, il faut tenir compte notamment des difficultés d'accès au chantier et des conditions topographiques locales particulières qui obligent entre autres à réaliser les excavations et remblayages à la main et à n'utiliser que des engins de chantier légers et de très faible encombrement. On constate d'une part que le coût des deux premières variantes est le même, bien que, selon les conditions du site il est vrai, la solution Terre Armée soit souvent plus économique qu'une solution dite traditionnelle. D'autre part, la solution géotextile conduit à une économie de l'ordre de vingt pour-cent, économie à mettre essentiellement sur le compte de la fourniture et de la mise en oeuvre du géotextile.

3. CAS B : CORRECTION DE ROUTE

3.1. Situation générale

L'étude du second cas est inspirée d'un projet de correction d'une route cantonale exigeant l'édification d'un ouvrage de soutènement, en Suisse. Elle ne fait cependant pas l'objet d'une analyse comparative globale comme dans le cas A, mais est plutôt consacrée à la confrontation de variantes de soutènement selon un profil topographique, géologique, hydrogéologique et géotechnique bien déterminé, et ceci pour des hauteurs variables d'ouvrage. Cette étude permet donc de tirer sur les plans techniques et économiques des conclusions plus générales.

Sur une pente naturelle inclinée à 4°, on prévoit d'édifier un remblai destiné à supporter une route. Pour des raisons d'emprise, ce remblai doit être limité et nécessite l'édification d'un soutènement. L'étude a porté sur trois hauteurs, 3, 6 et 9 m. Le sous-sol du site est formé d'une couche de colluvions, compressibles, de 4,5 m d'épaisseur, qui repose sur un substratum rocheux, constitué de marne et de grès tendre (molasse), peu déformables. (Fig. 3).

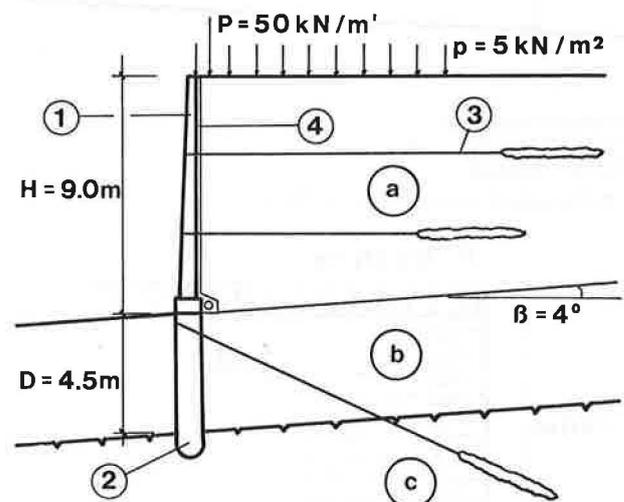
Les soutènements ont été étudiés en fonction d'une ou de deux sortes de sols de constitution du remblai (sols d'apport extraits d'une gravière sise à 10 km du site (gravier sableux GW) ou sols exploités à proximité (limon argileux CL). Les paramètres géotechniques de ces sols une fois mis en place ont été fixés à :

- gravier sableux : $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$,
 $\phi = 35^\circ$, $c = 0$
- limon argileux : $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,
 $\phi = 25^\circ$, $c = 10 \text{ kN/m}^2$

3.2. Solutions

Trois genres de soutènement ont été étudiés et comparés, c.à d. un ouvrage classique, un massif en Terre Armée et un massif renforcé par des géotextiles.

Parmi les solutions classiques, on a choisi, après confrontation avec d'autres variantes (mur à contreforts, mur console, etc.) une **paroi ancrée**. En raison de la grande déformabilité des colluvions, il s'est avéré nécessaire d'appuyer l'ouvrage sur des fondations profondes, c.à d. des pieux, forés et moulés en place, encastrés dans le rocher (fig. 3). L'analyse de cette solution a été faite pour les deux sols d'apport mentionnés plus haut (GW, CL).



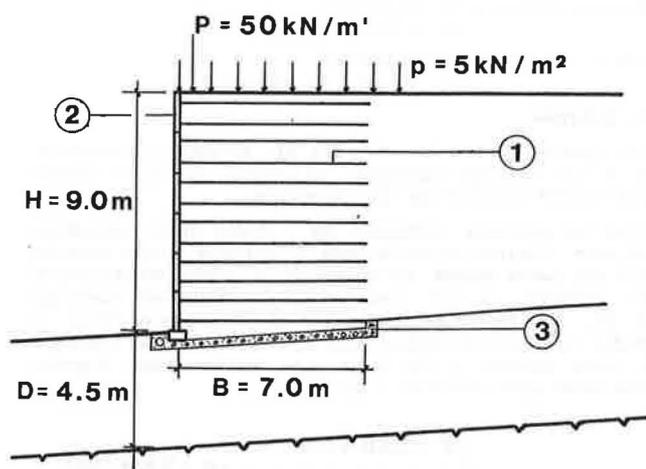
- a remblai (GW, ou CL stabilisé à la chaux)
- b colluvions : $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 20^\circ$, $c = 15 \text{ kN/m}^2$
- c molasse marno-gréseuse

- 1 mur en béton armé, ép. 20 à 60 cm
- 2 pieux espacés : $\phi 80$ à 100 cm
- 3 tirant d'ancrage : $L = 12$ à 15 m
- 4 masque drainant

Fig. 3. Première variante : paroi ancrée

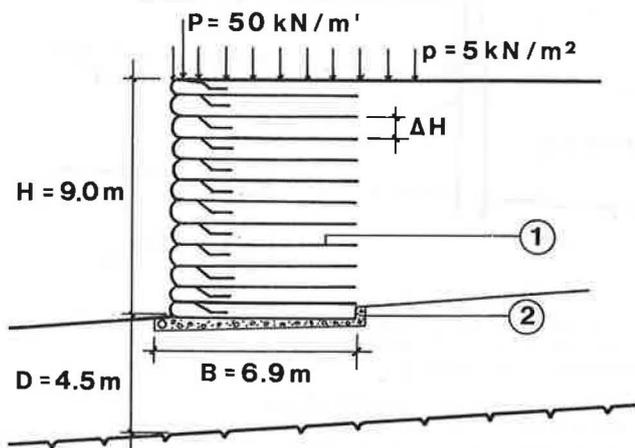
La deuxième solution, c.à d. la Terre Armée, n'exige pas de reporter les charges en profondeur. Les tassements différentiels de l'ouvrage (compte tenu de sa hauteur variable) restent en effet tolérables pour ce genre de soutènement ($< 1/100$) (fig. 4). Pour demeurer dans les spécifications Terre Armée, seuls les matériaux d'apport gravo-sableux ont été retenus pour la constitution du massif renforcé. En raison de la faible perméabilité des colluvions, un drainage de la base du massif est nécessaire.

La troisième solution, **massif renforcé par géotextiles**, par sa souplesse, n'exige pas non plus, dans le contexte du projet, un report des charges en profondeur (fig. 5). Pour prendre en compte les aptitudes spécifiques des différents géotextiles, ce soutènement a été envisagé d'une part avec un massif gravo-sableux renforcé par un géotextile tissé et d'autre part avec un massif limono-argileux armé d'un géotextile composite (association de tissé et de non-tissé). Comme pour la solution Terre Armée, l'assise du massif géotextile repose sur un matelas drainant.



- 1 armature métallique
- 2 écaille en béton
- 3 matelas drainant

Fig. 4. Deuxième variante : Terre Armée



- 1 géotextile
- 2 matelas drainant

Fig. 5. Troisième solution : massif renforcé par des géotextiles

3.3. Dimensionnement

Paroi ancrée : vu la nécessité de fonder la paroi ancrée sur pieux, son dimensionnement a dû être effectué en introduisant une poussée sur une hauteur comptée à partir du toit du rocher. Le calcul des efforts a été réalisé en introduisant la déformation relative des sols de la paroi. L'ouvrage comprend, 1, 2 ou 3 niveaux d'ancrage selon que sa hauteur H est de 3, 6 ou 9 m.

Terre Armée : l'ouvrage a été dimensionné selon les spécifications en vigueur. Les largeurs B de massif découlant du calcul sont de 3, 4 et 7 m pour les hauteurs respectives H de 3, 6 et 9 m.

Massif renforcé par géotextiles : la méthode développée par l'Université de Grenoble a été utilisée pour son dimensionnement [1]. Les paramètres sol-géotextile suivants ont été introduits dans les calculs : frottement 23°, cohésion

nulle (GW) et frottement 17°, cohésion 6 kN/m² (CL). La résistance à la traction du géotextile tissé, resp. non tissé, polyester, a été affectée d'un coefficient de sécurité de 5. Les résultats du calcul sont reproduits dans le tableau 1.

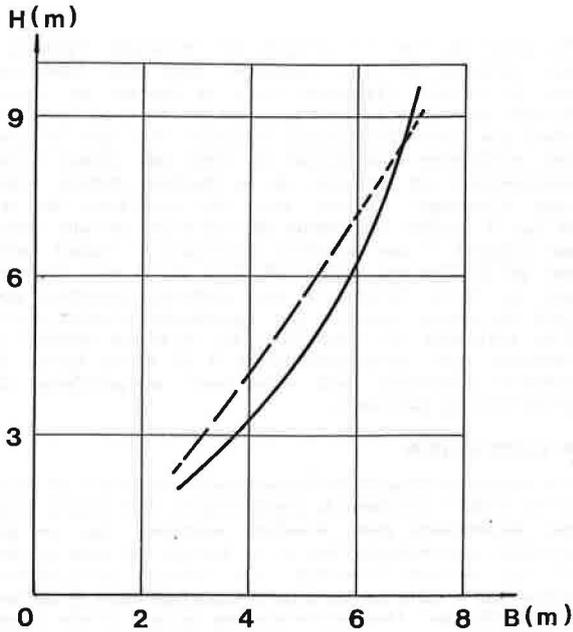
Tableau 1 : Résultats du dimensionnement des massifs renforcés par des géotextiles

H m	Massif renforcé : GW + tissé de résistance à la traction 215 kN/m'				
	B m	ΔH m	Long. tot. géotextile m	Sécurité renvers.	Sécurité glissem.
3	3.8	0,6 à 0,8	28	15,48	3,70
6	5,9	0,4 à 0,8	72	9,95	2,97
9	6,9	0,6 à 0,8	119	6,19	2,34
H m	Massif renforcé : CL + composite de résistance à la traction 100 kN/m'				
	B m	ΔH m	Long. tot. géotextile m	Sécurité renvers.	Sécurité glissem.
3	3,1	0,6 à 0,8	23	9,34	7,00
6	5,2	0,4 à 0,3	76	5,15	2,59
9	Irréaliste (Nombre de couches trop élevé)				

La figure 6 illustre graphiquement la relation entre la hauteur du massif renforcé et sa largeur, pour les deux sortes de remblai et de géotextile.

Pour tous les cas étudiés, la stabilité externe de l'ouvrage, déterminée par la méthode des perturbations, est suffisante, le coefficient de sécurité au glissement d'ensemble demeurant supérieur à 1.40.

En complément, on a examiné la stabilité externe du massif haut de 9 m renforcé par géotextiles tissés polyester (sol d'apport GW) dans des conditions géologiques et géotechniques identiques, mais avec une pente naturelle inclinée à 18°. Le coefficient de sécurité au glissement d'ensemble a passé alors de 1.43 à 1.15. Le degré de stabilité externe du massif devient insuffisant pour un ouvrage permanent; il nécessite de recourir à une structure destinée à augmenter la sécurité au glissement des colluvions, sous forme p. ex. d'une paroi de pieux ancrée, placée au pied du massif renforcé.



- géotextile tissé, remblai GW
- - - géotextile composite, remblai CL
- · - · - géotextile composite, remblai CL : irréaliste, car nombre de couches trop élevé

Fig. 6. Massif renforcé par des géotextiles : largeur B du massif en fonction de sa hauteur H

3.4. Bilan technique

La **paroi ancrée** a le désavantage de faire appel, si l'on excepte les terrassements, à trois types d'intervention (pieux, tirants, mur en béton armé). C'est une structure rigide qui ne supporte que de faibles tassements différentiels. Son remblai arrière peut par contre consister en matériaux de plus ou moins bonne qualité, pour autant qu'on prenne les mesures adéquates pour assurer leur bonne mise en oeuvre. Bétonnée sur place, une telle paroi convient sans trop de difficulté lorsque le profil en long est irrégulier. Elle est esthétiquement acceptable.

La **Terre Armée**, relativement souple, s'adapte bien à des tassements différentiels, pour autant qu'ils ne soient pas excessifs. Elle ne requiert pas de coffrage. Le frottement à mobiliser au contact terre-armature exige des sols d'apport répondant à des critères bien déterminés. Sur le plan esthétique, les écailles de béton (si l'on excepte le parement en peaux métalliques) sont aussi, si ce n'est plus satisfaisantes que des parois uniformes.

Le **massif renforcé par géotextiles**, de grande déformabilité, peut supporter d'importants tassements différentiels. Les géotextiles, légers, sont faciles à mettre en oeuvre; ils requièrent toutefois l'aide d'un coffrage mobile frontal. Par sa transmissivité, un géotextile composite (association de non-tissé et tissé), contrairement à un tissé, contribue à la consolidation de sols d'apport de médiocre qualité. Par contre, par sa résistance à la traction moyenne, son application devient irréaliste pour des soutènements de grande hauteur (nombre de couches trop élevé). Les massifs renforcés par géotextiles, sans protection de parement (végétalisation, p.ex. qui ne convient toutefois pas à un parement vertical) sont peu esthétiques.

La Terre Armée et le massif renforcé par géotextiles ne nécessitent, hormis les terrassements, qu'un type d'inter-

vention (montage du soutènement), avantage qui se répercute sur le délai d'exécution, plus court que pour une construction classique. Ils ne s'accrochent par contre pas toujours aisément d'un profil en long irrégulier.

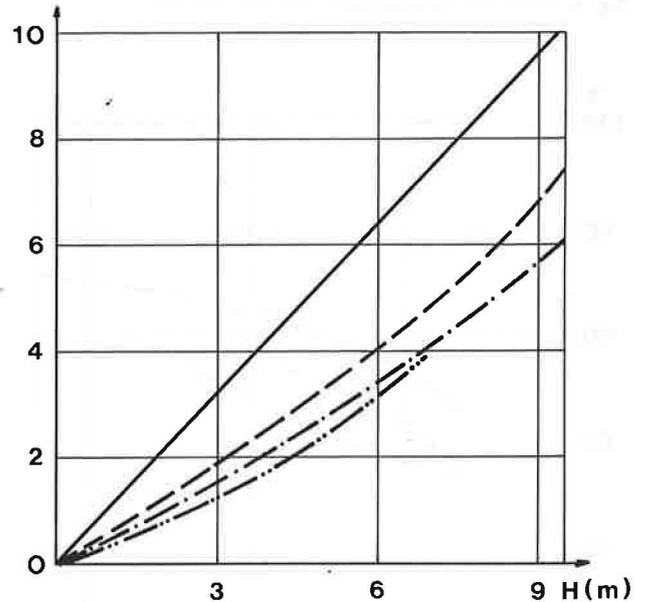
Au sujet de la durabilité des trois types de soutènement, on se référera au par. 2.4.

3.5. Bilan économique

Dans le souci de rester général, le coût estimatif des trois genres de soutènement a été établi en faisant abstraction des postes d'installations générales de chantier. De plus, pour mieux différencier ces coûts, le volume de remblai inclus dans l'estimation a, pour chaque hauteur d'ouvrage, été limité à celui du massif renforcé le plus grand. Les coûts ainsi établis sont issus d'une étude détaillée et sont basés sur des prix en vigueur en Suisse à fin 1985.

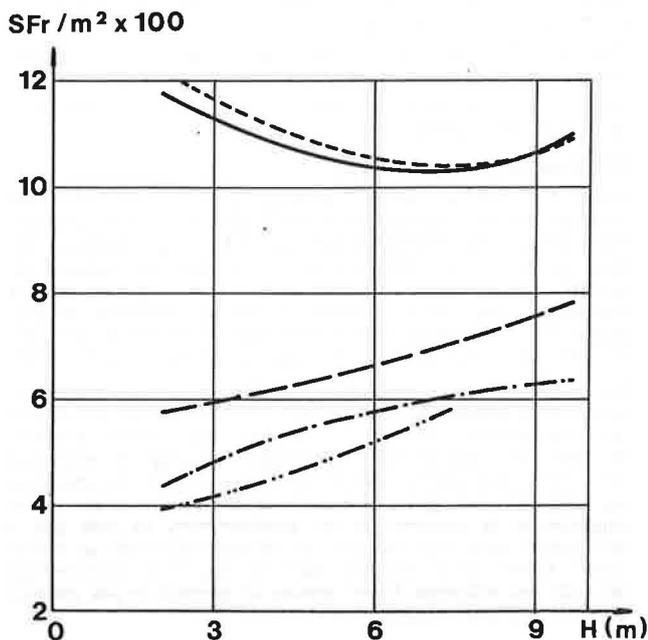
Le résultat de ces calculs économiques a été représenté sous forme graphique, chaque fois en fonction de la hauteur du soutènement. La fig. 7 illustre, par mètre linéaire, le coût de chaque type d'ouvrage. La fig. 8 reproduit ces coûts par mètre carré de soutènement. A souligner que le coût par mètre linéaire de la paroi ancrée a été rapporté à la hauteur H du soutènement, et non pas à sa hauteur H+D (fig. 3), pour en déduire son coût au mètre carré. Enfin, on a restitué dans la fig. 9 le pourcentage du coût des solutions Terre Armée et géotextile par rapport à celui de la paroi ancrée.

SFr/m' x 1000



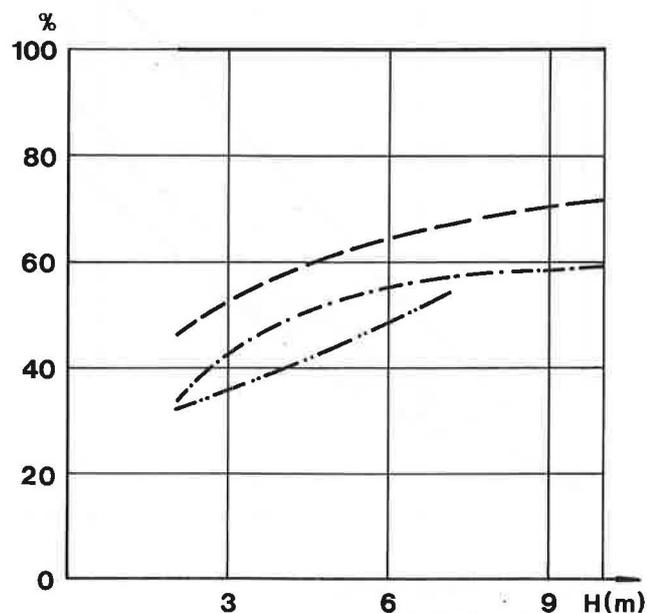
- Paroi ancrée, remblai GW ou CL ———
- Terre Armée - - - - -
- Massif renforcé par géotextiles :
- · - · - tissé - · - · - composite

Fig. 7. Coût des soutènements par mètre courant



Paroi ancrée : — remblai GW — remblai CL
Terre Armée : —
Massif renforcé par géotextiles :
—·—·— tissé —·—·— composite

Fig. 8. Coût des soutènements par mètre carré



Paroi ancrée : — remblai GW ou CL :
Terre Armée : —
Massif renforcé par géotextiles :
—·—·— tissé —·—·— composite

Fig. 9. Pourcentage du coût des massifs renforcés par rapport à la paroi ancrée

Du point de vue économique, on remarque d'emblée que les solutions en sols renforcés sont plus intéressantes que la solution classique. Avec la hauteur de l'ouvrage, le coût par mètre courant de paroi ancrée croît linéairement alors que celui des massifs renforcés suit une loi quelque peu différente. L'évolution du coût par mètre carré de soutènement en fonction de sa hauteur diffère selon le type d'ouvrage. Compte tenu des conditions du projet, la fig. 9 illustre l'économie des solutions de sols renforcés par rapport à une solution classique; le massif renforcé par géotextiles est d'env. 10 % à 15 % plus économique que la Terre Armée. Il faut rappeler toutefois que le coût du massif renforcé par géotextiles n'inclut pas celui d'un parement de protection. En première analyse il ne resterait donc qu'environ 10 % à 15 % en faveur de la solution géotextile pour solutionner le problème de la protection du parement.

4. CONCLUSION

Les bilans techniques et économiques des projets de soutènement étudiés justifient la confrontation d'un massif renforcé par géotextiles avec d'autres solutions. Par sa grande aptitude aux déformations et sa facilité de mise en oeuvre, un tel ouvrage constitue une solution particulièrement intéressante dans des conditions topographiques et géotechniques difficiles. Des matériaux de qualité plutôt médiocre conviennent aussi à sa construction pour autant que l'on choisisse un géotextile composite (association de non tissé et de tissé) qui autorise une consolidation des sols de remblai. Dans des conditions normales d'environnement, le géotextile est un produit durable. A long terme, son comportement est cependant tributaire des caractéristiques de sa matière première. Certains polymères, en particulier le polypropylène, ont tendance à fluer, phénomène à prendre en considération dans le dimensionnement de l'ouvrage. La protection du parement vertical, surtout d'un ouvrage permanent, demande encore à être résolu de manière satisfaisante. La solution géotextile n'est pas universelle, mais lorsqu'elle peut être appliquée, elle est économiquement intéressante.

Référence

[1] J.P. Gourc, A. Ratel, Ph. Delmas : "Prédiction des déformations de soutènement avec nappes textiles", comptes-rendus du IIIe Congrès International des Géotextiles, Vienne, 1986