

résistance aux séismes des ouvrages en terre armée seismic stability of reinforced earth structures

évolution des méthodes de recherche recent progress of research

Michel J. BASTICK

Directeur des Études et de la Recherche,
Société Terre Armée, Paris*

Résumé

Cet article présente une analyse critique des différentes méthodes de recherches qui ont été utilisées récemment pour mieux connaître le comportement des ouvrages en terre armée soumis aux séismes.

Les progrès récents des calculs par la méthode aux éléments finis ont permis de mieux mettre en évidence les problèmes de résonance, d'effet d'échelle et l'importance des conditions aux limites qui rendent délicate l'interprétation des essais sur modèles réduits.

Abstract

In this article, the research techniques recently applied to try and better understand the behaviour of Reinforced Earth structures subjected to earthquakes are analysed. Recent progresses in finite element method models evidenced problems raised by resonance, scale effect and limiting conditions.

These phenomena are responsible for the difficulties encountered in interpreting reduced scale model tests.

1. INTRODUCTION

L'expansion de la terre armée dans le monde a très rapidement amené cette technique à être employée dans des zones de sismicité importante. C'est donc très tôt que l'ingénieur d'étude s'est trouvé confronté au problème du dimensionnement de ce type d'ouvrage vis-à-vis des séismes.

Les premières recherches sur ce sujet ont tout d'abord été conduites dans les pays où le problème était le plus aigu comme la Californie (K. LEE et R. RICHARDSON en 1974 [1; 2] ou le Japon (UEZAWA, 1976 [3], CHIDA, 1980 [4; 5]).

Depuis 1976 de nombreux essais et calculs ont aussi été effectués par la Société la Terre Armée. Même si peu d'articles ont été publiés sur le sujet, notre compréhension des phénomènes en cause a donc fait beaucoup de progrès au cours de ces dix dernières années, ce qui a permis d'élaborer les méthodes de calcul actuellement employées pour le dimensionnement des ouvrages en terre armée situés dans les zones sismiques.

Le but de cet article n'est pas de faire le point des connaissances actuelles sur le sujet, ni de décrire les méthodes de calcul (voir plutôt [6; 7]) mais plutôt d'indiquer les derniers développements de la recherche, d'en étudier la méthodologie, ses points forts et ses faiblesses. Dans ce cadre nous développerons surtout la technique la plus récemment mise au point que constitue la méthode des éléments finis.

2. CALCULS AUX ÉLÉMENTS FINIS

2.1. Calcul en statique

La méthode du calcul aux éléments finis a été appliquée à des ouvrages en terre armée, tout d'abord en statique.

Une des premières études de ce type est certainement celle que J.F. CORTE a faite au L.C.P.C. en 1977 [8] à l'aide de la première version du programme ROSALIE. A peu près au même moment, J.C. CHANG [9] réalisait des calculs comparables.

La technique a depuis évolué et l'on est passé successivement de modèles parfaitement élastiques, qui représentent mal le sol, aux modèles élastoplastiques plus satisfaisants. Puis la mise au point des éléments de frottement-décollement a permis de mieux représenter le contact terre-armature. A l'heure actuelle, la Terre Armée exploite un modèle élastoplastique avec éléments de frottement mis au point sur le programme ROSALIE du L.C.P.C.

La nécessité d'introduire ces diverses améliorations est apparue en comparant les résultats des calculs faits avec des modèles plus rustiques aux mesures qui avaient pu être réalisées sur des ouvrages réels.

2.2. Le passage au calcul dynamique

Deux possibilités s'offrent pour le passage au calcul dynamique :

— Discrétiser l'accélérogramme pour lequel on veut étudier la réponse du modèle et faire un calcul statique en injectant l'accélération instantanée pour chaque pas de temps. La prise en compte des fréquences élevées (ou des harmoniques de fréquences importantes) exige de prendre un pas de temps très fin. Par ailleurs le réalisme impose des durées d'enregistrement assez conséquentes ce qui conduit à un nombre de résolutions du système incompatible avec les coûts actuels du temps ordinateur. A long terme, et si la baisse des coûts de calcul sur ordinateurs se confirme, cette méthode deviendra sans doute la meilleure.

— Le programme *SUPERFLUSH* utilise, lui, une autre technique : l'accélérogramme est tout d'abord analysé en séries de FOURIER pour un certain nombre d'incrémentes de fréquences. Ici aussi le choix des pas de fréquences et des fréquences de coupures haute et basse est important. Toutefois le nombre d'inversions de matrices à réaliser est bien inférieur à ce qui est nécessaire dans le premier cas. Cette méthode est très efficace pour des calculs en élasticité pure. Par contre, faire un calcul élastoplastique est, au sens strict, impossible et on approche le calcul élastoplastique en faisant varier le module (tangent) en fonction des déformations observées et en itérant (fig. 1). Il va de soi que ce calcul pseudo-élastique n'est pas totalement satisfaisant puisqu'on ne tient pas compte des variations de module en fonction du temps (les déformations dépendant du temps en dynamique). C'est cependant le meilleur modèle dont nous disposons à l'heure actuelle pour un coût raisonnable.

2.3. Résultats

Depuis 1981 le Dr UDAKA qui le premier a mis au point cette technique de calcul et écrit le programme *SUPERFLUSH* [10] et la Société la Terre Armée, ont élaboré un modèle pour l'étude dynamique par éléments finis des murs en terre armée suivant la seconde méthode.

Ce modèle utilisant *SUPERFLUSH* [11] semble maintenant bien au point ainsi que la comparaison entre les résultats de calculs et les mesures de CHIDA [4] (fig. 2 et 3) le montre.

Se pose ensuite le problème, non spécifique à la terre armée, du choix d'accélérogrammes représentatifs du site [12] et de la description de l'environnement de l'ouvrage. Enfin, ces calculs étant trop coûteux pour être appliqués au cas par cas (comme pour les centrales nucléaires) il convient de mettre au point une méthode de calcul simple à partir d'un certain nombre de cas typiques.

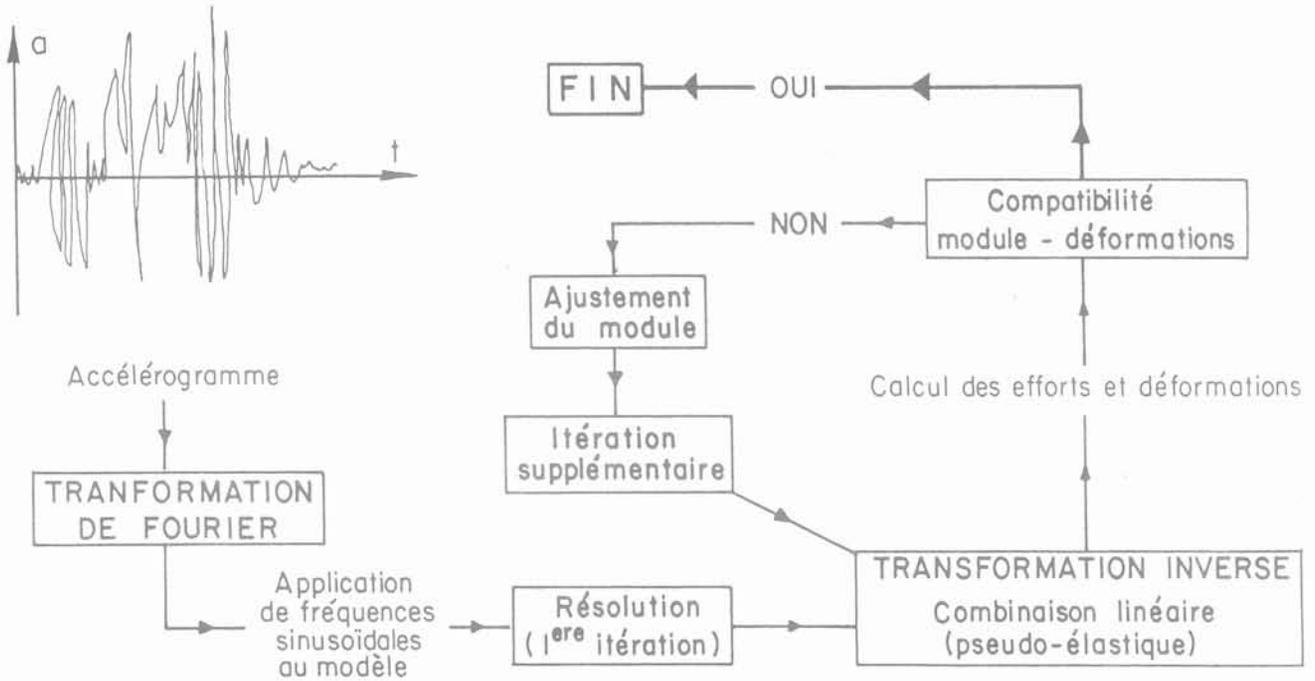


Fig. 1. — Programme de calcul SUPERFLUSH (éléments finis).

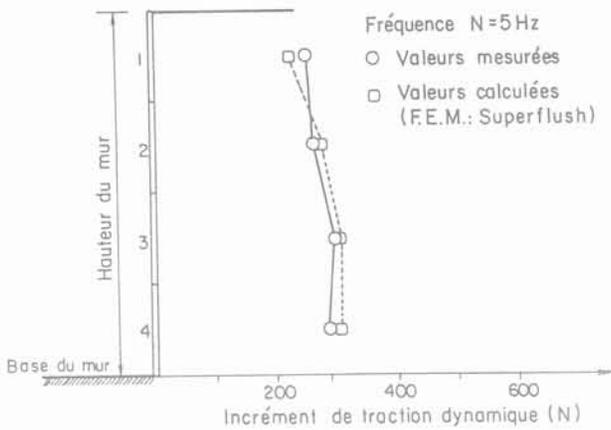


Fig. 2. — Tractions dynamiques calculées (UDAKA, 1985) et mesurées (CHIDA, 1980).

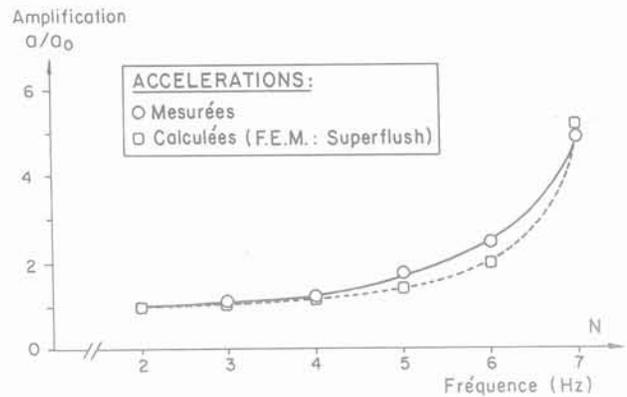


Fig. 3. — Effet de la fréquence : valeurs calculées (UDAKA, 1985) et mesurées (CHIDA, 1980).

3. LES MODÈLES RÉDUITS : UNE APPROCHE DANGEREUSE MAIS INTÉRESSANTE

3.1. Présentation

Les modèles réduits ont été utilisés très tôt (1974) pour l'étude du comportement dynamique des murs en Terre Armée.

Ainsi qu'il est précisé dans le rapport général [7] où une analyse plus approfondie de cette méthode de recherche est présentée, le problème du non-respect des lois de similitudes limite sérieusement leur intérêt. Des modèles à grande échelle comme celui de CHIDA [4 ; 5] sont, eux, beaucoup plus riches en enseignement.

3.2. Conditions aux limites

Malgré les doutes que l'on peut avoir sur leur représentativité, les murs réduits présentent l'intérêt de permettre un calage des modèles aux éléments finis. La seule technique possible pour extrapoler les mesures sur modèles réduits est d'ailleurs le recours aux calculs par éléments finis. C'est ainsi que le modèle utilisant *SUPERFLUSH* présenté plus haut, a été testé à l'aide des résultats du mur à l'échelle 1/2 de CHIDA. La concordance des résultats (fig. 2 et 3) est excellente.

La modélisation au niveau du maillage d'éléments finis a été faite de façon très précise en particulier en ce qui concerne le panneau rigide positionné à l'arrière du mur à échelle réduite. Par curiosité on a, en plus de la représentation exacte du modèle, calculé les réponses du massif pour diverses conditions aux limites à l'arrière du mur (fig. 4a) :

1. Paroi flexible.
2. Paroi rigide.
3. Massif de remblai infini.

Les différences de comportements calculés suivant les hypothèses (fig. 4b) montrent l'importance de la présence ou non d'une paroi rigide ou souple à l'arrière du modèle et apportent des doutes quant à la représentativité de modèles pour lequel l'extension du remblai représenté autour du massif armé est insuffisante par rapport aux dimensions de celui-ci. La même remarque vaut dans le sens vertical (conditions aux limites sur le plan inférieur) bien que de façon moins aiguë dans le cas de sollicitations principalement horizontales.

La présence d'une paroi rigide semble ici favoriser l'apparition de phénomènes de résonances, peu amortis, assortis de coefficients d'amplification (rapport entre l'accélération en tête et à la base, a tête/a base) importants (fig. 3) et peu réalistes. En effet tant les

essais de propagation de vibrations (vibreux, explosif) que les observations sur ouvrages réels conduisent à estimer [13] que les coefficients d'amplification réels sont compris entre 0,8 et 1,2.

De ces résultats on peut conclure que les limites des modèles, qui technologiquement sont obligatoirement rapprochées du mur peuvent très largement modifier son comportement.

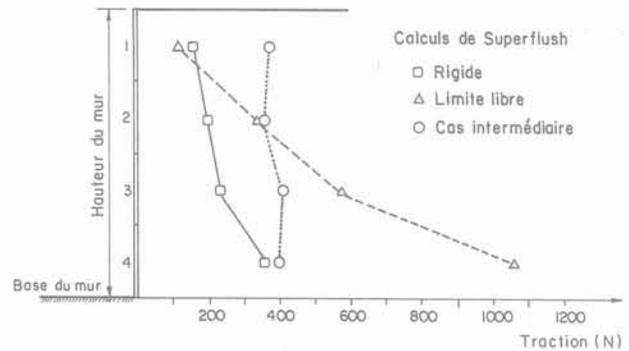


Fig. 4b. — Influence des conditions aux limites.

4. OBSERVATIONS SUR OUVRAGES RÉELS

L'auscultation des ouvrages ayant subi des tremblements de terre est essentielle car elle constitue le seul essai possible en vraie grandeur. La probabilité d'avoir de tels cas augmente avec le nombre d'ouvrages construits qui croît fortement chaque année. Certains cas sont décrits dans les références [6], [14]. L'inconvé-

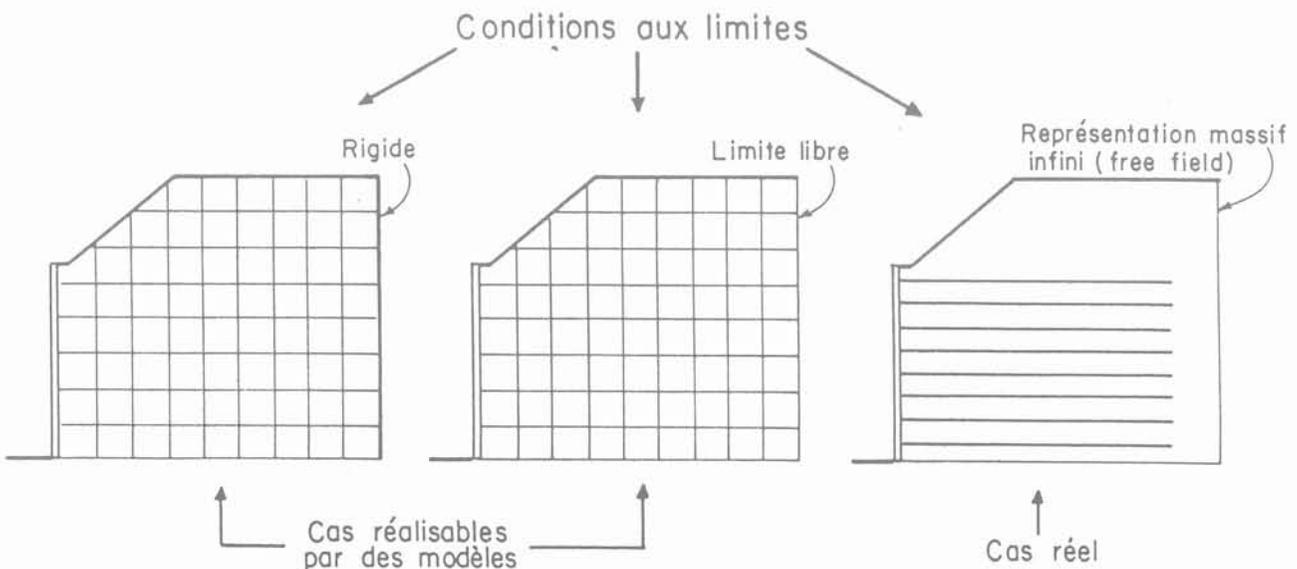


Fig. 4a. — Problèmes liés aux modèles réduits.

nient de cette source d'observations, outre son caractère totalement aléatoire, est qu'elle donne surtout des renseignements qualitatifs. Il serait intéressant d'affiner les résultats en disposant dans les massifs des instruments permettant des mesures d'efforts maximum par exemple. L'utilisation de jauges de contraintes avec enregistreur déclenché par le séisme paraît au regard du coût actuel de ce type de matériel totalement irréaliste.

On pourrait par contre mettre en place des éléments du type « fusibles » (à imaginer) dont le coût peut rester faible.

5. L'OUVRAGE DANS SON ENVIRONNEMENT

5.1. Fondations et drainage

D'une façon générale, la terre armée, résiste bien aux vibrations et aux sollicitations sismiques grâce à son caractère à la fois massif et souple.

La souplesse de la terre armée et sa faculté de s'accommoder de sols de fondations médiocres pousse les concepteurs à utiliser cette technique sur des terrains difficiles ; cela ne doit pas faire oublier qu'une rupture de fondation risque d'entraîner la ruine de l'ouvrage. Aussi l'étude des fondations doit-elle être plus rigoureuse en zone sismique. En particulier, il y a lieu de vérifier la susceptibilité de la fondation à une liquéfaction, comme on doit le faire pour toutes structures. La présence d'eau peut aussi amplifier les effets du séisme d'où l'importance de l'assainissement.

5.2. Stabilité de pente : rupture circulaire

Grâce aux qualités énoncées ci-dessus la terre armée est devenue la technique privilégiée de construction sur des pentes instables. Dans ce cadre, la vérification de la stabilité de l'ensemble par rupture circulaire est devenue nécessaire pour nombre de projets. Certains programmes (TARUPT, TALREN) permettent de vérifier la stabilité des pentes en tenant compte des éléments de renforcement [15]. La prise en compte de forces de masses verticales ou horizontales représentant les accélérations maximales pour lesquelles on doit dimensionner l'ouvrage permet d'évaluer la sécurité vis-à-vis d'un séisme. Dans ce type de calcul on s'attache à trouver l'accélération maximale pour laquelle le coefficient de sécurité vaut tout juste 1 (accélération critique), ce qui permet de déterminer si un séisme donné peut provoquer des déformations et même de les estimer par intégration. Le cercle critique correspondant est généralement différent du cercle critique obtenu en statique. Sa position est importante car elle permet de déterminer l'emplacement optimal pour l'ajout éventuel d'armatures et donc d'adapter la conception (position du ou des murs sur la pente) et le dimensionnement à la sismicité du terrain.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] RICHARDSON G.N., LEE K.L., *Seismic design of Reinforced Earth walls*, ASCE Nat. meeting on wat.resources eng., L.A. CA, 1974.
- [2] RICHARDSON G.N. FEGER D., FONG A., LEE K., *Seismic testing of Reinforced Earth walls*, Jour. of Geot. Eng. Div. ASCE, pp. 1-17, G 11, January 1977.
- [3] UEZAWA M., *An experimental study of earthquake resistance of embankment by a large size vibration stand*, Tokyo, 1976, Railway Technical research report Nr 823.
- [4] CHIDA S., MINAMI K., *La technique de la terre armée*, essais en laboratoire, août 1980.
- [5] CHIDA S., MINAMI K., ADACHI K., *Test de stabilité de remblais en terre armée* (traduit du japonais), 1982.
- [6] BASTICK M., SCHLOSSER F., *Comportement et Dimensionnement dynamique des ouvrages en terre armée*, 1^{er} Coll. Nat. de Génie parasismique, Saint-Rémy-les-Chevreuse (France), janvier 1986.
- [7] SCHLOSSER F. et DORMIEUX L., *Talus et soutènements en dynamique des sols*, «Fondations, propriétés des sols et impératifs sismiques», C.R. Journées communes A.F.P.S.-C.F.M.A.S., 18-19 novembre 1986.
- [8] CORTE J.F., *La méthode des éléments finis appliquée aux ouvrages en Terre Armée*, Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées 90, juillet-août 1977.
- [9] CHANG J.C., *Finite Element Analysis of Reinforced Earth walls*, ASCE Geotechnical, July 1977, GT 7.
- [10] UDAKA T., *A method for soil-structure interaction analysis*, Proceedings of the fourth symposium on the use of computers in Buildings engineering, Japon, March 1982.
- [11] UDAKA T., EET, *Finite element analysis of Reinforced Earth walls, numerical simulation using SUPERFLUSH*, (Internal progress reports, phase II, task 2), Sept. 1985.
- [12] EPRI, MORIWAKI Y., PYKE R., BASTICK M., UDAKA T., *Specification of input motion for seismic analyses of soil-structure systems within a nonlinear analysis framework*, Oct. 1981, U.S.A.
- [13] SEED H.B., MITCHELL J.K., *Earthquake resistant design of Reinforced Earth walls* (Internal study, progress report), Berkeley CA, U.S.A., 1981.
- [14] KAWASHO Corporation, *Comportement des ouvrages en terre armée au cours du tremblement de terre d'Akita* (Internal report), Tokyo, 1983.
- [15] BLONDEAU F., CHRISTIANSEN M., GUILLOUX A., SCHLOSSER F., TALREN, *Méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée*, Coll. Int., « Renforcement en place des sols et roches », Paris E.N.P.C., octobre 1984.