

Objectifs

Le clouage, technique de renforcement des sols en place par barres passives, a commencé en France au début des années 1970, à la suite de l'invention de la Terre Armée par Henri VIDAL en 1965 qui a marqué le début des techniques de renforcement des sols.

L'expérience française dans le clouage n'a cessé depuis de s'enrichir du fait de la compétitivité financière de cette technique, de son adaptation à de nombreux ouvrages (murs de soutènement, stabilisation de pentes et de talus, tunnels) et de sa flexibilité d'emploi et de mise en œuvre, notamment en site difficile (en montagne et en front de taille de tunnels).

Un premier Projet National CLOUTERRE I a été créé en 1985 à l'initiative de la DAEI (Direction des Affaires Economiques et Internationales du Ministère de l'Équipement) et de la FNTP, avec le CEBTP comme gestionnaire.



Projet National CLOUTERRE I et II

Renforcement des sols par clouage

... suite Objectifs

L'objectif était de promouvoir le clouage des sols, aussi bien pour des ouvrages provisoires que pour des structures permanentes, grâce à une connaissance approfondie du procédé, à la mise au point de méthodes de dimensionnement et à la rédaction de recommandations.

En effet, après un démarrage rapide de la technique pour des ouvrages provisoires, des incidents survenus sur quelques ouvrages, dont un mur de soutènement permanent, ont montré la nécessité de procéder à des recherches expérimentales sur le procédé.

Quelques années après la publication des Recommandations CLOUTERRE 1991 il s'est avéré nécessaire, compte tenu du fort développement de la technique du clouage en France et à l'étranger, de compléter le Projet National CLOUTERRE I en effectuant un certain nombre de recherches sur les murs et autres ouvrages en sol cloué. Un des domaines manquants était en particulier le développement d'une méthode de dimensionnement aux états de service à partir de calculs en déformation aux éléments finis, ce qui s'avérait alors possible compte tenu du très fort développement qu'avait connu l'informatique.

C'est ainsi qu'a été proposée puis acceptée la réalisation d'un nouveau Projet National sur le clouage, CLOUTERRE II, dont les recherches ont été effectuées de 1995 à 1999.

CLOUTERRE I

Programme réalisé

Le programme de recherches, en grande partie expérimentales, a été d'améliorer les connaissances sur le comportement des ouvrages ainsi que les méthodes de dimensionnement.

Quatre axes avaient été définis et ont été étudiés :

- 1** *Le comportement des murs en sol cloué aux états de service et à la rupture.*
- 2** *La détermination des limites d'utilisation du procédé vis-à-vis des sols rencontrés.*
- 3** *La mise au point de méthodes de dimensionnement fiables.*
- 4** *L'utilisation et la promotion du clouage pour des ouvrages permanents.*



Rupture du mur expérimental n°1 du Cebtp.



Mur en sol cloué M4 à Vierzon (Cofiroute - Socaso - Cebtp).



Mur cloué. Centre de conférences.

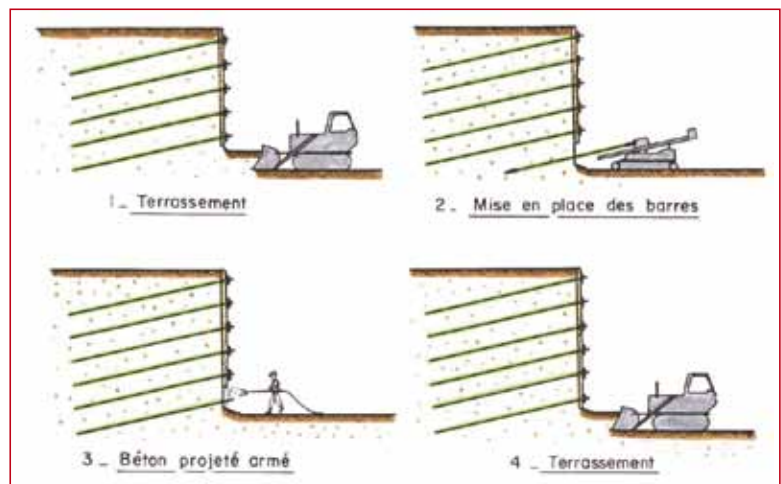
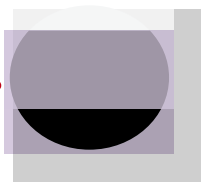


Schéma de la construction d'un mur en sol cloué.



Organisation

La Direction du Projet

Le Comité de Direction était présidé par R. SOULAS et un Comité Scientifique de 17 membres était présidé par François SCHLOSSER.

La Direction du Projet était assurée par R. SOULAS, R. ARIS, François SCHLOSSER et Claude PLUMELLE.

Les partenaires

21 membres, notamment 7 organismes publics, 3 maîtres d'ouvrage publics et privés, ainsi que 11 entreprises : Bachy - Ballot - Bouygues - CEBTP - CERMES-ENPC - Cofiroute et Socaso - DDE de la Moselle et de Savoie - DDST de la Martinique - EMCC - FNTP - Fougerolle - GIE Semed Dumez - IMG - Intrafor - La Forézienne - LCPC - Laboratoires Régionaux de l'Est Parisien, de Lorraine et du Rhône - Ministère des Transports du Québec - Sade - Scétauroute - Sefi - SEMALY - SETRA - Société du Métro de Marseille - Solétanche - Spie Batignolles - Terrasol.



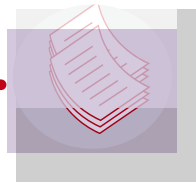
Durée Budget

Le Projet National CLOUTERRE I s'est déroulé de 1986 à 1990.

Le budget global a été de 3 150 000 € dont 15% apportés par la DAEI et 85% financés directement par les 21 membres sous forme de cotisations et de prestations en nature.



Pont de l'Ante à Falaise.
© Photo Sétra / Gérard Forquet



Publications

CLOUTERRE I a fait l'objet de 50 rapports internes et de publications à la fois en France et à l'étranger.

La publication la plus importante est constituée par les « **Recommandations CLOUTERRE 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols** ».

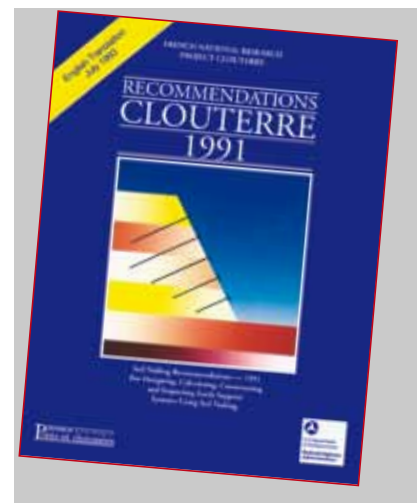
Ce livre de 268 pages a été élaboré par six groupes de travail sous la direction du Comité Scientifique et il a été rédigé par un comité de rédaction constitué de Jean-Pierre MAGNAN, Claude PLUMELLE, Jean SALENÇON, François SCHLOSSER et Philippe UNTERREINER. Il a été édité et publié à plus de 1 000 exemplaires par les Presses des Ponts et Chaussées en 1991.

Il comprend sept chapitres :

1. La technique des ouvrages : description et développement.
2. Le clouage en soutènement : mécanisme et développement.
3. Conception et dimensionnement.
4. Reconnaissance et essais.
5. Exécution des ouvrages.
6. Durabilité des ouvrages.
7. Spécifications et contrôles.

En Juillet 1993, ce livre, après avoir été traduit en anglais, a été édité à 10 000 exemplaires par la FHWA (Federal Highway Administration) aux Etats Unis et publié en commun par la FHWA et les Presses des Ponts et Chaussées dans le monde entier.

Les Recommandations ont abouti à la norme PR-94270 qui constitue la norme d'application française de l'Eurocode 7 pour ce qui concerne les parois clouées et les ouvrages de soutènement en sol renforcé.

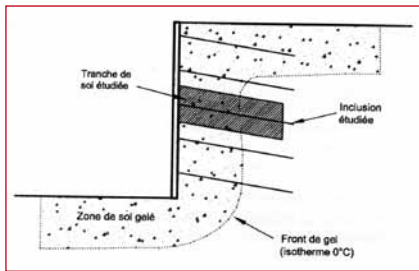


CLOUTERRE II

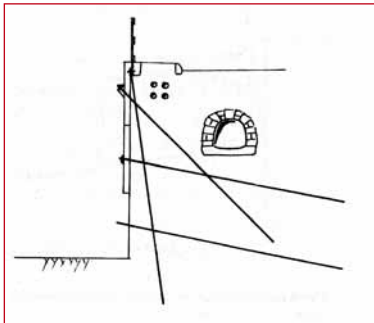
Programme réalisé

Les recherches effectuées dans le cadre de CLOUTERRE II ont marqué une étape supplémentaire dans la connaissance et le dimensionnement des ouvrages en sol cloué, l'accent ayant été mis sur les méthodes générales en déplacements, l'exécution, des sollicitations particulières (murs soumis au gel, aux séismes) et des ouvrages autres que les murs (front de taille des tunnels).

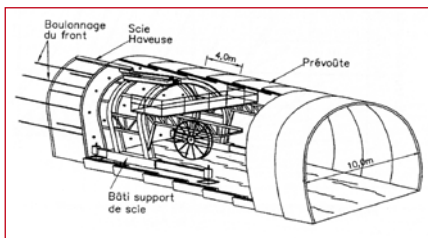
Elles ont porté sur les principaux thèmes suivants :



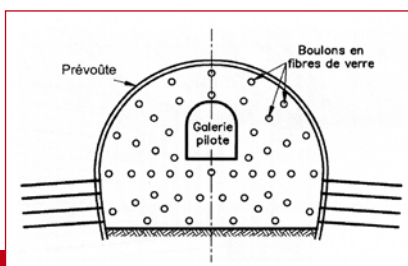
Schématisme d'un mur de soutènement en sol cloué soumis au gel.



Incorporation de micropieux à une paroi clouée.



Tunnel de Toulon : méthode de réalisation.



Tunnel de la Galaure : coupe type transversale.

1 Exécution des murs en sol cloué

- Mise à jour de la banque de données d'essais de traction de clous :
 - comparaison avec les abaques (q_s, p_l) proposés dans CLOUTERRE 1991 pour le frottement latéral limite q_s ;
 - exécution et justification du parement, drainage.

2 Dimensionnement aux états limites de service sous charges statiques

- Mesures des déplacements sur des ouvrages réels en sol cloué pour compléter la banque de données de CLOUTERRE 1991.
- Développement d'outils de calcul aux éléments finis en déformation pour un dimensionnement aux états limites de service.
- Modélisations et calculs effectués en parallèle avec des expérimentations réalisées aux USA par la FHWA.

3 Comportement et dimensionnement du parement d'un mur en sol cloué

- Instrumentation du parement sur des ouvrages réels (mesures sur les murs de l'A12 construits en 1994-1995).
- Répartition des efforts sur le parement et dimensionnement du parement.
- Dispositions constructives.

4 Etude du gel-dégel

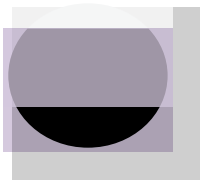
- Ouvrage instrumenté de La Clusaz.
- Modélisation des effets thermiques, hydrauliques et mécaniques.
- Disposition constructives spécifiques.

5 Dimensionnement des ouvrages en zones sismiques

Après une analyse du bon comportement de murs en sol cloué soumis à des séismes dans différents pays, des règles simples de calculs aux ELU, reposant sur la méthode pseudo statique, ont été proposées.

6 Clouage (boulochage) de fronts de taille des tunnels

- Techniques, fonctionnement et dimensionnement.
- Essais et contrôles sur les chantiers du tunnel de Toulon, de La Galaure, de Tartaguille.



Organisation

- **La Direction du Projet**
- Le Projet National CLOUTERRE II a été présidé par François SCHLOSSER (Terrasol), avec une Direction Scientifique et Technique assurée par Roger FRANK (CERMES-ENPC), Claude PLUMELLE (CEBTP et CNAM) et Philippe UNTERREINER (CERMES-ENPC).
- Un Comité Scientifique de 16 membres, présidé par François SCHLOSSER, a suivi et validé l'ensemble des travaux.
- **Les partenaires**
- Les partenaires ont été au nombre de 19 : Bouygues - CEBTP - CERMES-ENPC - CETU - Cofiroute - DDST de la Martinique - Dumez - FHWA (Etats Unis) - Forézienne d'Entreprises - Fougerolle Ballot - LCPC - Sade - Scetauroute - SEFI - SETRA - SOLEN/GEODE - Solétanche-Bachy - SPIE Batignolles - Terrasol ; parmi lesquels il faut souligner la participation importante de la Federal Highway Administration aux Etats Unis.



Durée Budget

- Le coût total du Projet National CLOUTERRE II s'est élevé à 1 579 190 € HT dont une subvention de la DRAST de 281 708 € HT représentant 17,8 % du budget total, le solde en apports en nature et cotisations des partenaires.



Publications

- **Les travaux du Projet National CLOUTERRE II ont fait l'objet de 22 rapports internes.**
- Un « **Additif 2002 aux recommandations CLOUTERRE 1991** » a été édité par les Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Il comprend 8 chapitres élaborés et mis au point par un comité de réaction
- de 12 personnes.



Autoroute A12 « ouvrage de référence » comité IVOR.

Tunnel de Toulon - ©ASCO TP



Au plan national.

■ Il est difficile de séparer en France les retombées de CLOUTERRE I de celles de CLOUTERRE II dans la mesure où ces deux projets ont été très complémentaires.

On peut affirmer sans pouvoir vraiment le quantifier qu'ils ont contribué en France à un très grand essor des murs en sol cloué en tant qu'ouvrages permanents, permettant de ce fait une économie importante par rapport à des murs plus classiques. On peut citer par exemple les murs de soutènement en sol cloué limitant les excavations autour de l'une des piles du viaduc de Millau. Le clouage a été rendu définitif en association avec du Pneusol® autre procédé d'acquisition de propriétés particulières de la part d'un sol. Conçus initialement comme des ouvrages provisoires, ces murs ont été, au moment de la remise en état des lieux à la fin de la construction du viaduc, transformés en ouvrages permanents et inclus dans l'ensemble du processus de suivi des divers éléments du viaduc, mais avec une démarche du type méthode observationnelle. L'économie par rapport à de nouveaux ouvrages de soutènement en béton armé a été substantielle.

■ En outre les deux projets sur le clouage ont permis de mettre au point et de publier en 1998 la norme XP 94-240 intitulée « Soutènement et talus en sol en place renforcé par des clous » et sa transformation en norme européenne PR-94270 en 2009.

■ Par ailleurs il convient de noter le classement en « ouvrage de référence » en 1998 par le comité IVOR (Innovations Validées sur Ouvrages de Référence) des murs de soutènement en sol cloué de l'autoroute A 12 qui ont fait l'objet d'une instrumentation importante dans le cadre de CLOUTERRE II.

■ Enfin le nouveau et intéressant Projet National ASIRI (Amélioration des Sols de fondation par Inclusions Rigides), qui se termine actuellement, se situe lui aussi dans ce domaine assez typiquement français du renforcement des sols.

A l'international

■ A l'international, c'est incontestablement le Projet National CLOUTERRE I, avec la traduction anglaise en 1993 des Recommandations CLOUTERRE 1991, qui a été à l'origine d'un fort rayonnement de la technique française, lequel s'est notamment traduit par la participation de l'Administration des Autoroutes Fédérales Américaines (FHWA), en tant que partenaire, à CLOUTERRE II.

■ Alors que les « Recommandations CLOUTERRE 1991 » n'avaient été diffusées en France qu'à un peu plus de 1 000 exemplaires, la traduction anglaise « Recommendations CLOUTERRE 1991 » fut éditée par la FHWA en 1993 à 10 000 exemplaires pour une diffusion nord-américaine, mais aussi tout à fait internationale.

■ Bien que les années 1980 aient déjà été marquées par de nombreuses publications françaises sur les murs en sol cloué dans des séminaires et colloques, pas seulement en France, mais également à l'étranger, notamment aux Etats Unis et en Grande Bretagne et que par ailleurs une coopération sur la recherche dans le renforcement des sols ait existé dès le début des années 1980 entre l'ENPC et l'Université de Berkeley aux Etats Unis, ce n'est véritablement que dans la seconde moitié des années 90 que l'essor du clouage est devenu très important et international. Les principaux membres du comité scientifique du Projet National CLOUTERRE ont alors été souvent sollicités pour des exposés à l'étranger en Europe, aux Etats Unis, et dans le Sud-est Asiatique notamment.

■ Il est intéressant de noter que le logiciel Talren, conçu et développé par Terrasol, a été et reste très largement utilisé dans de nombreux pays pour le dimensionnement des ouvrages en sol cloué (murs, talus et pentes) Il en est ainsi notamment en Corée du sud où l'utilisation du clouage est telle que les « Recommandations CLOUTERRE 1991 » ont été traduites en coréen.

■ Au tout début des années 90, la FHWA et le TRB (Transportation Research Board) des Etats Unis avaient organisé un « scanning tour » en Europe pour y connaître le développement du clouage. Ils furent très favorablement impressionnés par l'essor du clouage en France.

■ De même que la Terre Armée a connu un développement remarquable aux Etats Unis, le clouage des sols y a eu un essor rapide et sans doute plus important à tel point que le bénéfice cumulé obtenu grâce à l'utilisation de cette technique a pu être estimé voici quelques années par l'administration américaine à plusieurs centaines de millions de dollars.

“ *A l'heure actuelle, le clouage des sols est utilisé dans la quasi totalité des pays du monde, car il s'agit d'une technique simple, facile à mettre en œuvre et non protégée par des brevets.* ”