

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 120 (1994)
Heft: 25

Artikel: Protections de rive de grande rugosité hydraulique: expériences au sud de la Bolivie
Autor: Dènes, Renato
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78356>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Protections de rive de grande rugosité hydraulique

Par Renato Dénes,
Ingénieur civil EPFZ,
Ottenweg 24,
8008 Zurich

Expériences au sud de la Bolivie

Dans les années 1984-1985 et jusqu'en 1992, la Direction de la coopération au développement et l'aide humanitaire (DDA) du Département fédéral des affaires étrangères a soutenu financièrement et par la mise à disposition d'experts un programme d'amélioration des infrastructures rurales dans le sud du Haut-Plateau bolivien.

En 1988 l'occasion s'est présentée de construire un nouveau type de défenses de rives dans la région de Sucre. Le système semble avoir fait ses preuves et présente en plus de nombreux avantages par rapport aux ouvrages traditionnellement construits.

Importance des défenses de rives dans le programme de développement

Dans la plupart des cas, des protections de rive sont construites pour protéger des terres cultivables ainsi que des ponts, les villages se trouvant généralement dans des endroits surélevés, donc protégés des inondations.

Ces terres riveraines sont toujours d'une importance majeure pour la population locale, car

- ce sont des terres d'alluvions, donc d'une plus grande fertilité que les terres environnantes non irriguées par le limon;
- vu leur situation en bordure des rivières et donc le peu de différence d'altitude par rapport à celles-ci, elles sont facilement irrigables;
- les altitudes basses, entre 1900 et 2300 m, constituent un microclimat particulièrement favorable, non seulement en raison de la différence de température par rapport au haut plateau environnant (3000 à 4000 m d'altitude) mais également grâce à leur situation à l'abri des vents. Si, en effet, dans les

endroits non abrités du Haut-Plateau, seules les cultures traditionnelles, telles que la pomme de terre, le Quinoa, le blé et, à certains endroits, du maïs peuvent être envisagées, les terres riveraines accueillent quant à elles des plantes subtropicales telles qu'orangers, figuiers de Barbarie et autres.

Dans la plupart des projets, les surfaces à protéger étaient malheureusement assez restreintes, en raison de l'étroitesse des vallées. Ainsi dans l'examen des demandes formulées par les communes rurales, les questions de rentabilité immédiate ne pouvaient pas être considérées comme primordiales. En revanche, si l'on appliquait des critères analogues à ceux utilisés dans les programmes d'aide suisse aux paysans de montagne et que l'on tenait compte surtout du risque de dépeuplement croissant des zones rurales, de l'ensemble des conséquences négatives d'une migration de masse vers les agglomérations des villes et de la perte pour la culture indigène, une intervention prenait tout son sens.

Le système décrit dans cet article présente des avantages dans le domaine technique et dans celui de la longévité par rapport aux murs de soutènement traditionnels et aux gabions. Comme les murs, il fait appel à des matières premières qui sont disponibles dans la région ou sur le lieu même de la construction, mais requises en quantité bien inférieures, facteurs qui tous diminuent les coûts par rapport aux techniques traditionnelles.

Régime fluvial sur le Haut-Plateau bolivien

La saison des pluies sur le Haut-Plateau bolivien dure environ de la mi-décembre à avril (climat de mousson). Ce sont quelque 80 à

90% des averses annuelles, le plus souvent de fortes pluies ne durant généralement que quelques heures, qui tombent durant cette saison. De longues périodes de sécheresse de 6 à 8 mois empêchent la formation d'une végétation qui pourrait contribuer à régulariser le système d'écoulement fluvial.

Le succès de plusieurs programmes de reforestation prouve cependant que la formation d'une végétation plus riche est en principe possible, et d'importants programmes de reforestation sont soutenus depuis des années par la DDA dans cette zone.

Bien que la reforestation soit une intervention de haute qualité, elle ne déploie son effet qu'au fur et à mesure de la croissance des arbres, soit à moyen et à long termes, et son influence ne se fait sentir que s'il s'agit de surfaces relativement étendues. De plus, l'éveil de l'intérêt et l'extension des connaissances de la population locale nécessitent aussi un certain temps.

Pendant la saison des pluies, de gentils petits ruisseaux et rivières qu'on peut normalement traverser à pied, deviennent impétueux et prennent la dimension de fleuves. En raison de la destruction progressive et continue de la végétation surexploitée et de la grande vitesse d'écoulement, ils charrient de grosses quantités de débris solides. Si les dégâts restent généralement limités c'est uniquement grâce à la courte durée des crues, variant de quelques mois, semaines ou jours, à parfois seulement quelques heures.

Quelques types d'ouvrages de défenses de rives

La protection des rivages est assurée par des murs dont la face extérieure est verticale ou légèrement inclinée. Or, ce type de murs présente un désavantage majeur dans son effet hydrau-

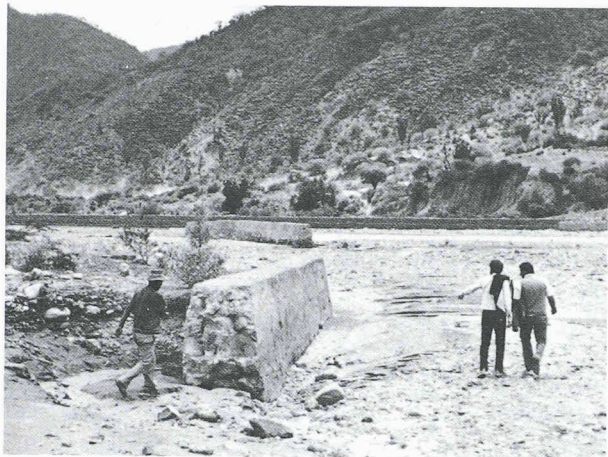


Fig. 1. – Mur de protection de rive. L'accélération de l'écoulement de l'eau le long du mur fait que des quantités additionnelles d'eau se dirigent vers le mur (photo E. Decormis, Sucre).



Fig. 2. – Le fleuve se divise s'il y a des murs lisses sur les deux rives et forme ainsi de petits îlots en son centre.

lique: il augmente la vitesse d'écoulement de l'eau, et ce d'autant plus que sa surface est lisse. Ces surfaces ont apparemment la caractéristique de lisser les turbulences si efficacement qu'elles engendrent un effet cumulatif: l'eau s'écoulant plus rapidement le long du mur, elle en

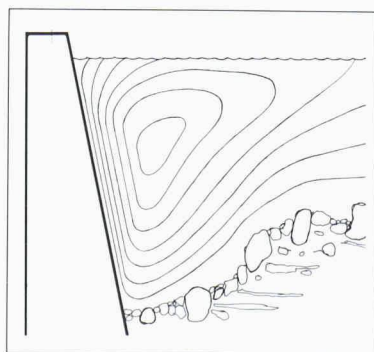


Fig. 3. – Distribution des vitesses et affouillement dans le fond d'un mur de surface lisse sur un lit de rivière avec une «grande» rugosité ($k_{\text{mur}} > k_{\text{fond}}$, formule de Strickler). Les lignes représentent schématiquement des lieux de même vitesse.

attire encore plus depuis le milieu de la rivière (fig. 1) et cet effet peut, lorsque le fleuve est bordé des deux côtés par des murs, amener la création d'îles en son centre (fig. 2).

En outre, la force d'entraînement accrue par la vitesse élevée d'écoulement de l'eau le long du mur y creuse un fossé, ce qui augmente encore l'effet précédemment décrit (fig. 3).

Si l'on se place en amont des murs, on peut fréquemment voir que les rivières «visent» pour ainsi dire ce point, ce qui s'explique par les phénomènes décrits (fig. 4).

Ainsi, des murs possédant des fondements de plusieurs mètres en dessous du lit de la rivière sont déchaussés, commencent à s'effondrer, et perdent ainsi rapidement leur fonction (fig. 5). N'ayant pas poussé plus avant les investigations théoriques plus pointues relatives à ce phénomène de l'effet du mur lisse, l'auteur renvoie le lecteur à la bibliographie en fin d'article. La plupart des sources indiquées ne se rapportent toutefois pas au problème des murs lisses, mais traitent de la rugosité des talus et des francs-bords, ce qui conduit à une conclusion: les éléments latéraux du périmètre mouillé doivent avoir une rugosité hydraulique au moins égale à celle du fond de la rivière. De cette manière, une distribution régulière de l'écoulement se

crée dans la section de la rivière, avec des vitesses faibles en bordure. Pour ce faire, plusieurs solutions se présentent, parmi lesquelles des murs à rugosité élevée, des gabions, des épis et perrés de protection sont les plus usuelles.

Gabions

Ils constituent un moyen souvent employé comme défense de rives. Ils présentent le grand avantage de ne pas être affectés par des affaissements. Cependant, dans les fleuves qui, comme ceux du sud de la Bolivie, charrient une grande quantité de débris solides, les gabions sont exposés à une intense usure mécanique. Les fils de fer cassent, le zingage est trop vite abrasé et donne libre cours à la rouille, si bien que les corbeilles se vident rapidement de leur contenu. Pour tenter d'éviter ces dommages, les gabions sont parfois posés sur des socles en maçonnerie et se trouvent ainsi 8 à 9 mois de l'année au sec, ce qui diminue la corrosion et l'usure mécanique, mais ne résout évidemment pas le problème de la surface lisse du socle.

Epis

Ils pourraient être considérés dans le contexte décrit ici comme des éléments qui créent une très grande rugosité en des points relativement éloignés les uns des autres. Mais la création de chambres entre les épis en-

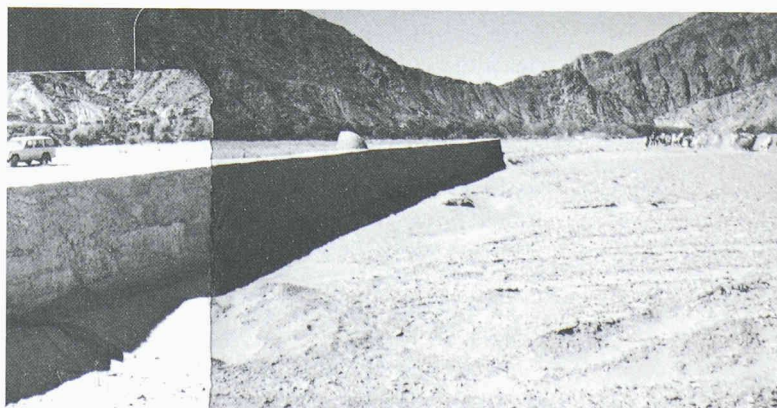


Fig. 4. – En amont des murs, nous pouvons fréquemment voir que les rivières semblent «viser» ce point.

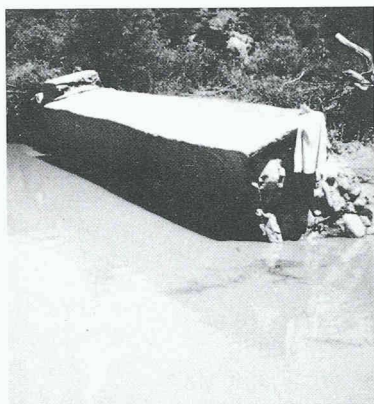


Fig. 5. – Ruine d'un mur dont les fondements se trouvaient à plusieurs mètres en-dessous du lit de la rivière. La chemise suspendue donne une idée des dimensions.

traîne des tourbillons très importants, qui peuvent amener des problèmes analogues à ceux des murs lisses (fig. 6 et 7).

Perrés de protection

La protection des rivages par des perrés paraît l'une des mesures les plus efficaces, de surcroît adaptée à la nature. Le fond n'est pas scellé et la végétation peut se développer en fonction de l'ampleur réelle d'érosion. Les blocs protègent arbres et buissons des chocs des débris solides et les racines stabilisent à leur tour les blocs et empêchent que leur fond ne soit affouillé. Les échanges entre l'eau de la rivière et la nappe phréatique ne sont pas entravés.

Passages

Les passages sont des éléments supplémentaires qui peuvent aider à réduire la vitesse d'écoulement des rivières et sont surtout indiqués dans des cours d'eau à forte déclivité. Dans de grands fleuves et lors de crues, ils entraînent une dissipation par création de remous uniquement si leur hauteur est suffisante, c'est-à-dire si l'eau ne peut pas simplement passer par-dessus. Dans le cas ci-après, une telle solution aurait nécessité une construction beaucoup plus importante et des modifications

topographiques qui auraient coûté l'abandon d'une importante surface de terres cultivables.

Les défenses de rives à Teja Huasi

Dans la commune de Teja Huasi, à environ 40 km de Sucre, il s'agissait de protéger environ 25 ha de terres cultivables menacées par le fleuve Rio Chico, car les murs de protection existants avaient été partiellement détruits. Le fleuve a une pente de l'ordre de 4‰ à cet endroit. Afin de construire un perré de blocs d'une dimension suffisante, des blocs de pierre idoine auraient dû être transportés sur une distance de plusieurs centaines de kilomètres et leur maniement aurait nécessité de grandes machines de chantier, augmentant ainsi les coûts de manière disproportionnée, réduisant la part du travail fournie par les paysans eux-mêmes à la portion congrue. Or l'aide au développement devrait toujours être une incitation à l'initiative et à la participation de la population locale, afin que les travaux exécutés soient estimés à leur juste valeur et déploient leur effet également à moyen et long termes.

C'est pour cet ensemble de raisons qu'à Teja Huasi, nous avons opté pour un système qu'on pourrait appeler un perré ou un mur de blocs synthétiques.

Des blocs en béton non armé formant un mur en denture ascendant de 51° ont été coulés au moyen de coffrages métalliques (fig. 8 à 12).

Ces blocs ont un volume d'environ 1 m³ chacun, ce qui, compte tenu de la poussée d'Archimède, représente un poids d'environ 1,2 t. Vue de face, la partie empiétant sur la section de la rivière ressemble à une tête proéminente et, d'en haut comme l'élément d'un passage. Nous avons donné à la partie proémi-

nente des angles de 135° au minimum, pour que la prise au charriage soit négligeable. Le revers de ces mêmes parties centrales forment la plate-forme d'appui pour le rang supérieur de blocs.

Les coffrages, dont les divers segments peuvent être assemblés par des boulons, ont été fabriqués en six exemplaires seulement par une serrurerie de Sucre, ce qui ralentit l'avancement des travaux. Malgré le coût du matériau et leur prix de fabrication, les coffrages métalliques offraient en effet une solution plus avantageuse que des coffrages en bois, car ils peuvent être employés un nombre de fois presque illimité. Les blocs étaient coulés à leur emplacement définitif, ce qui rend superflu l'emploi d'appareils de levage, puis chaque rang terminé était rempli par de la terre et comprimé par des fouloirs à main.

Premières expériences

Déjà pendant la construction, lors de la saison des pluies de printemps 1988, et alors que manquaient encore deux rangs et demi de blocs, le système à été soumis à un premier test. Précisons que

- les fossés qui avaient été creusés pour la construction des rangs inférieurs étaient encore ouverts et
- qu'en plus, un mur traditionnel en amont immédiat créait un courant marginal renforcé qui se dirigeait vers les blocs.

Les craintes que tout l'ouvrage se déchausse et soit ainsi détruit avant d'être achevé étaient donc fondées. Cependant, la rivière remplit les fossés de débris et forma une première plate-forme inclinée vers son centre. L'effet de dépôt précipité était tellement prononcé que le courant marginal renforcé venant du mur traditionnel en amont était repoussé vers le milieu de la rivière (fig. 13).

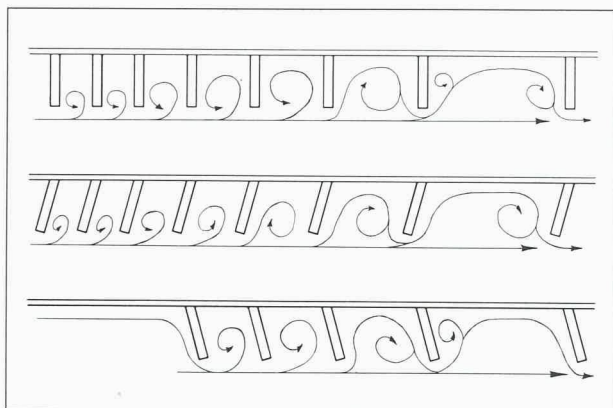


Fig. 6. – Formation de tourbillons d'entrée et de sortie le long des épis.

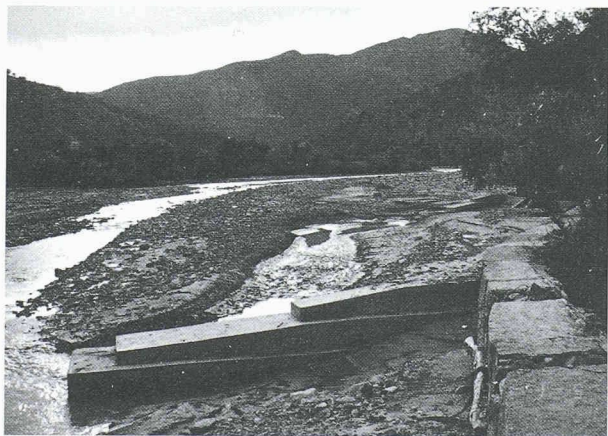


Fig. 7. – Affouillement autour d'un épi (photo E. Decormis, Sucre)

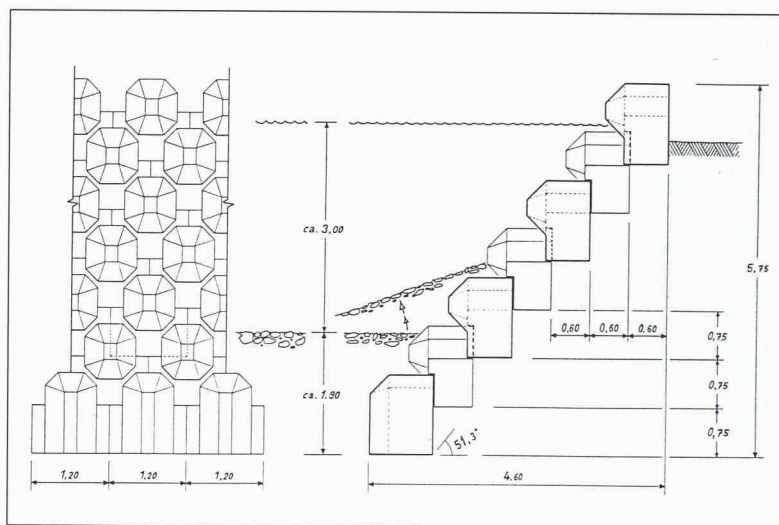
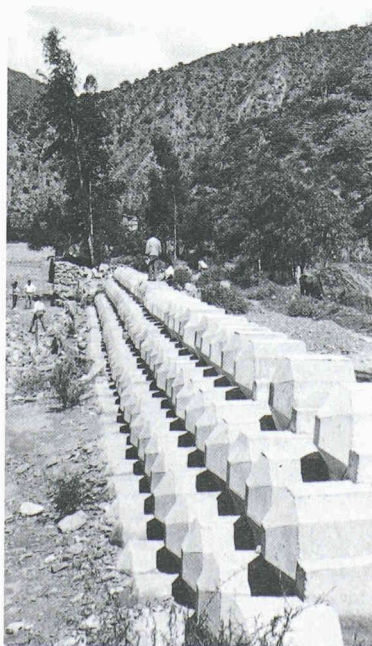


Fig. 10. – Vue et section du mur de «blocs synthétiques»

Au mois de février 1989 trois rangs de blocs étaient visibles, (fig. 9) et seulement deux et demi une année plus tard. Apparemment les blocs ne remplissent pas seulement leur fonction de protection, mais sont eux-mêmes protégés par les dépôts qui se forment devant eux. Dans le cas d'un lit de rivière étroit, cela pourrait causer une obstruction, et il serait alors indispensable de prendre en compte les effets de la rugosité élevée des bords dans le calcul hydraulique. Mais dans notre cas, il s'agissait d'obtenir dans une rivière d'une largeur de 200 à 300 m un effet local sur un petit pourcentage du périmètre mouillé.

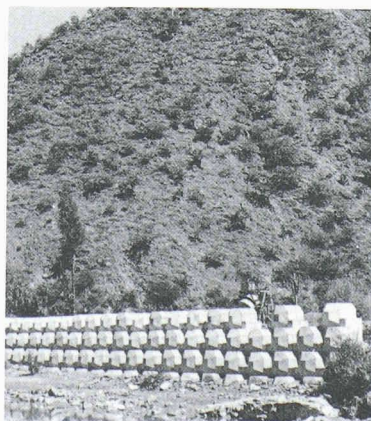


Fig. 8 et 9. – Le mur entièrement érigé en février 1989 (photos E. Decormis, Sucre)

Etat actuel

Comme le montrent nos photos, les travaux décrits portaient sur la reconstruction d'un mur partiellement effondré. Pour protéger les parties restantes de l'ancien mur, des épis furent mis en place dans le courant de l'année 1990, protégeant également une partie du mur de «blocs synthétiques», alors que d'autres se trouvent exposées aux turbulences créées par ces épis. L'ouvrage a cependant fait ses preuves sans l'existence des épis pendant au moins deux saisons des pluies.

Stabilité

Grâce à l'ancrage tridimensionnel, le système, comme les gabions, n'est pas sensible à l'affaissement local.

Aspects économiques

L'épaisseur d'un bloc est d'environ 1 m et la section du mur entier est d'environ 8 m². Ce projet a été préféré à la construction d'un mur traditionnel, qui aurait nécessité le double de section. Les coûts n'étaient donc pas plus élevés que ceux liés à la pose des gabions, tout en promettant une durée de vie incomparablement plus élevée (tableau 1). On peut donc ajouter qu'il s'agit d'un système extrêmement avantageux et même

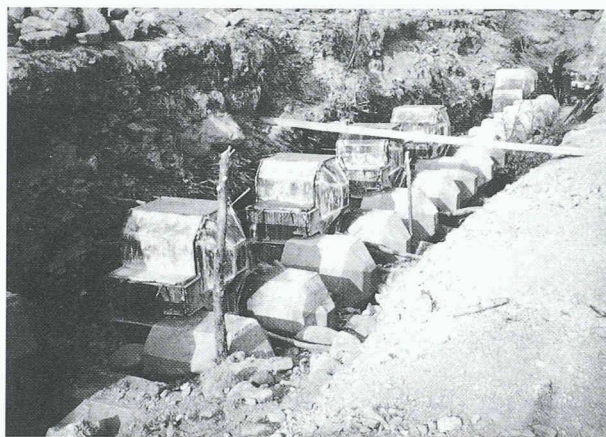


Fig. 11. – Coffrages métalliques et blocs terminés

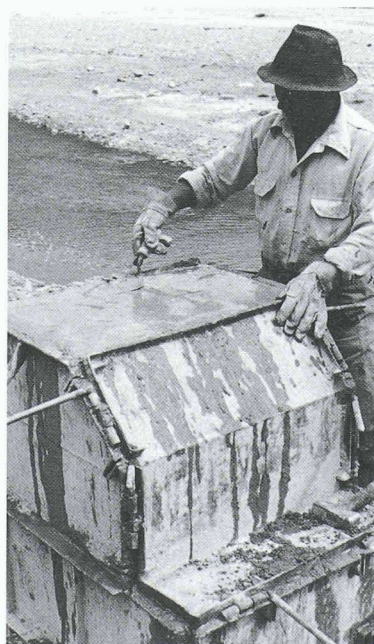


Fig. 12. – Un bloc vient d'être coulé

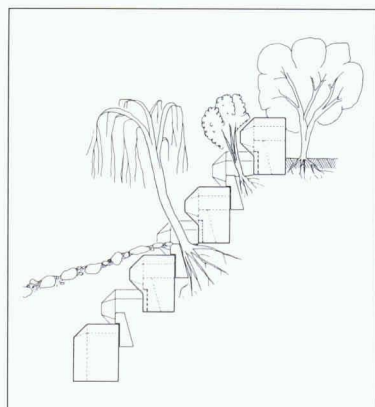


Fig. 15. – Une variante du mur avec des espaces entre les blocs pour la formation de végétation

Tableau 1- Coûts approximatifs des murs de défense de rive (env. 60 m); base des prix: fin 1992.

| | Fr. |
|--|----------|
| Contributions de la communauté de Teja Huasi sous forme de travail et de matériaux | 23 000.– |
| Contributions de la DDA pour | |
| – les coffrages métalliques | 11 000.– |
| – le ciment | 4 800.– |
| – les salaires des maçons, les transports et coûts divers | 6 000.– |
| Total (sans les coûts des ingénieurs et des géomètres du Service National pour le Développement Rural) | 44 800.– |
| Coût par m ³ | 147.– |

bon marché, au vu de son efficacité.

Végétation

A l'origine nous avions l'intention de garder dans les rangs supérieurs de l'ouvrage des espaces pour que des buissons et des arbres puissent y pousser. Ceux-ci auraient ainsi facilité la stabilisation du sous-sol et de l'arrière du mur. Nous aurions en outre obtenu une intégration optique avantageuse dans le paysage (fig. 15).

Malheureusement, par manque de temps, l'auteur ayant à gérer un grand nombre d'autres projets dans des régions très éloignées, ces détails ne furent pas réalisés.

Prévisions

Il va sans dire que l'auteur de la présente contribution accueillerait avec intérêt d'éventuelles informations concernant d'autres applications du système décrit ici et qui ne fait l'objet d'aucun brevet.

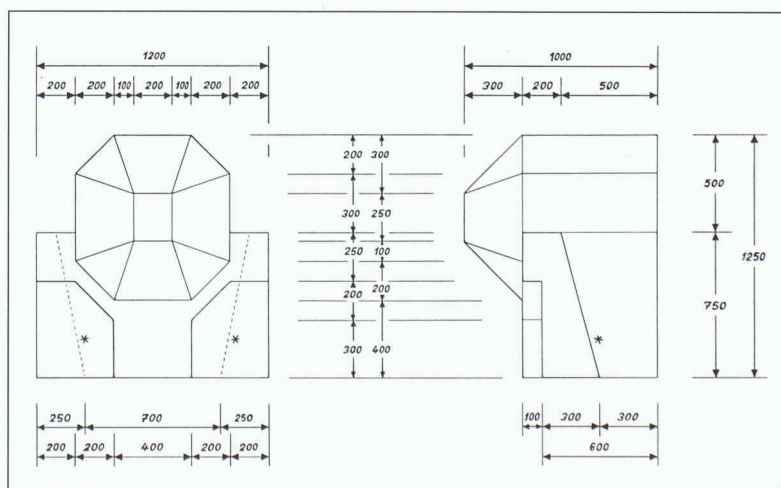


Fig. 16. – Dimensions des blocs: détails (* = espaces)

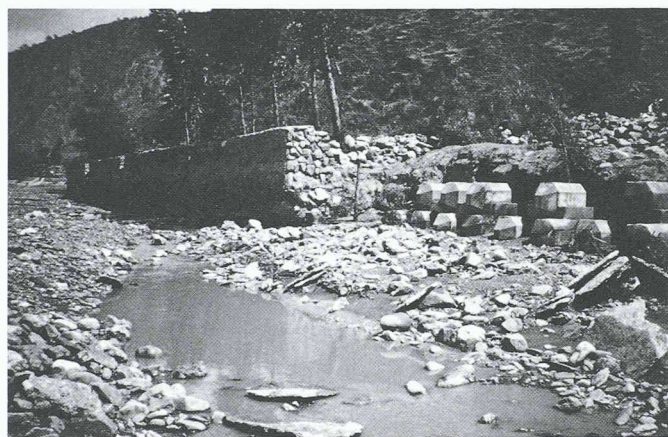


Fig. 13. – L'état de l'ouvrage le 12 octobre 1988

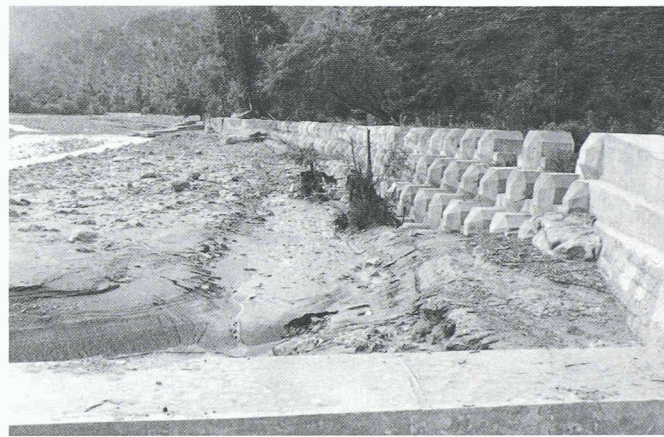


Fig. 14. – Le mur avec les épis au mois de février 1992

Bibliographie

- [1] BEZZOLA, G.R., KUSTER P., PELLANDINI S.: «The Reuss River flood of 1987 – Hydraulic model tests and reconstruction concepts.» International Conference on River Flood Hydraulics, Wallingford, 17-20 September 1990
- [2] CHERVET, A. und WEISS, H.W.: «Naturnaher Ausbau kleiner Bäche, Sohlenstabilisierung mittels Blockrampen», *Schweizer Ingenieur und Architekt* Nr. 42, 1990
- [3] LORENZ, H.: «Wasserbau beim Strassenbau», Autobahnamt Nürnberg, 1961
- [4] MERTENS, W.: «Zur Frage hydraulischer Berechnungen naturnaher Fließgewässer», *Wasserwirtschaft*, Heft 79, (1989) 4¹.
- [5] OSTERWALDER, W., Iteco AG, Affoltern a. Albis: «River Control with Concrete Elements. Stabilisation d'un ruisseau par des éléments en béton». Symposium international *Interpraevent* 1992, Berne
- [6] PETERKA A. J.: «Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators», Sect. 11. U.S. Bureau of Reclamation, Engineering Monograph Nr 25
- [7] SCHIECHTL, M.: «Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau», Callwey, München

¹La référence [4] contient une liste de 21 autres titres.

Note de lecture

Les voies de communication: des traces millénaires

Nous sommes rarement conscients de ce que les routes que nous empruntons ont souvent une très longue histoire, qui explique le tracé parfois tourmenté qui nous étonne. Nos paysages ont été marqués au cours des siècles par le passage des voyageurs comme par les activités locales de nos ancêtres. Le progrès, la mécanisation ont conduit à l'abandon de nombre de ces antiques itinéraires, qui subsistent parfois sous forme de sentiers pédestres ou simplement de traces dans le tissu végétal.

Aujourd'hui, la construction de voies de communications modernes, autoroutes ou voies ferrées, menace d'effacer ces traces millénaires. C'est pourquoi la loi sur la protection de la nature et du paysage a conduit à la création de l'Inventaire des voies de communication historiques de la Suisse (IVS), dont le siège se trouve à l'Université de Berne.

L'IVS est complémentaire de l'Inventaire des sites et ouvrages construits en Suisse (ISOS) et de l'Inventaire fédéral des paysages et des sites d'importance nationale (IFP).

Par le relevé cartographique et la recherche des voies de communication historiques, des éléments du paysage routier et de leurs vestiges, l'IVS veut établir une documentation, accessible à un large public, sur leur structure, leur morphologie et leur histoire, cette dernière permettant de situer leur importance dans l'aménagement national que nous connaissons aujourd'hui.

Les intéressés peuvent obtenir auprès de l'IVS¹ le *Bulletin IVS*, qui présente des articles consacrés à ce sujet passionnant. On relèvera plus particulièrement, dans la livraison 94/2, une contribution exposant le rôle que peut et doit jouer la carte d'inventaire IVS dans l'aménagement du territoire.

¹IVS, Université de Berne, Finkenhubelweg 11, 3012 Berne