

DEUX TYPES  
DE  
**MURS DE SOUTÈNEMENT ÉCONOMIQUES**  
**EN BÉTON LÉGÈREMENT ARMÉ**

PAR  
**M. F. CAMPUS**

---

La théorie de la poussée des terres reste dominée par les conceptions générales et géniales de Coulomb, dont la fécondité est loin d'être épuisée. Les études les plus récentes, tant théoriques qu'expérimentales, notamment celles faites à l'étranger (1) ramènent à la conception initiale des plans de rupture des terres retenues par les murs de soutènement. Les méthodes si simples dues à Poncelet, autre grand savant français, conservent leur valeur. On ne peut évoquer ces noms sans y joindre ceux de M. Lévy, J. Resal et Boussinesq, dont les savantes études ont contribué à jeter une vive lumière sur la théorie de la poussée des terres en général et sur l'action de certains facteurs physiques en particulier, tels que la cohésion. Ces théories moins fondamentales et plus compliquées sont moins connues et moins appréciées par l'ensemble des ingénieurs; leur étude est cependant indispensable à qui veut posséder une connaissance approfondie de la poussée des terres.

Le point de départ de Coulomb est expérimental, mais les recherches des autres grands savants français précités se placent dans le plan théorique, à partir des hypothèses simples formulées par Coulomb.

Nous trouvons là un des plus beaux exemples de l'incomparable valeur pratique des théories d'ingénieurs, chefs-d'œuvre d'interprétation simplifiée et synthétique des phénomènes dont

(1) Cfr. entre autres les publications de Th. von Kármán (Comptes rendus du 2<sup>e</sup> Congrès international de mécanique appliquée, Zurich 1927).

A. Freund (*Die Bautechnik*, n<sup>o</sup> 12 du 18 mars 1924).

Angenot, Buisman et van Iterson (*De Ingénieur*, La Haye, fascicules des 28 février, 14 et 28 mars 1930).

la nature est si complexe que tout autre mode d'interprétation ne peut conduire qu'à des énumérations confuses et stériles. Quelles que soient les objections que l'on puisse faire à la théorie, il est un fait que les murs de soutènement des types les plus divers, conçus et exécutés en règle générale selon cette théorie, constituent des constructions d'une stabilité éprouvée et ne donnent lieu qu'à une infime proportion d'insuccès.

Faut-il se contenter des résultats acquis et considérer que la question est close? Je ne le pense pas et je crois que les recherches expérimentales entreprises spécialement en Amérique, en Allemagne, en Suisse et, sur une moindre échelle, ailleurs, dans les laboratoires spécialement affectés à ce que l'on appelle maintenant la mécanique des terres, doivent être suivies avec grand intérêt. Il serait même utile que les pays de langue française ne restent pas, concernant ces recherches, en posture de simples observateurs, mais qu'ils tirent parti de leur excellente base théorique pour suivre le mouvement. Tout récemment, Monsieur Ravier (1) a manifesté en France une activité méritoire dans ce domaine. Les installations requises paraissent susceptibles d'être rattachées sans difficultés à de nombreux laboratoires existants.

Jusqu'à présent, il semble bien que ces recherches expérimentales n'aient procuré dans l'ensemble aucun progrès utilisable par les ingénieurs. Au contraire, elles n'ont fait que confirmer l'inextricable complication du problème et la diversité des cas particuliers. Ces travaux restent donc, jusqu'à nouvel avis et probablement pour longtemps encore, l'aliment des chercheurs et des spécialistes très avertis, mais non la panacée des ingénieurs qui risquent de n'y trouver que des raisons de douter. La diffusion de ces idées et de ces résultats avec le temps est certaine, mais elle demande une clarification sérieuse des concepts, leur confrontation serrée avec la théorie et une préparation théorique plus avancée dans ce domaine que n'en possèdent la plupart des ingénieurs.

Dans la dure période de crise économique que nous traversons, l'ultime raison de l'ingénieur restera plus que jamais l'efficacité et l'économie. En matière de murs de soutènement, ces résultats peuvent être atteints par le choix judicieux des matériaux et de leur mode de mise en œuvre et par la forme appropriée du mur, impliquant une connaissance suffisante des propriétés des terres.

(1) Cfr. *Le Génie Civil*, années 1929, 1930 et 1931.

L'emploi du béton armé n'a pas évincé les autres matériaux. Le poids joue un rôle important dans la stabilité des murs de soutènement. Pour cette raison, ceux construits en béton armé ont dû recevoir en général des formes complexes, entraînant une complication assez grande de coffrage et d'exécution. L'armature importante élève le prix d'une manière très appréciable. C'est surtout pour la construction des murs en tranchée contre les terres en place que l'emploi du béton armé réserve de réelles difficultés. On se référera à ce sujet à la note présentée en 1930 au premier Congrès international du béton et du béton armé, à Liège, par l'ingénieur Ewart S. Andrews, de Londres (1), qui établit les avantages économiques et pratiques des murs en béton légèrement armés, c'est-à-dire dans lesquels les barres d'armature travaillent au taux usuel de  $1\,200\text{ k/cm}^2$ , tandis que la fatigue du béton atteint à peine  $20\text{ à }30\text{ k/cm}^2$ , de telle sorte que sa composition puisse être celle du béton massif. Les armatures peuvent être assez écartées des parois du coffrage pour que celles-ci ne présentent aucune différence par rapport à celles du mur en béton massif. L'économie résulte de la diminution sensible des dimensions par rapport à celles du mur massif et de la diminution de qualité du béton, de poids des armatures et des dépenses d'exécution par rapport au mur en béton armé ordinaire.

Les observations de M. Andrews se basent sur la comparaison de trois profils de murs en béton massif, ou légèrement armé ou fortement armé, construits en tranchée contre les terres à soutenir et résistant par leur poids. Elles ne peuvent certes prétendre à la généralité et elles peuvent se trouver en défaut dans d'autres cas concrets.

Toutefois, elles exposent très judicieusement les mérites du béton légèrement armé pour les murs de soutènement. Ils proviennent de ce que dans les murs massifs non armés, même en admettant de faibles tractions, les épaisseurs sont toujours considérables. Une légère armature permet de les diminuer appréciablement sans exiger un béton de qualité supérieure et sans compliquer l'exécution. Mais la forme des murs permet aussi, par des dispositions adéquates, des économies importantes de matière, une meilleure utilisation de celle-ci et une sécurité plus grande. Il est étonnant que les formes usuelles des murs de soutènement : profil trapèze pour la maçonnerie massive, paroi à contreforts et semelle pour

(1) A study of plain and reinforced concrete retaining walls.

le béton armé, soient analogues à celles des murs destinés à résister à la pression hydrostatique, sous réserve des dimensions et des dispositions d'étanchéité.

C'est dire que les ingénieurs ne tiennent pas suffisamment compte et ne tirent pas suffisamment parti des différences essentielles entre les propriétés mécaniques des terres ordinaires et de l'eau. Ces distinctions sont notamment :

1° L'inégalité des pressions suivant toutes les directions en tout point d'un massif de terre, permettant notamment qu'elles soient nulles suivant une direction et non suivant les autres.

2° La possibilité de variation entre des limites très écartées des pressions en un point d'un massif de terre, sans rupture d'équilibre et sans déplacements ou déformations excessifs. Cette variation correspond notamment au passage de l'état de poussée active à l'état de poussée passive ou butée. La butée des terres est trop rarement prise en considération. Il importe, certes, d'être prudent quand on y a recours, mais il peut être excessif de la négliger.

Le premier type de mur économique en béton légèrement armé sur lequel je désire attirer l'attention, et qui utilise les propriétés énoncées ci-dessus des massifs de terre, comporte un mur très mince, une tablette d'équilibrage en saillie sur le parement postérieur vers la mi-hauteur du mur et une semelle de fondation en saillie sur le parement antérieur du mur. L'élément intéressant est la tablette d'équilibrage, dont l'invention appartient à M. Chaudy.

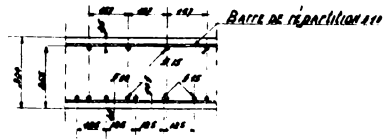
La partie supérieure du mur est principalement soumise à la flexion sous l'effet de la poussée des terres. La ligne des pressions sort nettement du profil du côté antérieur. La résistance est assurée par une légère armature placée près du parement postérieur. Au niveau de la tablette d'équilibrage (*fig. 1*), une force extérieure nouvelle est à prendre en considération : c'est le poids de la tablette et surtout celui des terres supportées par la tablette. Cette force supplée à l'insuffisance de poids propre du mur, pour assurer l'équilibre, tant pour le renversement que pour le glissement. Sous l'effet de cette force, la ligne des pressions subit un déplacement brusque vers le parement postérieur du mur et se rapproche de la verticale sous l'action du poids.

Sous la tablette, l'action de la poussée des terres agit pour produire l'incurvation de la ligne des pressions vers le parement antérieur du mur. Mais cette incurvation est faible et la résultante

tante ne sort que très modérément du profil, tant par l'action suffisante du poids du mur et de la tablette d'équilibrage que

COUPE TRANSVERSALE

COUPE PAR A.B.



COUPE PAR C.D.

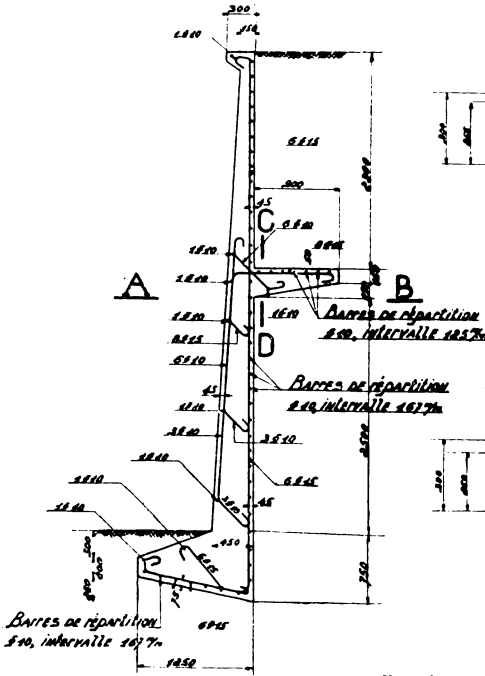
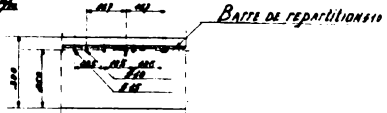


FIG. 1.

du fait de la diminution de la poussée des terres sous la tablette.

En effet, du moment que la résultante dans la base de fondation est excentrée vers l'avant, il y correspond une légère rotation ou tendance à la rotation du mur vers l'avant. De ce fait, on doit admettre que la face inférieure de la tablette d'équilibrage ne subit aucune réaction de la part des terres sous-jacentes; elle se comporte donc pour celles-ci comme une surface libre, sans pression verticale (voir la première propriété des massifs de terres énoncée ci-dessus).

La poussée des terres subit de ce fait une diminution appréciable, surtout lorsque le terre-plein supporte des surcharges importantes. En outre, l'alignement de la résultante totale des poussées est abaissé.

De la sorte, on peut réaliser, même pour d'assez grandes hauteurs et pour de fortes surcharges, des murs d'un profil très

mince, peu armés, peu encombrants, assurant une grande sécurité et susceptibles d'être construits en tranchée, contre les terres à soutenir et sans coffrages compliqués.

La figure 1 représente le profil d'un tel mur, limitant une cave de chaufferie de 5,10 m de profondeur et en bordure d'un terre-plein sur lequel est stocké un important dépôt de charbon et, à d'autres endroits, circule une locomotive-grue pour l'enlèvement des cendres. La surcharge correspondante est de 2,20 m de hauteur fictive de terre. L'encombrement horizontal maximum est de 2,15 m; l'épaisseur maximum à la base de 0,45 m. Le cube de béton par mètre de mur est de 2,414 m<sup>3</sup> et le poids d'armature total s'élève à 135,40 kg environ, soit 56,20 kg par mètre cube ou 0,72 0/0 net en volume. Il eut été possible, d'ailleurs, de diminuer le pourcentage aux environs de 0,50 0/0 en supprimant les barres de répartition et en simplifiant l'armature.

Le taux de travail de l'acier n'atteint nulle part, selon le calcul usuel, 1 200 k/cm<sup>2</sup>; celui du béton est inférieur partout à 30 k/cm<sup>2</sup>, mais est assez uniforme dans la partie inférieure du mur (1). Ce mur, qui a été de construction facile et économique, est en service depuis quatre années d'une manière satisfaisante.

Il importe de définir une propriété intéressante de ce type de mur, qui lui confère une très grande sécurité, malgré sa hardiesse apparente, celle de l'*auto-équilibrage*. La figure 2 montre les variations de la ligne des pressions du mur précédemment décrit dans quatre cas de sollicitation différents :

- 1° Le mur isolé et le terre-plein surchargé;
- 2° Le mur isolé et le terre-plein non surchargé;
- 3° Le mur supportant un dallage en béton armé (charge verticale de 5 000 kg par mètre courant de mur agissant à 0,075 m en avant du parement postérieur), terre-plein surchargé;
- 4° Le mur supportant le même dallage, le terre-plein non surchargé.

La charge transmise par le dallage contribue à l'action stabilisante de la tablette d'équilibrage. Mais on constate que sous l'action de cette dernière, à la partie inférieure du mur, les variations des lignes des pressions sont très modérées en rapport avec celles de la sollicitation extérieure. En fait, elles doivent même être moindres encore. Car, dès que la résultante dans le joint de

(1) Ces chiffres ont été obtenus en calculant la poussée des terres par les formules les plus prudentes, ce qui contribue encore à la très grande sécurité.

fondation est excentrée vers le côté des terres, la tendance à la rotation s'exerce vers celles-ci.

Il se développe aussitôt une réaction au contact des terres et de

## MUR DE SOUTÈNEMENT EN BÉTON ARMÉ

### SCHEMA REPRESENTATIF DE LA STABILITÉ DU MUR

#### DANS DIVERSES HYPOTHÈSES DE

#### CHARGE

*SURCHARGE DU TERRE - PLAIN 4000 KG/M<sup>2</sup> - 2 20 M DE TERRES.*  
*SURCHARGE MAXIMUM DE L'APPUI D'UN DALLAGE 5000 KG/M COURANT*

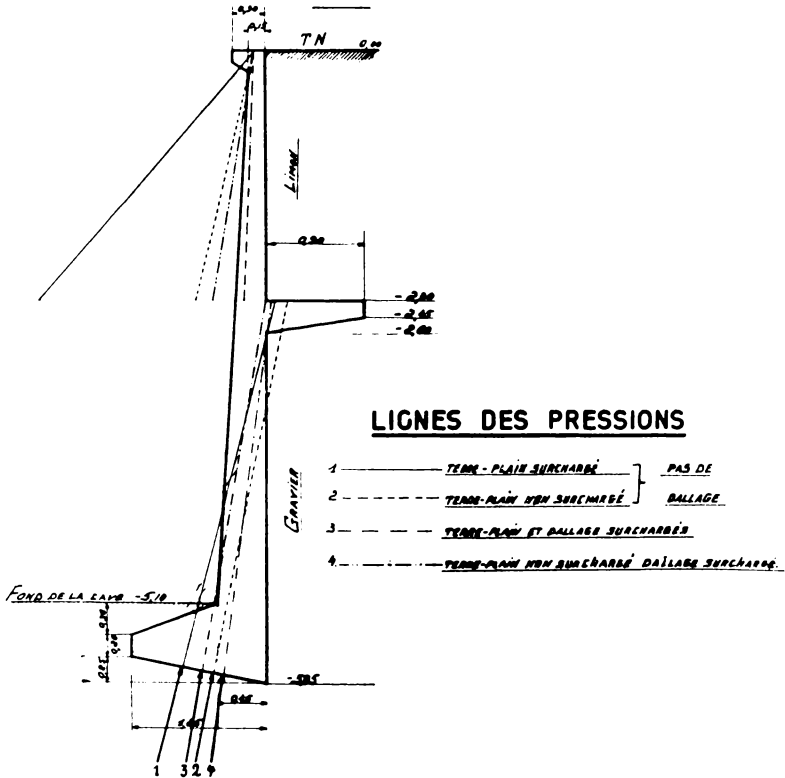


FIG 2.

la face inférieure de la tablette d'équilibrage. Elle a pour effet de diminuer l'action équilibrante de la tablette et d'augmenter la poussée des terres sous celle-ci. La conséquence en est un

déplacement de la ligne des pressions vers l'avant. Donc, en fait, le faisceau des résultantes 1-2-3-4 sera encore plus serré qu'il n'est indiqué à la figure 2, dans l'établissement de laquelle il n'a pas été tenu compte de la réaction des terres sur la face inférieure de la tablette dans les cas 2-3-4. La pression maximum sur le terrain calculée à l'extrémité antérieure de la semelle de fondation est de  $2,06 \text{ k/cm}^2$ . A l'extrémité postérieure elle est calculée à  $3,18 \text{ k/cm}^2$  pour le cas 4, mais d'après ce qui a été dit ci-dessus, elle doit être moindre. Grâce à une légère inclinaison de la semelle de fondation, on constate que la stabilité de glissement est aussi largement assurée que la stabilité de renversement. La sécurité de ce type de mur est donc très considérable, parce qu'il est peu sensible aux variations de la sollicitation. Il faut observer que d'autres actions qu'une charge verticale transmise en crête du mur, par exemple une pression hydrostatique éventuelle sur le parement antérieur, donneraient lieu aux mêmes effets. Ce type de mur peut parfaitement convenir comme mur

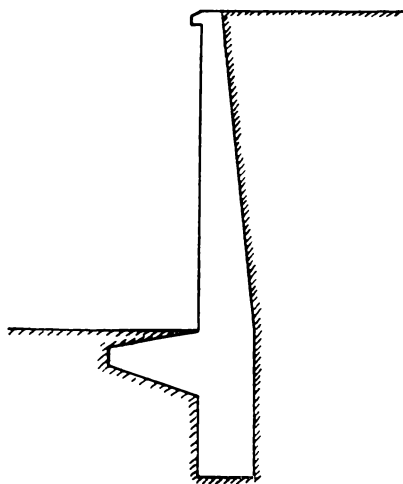


FIG. 3.

de quai. Pour le calcul, si les cas de sollicitation extrêmes sont sûrement définis, on dessinera le profil de telle sorte que les deux lignes des pressions extrêmes se disposent favorablement. Cela ne présentera aucune difficulté, vu que ces lignes seront relativement peu écartées et que l'on juge facilement du sens de l'écart. Si les sollicitations extrêmes sont mal connus, on dessinera le mur pour le cas de sollicitation normale, avec une grande sécurité (compression simple du joint de fondation).

On pourra facilement apprécier que d'importantes variations de sollicitation dans l'un et l'autre sens ne sont pas susceptibles de compromettre la stabilité de l'équilibre.

En examinant d'une manière attentive ce type de mur, on lui trouverait de nombreux avantages accessoires, plus que d'inconvénients. Je pense qu'il mérite d'être connu et d'être appliqué.

Il se trouvera cependant en défaut lorsqu'il s'agira de cons-



truire un mur destiné à retenir un remblai constitué après le mur. La stabilité du mur non adossé aux terres paraît assez précaire. Il sera également en défaut lorsque, par suite de manque de place, aucune saillie ne peut exister sur le parement postérieur, ce qui empêche la constitution de la tablette d'équilibrage. On peut dans ces cas recourir au type de la figure 3, dans lequel, au lieu d'une tablette d'équilibrage en saillie on trouve une prolongation du mur sous la semelle de fondation, réalisant un véritable encastrement dans le sol. Le but de ce prolongement du mur dans le sol est :

1° D'équilibrer, par rapport à la semelle de fondation, le moment de renversement dû à la poussée des terres sur la partie du mur en élévation ;

2° D'augmenter suffisamment le poids pour assurer un équilibre suffisant de translation horizontale ;

3° De contribuer par une butée importante à cet équilibre de translation horizontale.

Il est facile de constater que cet encastrement du mur dans le sol, concurremment avec la semelle de fondation en saillie sur le parement antérieur du mur, réalise également une sorte d'auto-équilibrage du mur en cas de variation de sollicitation, quoique dans une mesure moins définie que le type précédent.

Evidemment, l'économie est moins grande, car toute la partie supérieure du mur est fléchie. Mais en travaillant aux taux indiqués de 1200 k/cm<sup>2</sup> pour l'acier et de 20 à 30 k/cm<sup>2</sup> pour le béton, on obtiendra des dimensions assurant à la fois une bonne économie et un poids suffisant pour permettre un dimensionnement satisfaisant du mur.

On pourrait aussi adopter les taux ordinaires du béton armé ; on retrouverait, en principe, les caractères définis en introduction : faibles épaisseurs, fortes armatures et exécution difficile. En outre, le poids diminuerait sensiblement, de telle sorte que son rôle deviendrait accessoire. Cela exigerait un élargissement considérable de la semelle, fréquemment impossible, ou éventuellement un allongement considérable de la partie enterrée du mur, coûteuse et difficile d'exécution. Ceci suffit pour indiquer les avantages du type légèrement armé. Le problème change d'aspect s'il est possible de prendre appui sur une construction voisine pour assurer l'équilibre de translation. Tel est le cas du mur représenté à la figure 4, du type envisagé, bordant un remblai de

chemin de fer surchargé fictivement de 2 m de hauteur de terre.  
Les poussées sur les parties inférieures et supérieures du mur équilibrent leurs moments par rapport à la semelle de fondation.

## MUR DE SOUTÈNEMENT EN BÉTON ARMÉ

SURCHARGE DE LA PLATEFORME - 2 M DE HAUTEUR FICTIVE DE TERRES

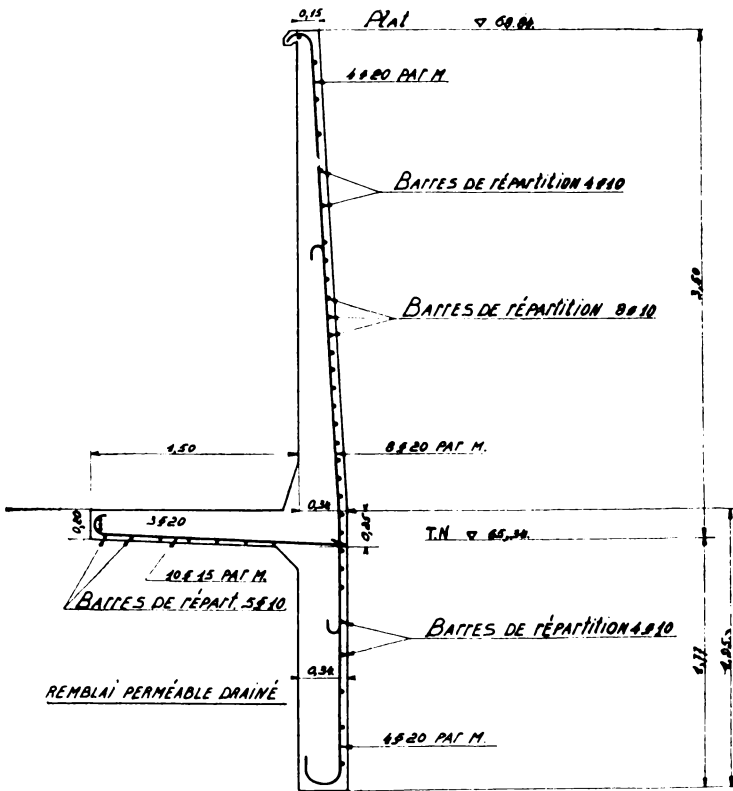


FIG. 4.

Celle-ci s'appuie contre une construction rigide profondément enterrée, capable d'assurer l'équilibre de translation du mur sans développement de butée des terres sur la partie enterrée du mur,

butée qui pourrait d'ailleurs être défavorable à la construction voisine sur laquelle le mur prend appui.

Ce dernier exemple ne constitue qu'une modification occasionnelle du deuxième type envisagé, que je cite simplement pour montrer que ces formes peuvent, suivant les circonstances, recevoir des variantes appropriées.

En résumé, les deux types de murs envisagés utilisent avantageusement les propriétés des matériaux dont ils sont constitués et des terres qu'ils ont à retenir. Ils ont des caractères propres, bien définis, alliant une appréciable économie à une grande sécurité, dans des limites assez écartées de sollicitation variable. Pour ces raisons, ils méritent de retenir l'attention des ingénieurs et d'être appliqués plus qu'ils ne le sont.

---