

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 648 841

②1 N° d'enregistrement national :

89 08743

⑤1 Int Cl<sup>5</sup> : E 02 D 35/00.

⑫

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 26 juin 1989.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la  
demande : BOPI « Brevets » n° 52 du 27 décembre 1990.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux appa-  
rentés :

⑦1 Demandeur(s) : AMOUROUX Joseph Aurélien François.  
— FR.

⑦2 Inventeur(s) : Joseph Aurélien François Amouroux.

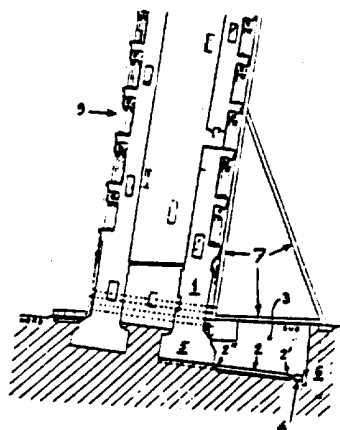
⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) :

⑤4 Procédé de reprise en sous-œuvre.

⑤7 Procédé de reprise en sous-œuvre en vue de stabiliser  
l'assiette d'un ouvrage, ledit procédé comprenant l'étape du  
creusement d'une tranchée étroite sensiblement perpendicu-  
laire à un mur de façade de l'ouvrage, caractérisé en ce que  
l'on enfonce au-dessous dudit mur 1, une première poutre 2,  
d'une pluralité de poutres, ladite poutre étant disposée initia-  
lement de façon sensiblement horizontale sur le fond de la  
tranchée 3, au moyen d'un vérin 4 prenant appui sur une  
extrémité 2' dite extérieure de la poutre, l'autre extrémité 2''  
dite intérieure étant destinée à pénétrer sous les fondations 5  
dudit mur.

Application à la Tour de Pise, par exemple.



FR 2 648 841 - A1



La présente invention est du domaine de la restauration des ouvrages du bâtiment et des travaux publics; elle a pour objet un procédé de reprise en sous-oeuvre en vue de stabiliser l' assiette d' un ouvrage.

- 5 On connaît la technique consistant à creuser une fouille de dimensions réduites près d' un mur pour fouiller profondément au-dessous de sa fondation afin d' approfondir celle-ci, et à répéter l' opération en plusieurs points du mur jusqu' à soutenir ainsi la totalité des fondations. Cette technique est utilisée, par exemple, pour construire un immeuble à côté d' un immeuble existant,
- 10 le nouvel immeuble devant avoir un ouvrage en sous-sol beaucoup plus profond que celui de l' immeuble existant.

- La présente invention , qui s' inspire de loin de la technique sus-décrite , a pour objet de proposer un procédé de stabilisation de l' assiette d' un
- 15 ouvrage existant menaçant ruine par tassement plus ou moins uniforme du sol sous-jacent. Le cas de telles déstabilisations de l' assiette est fréquent pour les ouvrages tours ou campaniles; un cas bien connu est celui de la Tour penchée de PISE.

- 20 Ainsi, la présente invention concerne un procédé de reprise en sous-oeuvre en vue de stabiliser l' assiette d' un ouvrage; ledit procédé comprend l' étape du creusement d' une tranchée étroite sensiblement perpendiculaire à un mur de façade de l' ouvrage; il est caractérisé d' une manière générale en ce que l' on enfonce au-dessous dudit mur une première poutre, d' une pluralité
- 25 de poutres, ladite poutre étant disposée initialement de façon horizontale sur le fond de la tranchée; on enfonce la poutre sous le mur au moyen d' un vérin exerçant son effort sur une extrémité, dite extérieure, de la poutre, l' autre extrémité, dite intérieure, de la poutre étant destinée à pénétrer sous la fondation dudit mur. De préférence, on aura préalablement étayé
- 30 le mur pour prévenir une destabilisation supplémentaire consécutive à de petites ruptures d' équilibre résultant des travaux. Pour enfoncer la poutre, le vérin peut prendre appui soit sur le terrain environnant, soit sur l' ouvrage lui-même, ce dernier ayant été pourvu de moyens de prise ou de renforts pour cet appui.

- 35 Toujours selon l' invention, le procédé comprend l' enfoncement analogue d' une deuxième, puis d' une troisième, puis d' une n<sup>ième</sup> poutre pour former au moins un premier ensemble de poutres coplanaires.

- 40 Les poutres peuvent être métalliques ou en béton armé.



Suivant deux variantes alternatives du procédé, des poutres sont enfoncées soit de façon sensiblement parallèle les unes aux autres, soit de façon sensiblement radiale par rapport au centre de l'ouvrage.

- 5 S' agissant simplement de stabiliser l' ouvrage, les extrémités extérieures des poutres, après enfoncement sous le mur, dépasseront d' une certaine longueur à l'extérieur de l' ouvrage ; les poutres utilisées seront avantageusement des poutres en béton armé disposées de façon sensiblement coplanaire pour former un ensemble de poutres qui aura pour effet d' une  
10 part de combler par son volume les vides interstitiels du sol sous-jacent et d' en augmenter la compacité, et, d' autre part d'augmenter la surface de l' assiette de l' ouvrage.

- S' agissant de soulever ou redresser l' ouvrage ( au cas où il serait penché  
15 comme la Tour de PISE ) , les dites poutres seront des poutres métalliques disposées de façon coplanaire pour former un ensemble à fonction de plancher; puis, prenant appui sur la face inférieure dudit plancher, on enfoncera des pieux verticaux sous l' ouvrage de façon à constituer une fondation par pieux, ledit plancher transmettant aux pieux au fur et à mesure que leur  
20 nombre s' accroîtra, le poids de l' ouvrage.

La présente invention sera mieux comprise et des détails en relevant apparaîtront, à la description qui va être faite en prenant comme exemple d' ouvrage menaçant ruine celui de la Tour de PISE, en relation avec les  
25 figures des planches annexées dans lesquelles :

- la fig. 1 est une coupe verticale du monument dans son état actuel après étaielement;
- la fig. 2 illustre de façon analogue la partie inférieure après creusement d' une tranchée;
- 30 - la fig. 3 illustre de façon analogue l' enfoncement d' une poutre sous la Tour depuis le fond de la tranchée;
- la fig. 4 illustre en plan la formation d' un plancher à poutres dépassantes au-dessous de la Tour;
- la fig. 5 illustre, toujours en coupe, la base de la Tour sous laquelle  
35 un plancher de poutres métalliques a été formé pour permettre l' appui de vérins de soulèvement et, en phase définitive, transmettre le poids de la Tour au nouveau système de fondations;
- enfin, la fig. 6 illustre les nouvelles fondations de la Tour à l' état redressé.



### CONSOLIDATION PROVISoire DE LA TOUR

Avant tout travail risquant de compromettre la stabilité de la Tour, nous l'étaierons d'une manière très efficace, afin de n'avoir plus, par la suite, à nous en soucier.

L'étalement 7 de la Tour sera constitué par des profilés métalliques, par exemple des HEA 600. Un HEA 600 sera plaqué contre la Tour, du côté Sud, le long de la génératrice contenue dans le plan vertical Nord-Sud passant par l'axe de la Tour. Un autre HEA 600, contenu dans ce même plan vertical Nord-Sud, sera lié à son extrémité supérieure au profilé précédent à mi-hauteur environ de la Tour, son extrémité inférieure s'appuiera sur le sol à une quinzaine de mètres de la Tour, au Sud de celle-ci. Un troisième HEA 600 posé sur le sol reliera les pieds des deux précédents. Ces trois profilés constitueront une jambe de force s'opposant au renversement de la Tour. Nous mettrons en place quatre ou cinq autres jambes de force identiques à la précédente dans des plans verticaux faisant entre eux des angles de 30 degrés environ. Il sera peut-être utile de ceinturer la Tour avec des câbles afin de la maintenir liée avec les jambes de force et d'éviter que sa base ne se déplace vers le Nord. Ces câbles seront du type de ceux que l'on utilise pour haubanner les plates-formes off-shore et pourront résister à un effort global de plusieurs centaines de tonnes. Ainsi étayée, la Tour aura une stabilité à toute épreuve.

Nous avons envisagé le cas où ces travaux d'étalement risqueraient eux-mêmes d'ébranler la Tour, à cause des vibrations des engins de levage travaillant tout près d'elle, ou pour toute autre raison. Si tel était le cas, avant cet étalement, nous procéderions à un autre étalement plus sommaire : à diverses hauteurs, par exemple au tiers, à la moitié et aux deux-tiers de la hauteur de la Tour, nous la ceinturerions avec des câbles que nous ancrerions au sol, à une cinquantaine de mètres au Nord de la Tour, à un lest de plusieurs centaines de tonnes (six gros engins de travaux publics seraient probablement suffisants). Nous pourrions alors procéder à l'étalement décrit à l'alinéa précédent.

### RENFORCEMENT DES FONDATIONS DE LA TOUR

La Tour étant maintenant parfaitement stable, nous pouvons entrer dans le vif du sujet.



Le procédé qui fait l'objet du présent brevet peut permettre d'exécuter différents projets de stabilisation plus ou moins ambitieux, plus ou moins onéreux; nous les envisagerons successivement du plus simple au plus élaboré.

## 5 SOLUTION MINIMALE

L'idée de base consiste à creuser, près de l'ouvrage 9, à savoir la Tour et du côté Sud, une tranchée étroite 3 dont l'axe passe par le centre de la base de la Tour; pour fixer les idées, cet axe est contenu dans le plan Nord-Sud. La  
10 profondeur de cette tranchée est variable : près de la Tour, elle est de six mètres et augmente lorsqu'on s'éloigne de la Tour, le fond de la tranchée faisant avec l'horizontale un angle de six degrés. La longueur de la tranchée est de douze mètres (Ces chiffres sont approximatifs ).

15 Dans cette tranchée, on descend une pièce en forme de poutre 2 en béton armé de dix mètres de longueur et de section carrée de 0,50 mètre de côté. Une fois posée au fond de la tranchée, cette pièce est parallèle au plan de contact de la Tour avec le sol sous-jacent. On descend ensuite dans la tranchée un vérin 4 de forte puissance, du type de ceux que l'on utilise pour soulever des tabliers de  
20 ponts; on le place à l'extrémité Sud dite deuxième extrémité 2' de la pièce de béton dont l'axe coïncide avec celui du vérin. Enfin, en calant convenablement l'extrémité Sud du vérin contre le terrain, on peut pousser la pièce de béton sous la Tour. Un calcul simple montre que l'effort du vérin ne devrait pas dépasser 500 tonnes et , à titre de comparaison, il existe dans le commerce des  
25 vérins de 500 mm de diamètre et de 350 bars de pression nominale, soit un effort nominal de 700 tonnes; ces vérins seraient donc très surabondants.

Lorsque le vérin commencera à pousser, le terrain 6 qui lui servira d'appui  
30 terrain sera suffisante pour que ce soit la pièce de béton qui se déplace, sa première extrémité 2'' pénétrant ainsi sous les fondations 5 de la Tour. On pourra appuyer le vérin sur une plaque de répartition qui réduira la compression du terrain. Lorsque le vérin sera en bout de course, on le repliera entièrement en le maintenant lié à la pièce de béton et l'on remplira, par  
35 exemple avec des blocs de béton, l'espace devenu libre entre le vérin et le terrain. A terme, l'extrémité Nord de la pièce de béton atteindra le bord intérieur de la base de la Tour.

On peut perfectionner cette phase des travaux. Il sera sans doute souhaitable,



avant de mettre en place les jambes de force à base de profilés HEA 600, de forer des pieux pour y appuyer les bases des jambes de force. Si cette idée est retenue, on pourra appuyer le vérin sur ces pieux qui devront alors être dimensionnés et ferrailés en conséquence.

5

Lorsque l'extrémité Nord de la pièce de béton aura atteint le bord intérieur de la base de la Tour, on recommencera la même opération autant de fois que nécessaire. Si, par exemple, on l'exécute 19 fois ( 9 fois de chaque côté de l'axe Nord-Sud ), chaque pièce 2,10,11 de béton étant au contact de ses  
10 voisines, nous pensons que le but recherché sera atteint et que la Tour sera parfaitement et définitivement stabilisée par cet ensemble 8 de poutres. En effet, le terrain supportant la Tour est compressible sur une épaisseur de l'ordre de 7 mètres; donc en introduisant sous la Tour du béton sur une épaisseur de 0,50 mètre, nous aurons augmenté de 7% la compacité du terrain  
15 défaillant. D'autre part, chaque pièce de béton débordera de la base de la Tour d'une longueur l de 2,50 mètres environ. La surface de l'assise de la Tour aura donc été augmentée de 24 mètres carrés, soit de 8%, réduisant dans les mêmes proportions la contrainte du sol de fondation. Enfin, ce supplément de surface portante sera particulièrement efficace puisque très excentré par rapport à la  
20 Tour du côté où elle penche.

Afin d'éviter que les extrémités Sud des pièces en béton ne cassent sous la pression du sol sous-jacent ( leur section de 0,50 x 0,50 m est insuffisante pour résister ), nous aurons, au stade de leur fabrication, laissé des armatures  
25 émerger de leur face supérieure; une fois ces pièces en place sous la Tour, nous coulerons du béton sur leur porte-à-faux afin d'augmenter leur hauteur et donc leur résistance. Etant alors encastrées au droit du parement de la base de la Tour, elles auront la résistance requise. Naturellement, une étude plus fouillée permettra d'affiner les divers chiffres qui précèdent.

30

Ces travaux seront rendus très délicats par la présence de l'eau. Toutefois, dans le cas de cette solution minimale, nous pourrions simplement laisser la tranchée remplie d'eau et y descendre chaque pièce de béton à l'extrémité Sud de laquelle nous aurons fixé le vérin. Nous ne désolidariserons le vérin de la  
35 pièce de béton que lorsque cette dernière aura atteint sa place définitive. Le guidage de tous les éléments que l'on descendra dans la tranchée pourra être effectué par un plongeur.



## SOLUTIONS PLUS ELABOREES

- Avant de creuser la première tranchée, nous exécuterons tout autour de la Tour et au ras de sa base une paroi moulée dimensionnée en épaisseur et en
- 5 profondeur pour pouvoir supporter une charge verticale de l'ordre de 100 tonnes par mètre linéaire. Elle sera arasée à 2 mètres environ au-dessous de la base de la Tour. Ensuite nous creuserons les tranchées comme précédemment, et nous introduirons sous la Tour, non pas des pièces en béton armé, mais des
- 10 profilés métalliques, par exemple des HEM 600 de 9 mètres de longueur. Dès que le premier profilé sera en place sous la Tour, nous le calerons très solidement sur la paroi moulée. Alors, nous creuserons, sous la Tour et dans le même plan vertical que le profilé, un boyau dont la largeur et la hauteur seront respectivement de 1 mètre et 2 mètres et la longueur de 2 à 3 mètres.
- 15 Dans cette phase de travail, la Tour reposera partiellement sur le profilé qui reportera la charge d'une part sur la paroi moulée et d'autre part sur le terrain vers le centre de la Tour. Nous fonderons alors un pieu 12 à l'extrémité du boyau. Pour cela, nous construirons un tronçon de pieu comme s'il s'agissait d'un poteau; il sera posé sur le sol du boyau et sa hauteur sera de l'ordre de 1
- 20 mètre. Au-dessus de ce "poteau" et dans son prolongement, nous placerons un vérin analogue aux précédents que nous fixerons solidement au profilé. Alors, en déployant le vérin, nous enfoncerons le "poteau"; lorsque le vérin sera en bout de course, nous le replierons et nous coulerons un nouveau tronçon de poteau-pieu et ainsi de suite. Il est bien évident que, le profilé répartissant la
- 25 poussée du vérin, la Tour ne sera pas ébranlée. Nous pourrons de cette manière fonder des pieux de section et de profondeur quelconques; nous ne serons limités que par la puissance du vérin et nous pourrons donc sans difficulté fonder des pieux de 700 tonnes. Remarquons que, ce faisant, nous aurons "essayé" le pieu dont la portance sera parfaitement garantie.
- 30 Lorsque le pieu atteindra la portance désirée, nous l'araserons à 2 mètres environ au-dessous du profilé et nous ferons reposer le profilé sur le pieu par l'intermédiaire d'un poteau métallique amovible pour réserver la suite des travaux. Nous prolongerons alors le boyau de 2 à 3 mètres pour fonder un
- 35 deuxième pieu et progresser vers le centre de la Tour. Trois ou quatre pieux seront très suffisants pour supporter le profilé sur toute sa longueur. De cette manière et de proche en proche, nous placerons sous la Tour environ 80 profilés disposés comme les rayons d'une roue et constituant un plancher qui supportera la totalité de son poids et le transmettra aux pieux. Nous aurons



ainsi entièrement dégagé la sous-face de la Tour et réalisé un sous-sol sur toute sa surface.

### REDRESSEMENT DE LA TOUR

5

Nous pourrions foncer des pieux de forte capacité en tout point du sous-sol de la Tour (à la condition de ne pas nous approcher inconsidérément de ses pourtours intérieur et extérieur). Nous foncerons donc des groupes de pieux qui, une fois solidarisés par des semelles, supporteront chacun une charge

10 beaucoup plus importante. Par exemple, nous pourrions foncer 12 groupes de 3 pieux; chaque pieu pourra supporter 400 tonnes; nous disposerons donc de 12 points d'appui pouvant supporter chacun 1200 tonnes et, par conséquent, nous soulèverons la Tour avec 12 vérins de 1200 tonnes chacun.

- 15 Pour soulever la Tour avec quelques vérins, il faudra au préalable la poser sur un "plateau" qui transmettra son poids aux vérins. Il ne saurait être question de le construire en charpente métallique car son encombrement serait prohibitif. En fait, une solution infiniment plus simple et économique est fournie par la précontrainte: nous ceinturerons la base de la Tour à l'aide d'un câble
- 20 analogue à ceux qui nous ont permis de la stabiliser en phase provisoire. Nous constituerons ainsi une dizaine de spires tout en tendant ce câble avec un effort de l'ordre de 60 tonnes; un certain nombre de réservoirs cylindriques ont été construits en béton précontraint suivant ce procédé. Pour tendre ce câble, on pourra par exemple placer des vérins à soufflets entre le câble et la
- 25 Tour sur tout son pourtour. La base de la Tour aura ainsi une résistance suffisante pour transmettre aux vérins les 14400 tonnes de son poids. Si nécessaire, nous pourrions cercler la Tour de la même manière à divers niveaux pour la rendre indéformable.

- 30 Non seulement nous soulèverons la Tour, mais nous la redresserons. Les vérins éloignés de l'axe de rotation devront donc se déployer plus rapidement que ceux qui en seront plus rapprochés et la course des premiers sera plus longue que celle des seconds. Par conséquent, tous les vérins devront être pilotés par ordinateur.

35

Un problème, peut-être ardu, est posé par la jonction entre chaque vérin de 1200 tonnes et la sous-face de la Tour. Cette jonction sera obligatoirement articulée, car la tête du vérin se déplacera par translation alors que la sous-face de la Tour pivotera pour se rapprocher de l'horizontale, et cette articulation



supportera en permanence une charge de 1200 tonnes. La solution est probablement la suivante : l'extrémité de la tige du vérin sera coiffée par une pièce en acier très dur dont la face supérieure aura la forme d'un cylindre de section circulaire ; l'axe de ce cylindre sera horizontal et parallèle à l'axe de rotation de la Tour, c'est-à-dire qu'il sera orienté Est-Ouest. Lorsque le vérin se déploiera, cette pièce cylindrique "roulera" sur la sous-face de la Tour comme une roue de locomotive roule sur un rail. En fait, elle roulera sur une autre pièce en acier de même dureté qui répartira l'effort sur les profilés HEM 600. Il reste à déterminer les paramètres du couple rail-roue: rayons de courbure, nuance des aciers utilisés, contrainte de compression subie par la surface de contact.

Le problème posé par la présence de l'eau sera ici plus difficile que dans le cas de la solution minimale. Nous congèlerons le sol soit à la saumure, soit à l'azote liquide. Le volume à congeler se limitera au terrain environnant la fouille et sera donc relativement limité, car nous réaliserons en même temps, à l'avancement, un cuvelage empêchant la remontée de l'eau dans les zones précédemment dégagées.

Remarquons que, la Tour reposant maintenant uniquement sur les profilés HEM 600, la surlargeur de sa base ne se justifie plus. Nous pouvons donc reprofiler la Tour de sorte que ses diamètres intérieur et extérieur soient à peu près constants sur toute la hauteur ; nous l'allègerons et les profilés HEA 600 pourront être plus courts; de plus, la lumière du jour pénétrera dans le sous-sol sur tout son pourtour.

Bien que l'on ait décrit et/ou représenté une forme particulière de mise en oeuvre du procédé de l'invention, ainsi qu'une application particulière de ce procédé à un monument connu, il doit être compris que la présente invention n'est pas limitée à cette forme ou à cette application, mais qu'elle s'étend à tout procédé comportant les étapes définies plus haut d'une manière générale.



### REVENDEICATIONS

1.- Procédé de reprise en sous-oeuvre en vue de stabiliser l' assiette d' un ouvrage , ledit procédé comprenant l' étape du creusement d' une tranchée  
5 étroite sensiblement perpendiculaire à un mur de façade de l' ouvrage , caractérisé :

en ce que l' on enfonce au-dessous dudit mur (1), une première poutre (2), d'une pluralité de poutres, ladite poutre étant disposée initialement de façon sensiblement horizontale sur le fond de la tranchée (3), au moyen  
10 d'un vérin (4) prenant appui sur une extrémité (2') dite extérieure de la poutre, l' autre extrémité (2'') dite intérieure étant destinée à pénétrer sous les fondations (5) dudit mur ;

2.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé :

15 en ce que l' enfouissement de ladite poutre est opéré en prenant appui sur le terrain (6) environnant ;

3.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé :

20 en ce que l' enfouissement de ladite poutre est opéré en prenant appui sur ledit ouvrage (9) lui-même;

4.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé :

25 en ce qu' une deuxième (10), puis troisième (11), puis n<sup>ième</sup> poutres sont enfoncées de façon sensiblement parallèle aux autres;

5.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé :

en ce qu' une deuxième, puis troisième, puis n<sup>ième</sup> poutres sont enfoncées de façon sensiblement radiale par rapport au centre de l'ouvrage ;

30 6.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé :

en ce que lesdites poutres sont des poutres métalliques ;



7.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé :

en ce que lesdites poutres sont des poutres en béton armé ;

8.- Procédé selon l' une quelconque des revendications précédentes, caracté-  
5 risé :

en ce que les poutres de ladite pluralité sont coplanaires, pour  
former au moins un premier ensemble (8) de poutres coplanaires ;

9.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé :

10 en ce que les extrémités extérieures des poutres, après enfon-  
cement sous le mur, dépassent d' une certaine longueur (1) à l' extérieur de  
l' ouvrage et

15 en ce que les poutres de ladite pluralité sont des poutres en béton  
armé disposées de façon sensiblement coplanaire pour former un ensemble (8)  
de poutres qui aura pour effet d' une part de combler par son volume les vides  
interstitiels du sol sous-jacent et d' en augmenter la compacité, et d' autre part  
d' augmenter la surface de l' assiette de l' ouvrage ;

10.- Procédé selon la revendication 1, caractérisé :

20 en ce que lesdites poutres sont des poutres métalliques dispo-  
sées de façon coplanaire pour former un ensemble (13) à fonction de plancher,  
et

25 en ce que, prenant appui sur la face inférieure dudit plancher,  
on enfonce des pieux (12) verticaux sous l' ouvrage de façon à constituer une  
fondation par pieux, ledit plancher (13) transmettant aux pieux, au fur et à  
mesure que leur nombre s' accroît, le poids de l' ouvrage.



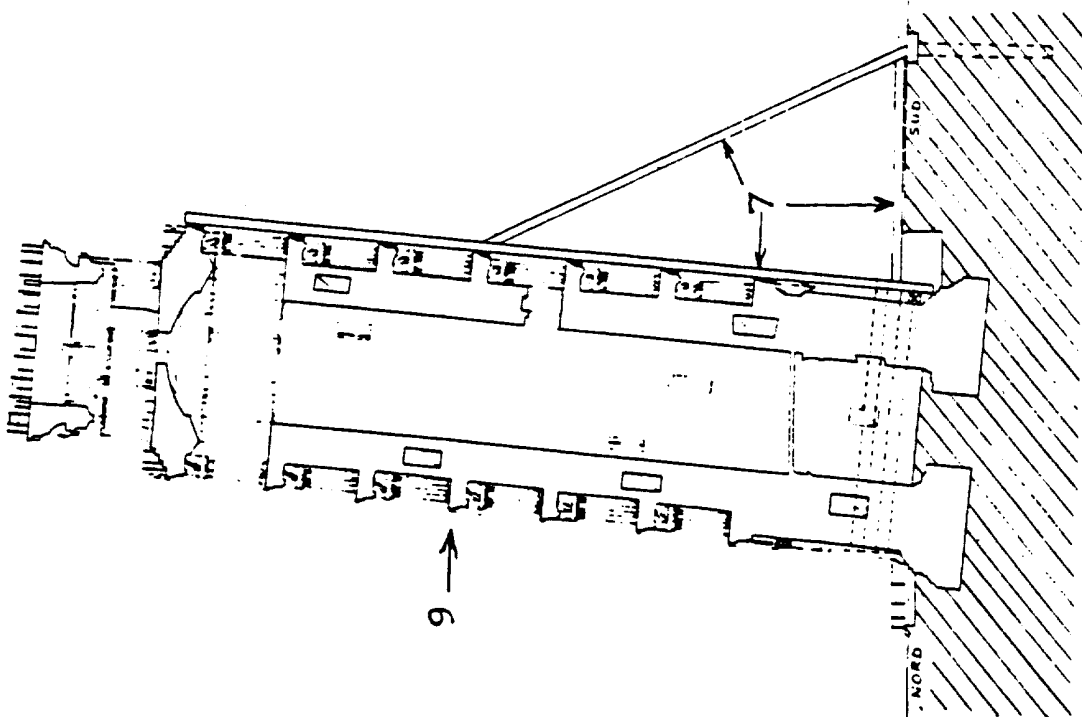


fig.1

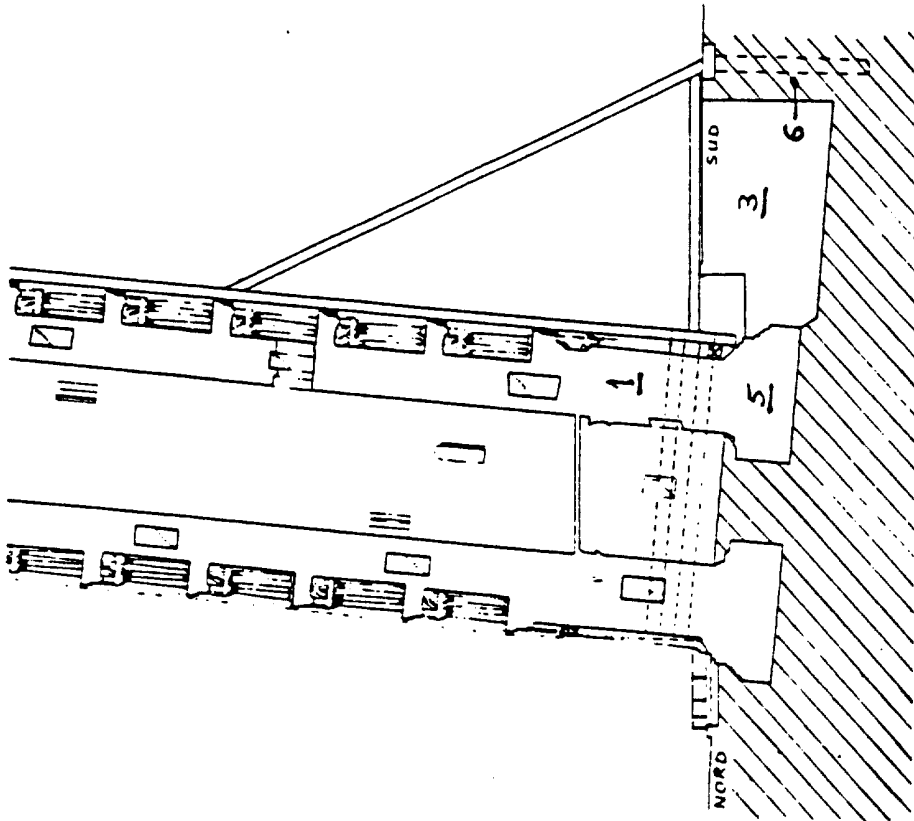


fig.2

fig.3

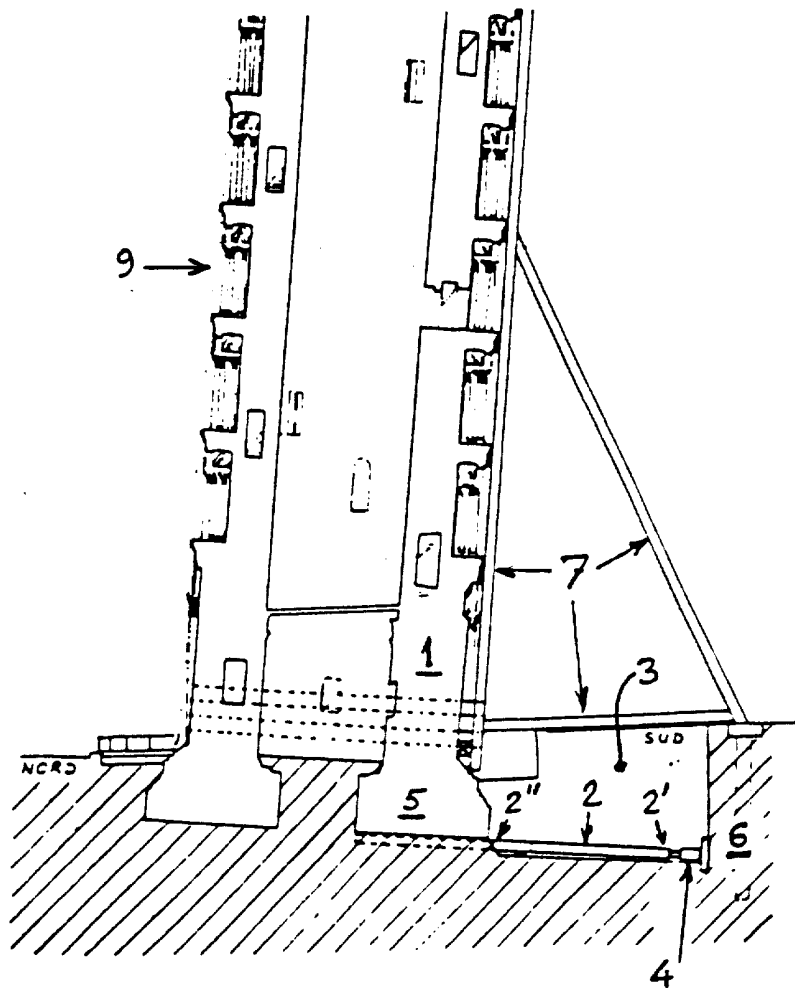


fig.4

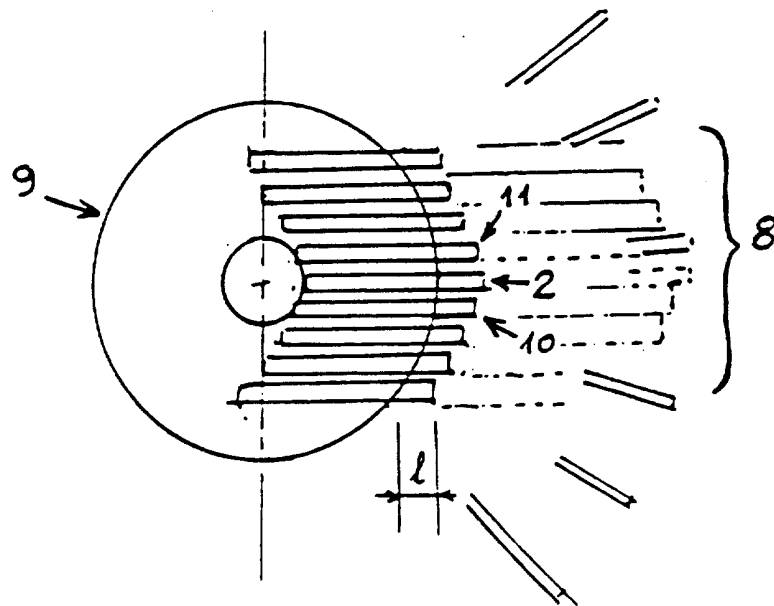


fig.5

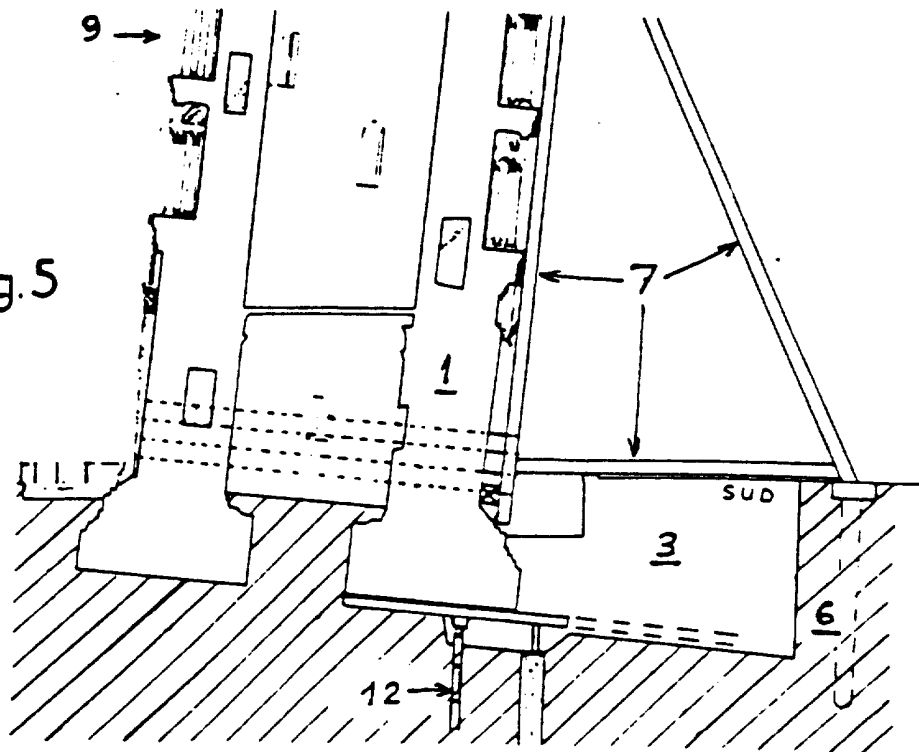


fig.6

