

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

PATHOLOGIE DES CONSTRUCTIONS

GCL 566

Responsable: Dr. GHOMARI Fouad

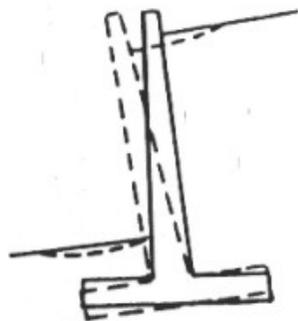
Chap. 3. PATHOLOGIE DES MURS DE SOUTÈNEMENTS.

3.1. Rappels.

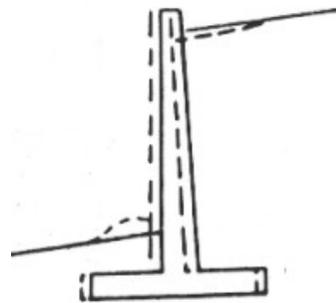
Un mur de soutènement est un solide quasiment indéformable, souvent fragile, qui cherche son équilibre, tel un corps étranger, dans un milieu plus ou moins mou et hétérogène, qui est le sol. Il peut comme un bateau rouler, dériver et parfois craquer.

Rouler, dériver, craquer : ce sont bien trois phénomènes dont peuvent être victimes les murs de soutènement.

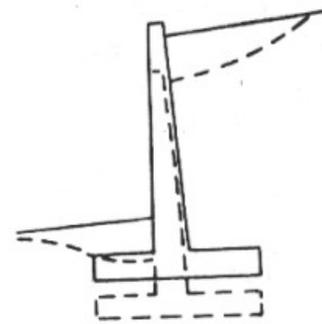
Etant donné leur faible amplitude, on dira : se déverser, glisser, se fissurer.



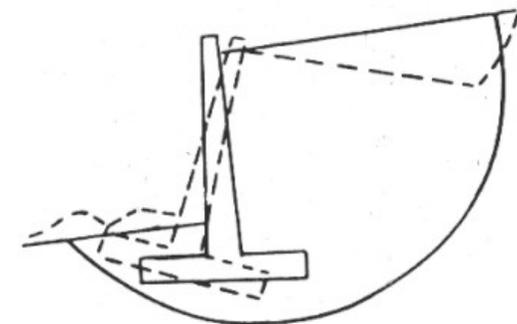
Déverser



Glisser



Tasser



Mvt. ensemble

A l'équilibre, les forces en présence dans un mur de soutènement doivent concourir et l'on a :

$$\vec{T} + \vec{P} + \vec{S} = 0$$

T : action des terres à soutenir,

P : poids du mur,

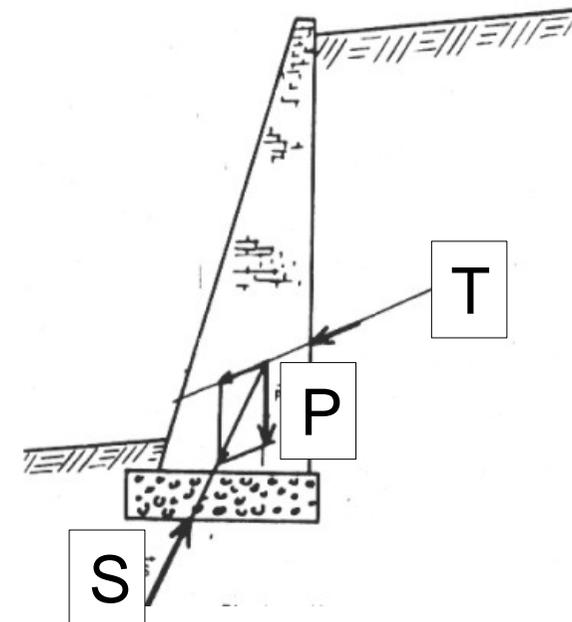
S : réaction du sol d'assise

Les murs de soutènement se distinguent de la manière suivante :

i., Mur poids :

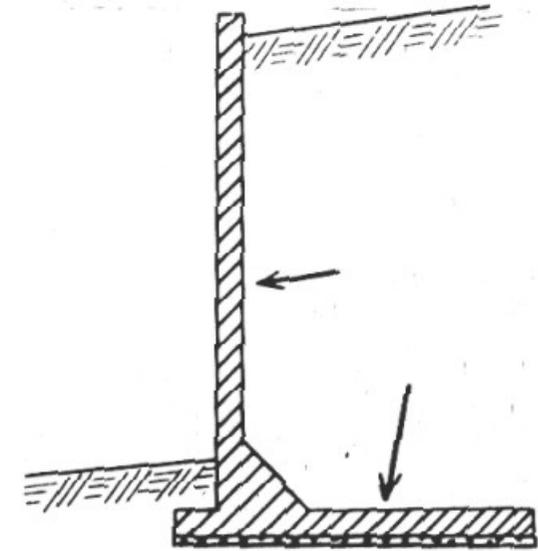
Dans ce cas, l'action du poids est prépondérante.

L'association $(\vec{T} + \vec{P})$ donne une résultante qui traverse la semelle et équilibre la force \vec{S} qui lui est égale et opposée.



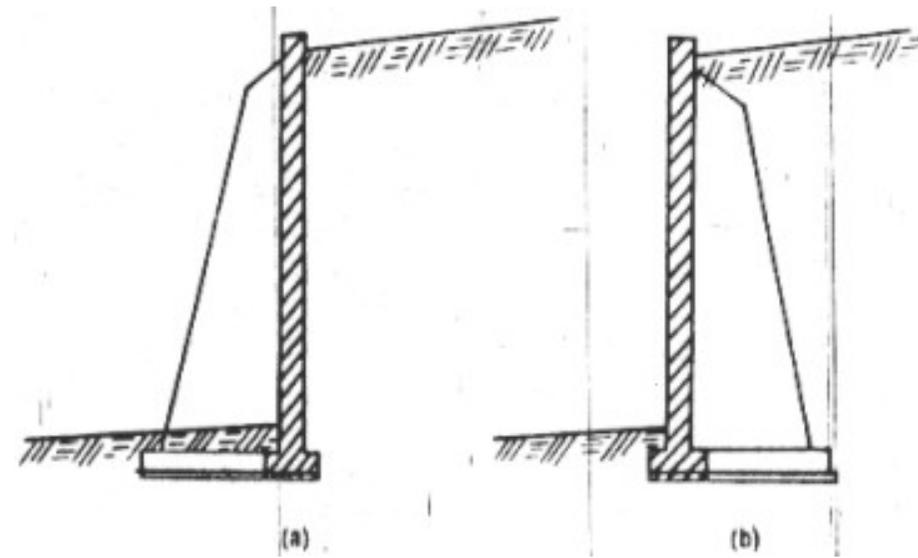
ii., Mur console :

Les terres à soutenir, avec les murs consoles, agissent à la fois sur la paroi amont où elles exercent une poussée, et sur la surface de la semelle qu'elles chargent de leur poids.



iii., Mur à contrefort :

Les contreforts peuvent être extérieurs ou noyés. Les contreforts noyés ont leur semelle chargée par le terrain.



3.2. Quelques statistiques.

Si l'on classe les sinistres de murs de soutènement soit par rapport à leur fréquence, soit par rapport aux coûts des travaux de réfection engagés, on trouve les mêmes pourcentages qui sont les suivants, par ordre d'importance décroissante :

a)- Sinistres causés par l'eau :

Un sinistre sur trois est dû à une mauvaise évacuation des eaux. Le plus souvent, une absence de drainage à l'arrière permet la montée de la nappe et l'accroissement important de la poussée qui en découle. Les dommages se montent à 35% du coût total des sinistres des murs de soutènement.

C'est dire l'importance du soin à apporter au bon fonctionnement du dispositif d'assèchement : drain et son exutoire ou simples barbacanes.

b)- Sinistres causés par un mauvais dimensionnement :

Un sinistre sur quatre (et 25% des coûts) est dû à une mauvaise appréciation des efforts en présence (poussées et réactions du sol) ou sous modification ultérieure de ces efforts.

La manifestation la plus courante et la plus coûteuse est un déversement excessif, voire un renversement complet du mur.

Un glissement excessif présente beaucoup moins de gravité s'il suffit de stopper la progression du mur et si on peut l'accepter sans trop de gêne à sa nouvelle position.

Un excès de tassement ou un glissement doivent être maîtrisés d'urgence en renforçant le terrain ou en le soulageant de ses surcharges.

c)- Sinistres dans l'ouvrage :

Un sinistre sur quatre (et encore 25% des coûts) est dû aux fautes de conception ou d'exécution du mur :

- Rupture à la jonction entre la paroi verticale et la semelle,
- Fissuration de la poutre de couronnement quand elle existe,
- Décrochement entre paroi et contrefort.

Ce sont là des sinistres spécifiques à la maçonnerie ou au béton armé.

d)- Sinistres dus à une faute dans le déroulement des travaux :

10 à 15% sont des sinistres causés par des imprudences dans la conduite du chantier :

- Fosse taillée trop raide et qui s'éboule,
- Remblaiement prématuré quand le béton ou les joints de maçonnerie n'ont pas encore durci,
- Compactage excessif du remblai,
- Chocs d'engins ou de matériels, ...

e)- Causes diverses :

Les quelques 5% de sinistres restants sont dus à des causes diverses :

- Eaux agressives : les eaux séléniteuses sont fréquentes en présence de certaines couches de sol (sols gypseux ou encore urbaine,
- Détérioration du parement extérieur du mur, par suite de l'humidité ambiante,
- Détérioration des joints de dilatation,
- Fissurations mineures, ...

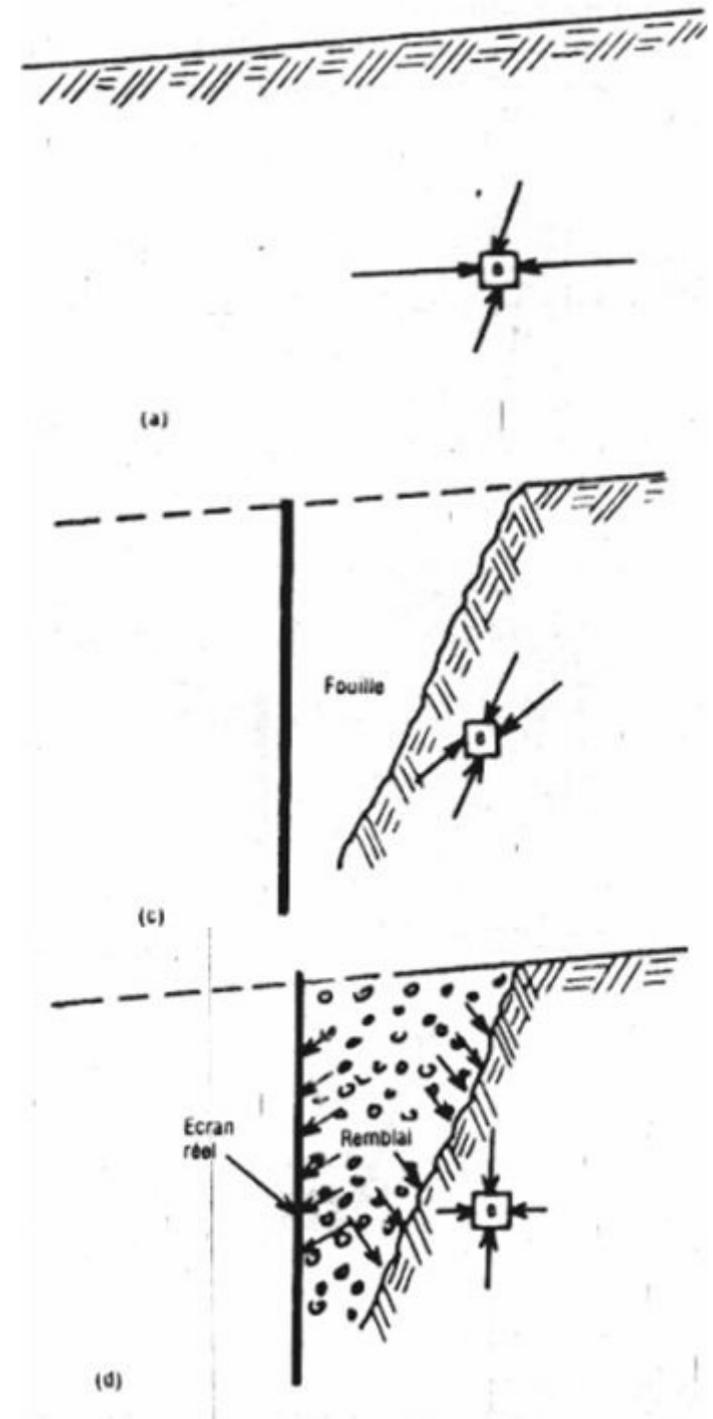
3.3. Evolution des équilibres en cours des travaux.

Pour construire un mur de soutènement, on doit le plus souvent effectuer dans le terrain une opération qui rompt temporairement son équilibre : c'est l'ouverture de la fouille.

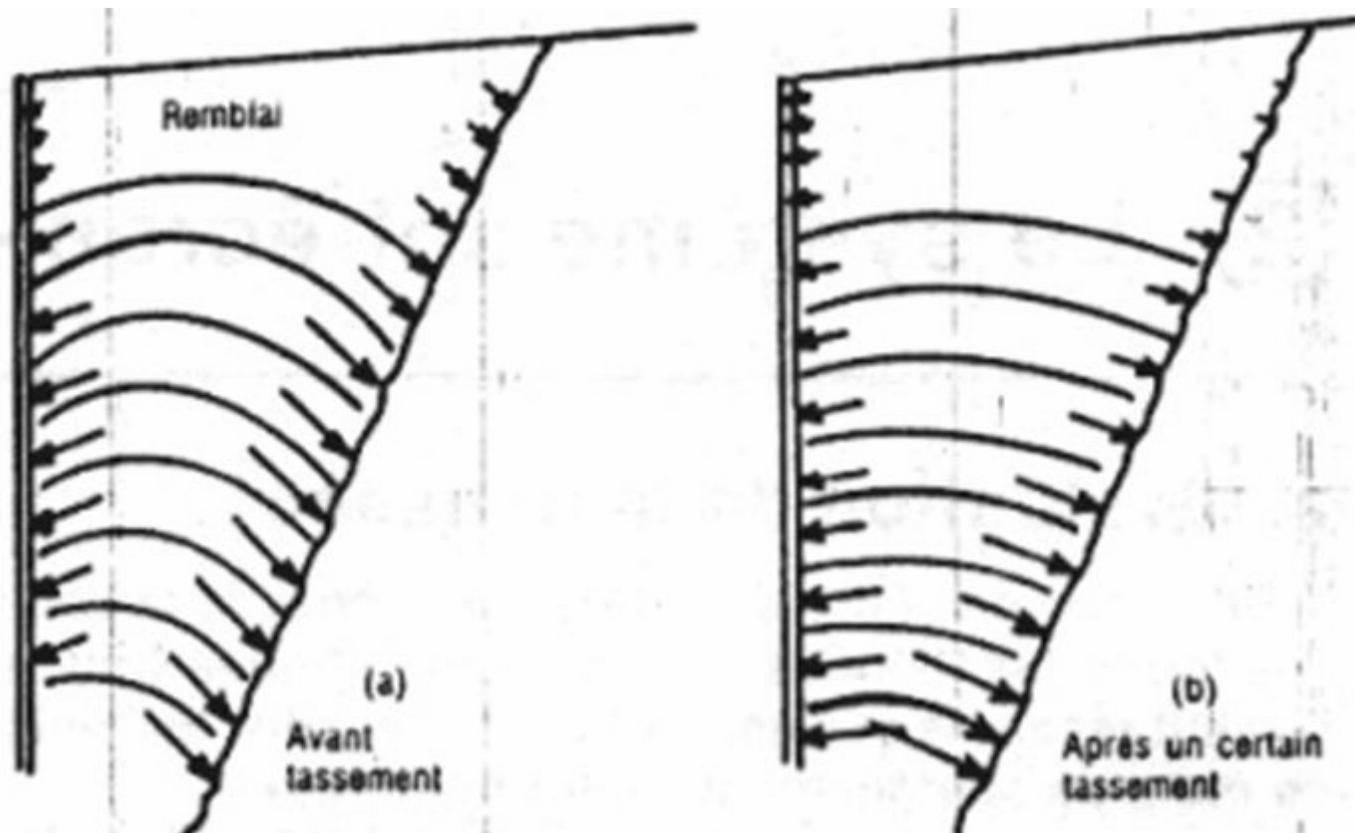
On oblige, en effet les pressions dans le sol à s'annuler le long du parement de la fouille et à s'amenuiser dans son voisinage immédiat.

Le mur une fois réalisé, on remblaye derrière, cherchant ainsi à reconstituer le sol primitif. En réalité, on déverse des matériaux et on se garde de trop les compacter pour ne pas endommager le mur encore jeune.

Ce remblai va se trouver coincer entre le mur et le terrain en place. Il va d'abord s'arc-bouter sur les deux parois et exercer une pression oblique, à la limite de l'angle maximal de frottement. Comme le parement du mur est généralement rugueux, cet angle sera proche de l'angle de frottement interne du sol φ .



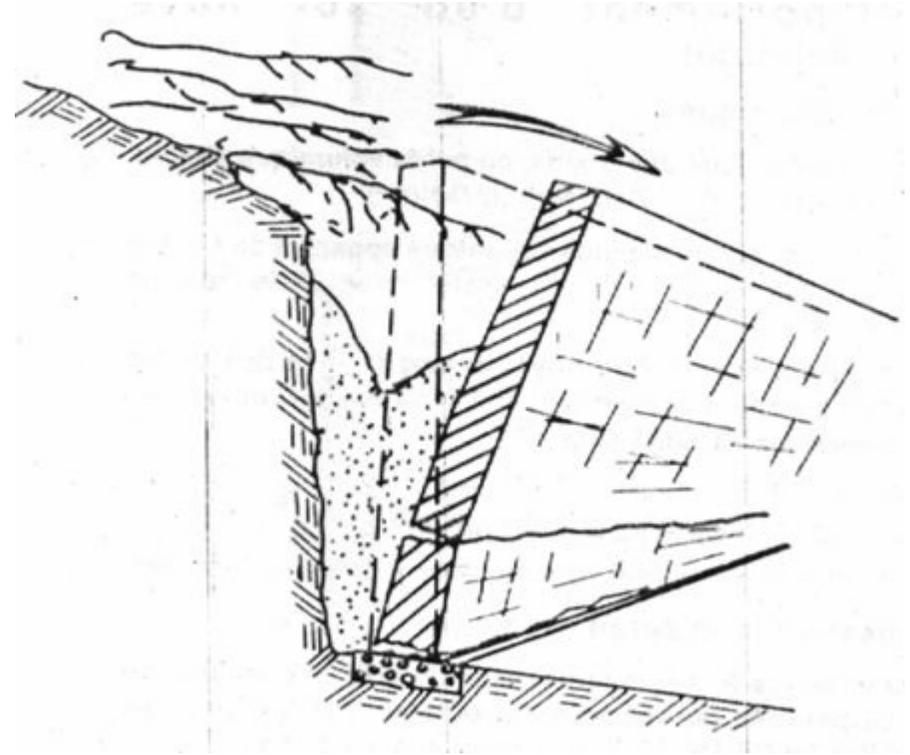
1., l'équilibre du sol en place va s'améliorer. Néanmoins, les conditions d'équilibre vont évoluer dans le sens d'une aggravation des poussées. En effet, le remblai a tendance à tasser et les voûtes d'arc-boutement s'aplatissent. L'angle des poussées sur le mur diminue, tandis que leur intensité augmente et la résultante descend. Ce mouvement est plutôt *déstabilisateur*.



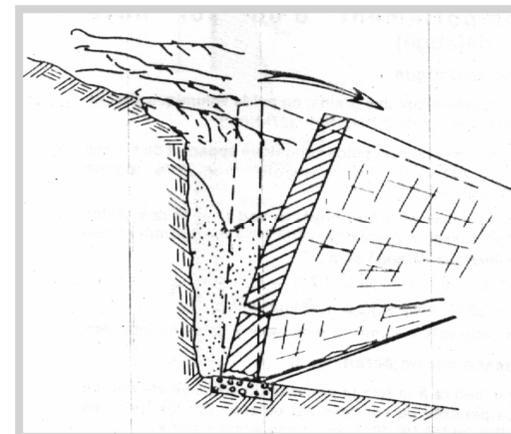
Exemple 1 : un mur de parement s'effondre. Un mort et deux blessés graves.

Derrière un immeuble construit en site montagneux, une paroi rocheuse fut jugée inesthétique et l'on décida de la masquer par un mur de moellons de largeur 60 cm à sa base et 45 cm au sommet pour une hauteur de 5 m et une longueur d'environ 20 m.

Entre le mur et la paroi rocheuse subsiste un vide de un à deux mètres de large que l'on combla à l'aide d'un remblai. On avait cru qu'une faible quantité de remblai produisait une faible poussée. On se mit donc à combler l'arrière du mur d'un bon sable granitique, tandis que devant, les travaux s'achevaient par un rejointement soigné de la maçonnerie, en descendant, au fur et à mesure que l'on démontait l'échafaudage.



Causes : des tirs de mines journaliers, dans une carrière voisine en exploitation, provoquaient, par les vibrations qu'ils engendraient, un tassement progressif du sable et par suite une aggravation de la poussée T.



Les travaux de rejointement étaient en cours lorsque, sous l'effet d'une dernière onde de vibration, le mur s'effondra sur les ouvriers.

2., Si le terrain recule de quelques millimètre seulement, il permet une décompression du terrain, et par conséquent une réduction des poussées. L'effet est *stabilisateur*.

Si la largeur de largeur est importante, le mouvement de recul peut atteindre sans danger plusieurs centièmes de la hauteur : le remblai remplit le supplément de volume en tassant de nouveau et continue à transmettre un effort de poussée entre le sol et la paroi du mur.

Ce mouvement de remblai, dans le cas où sa largeur est faible, peut être suivie de la zone voisine du terrain en place. Ainsi, un léger recul du mur réduit la poussée (effet *stabilisateur*), mais cela tant qu'il n'y a pas attrition du terrain en place. Au-delà, l'effet est *déstabilisateur*.

3., Aussi, un léger déversement comme le recul de faible importance, présente un effet *stabilisateur* car il atténue les poussées vers le haut et en abaisse la résultante.

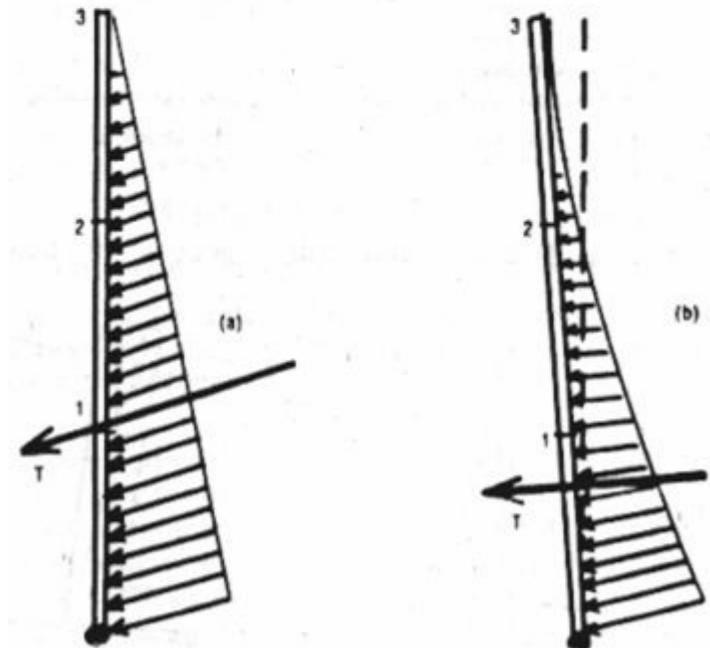
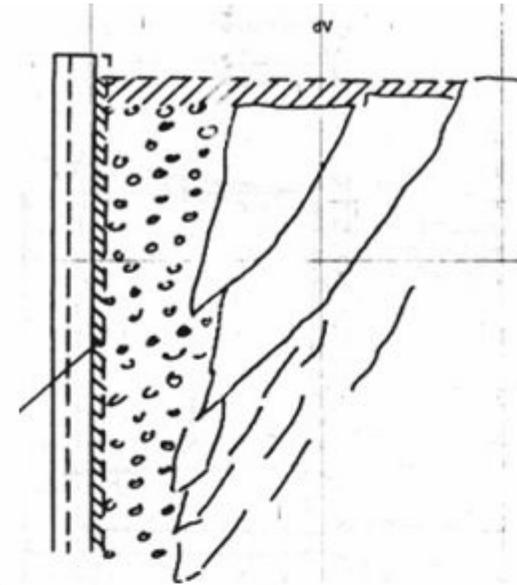
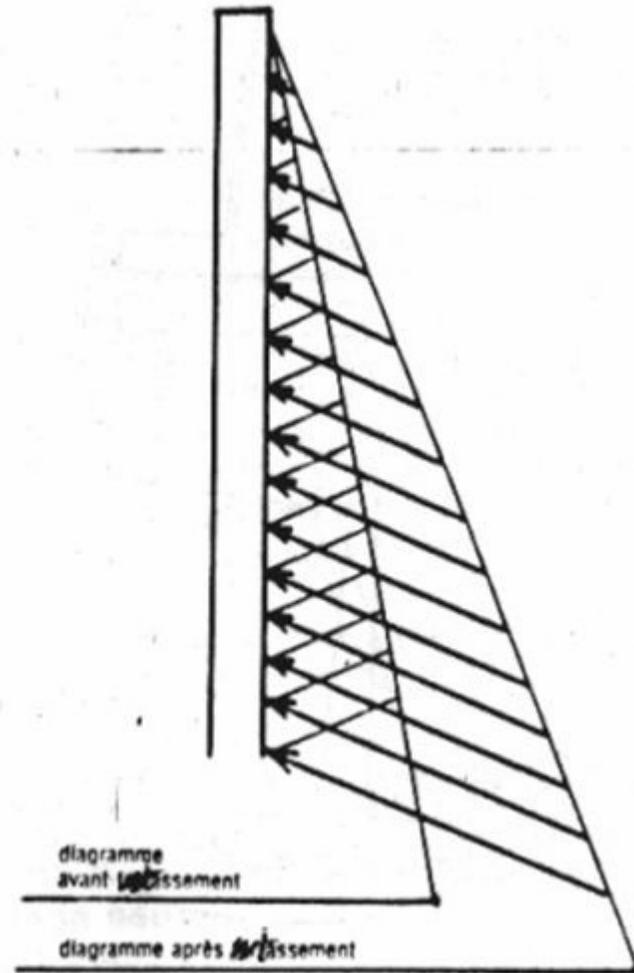


Fig. 9. — Effet sur les poussées d'un déversement du mur.
 (a) Avant. Répartition supposée triangulaire
 (b) Après. De bas en haut, les poussées décroissent plus vite et leur orientation se redresse.

4., Le tassement de l'assise du mur est un mouvement *déstabilisateur*. En effet, le terrain retenu va tendre à s'opposer au mouvement et de ce fait son angle de poussée prendra une valeur négative et l'intensité des forces augmente ; il s'en suit une aggravation des efforts de déversement.



En conclusion, on voit que les tassements du remblai et du sol d'assise tendent à détériorer la stabilité. En revanche, un léger recul ou déversement du mur tend à l'améliorer. En fait, un bon sol d'assise et un bon remblai sont des conditions essentielles de stabilité des murs de soutènement.

3.4. La recherche de la sécurité.

La vérification se ramène à rechercher l'intensité et le point d'application de la réaction S du sol sous la semelle. Cette vérification prend trois aspects selon la nature du terrain porteur :

i., Si le sol est rocheux, il est inutile de vérifier :

- l'intensité de S à l'égard de la force portante,
- le risque de trouver S hors de la semelle vers l'arrière.

On vérifiera que S n'atteint pas l'arrête avant (point O) en donnant aux actions et aux points d'application des efforts des valeurs raisonnablement pessimistes, et en multipliant la poussée T par un coefficient choisi entre 1.2 et 1.5 ;

ii., en terrain ordinaire, on fait deux calculs :

a)- un premier calcul avec des hypothèses pessimistes et une poussée de $1.5 \times T$. Il doit conduire à une position de S dans le 1/3 central et les contraintes maximales doivent rester acceptables,

b)- un second calcul avec des hypothèses raisonnablement optimistes. S va se déplacer vers l'arrière. Il doit demeurer dans le 1/3 central et les contraintes maximales doivent rester acceptables,

iii., c'est en terrain très compressible, que la vérification est la plus difficile car il ne faudrait être ni optimiste ni pessimiste mais exact dans les hypothèses conduisant à vérifier que S est centré. Ce qui est impossible. Dans ce cas, on se contente de vérifier, avec les deux types d'hypothèses, du 3.4.ii ci-dessus, que par exemple S ne s'éloigne pas du milieu de la semelle de plus du 1/12 de la largeur.

En conclusion, on peut écrire que la sécurité ne réside pas dans des majorations arbitraires de composantes de forces, mais dans un choix prudent, voire pessimiste de ces forces.

3.5. Désordres dus à l'eau.

La présence de l'eau provoque la dégradation des qualités mécaniques du sol (c et φ) d'où il résulte une aggravation de la poussée T .

a., sous la semelle, la détérioration de c produit à la fois :
une réduction de la force portante et par la suite, une augmentation des tassements et un risque accru de déversement,

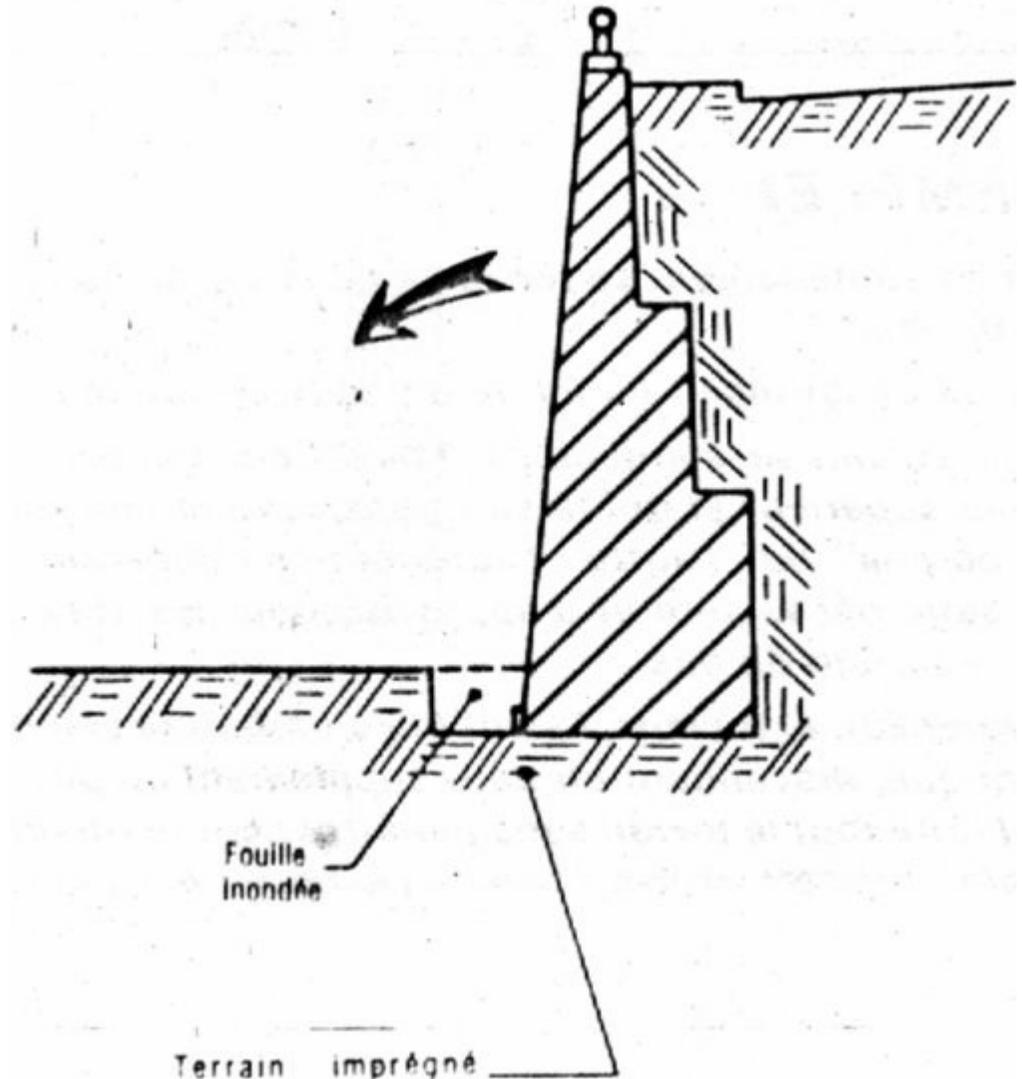
une réduction de la capacité de réaction horizontale $SH_c + SH_\varphi$ et un risque accru de glissement.

Exemple 2 :

un mur de soutènement bordant une chaussée s'écroule lors de l'exécution de travaux à son pied. Ce sinistre causa des dégâts extrêmement importants.

On avait projeté la construction, contre ce mur, d'un immeuble qui devait être desservi par la chaussée supérieure. Les fondations de la façade allaient donc être réalisés en bordure immédiate du pied du mur. On avait ouvert la fouille et on s'apprêtait à couler la semelle quand l'effondrement survint.

Causes : de grosses pluies avaient inondé la fouille et détrempe le terrain voisin et particulièrement la couche d'assise du pied du mur de soutènement. Le terrain était sablo-graveleux. L'humidité détériora ses qualités portantes. Le pied commença alors à tasser ce qui amorça un déversement du mur à cet endroit ; puis le mouvement s'accéléra jusqu'à l'éboulement complet.



b., le terrain saturé d'eau se trouve allégé par la poussée d'Archimède de sorte que son poids volumique est largement diminué (poids volumique déjaugé) par conséquent la poussée sur le mur se trouve réduite. Cependant il s'ajoute la pression de l'eau interstitielle de sorte que la pression finale sur le mur est fortement majorée.

Il faut donc empêcher l'eau de s'accumuler à l'arrière et au pied du mur. Pour cela :

- le terrain à cet endroit, doit former drain vertical et, par conséquent, être très perméable. Il faut proscrire les terres argileuses qui ont pu être extraites de la fouille, et les remplacer par un sable grossier mélangé ou non de gravier,
- si l'on décide de réaliser au bas du mur un drain horizontal, ce drain aura évidemment un exutoire, lequel ne devra jamais être engorgé. Or les écoulements entraînent toujours les particules fines, qui vont se retrouver à l'exutoire. Elles devront pouvoir être purgées de temps à autre pour ne pas risquer, en s'accumulant, de colmater le débouché,

- si l'on décide de faire évacuer l'eau à travers le mur, par des barbacanes, les plus basses d'entre elles ne doivent pas être trop éloignées du pied du mur, de manière à éviter une accumulation d'eau jusqu'à leur niveau,
- les barbacanes ne doivent surtout pas être bouchées par souci d'esthétique, ou se boucher d'elles mêmes par dépôt de fines particules ou par la végétation,
- l'eau sortant des barbacanes ne doit pas aller tremper le sol d'assise. Elle doit être recueillie sur l'avant de la semelle par un caniveau et évacuée,

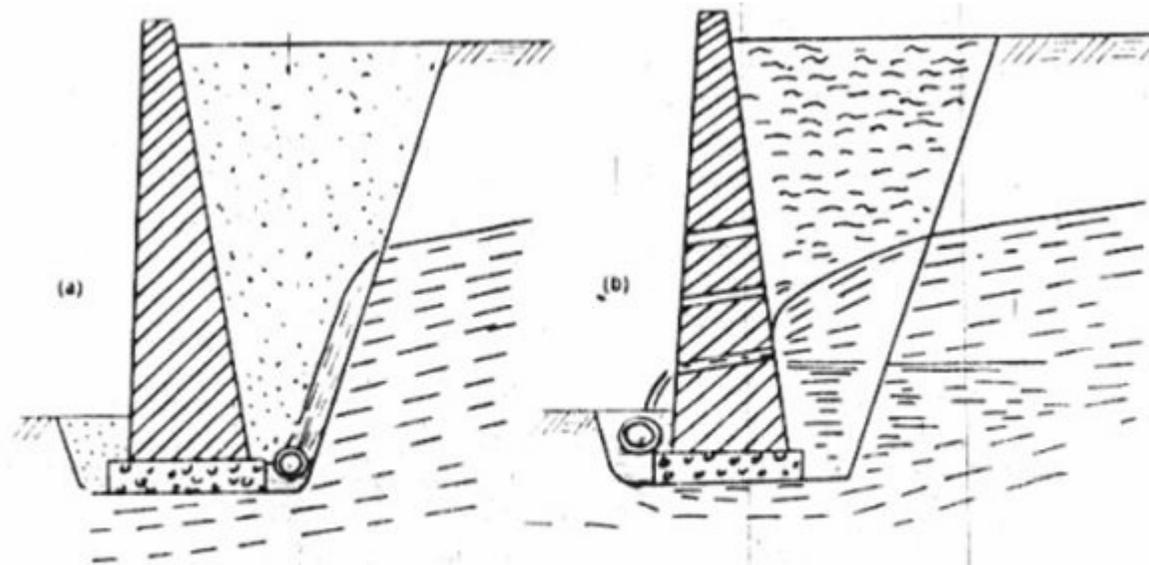
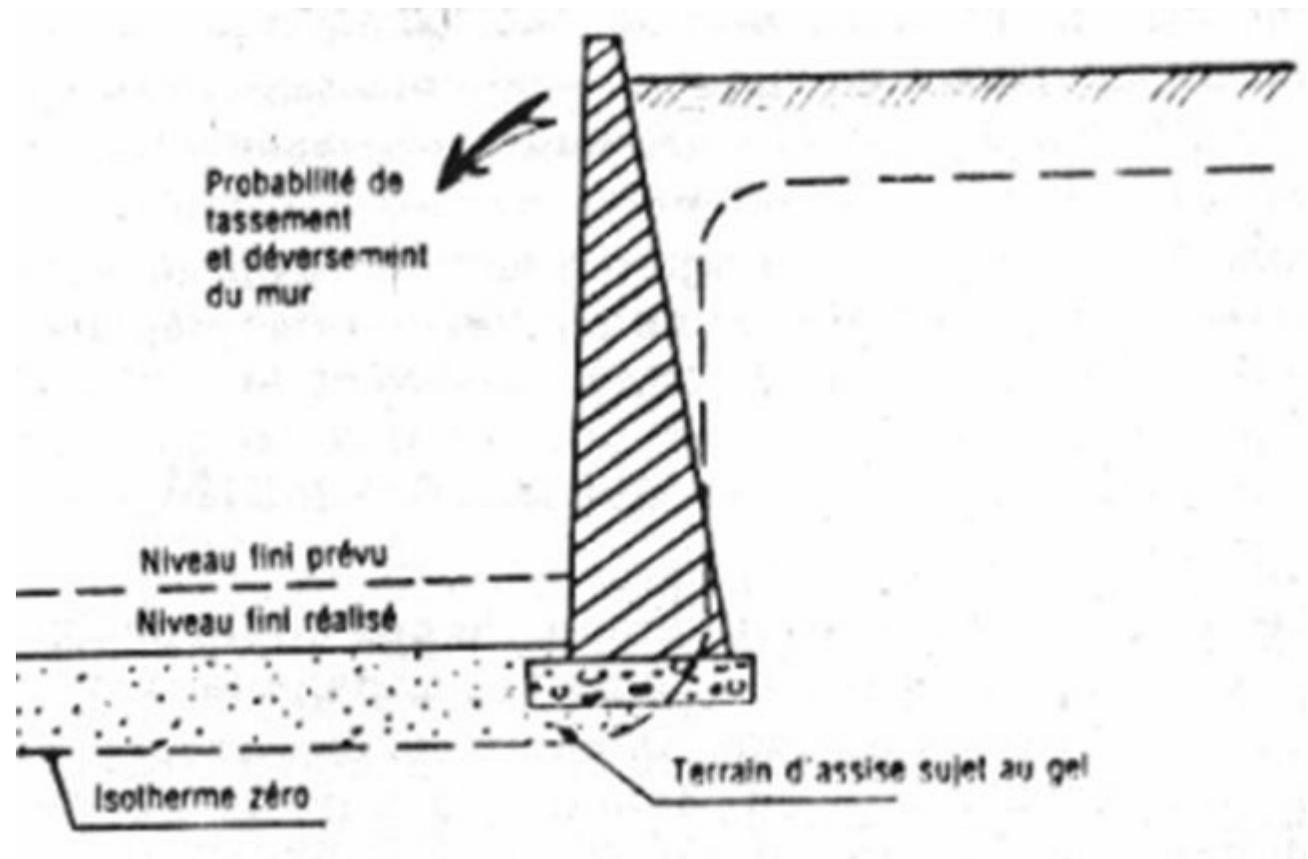


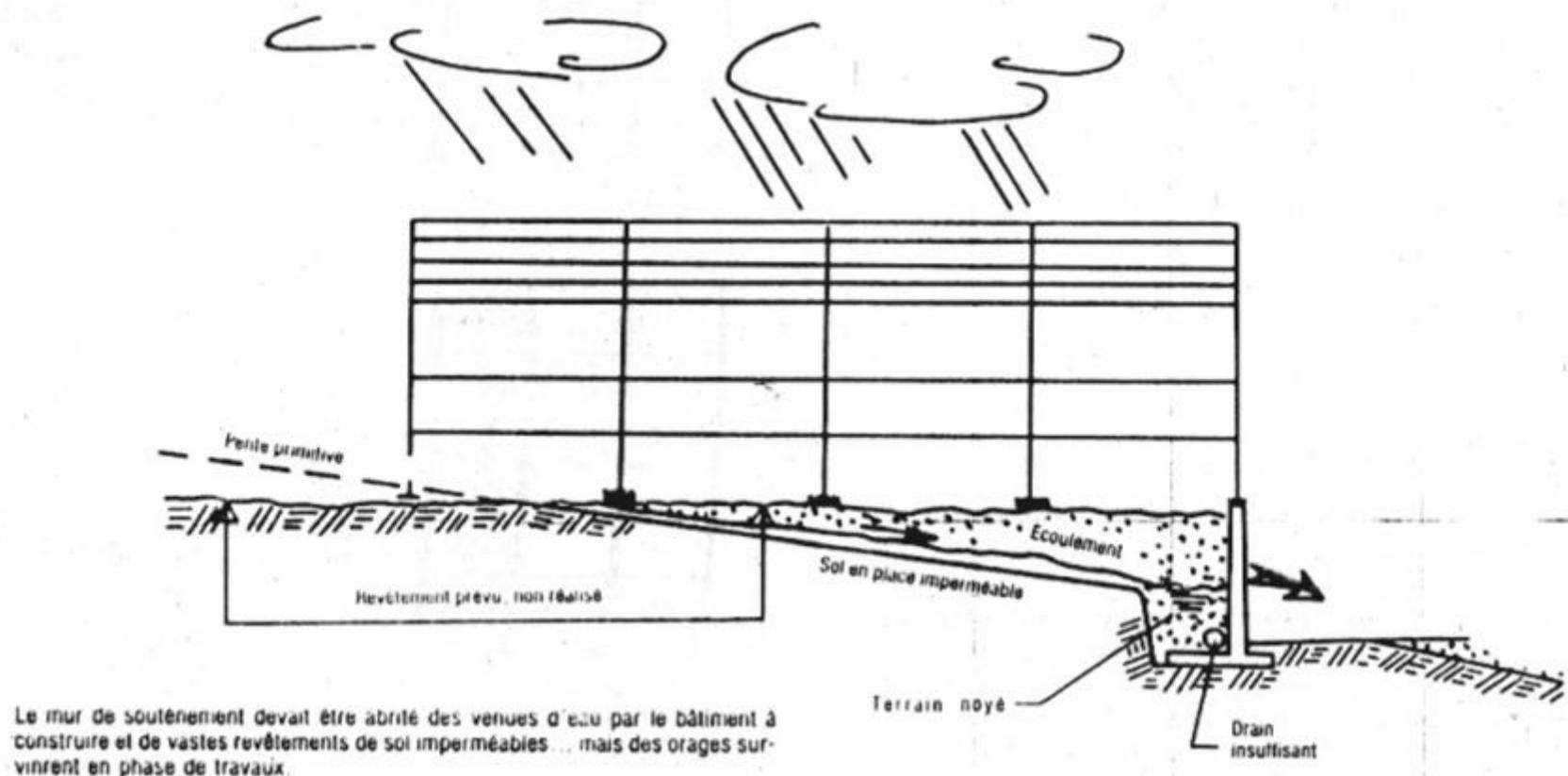
Fig. 23. — Drainages pour mur de soutènement. Les pointillés figurent les lignes de courant.
 (a) Drainage arrière avec remblai très perméable. Solution idéale.
 (b) Barbacanes et drainage avant + remblai médiocre. Le sol arrière est noyé jusqu'aux premières barbacanes.

- si l'on réalise un trou ou une tranchée au pied du mur, il convient d'empêcher l'eau de pluie de s'y accumuler, pour éviter qu'en s'infiltrant, elle ne trempe une partie du sol d'assise (cas de l'exemple 2),
- enfin, il faut réserver et maintenir la profondeur d'enfouissement du pied avant la semelle, pour préserver le sol porteur contre toute atteinte au gel car la garde au gel du sol d'assise est une condition essentielle de la stabilité du mur.



Exemple 3 :

à la suite d'orages abondants, un mur de soutènement s'écroule et entraîne dans sa chute la charpente métallique d'un atelier.



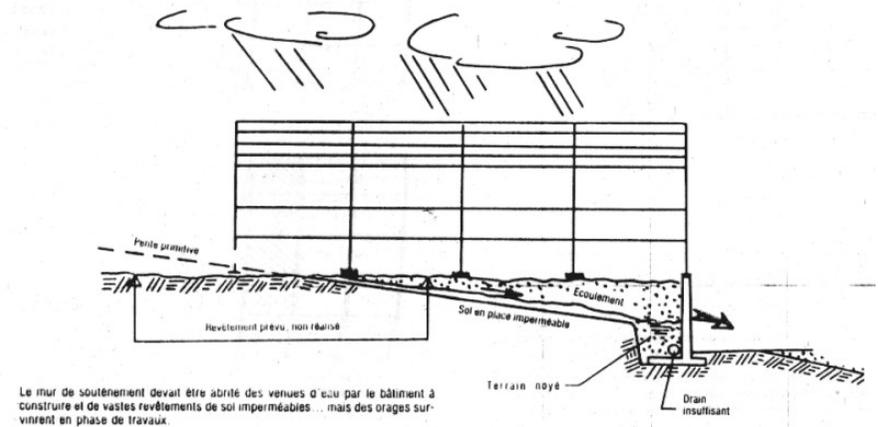
L'ossature métallique d'un bâtiment venait d'être achevée. Le terrain naturel était en pente. On l'avait nivelé et un pan de la charpente s'appuyait en crête d'un mur de soutènement.

Le sol paraissait sain et puis, il allait être protégé de la pluie par de vastes revêtements de sol imperméables. Les venues d'eau paraissent donc improbables.

On n'avait pas alors équipé le mur de barbacanes ; par contre un drain avait été posé à l'arrière du mur avec un exutoire d'un débit modeste.

La charpente métallique venait d'être montée quand à la suite de pluies torrentielles, le mur bascula, suivi par les poteaux qu'il supportait, et par la charpente entière qui se retrouva au sol, complètement détruite.

Causes : peut être la conception du mur était-elle valable pour la phase finale de l'ouvrage. Il fallait pour cela que, non seulement la pluie tombant sur l'atelier soit canalisée vers les égouts, mais aussi qu'il n'y ait pas d'écoulements souterrains dangereux sur ce terrain en pente.



Le sinistre survint durant la phase des travaux la plus exposée : ni la couverture, ni les dallages et revêtements de chaussée n'étaient réalisés, et la charge stabilisatrice du mur qu'allait apporter la façade de l'atelier n'était pas encore en place. Ainsi le drain s'avéra insuffisant pour l'afflux orageux, le niveau monta et le mur, dans cet état, ne put résister à la poussée élevée du terrain noyé.

3.6. Excès de confiance.

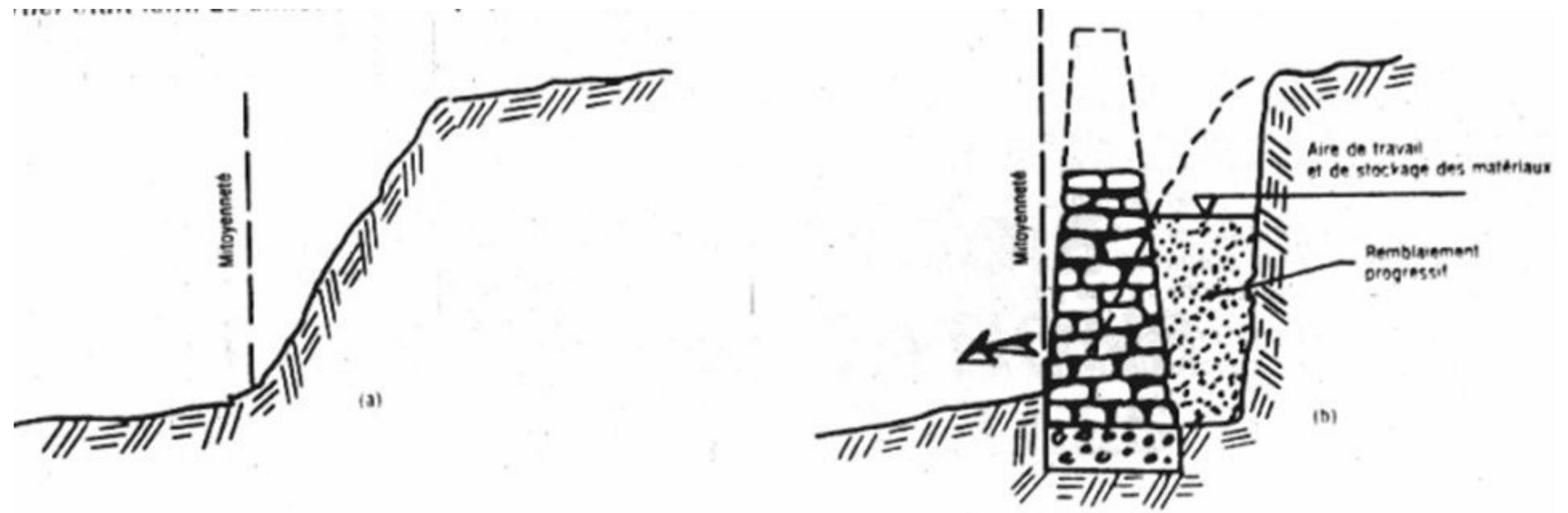
a., Il va de soi que le remblaiement derrière le mur ne doit pas être entrepris que lorsque sa résistance ; i.e. quand le mortier pour les murs en maçonnerie ou le béton pour les murs en béton armé ait suffisamment durci.

Exemple 4 :

un mur de soutènement se renversa en cours de construction ; un mort.

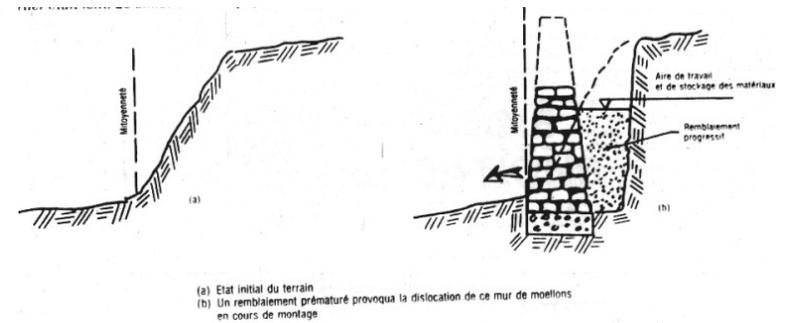
Ce mur se construisait en limite de deux propriétés. Les deux voisins ne s'entendaient pas. Celui qui occupait le fond supérieur et qui faisait construire le mur ne pouvait obtenir de l'autre l'autorisation d'installer l'échafaudage nécessaire et d'approvisionner les matériaux sur les terrains bas.

L'entrepreneur astucieux, expliquait qu'il pourrait faire le travail, moyennant un supplément de prix, sans pénétrer chez le voisin récalcitrant.



(a) Etat initial du terrain
(b) Un remblaiement prématuré provoqua la dislocation de ce mur de moellons en cours de montage

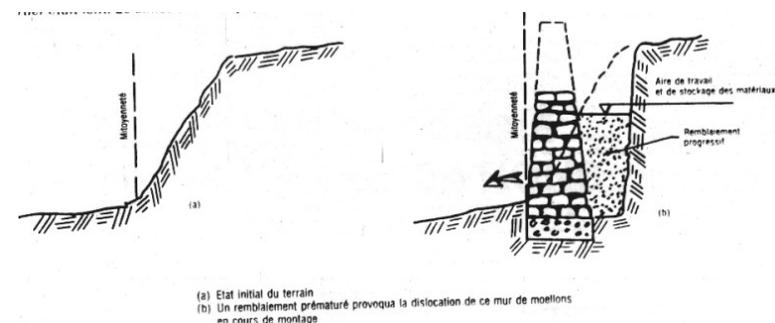
Le sol était une bonne argile, capable d'être taillée en talus très raide. L'entrepreneur creusa sa fouille, coula la semelle et commença à monter les lits successifs du mur en moellons.



Alors, il s'avisa de ne pas installer l'échafaudage dans l'espace réduit limité par le mur et le talus : puisque cet espace devait être remblayé, autant le faire tout de suite, par couches successives, de façon à toujours pouvoir maçonner à bonne hauteur.

Le mur en était aux 2/3 de sa hauteur quand il se disloqua pendant une opération de remblaiement. Les décombres tombèrent évidemment chez le voisin, qui se trouve bien plus gêné par les déblaiements, nettoyage, visites d'experts et d'assureurs, que s'il avait autorisé le cours normal des travaux.

Causes : le remblai poussait sur une maçonnerie aux joints encore frais. C'était l'hiver et le durcissement du mortier était lent.



Le sinistre s'amorça probablement par des glissements au niveau de certains joints entre moellons, qui en entraînaient d'autres par réaction en chaîne jusqu'à dislocation.

Moralité : on ne doit jamais remblayer derrière un soutènement avant qu'il ne soit capable de résister aux poussées du remblai.

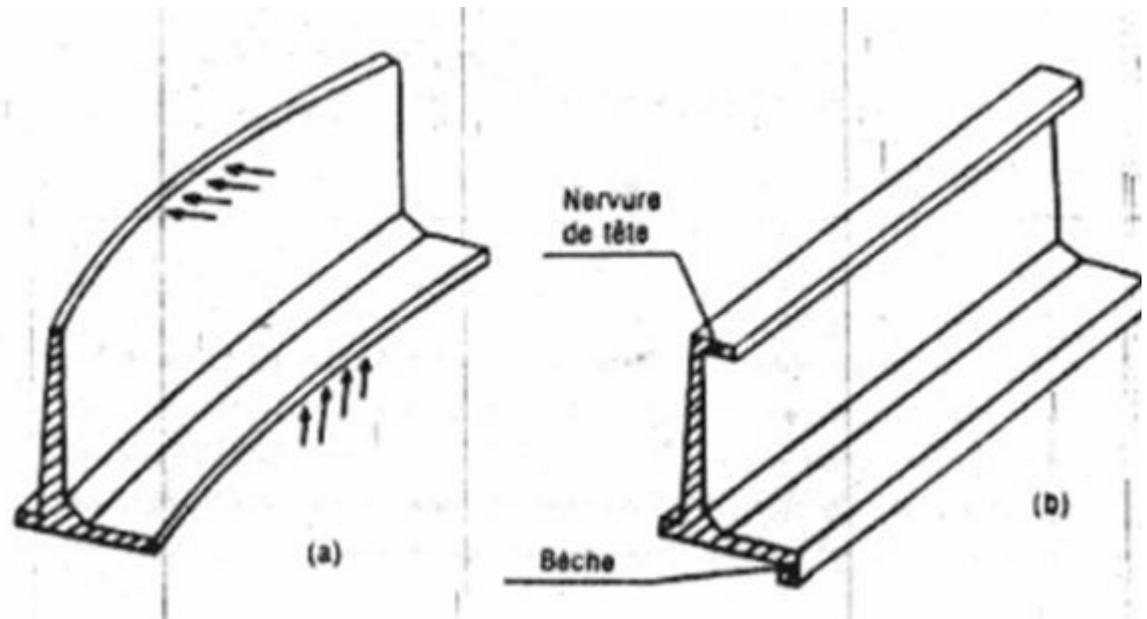
b., Le sol possède rarement des caractéristiques mécaniques identiques tout au long d'un même mur de soutènement : ici la poussée est un peu plus forte, le sol d'assise un peu plus mou qu'ailleurs, et la mise en charge tend à provoquer d'avantage de glissements, de déversements et de tassements.

Mais le mur est un ouvrage rapide. Il va réagir suivant sa raideur dans le sens d'une égalisation des déplacements. Des couples de flexion, de torsion, etc. vont s'y développer pour transporter une partie des plus fortes poussées vers les zones où le terrain d'assise est le plus raide. Ces effets, parfois importants doivent être pris en compte dans le dimensionnement du soutènement.

De plus, les effets de charges roulantes sont particulièrement intenses près de la crête du mur.

Une nervure raidisseuse en tête, une bêche en arrière, empêcheront la crête du mur de festonner.

Les déformations indiquées en (a) par les flèches; dues aux hétérogénéités du sol, auraient été combattues par la nervure de tête et la bêche de pied de l'image (b).

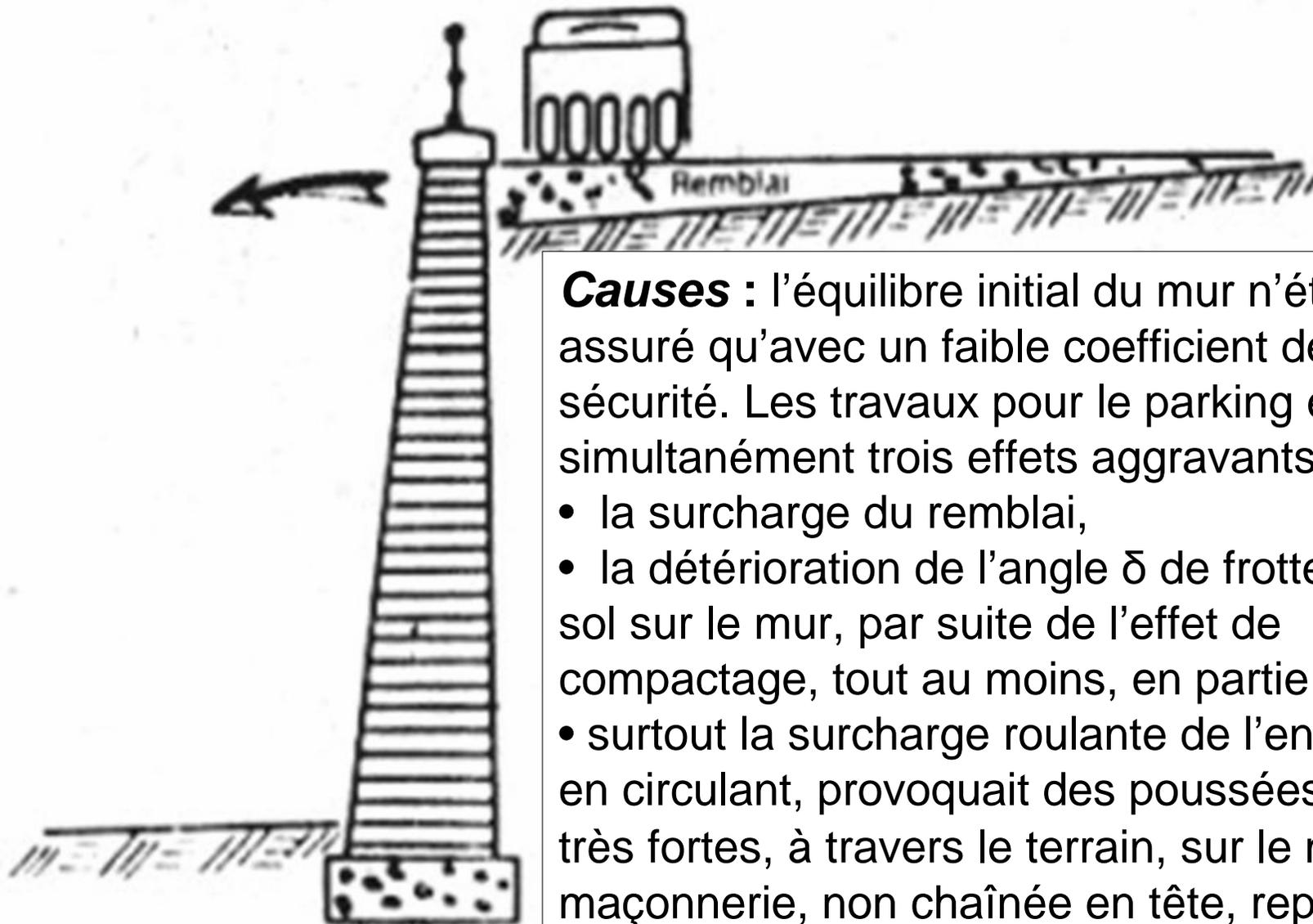


Exemple 5 :

un mur s'effondre en bordure d'un parking en cours d'aménagement.

Afin de désencombrer un quartier commerçant dans une grande ville, où la circulation automobile était intense, on projeta d'ouvrir un parking sur une place précédemment réservée aux promeneurs.

Cette place était limitée d'un côté par un mur de soutènement en maçonnerie d'environ 5 mètres de haut. En préparation du revêtement routier, un remblai sablo-graveleux venait d'être épandu sur le sol et on le compactait soigneusement au rouleau quand l'accident survint. Le mur céda près de l'engin, lequel fût entraîné dans l'éboulement. Son conducteur fut sauvé par miracle.



Causes : l'équilibre initial du mur n'était assuré qu'avec un faible coefficient de sécurité. Les travaux pour le parking eurent simultanément trois effets aggravants :

- la surcharge du remblai,
- la détérioration de l'angle δ de frottement du sol sur le mur, par suite de l'effet de compactage, tout au moins, en partie haute,
- surtout la surcharge roulante de l'engin qui, en circulant, provoquait des poussées locales très fortes, à travers le terrain, sur le mur. La maçonnerie, non chaînée en tête, reportait

Moralité : en prévision des poussées localisées intenses exercées par les charges roulantes, il est bon de munir la crête des murs de soutènement bordant des aires de circulation, d'une poutre raidisseuse largement dimensionnée.