

# Méthodes de construction des remblais sur massifs de tourbe

Autor(en): **Marche, René / Richard, Alban**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **98 (1972)**

Heft 11

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-71547>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Méthodes de construction des remblais sur massifs de tourbe<sup>1</sup>

par RENÉ MARCHE et ALBAN RICHARD, Ecole polytechnique de Montréal

## 1. Introduction

L'extension des réseaux routiers dans le cadre de l'amélioration de l'infrastructure d'une région, ou de la mise en valeur de secteurs jusqu'alors considérés peu propices, pose le problème du franchissement de zones dont le sous-sol est constitué de terrains très compressibles. Ce problème a vu son importance croître considérablement ces dernières années parce que les bons terrains sont généralement utilisés en priorité par l'urbanisme et par l'agriculture, si bien que les projets routiers sont souvent conçus indépendamment des qualités mécaniques des sols.

Les terrains très compressibles dont le projeteur doit s'accommoder se présentent sous la forme de couches de tourbe, d'argile molle, de vase et de limon argileux. Quand ces terrains sont situés dans des zones dépressionnaires, il est généralement nécessaire de faire passer la chaussée de la voie projetée à plusieurs mètres au-dessus du terrain naturel. On peut alors envisager soit le passage par ouvrage d'art, soit le passage en remblai. Cette dernière solution est avantageuse du point de vue économique. Le coût du passage en remblai est généralement compris entre le tiers et la moitié du prix de revient d'un ouvrage d'art pour des hauteurs brutes de passage ne dépassant pas 13 à 15 m. D'un point de vue technique le remblai présente évidemment davantage de risques de désordre pendant la construction et ultérieurement ; ces risques peuvent néanmoins être cernés convenablement à l'heure actuelle.

Le présent exposé examine les différentes méthodes de construction permettant le passage en remblai de massifs de tourbe d'épaisseur variable, reposant soit sur une couche compressible soit sur une couche résistante. On essaie de dégager le champ d'application, le caractère économique et les limites de chacune de ces méthodes.

## 2. Conditions de choix d'une méthode

La tourbe est caractérisée par une teneur en eau élevée, une faible résistance au cisaillement et une compressibilité élevée. De telles caractéristiques conduisent à des problèmes de stabilité et à des problèmes de tassement. L'étude de stabilité et l'étude prévisionnelle des tassements doivent aboutir au choix de la méthode de construction qui présente aux plans économique et technique le plus d'avantages.

Les aspects à l'origine de ce choix sont généralement les suivants :

- la nature du site (site urbain ou autre)
- la nature et l'épaisseur des formations compressibles

- la hauteur du remblai à construire ; il semble que l'épaisseur minimale du remblai au-dessus de la nappe soit de 1 m à 1.50 m
- les déformations admissibles du profil de la chaussée et les limites budgétaires prévues pour son entretien
- le délai de construction. Ce sera généralement un compromis entre celui demandé par le maître de l'œuvre et celui nécessaire à la réalisation d'un profil garantissant une amplitude acceptable des tassements d'ensemble et des tassements différentiels en particulier dans les zones de transition.

Enfin, du fait de l'hétérogénéité du sol et de l'incertitude des hypothèses faites pour les calculs, le procédé de construction devrait permettre le contrôle du comportement du remblai pendant et après la construction. Le maître de l'œuvre aura tout avantage à demander que de telles mesures soient prises en vue de s'assurer du planning des travaux le plus économique, de remettre en cause éventuellement les choix préalables qui ont été faits et de profiter, lors des projets ultérieurs, des services de projeteurs ayant parfait leur expérience.

## 3. Méthodes de construction

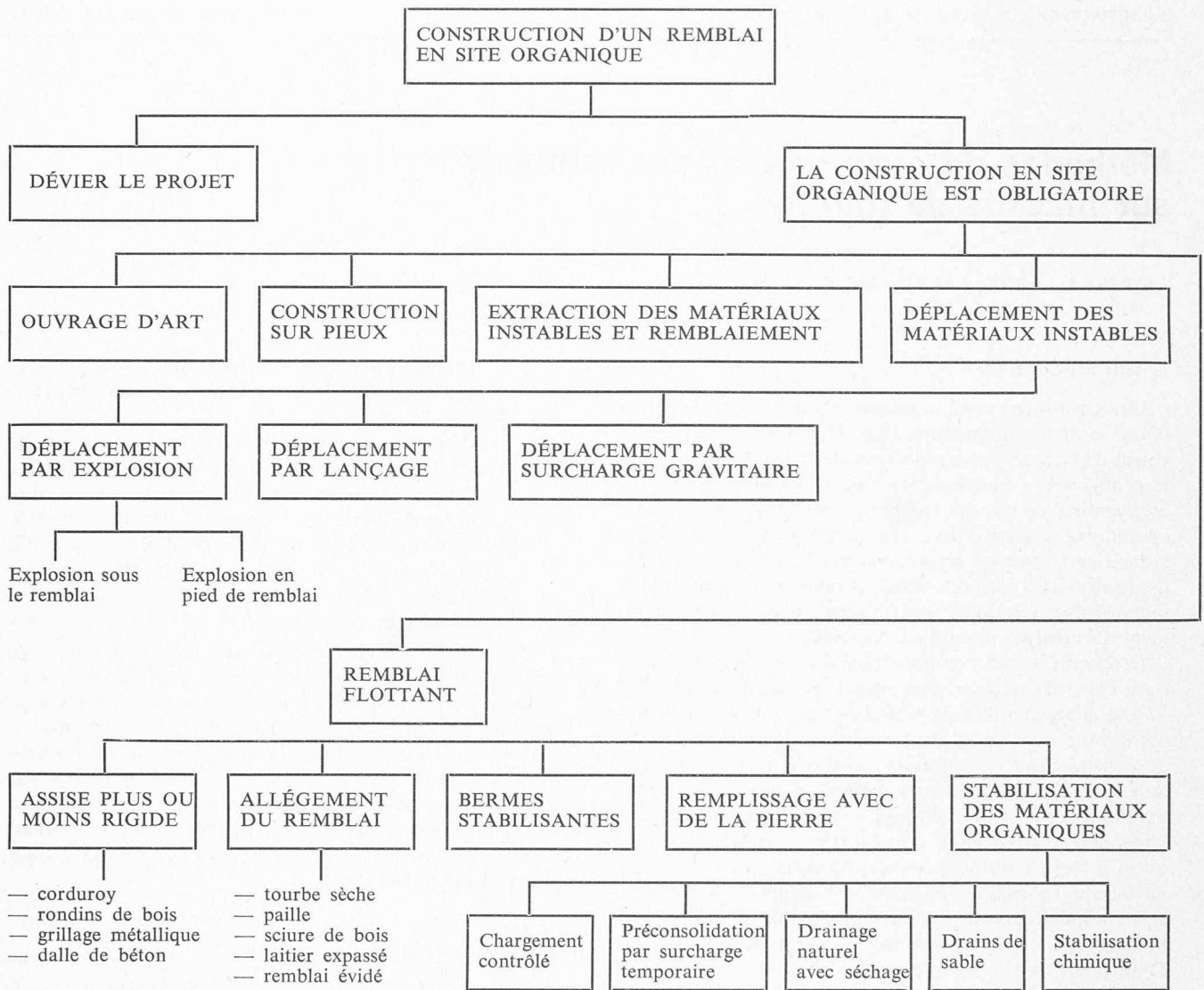
Une première catégorie de méthodes est celle pour laquelle le sol compressible n'est pas chargé. Les charges exercées par le remblai et le trafic sont directement transmises au sous-sol résistant par l'intermédiaire de pieux. En raison de son coût élevé, la solution est réservée à des problèmes particuliers sur lesquels on revient dans le texte.

Une seconde catégorie de méthodes est celle pour laquelle les matériaux instables sont excavés en partie ou en totalité puis remplacés par remblaiement.

Une troisième catégorie de méthodes est celle pour laquelle les matériaux instables sont déplacés. Cette catégorie englobe le déplacement par surcharge gravitaire entraînant la rupture, le déplacement par explosion et le déplacement par lançage.

Une quatrième catégorie de méthodes est celle pour laquelle le matériau instable supporte intégralement les charges appliquées. Le remblai est dit flottant. Il s'agit d'assurer au remblai une stabilité suffisante pendant la période de construction et d'obtenir une vitesse de tassement compatible avec les délais de construction. On aura recours aux méthodes suivantes : 1) utilisation d'une assise plus ou moins rigide, 2) utilisation de remblais allégés, 3) adoption de bermes latérales stabilisantes, 4) stabilisation des matériaux instables. A cette fin on utilisera l'un, ou plusieurs conjointement, des procédés suivants : chargement contrôlé, préconsolidation par surcharge temporaire, drainage naturel avec séchage, drains de sable. L'organigramme donné ci-après rassemble les différentes méthodes citées ; il constitue le plan de l'exposé.

<sup>1</sup> Conférence présentée au symposium sur les *Remblais sur sols de mauvaise qualité*, tenu à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne en juillet 1971.



#### 4. Méthode de la première catégorie

##### Construction sur pieux

Le matériau compressible ne supporte pas les charges exercées par le remblai. Ces dernières sont directement transmises au sous-sol résistant par l'intermédiaire d'une auge établie sur des pieux tel que montré figure 1. La méthode est employée exceptionnellement quand la couche compressible a au moins 8 m d'épaisseur et que ses caractéristiques mécaniques sont très mauvaises. La méthode est très onéreuse. Son utilisation est justifiée en zone urbaine ou à proximité immédiate d'ouvrages d'art tels que des ponts établis sur pieux. La construction de remblais au voisinage immédiat de ces ouvrages peut entraîner des

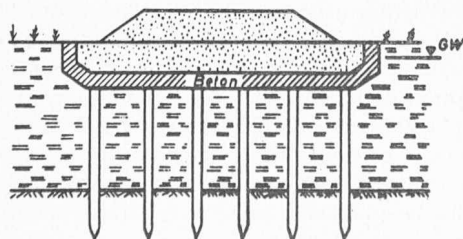


Fig 1. — Chaussée en tourbière sur pieux en béton armé.

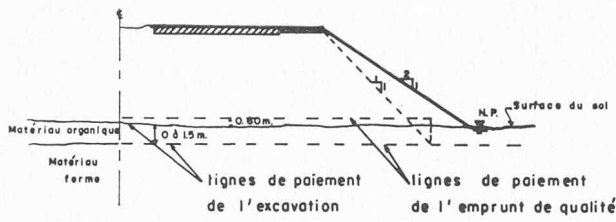
dommages sérieux pour les pieux les supportant. Le phénomène a été mis en évidence dans le cas de culées de ponts et lors d'essais effectués par la ville d'Amsterdam en Hollande. L'auge en béton armé utilisée joue alors le rôle de plateforme de déchargement au voisinage des ouvrages à protéger.

#### 5. Méthode de la seconde catégorie

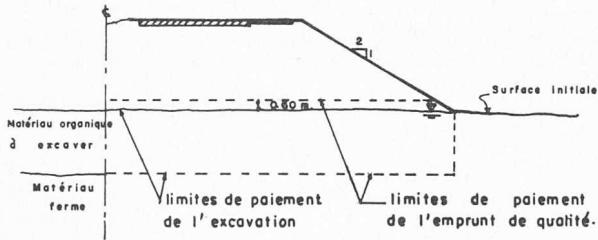
##### Extraction des matériaux instables et remblaiement

La couche de tourbe est excavée en partie ou en totalité, elle est remplacée par un matériau d'emprunt granulaire. La méthode est utilisée dans le cas de dépôts de tourbe d'épaisseur ne dépassant pas 4 m quand le maître de l'œuvre ne dispose pas du temps nécessaire au développement des tassements. Une excavation partielle n'est valable que si au moins la moitié de l'épaisseur de la couche compressible est excavée. Une telle mesure gagne en efficacité quand la résistance au cisaillement augmente avec la profondeur. Une rupture de fond est alors peu probable.

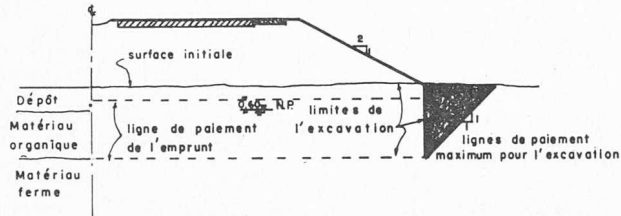
Une exploration détaillée des conditions de sol est nécessaire. Elle devra définir avec précision l'épaisseur de la couche compressible et l'évolution de la résistance du sol avec la profondeur. Une telle étude permet de prévoir la profondeur de l'excavation, le volume nécessaire des matériaux d'emprunt et par suite, d'établir le coût prévisionnel du projet.



a) Faibles profondeurs (0 à 1,5 m).



b) Profondeurs supérieures à 1,5 m.



c) Cas d'un dépôt de surface recouvrant le sol organique.

Fig. 2.1. — Sections types pour l'excavation des matériaux compressibles. (D'après Moore, 1966)

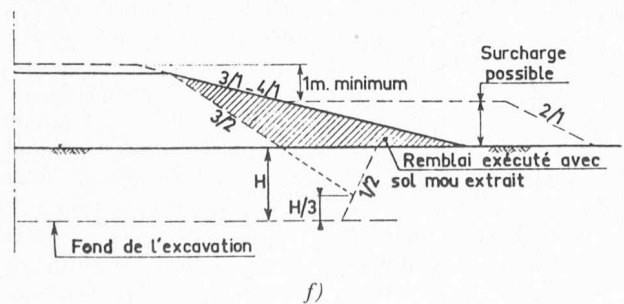
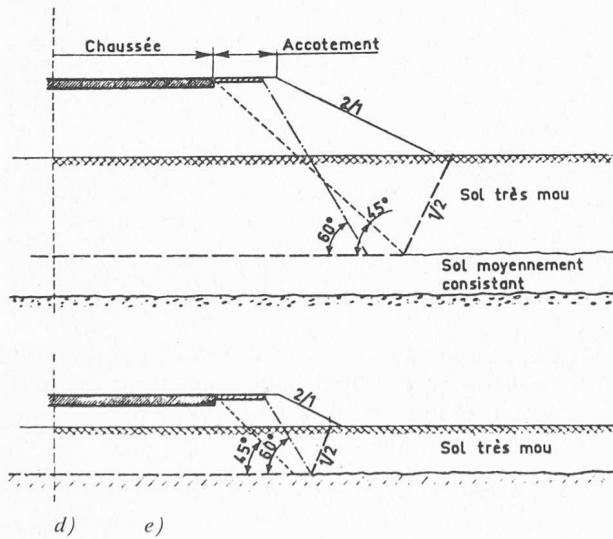
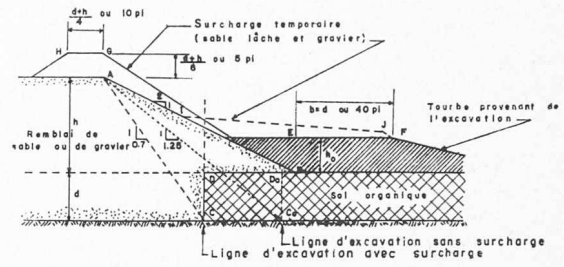
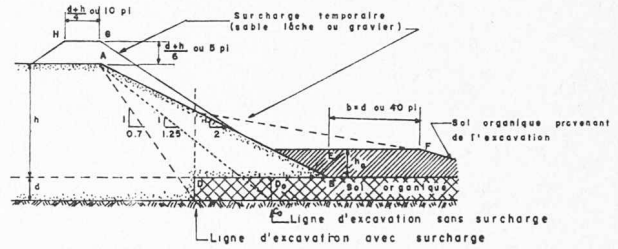


Fig. 2.2. — Sections types pour l'excavation des matériaux compressibles.



a) Procédure  $h/d = 2$  Hauteur minimum requise  $h_0 = 0,37 h$

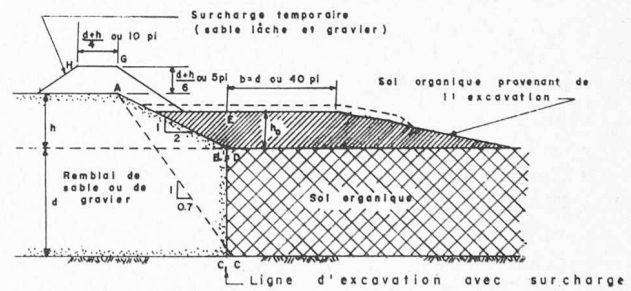


b) Procédure  $h/d = 5$  Hauteur minimum requise  $h_0 = 0,25 h$

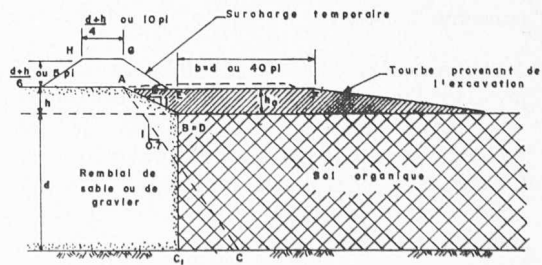
Fig. 2.3. — Sections types pour l'excavation des matériaux compressibles, recommandations de Casagrande (1966).

Les points suivants nécessitent d'être examinés.

1) *Largeur de l'excavation.* Elle doit être telle que les pentes du remblai soient stables malgré les tassements ou mouvements latéraux de l'épaulement routier. Les figures 2.1 à 2.4 donnent les sections types courantes conseillées pour les stratigraphies rencontrées le plus souvent. Pour des remblais très larges, 60 m ou plus, il est de pratique courante d'avancer le remblai par bandes de 15 à 20 m de large, en faisant attention d'éviter d'emprisonner du matériau tourbeux entre deux bandes, ce qui entraînerait ultérieurement des tassements différentiels.



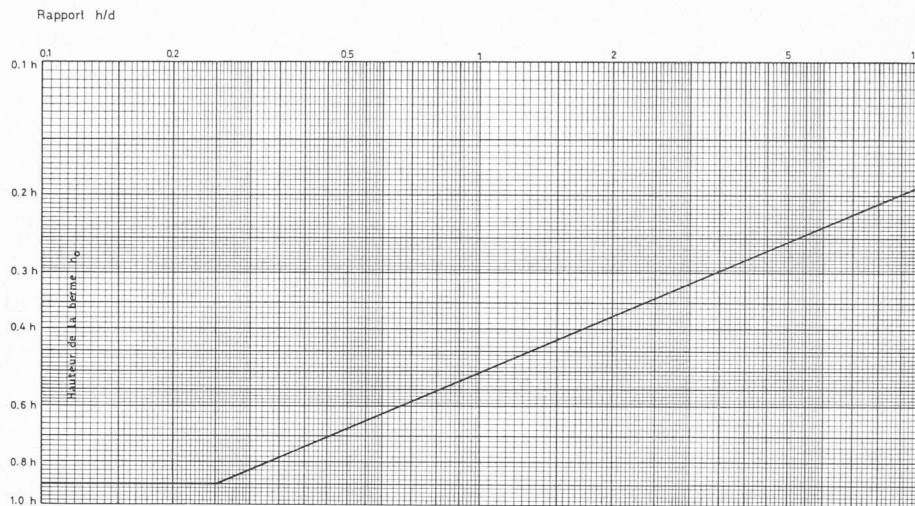
a) Procédure  $h/d = 0,5$  Hauteur minimum requise  $h_0 = 0,67 h$



b) Procédure  $h/d = 0,2$  Hauteur minimum requise  $h_0 = 0,9 h$

Fig. 2.4. — Sections types pour l'excavation des matériaux compressibles, recommandations de Casagrande (1966).





h : Hauteur du remblai  
d : Epaisseur de la couche molle  
 $h_0$  : Hauteur minimum de la berme

Fig. 2.5. — Hauteur minimum des bermes de protection.

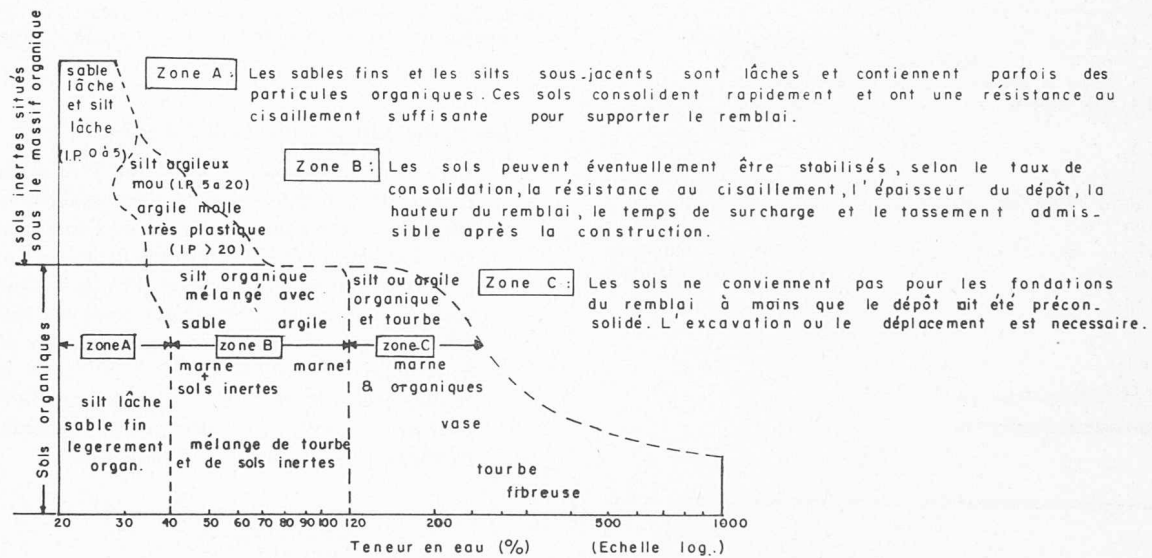


Fig. 3. — Abaque de corrélation basé sur l'identification des sols et leur teneur en eau. (D'après Moore, 1966)

- 2) *Stabilité des pentes verticales de l'excavation.* Quand l'excavation se fait sous l'eau, la stabilité des pentes verticales de l'excavation pendant la construction avant remblaiement ne pose pas de problème. Si l'excavation doit être asséchée pour inspection, la hauteur critique stable diminuée, elle est néanmoins supérieure à celle donnée par les méthodes de calcul conventionnelles.
- 3) *Stabilité relative-zone de remblaiement/massif compressible.* Une analyse par la méthode des cercles prévoit souvent une instabilité du matériau de remblai de l'excavation vis-à-vis du massif de tourbe adjacent. L'expérience montre que les surfaces verticales de contact entre la partie enterrée du remblai et la tourbe restent pratiquement planes et verticales, une expansion négligeable du remblai est généralement observée. Il est probable que les méthodes traditionnelles de calcul attribuent aux massifs organiques une résistance passive trop faible.
- 4) *Entreposage des matériaux de déblai.* Les matériaux de déblai peuvent être utilisés économiquement pour aplatir les pentes du remblai de la route, tel que montré aux figures 2.2 et 2.3.
- 5) *Problème de surexcavation.* Il est fréquent que le massif de tourbe repose sur un limon très lâche ou un limon argileux mou. De telles formations peuvent, à première vue, ne pas paraître convenir pour les fondations du remblai. En fait, sous l'action d'une charge, elles consolident rapidement et fournissent une fondation adéquate. Afin de savoir s'il faut excaver ou non de tels sols, une méthode rapide consiste à prélever des échantillons à partir de tranchées d'essai ou de trous exécutés à la tarière, à déterminer la teneur en eau de ces échantillons et à établir une corrélation entre la description du sol et sa teneur en eau d'une part et les propriétés de résistance et de consolidation d'autre part. Une telle corrélation est proposée figure 3, elle guide l'ingénieur quant au choix de la

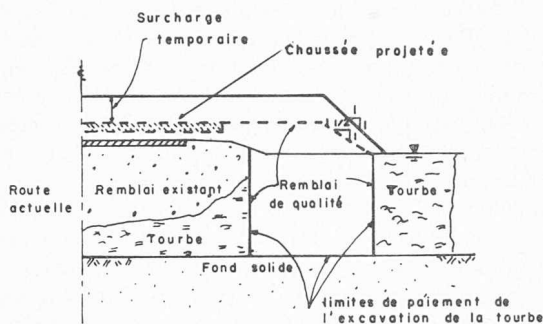


Fig. 4. — Section type dans le cas de l'élargissement d'une route. (D'après Moore, 1966)

profondeur d'excavation, elle permet de fixer des « limites de paiement », au-delà desquelles les frais d'excavation ne sont plus remboursés à l'entrepreneur. Cette procédure est utilisée par le Département des travaux publics de l'Etat de New York.

Un problème particulier de stabilisation de remblai par excavation est rencontré lors des projets d'élargissement de routes secondaires construites sur des tourbières. Ces routes anciennes sont construites sur des remblais flottants qui se sont considérablement enfoncés. La route existante est relativement stable, car le sous-sol est bien consolidé. L'établissement, sans précautions particulières, d'un nouveau remblai adjacent à l'ancien est à l'origine de tassements différentiels transversaux inacceptables. Il est nécessaire d'excaver la couche de tourbe au droit du nouveau remblai. La section type retenue peut être celle donnée figure 4.

Nous citerons pour exemple de cas d'excavation celui rapporté par Starring (1971). Il s'agit de la construction de l'autoroute n° 10 dans une zone de marais située entre Baton Rouge et New Orleans, Louisiane. Le dépôt organique a une épaisseur variant entre 4 et 7 m, il repose sur une couche d'argile de consistance moyenne. La nappe phréatique est 0,3 à 1 m au-dessus du niveau original du sol. On a envisagé deux solutions : la construction d'un ouvrage d'art et le passage en remblai après excavation de la couche compressible. La seconde solution a été retenue, elle était deux fois moins onéreuse que la première, bien que le sable ait dû être dragué dans la rivière Mississippi et transporté par pompage sur une distance de 40 km jusqu'au site de construction du remblai. L'excavation du dépôt organique s'est faite avec deux dragueuses montées sur barge. La profondeur typique d'excavation est de l'ordre de 3 à 4 m. Le remblai a une largeur crête à crête de 43 m, des pentes de 6:1, une surface située 2,5 m au-dessus du niveau original du sol. Le coût de réalisation, par mille, est environ de \$1,2 million.

## 6. Méthodes de la troisième catégorie Déplacement des matériaux instables et remblaiement

### 1. Déplacement par surcharge gravitaire

Le sol naturel est chargé avec des matériaux d'apport jusqu'à produire une rupture par cisaillement dans le sous-sol. Les matériaux d'apport s'enfoncent en refoulant le sol compressible vers l'extérieur et vers le haut. Le déplacement par gravité peut se faire suivant trois techniques :

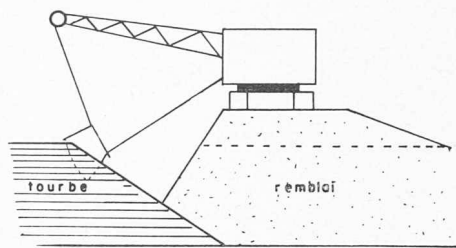


Fig. 5. — Déplacement en front de remblai.

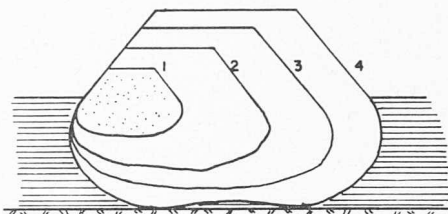
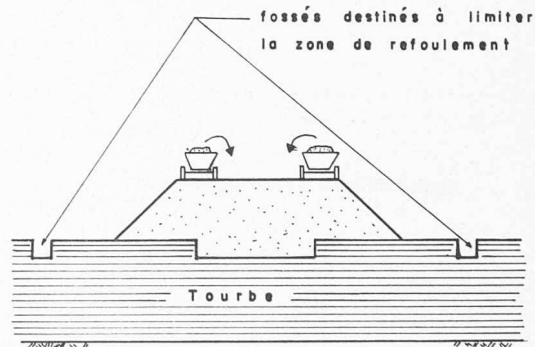


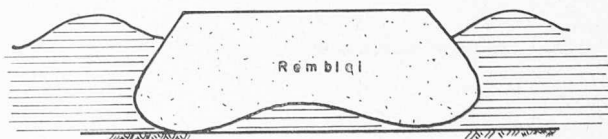
Fig. 6. — Refoulement vers l'un des bords : différentes phases.

1) *Déplacement du sol en front de remblai.* Le sol naturel est chargé sur toute la largeur du remblai. La rupture atteinte est de type frontal, elle peut être facilitée par l'ouverture d'une fouille en front de remblai tel que montré figure 5.

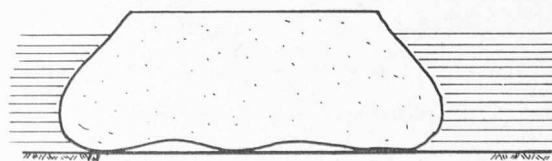
2) *Refoulement des sols compressibles vers l'un des bords du remblai.* Le procédé est schématisé à la figure 6. Il est utilisé lorsque le remblai doit être édifié au voisinage immédiat de constructions existantes.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. — Refoulement de part et d'autre du remblai.

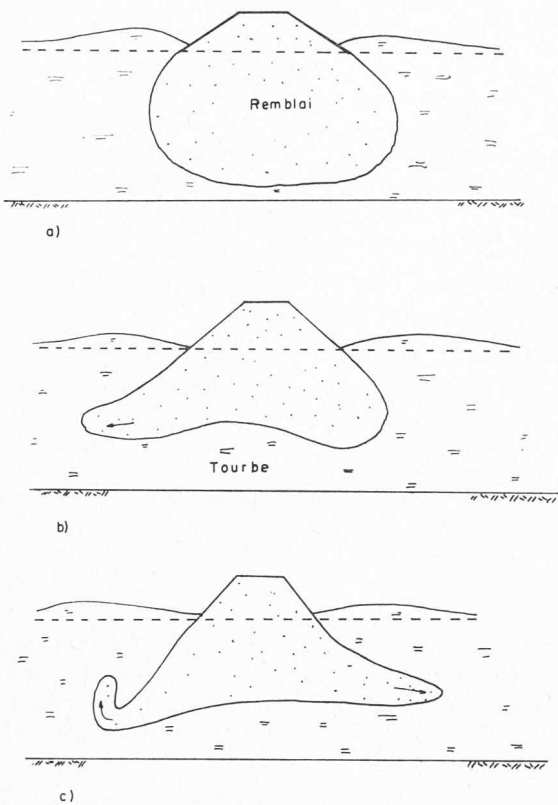


Fig. 8. — Tassements caractéristiques d'un remblai sur tourbe.

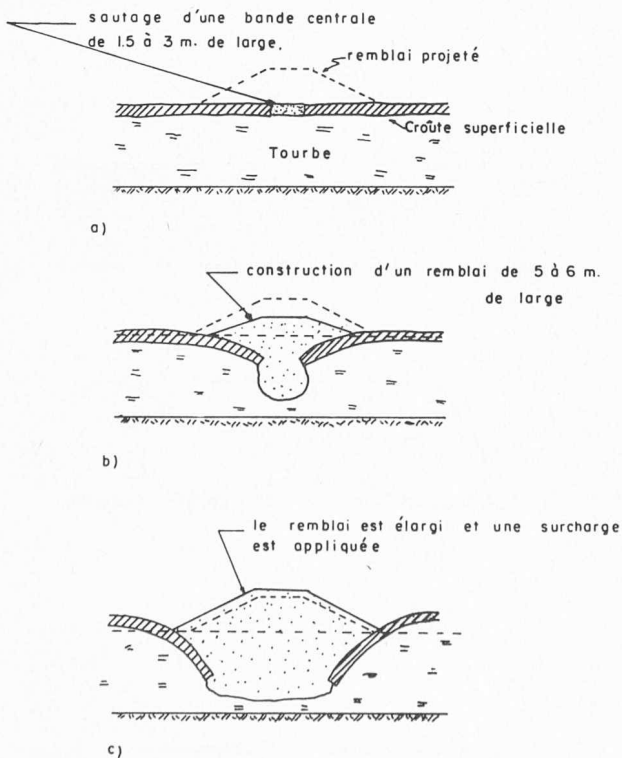


Fig. 9. — Procédure proposée par L. Casagrande pour la construction de remblais (1966).

3) *Refoulement du sol compressible de part et d'autre du remblai.* Une tranchée peu profonde est creusée suivant l'axe du remblai jusqu'au niveau de la nappe phréatique. On élimine ainsi les sols situés au-dessus de la nappe qui s'opposent avec plus de résistance que les sols sous-jacents à l'enfoncement. Le chargement se fait sur l'axe du remblai, les étapes de construction sont données figure 7.

La méthode du déplacement par gravité ne se justifie que dans le cas de couches de très faible consistance, d'épaisseur au moins égale à 7 ou 8 m. Dans ce cas, l'extraction par des moyens mécaniques ne peut plus être envisagée. La méthode est onéreuse et incertaine. Elle nécessite une grande quantité de matériau de remblai de bonne qualité, le déplacement est lent, il demeure le risque d'inclusion de poches de tourbes qui peuvent occasionner des tassements différentiels différés. Il est très fréquent de devoir recourir conjointement aux techniques facilitant le déplacement telles que lançage et explosion. Le contrôle en cours de construction est impossible. Bien que la méthode ait été utilisée fréquemment en Hollande par le passé, il semble qu'elle ait perdu de son intérêt à l'heure actuelle.

## 2. Sautage aux explosifs

Le procédé a été développé en Allemagne et aux Etats-Unis pour la construction d'autoroutes dans les années 1930. Le procédé a pour but de créer un souffle par explosion qui permet à la plus grande partie du massif compressible d'être refoulée sous l'action du poids propre du corps du remblai et à la partie restante d'être rejetée latéralement par l'explosion ou compactée fortement.

On ne se propose pas d'étudier en détail toutes les méthodes aux explosifs ; on tentera simplement d'indiquer le principe de chacune d'elles et de dégager les nouvelles tendances.

1) *Traitement du tapis végétal superficiel.* Il peut paraître intéressant de briser le tapis végétal superficiel avec des charges légères sur toute la largeur du remblai afin de réaliser les trois objectifs suivants : i) diminuer le danger d'apparition de fissures pouvant conduire à des glissements subits lors du remblaiement ; ii) faciliter un tassement uniforme du remblai ; iii) empêcher que la croûte soit emprisonnée sous le remblai.

En fait, cette procédure présente deux inconvénients importants. Le premier est une perte possible considérable du matériau de remblaiement, si, au lieu de s'épandre en forme de bulbe comme au schéma a) de la figure 8, le remblai tasse d'une façon très irrégulière, avec un écoulement horizontal excessif, comme indiqué aux schémas b) et c) de cette figure. Le second inconvénient est un remaniement de la tourbe molle située sous la croûte.

Pour pallier chacun d'eux, Casagrande (1966) préconise la procédure montrée à la figure 9. La croûte est brisée par sautage sur une largeur de 2 à 3 m le long de l'axe central, plutôt que sur toute la largeur ; un remblai étroit de 5 à 6 m de large est réalisé par déchargement frontal. Un bulbe étroit se forme dans la tourbe molle dont l'expansion est empêchée par les portions intactes de la croûte. Le remblai est ensuite élargi graduellement sans risque de glissement soudain ou d'écoulement excessif. Le déplacement de la tourbe est achevé par les méthodes aux explosifs que l'on va exposer. Cette procédure a été utilisée avec succès par le Département des routes de l'Etat du Michigan ainsi que pour plusieurs projets en Allemagne.

2) *Procédés de sautage.* Le premier procédé est le sautage en front de remblai connu sous le nom de « Toe-Shooting ». Il peut être conduit selon la méthode standard ou selon la





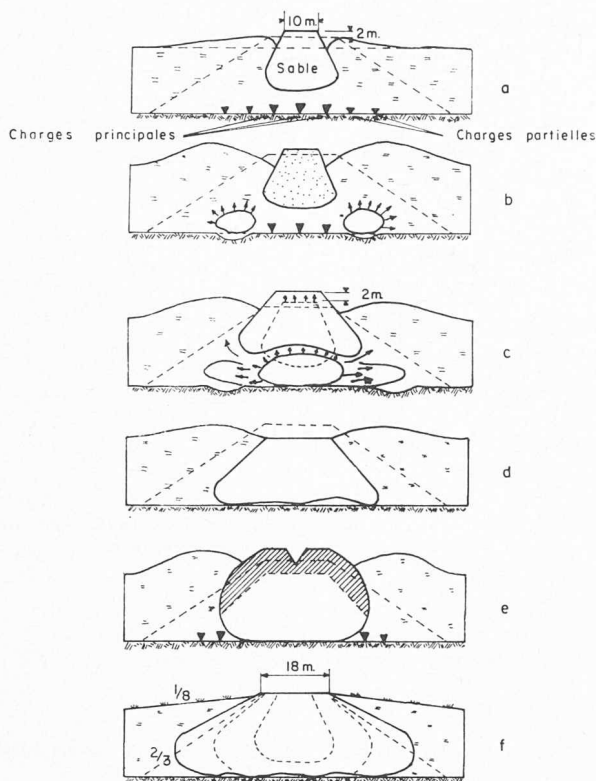


Fig. 13. — Procédé allemand d'explosion sous le remblai.

de poches de tourbe importantes. La méthode a été néanmoins très utilisée pour des dépôts de tourbe ayant une épaisseur ne dépassant pas 20 m.

jj) *Sautage le remblai, méthode du New Hampshire.* La méthode est schématisée figure 12. Elle a été développée par le Département des routes de l'Etat du New Hampshire pour des dépôts de tourbe de 3 à 15 m d'épaisseur. La croûte de surface est disloquée, le remblai est placé par déchargement frontal. Les deux sections terminales du remblai sont descendues jusqu'au fond résistant en utilisant une surcharge. La partie principale du remblai est placée sur toute la longueur tel qu'indiqué par les lignes pointillées de la figure 12 a). Un rang de charges principales et un rang de charges secondaires sont mis en place de part et d'autre du remblai. Le rang de charges secondaires est mis à feu une seconde après le rang principal. Après explosion, la section transversale du remblai est du type de celui montré figure 12c. Généralement, l'emprisonnement de poches de tourbe ne peut être évité en particulier au voisinage des deux sections terminales du remblai. Il sera donc nécessaire de contrôler la géométrie du remblai après sautage. Il est intéressant d'utiliser pour le remblai de base un matériau granulaire aussi grossier que possible. La perte de matériaux par expansion dans la tourbe est très réduite et l'effet de voûte qui se développe sur les poches de tourbe emprisonnées atténue les tassements.

jjj) *Sautage sous le remblai, méthode allemande.* Après décapage du sol naturel, on édifie dans l'axe du tracé un remblai étroit que l'on élargit progressivement. Le remblai s'enfonce en partie dans les couches molles, mais demeure constamment supporté par ces dernières tel que montré figure 13. Deux séries de charges sont ensuite mises en place par lançage, un peu au-dessus du fond dur. Les charges principales sont placées sous la partie centrale du remblai, les charges secondaires le sont de part et d'autre

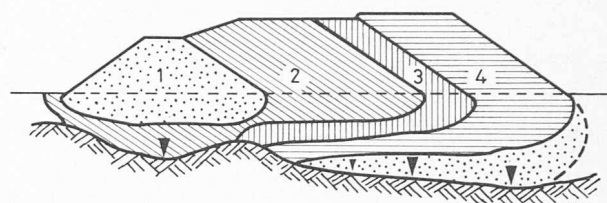


Fig. 14. — Micro-explosions assurant la progression latérale du remblai.

des charges principales. La mise à feu a lieu sur toute la longueur du remblai. Les charges primaires explosent 1 à 2 secondes après les charges secondaires. L'explosion soulève la totalité du remblai de plusieurs dizaines de centimètres puis la masse retombe sur la tourbe sous-jacente qui est alors déplacée. Le profil en travers du remblai est déterminé à l'aide de sondages. Si le profil voulu n'est pas atteint, on procède à une autre explosion.

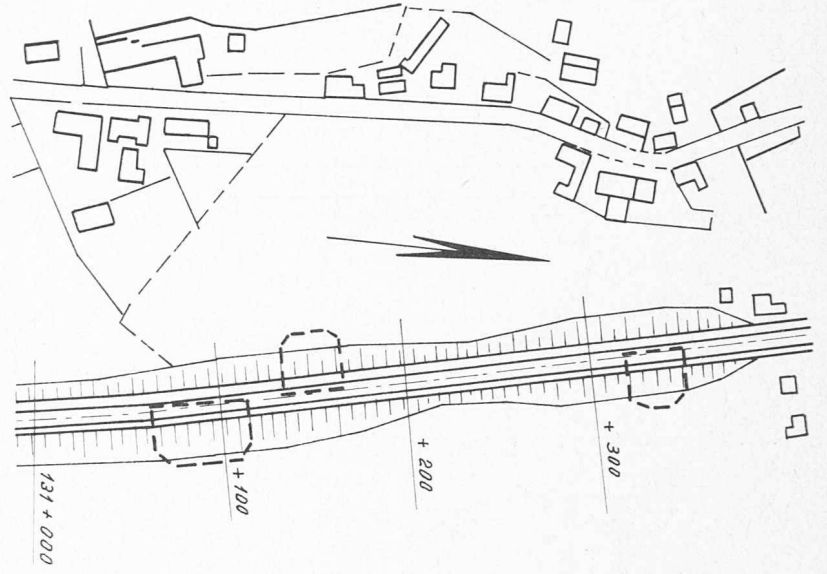
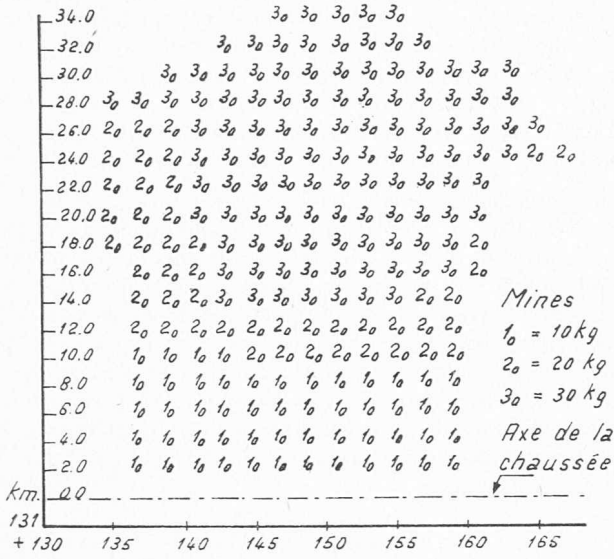
Si la profondeur du marais croît perpendiculairement à l'axe de la chaussée, il est opportun d'utiliser la technique de sautage montrée figure 14. Un remblai partiel est mis en place sur la partie où le marais est de faible profondeur puis avancé en direction de la plus forte profondeur de marais. On procède ensuite aux explosions en prévoyant avant chacune d'elles une surélévation du remblai de 3 à 4 m. Il s'agit de petites explosions (moins de 100 kg d'explosif tirés en même temps) dont l'efficacité peut être améliorée en décompactant la tourbe en pied de remblai soit par lançage, soit par micro-explosions de déchargement. Le matériau de remblai à utiliser doit être de type granulaire et de bonne qualité. Le déplacement par sautage en front de remblai a été conduit avec succès dans le cas d'une grave limoneuse avec pierres, Garras (1965). Le risque d'inclusions avec ce matériau de remblai est accru.

3) *Exemple n° 1, sautage sous le remblai.* Le cas est rapporté par Garras (1965). Il s'agit de la construction de la route européenne n° 3 aux environs de Schleswig, à proximité du village de Busdorf. En trois sites définis figure 15a on a trouvé une couche de 5 à 6 m d'épaisseur de tourbe et, sous-jacente à la précédente, une couche de vase calcaire allant jusqu'à 12,40 m de profondeur. La teneur en eau de la tourbe varie de 500 à 800 %, celle de la vase calcaire de 140 à 400 %. Les dépôts sont très localisés, la route les traverse sur trois tronçons dont la longueur varie de 30 à 50 m. Le marécage a été refoulé par remblaiement et explosion ; les travaux d'explosion commencèrent en automne 1961 et se terminèrent en février 1962. La grosseur et la position des mines utilisées sont choisies en fonction de la consistance du marais et des lignes de niveau du bed-rock. Le plan de situation des trois zones d'explosion et les lignes de niveau au bed-rock sont donnés figure 15b. L'emplacement des mines et leur puissance sont donnés figure 15c. Avant la construction du remblai on a procédé à un dragage jusqu'à 5 m de profondeur environ.

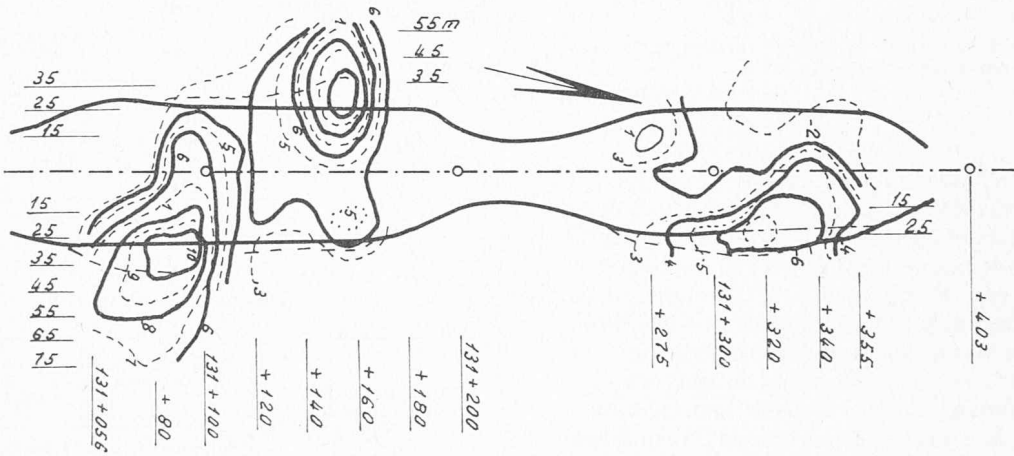
Environ 53 000 m<sup>3</sup> de sol marécageux ont été refoulés dont 16 500 m<sup>3</sup> ont été dragués et transportés après refoulement. Le coût pour l'opération de refoulement seule est de l'ordre de 4,90 DM/m<sup>3</sup>. Si l'on inclut le coût de dragage et de transport du marécage refoulé on obtient 5,75 DM/m<sup>3</sup>. La consommation en explosif fut de 0,39 kg par mètre cube de sol refoulé. Des maisons anciennes et des villas neuves se trouvaient à une distance de 100 m des points d'explosion. Seuls des dégâts minimes (fissurations mineures et détérioration d'enduits) ont été observés.



a) Situation



b) Lignes de niveau du bed-rock



c) Position et puissance des mines

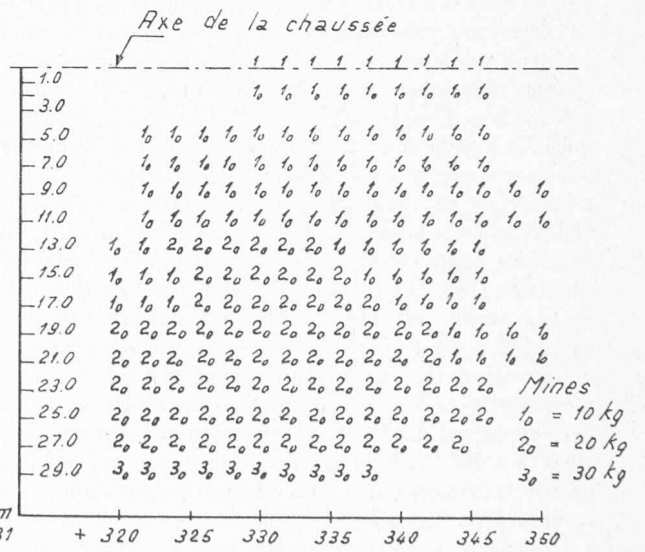
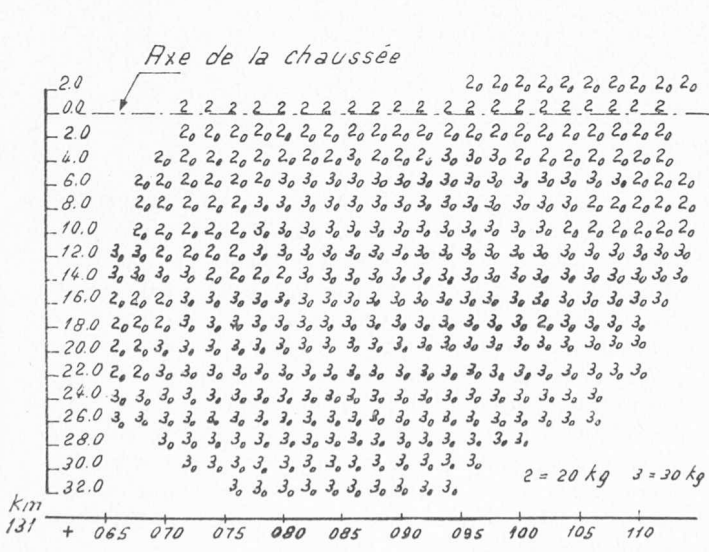


Fig. 15. — Conditions au site de construction d'un remblai par sautage sous le remblai. (D'après Garras, 1965)

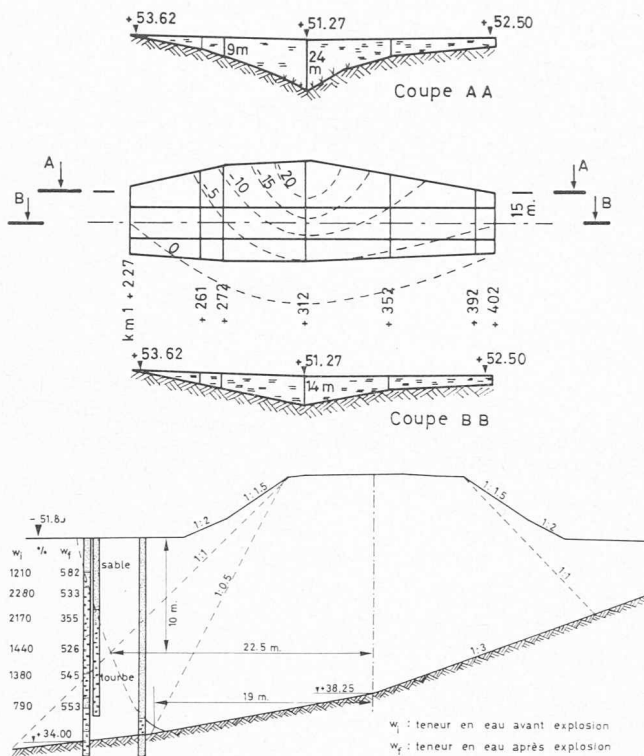


Fig. 16. a) Coupes longitudinales et lignes de niveau de bed-rock. b) Section du remblai après explosion. (D'après Garras, 1965)

4) *Exemple n° 2, sautage sous le remblai.* Le cas est rapporté par Garras (1965). Il s'agit de la construction de la route provinciale de première catégorie n° 16 au voisinage de Harrisleefeld. La longueur de la section marécageuse dans la zone prévue pour le déplacement à l'explosif est de 140 m. La plus grande profondeur de marais est de 24 m. Le plan de situation et les lignes de niveau du bed-rock sont donnés figure 16a. Les lignes de pente du bed-rock sont obliques par rapport à l'axe de la chaussée, la pente variant de  $1/3$  à  $1/2,5$ . Les couches de tourbe sont extrêmement molles, leur épaisseur moyenne est de 11,5 m, leur teneur en eau varie de 400 à 2300 % avec une moyenne située aux environs de 950 %. Le procédé de construction devait être tel qu'il soit techniquement réalisable et qu'il permette de construire très rapidement. Le remblai de sable fut construit sur le sol mou jusqu'à une hauteur de 3 m. Les charges nécessaires de 10, 20, 30 et 40 kg furent mises en place à 3 m d'intervalle ; le massif de sable fut monté jusqu'à 5 à 6 m de hauteur et les charges furent mises à feu. Sur ce chantier on devait faire particulièrement attention à ce que la direction de l'explosion suive le pendage du bed-rock. Le résultat des explosions fut contrôlé par sondages. La figure 15b reproduit une section du remblai après explosion, telle qu'obtenue de l'interprétation des sondages. La section montrée est l'une des plus critiques observées ; une forte épaisseur de marais se trouve dans la zone de répartition de pression suivant une pente de  $1/1$ . Le sol marécageux a été néanmoins considérablement amélioré par l'explosion. La teneur en eau est passée en moyenne de 1000 % à 500 %. Bien que l'assainissement des inclusions de sol marécageux n'ait pas été entrepris, le remblai s'est comporté de façon satisfaisante.

Le coût en explosif par mètre cube de sol marécageux refoulé est de l'ordre de 2,92 DM. Si l'on englobe le coût de dragage et d'évacuation du sol marécageux refoulé, le

coût par mètre cube refoulé est de l'ordre de 4,65 DM. La consommation en explosif est de 0,23 kg par mètre cube de sol marécageux refoulé.

Le coût est dans ce cas particulièrement bas. Le procédé était très adapté aux conditions du chantier et aux délais de construction imposés par le maître de l'œuvre. En particulier, du fait du caractère très mou de la tourbe, le procédé d'extraction totale n'était pas techniquement réalisable et l'utilisation de drains de sable était tout à fait déconseillée.

5) *Explosifs, délais de mise à feu et largeur nécessaire de déplacement.* De la « gélatine dynamite » à 40 ou 60 % est très généralement utilisée. Selon Casagrande (1966) le délai prévu de mise à feu entre les charges principales et les charges secondaires n'est pas bénéfique. Toutes les charges devraient être mises à feu en même temps. Pour les projets d'envergure on devrait avoir recours à des sections d'essai permettant de faire choix du type d'explosif, de l'espace-ment des charges et du délai des mises à feu. Les tableaux 1 et 2 donnent des recommandations générales quant au choix de ces facteurs.

TABLEAU 1

Espacement des charges

Epaisseur H du dépôt de tourbe	Distance D entre les rangs de charges	Espacement B entre les charges d'une même rangée		
		Sous la crête	Sous les pentes	Hors empattement
30 pi	0,75 H	H	0,75 H	0,5 H
30 à 60 pi	0,75 H	0,5 H	0,5 H	0,5 H
60 pi	45 pi	15 pi	7,5 pi	30 pi
		45 pi	38 pi	

TABLEAU 2

Quantité d'explosifs

Epaisseur H du dépôt de tourbe, pi	Quantité d'explosifs W en lb./charge le long de l'axe central du remblai	
	Pour une largeur de crête 30 pi	Pour une largeur de crête 30 pi
10	50	60
20	80	100
30	120	150
40	160	200
50	200	250
60	250	300

Le poids d'explosif nécessaire pour déplacer un mètre cube de sol est d'autant plus faible que la teneur en eau est plus élevée, pour une épaisseur donnée de la couche. Ce poids varie généralement entre 0,4 kg et 0,8 kg. Chaque fois qu'il est possible, les charges devraient être mises en place avant la construction du remblai. La mise en place est alors indépendante de la nature du matériau de remblai. La méthode par sautage n'est généralement pas utilisée dans les régions à forte densité de population. Si tel n'est pas le cas, la quantité d'explosif mise à feu en même temps ne dépasse pas 300 kg et il sera prudent de faire un relevé des fissures et dommages existants des bâtiments avoisinants avant que soit déclenchée l'explosion.

Une largeur de déplacement acceptable est celle comprise entre des pentes de 1 vertical, 0,75 horizontal, tracées à

partir des lignes de crête du remblai jusqu'au fond dur. Cette règle a été définie par les ingénieurs allemands, elle est basée sur leur expérience.

6) *Champs d'application et limites du procédé.* On considère généralement que le déplacement des sols compressibles par explosion ne présente d'intérêt pratique que si l'épaisseur de ces dépôts est au moins égale à 5 m, si leur teneur en eau est supérieure à 400 %. On a recours également à cette méthode quand la forte teneur en eau du sol rend techniquement irréalisable l'extraction des sols mous ou la mise en place de drains de sable, enfin quand le temps imparti à la construction est très court.

Le coût de refoulement, y compris celui d'évacuation des matériaux refoulés, se situe entre \$1,5 et \$2,5 par mètre cube de matériau refoulé.

Dans ce paragraphe, il a été passé sous silence les méthodes faisant appel à la réalisation d'un fossé central (Ditching) ou de deux fossés latéraux (Relief method). La méthode par fossé central, réservée à des dépôts de moins de 5 m d'épaisseur, a été supplantée par la méthode par excavation à cause du développement d'équipement d'excavation de grande capacité. La méthode par fossés latéraux peut être combinée au sautage sous le remblai. Il est probable que, dans les années à venir, le prix de revient de la méthode pourra être abaissé en remplaçant la dynamite à 40 ou 60 % par un mélange de nitrate d'ammonium et de fuel-oil dont le prix est six fois moindre. Ce mélange présente plus de sécurité quant au maniement et au stockage, il produit un volume plus important de gaz à l'explosion.

### 3. Déplacement par lançage

Le lançage ou « jetting » constitue très rarement en lui-même une méthode complète pour déplacer la tourbe. Il est généralement utilisé conjointement avec la méthode par excavation partielle ou la méthode de déplacement par surcharge gravitaire.

Le procédé consiste à envoyer de l'eau sous pression dans la tourbe à déplacer en traversant le remblai au préalable par la même technique. L'injection d'eau sous pression fluidifie la tourbe et la rend plus facilement déplaçable. Il est conseillé d'entreprendre le lançage de la tourbe avant construction du remblai et de poursuivre le lançage pendant la phase de développement des tassements. Cette façon de faire permet d'augmenter la vitesse des tassements ou facilite considérablement le déplacement. Les remblais sableux ou graveleux conviennent bien à ce genre d'opération car ils peuvent se déformer sans apparition de fissures quand ils suivent les déplacements de la tourbe. Les remblais argileux répondent beaucoup moins vite à ces déplacements et ont tendance à s'écouler latéralement si le dépôt est profond. On pourra éviter ce dernier inconvénient en construisant de petits remblais temporaires au droit de chaque crête du remblai qui seront laissés en place plusieurs semai-

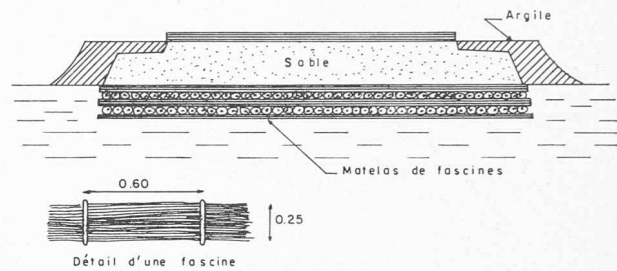


Fig. 17.2. — Plate-forme hollandaise avec fascines.

nes. Le matériau de ces remblais pourra être ensuite utilisé pour terminer les bermes latérales. Cette façon de faire permet d'assurer au remblai des déformations latérales d'amplitude acceptable. La méthode par lançage nécessite qu'une grande quantité d'eau soit disponible à proximité du site de construction. Le coût de revient est compris entre \$0,30 et \$0,50 par mètre cube.

## 7. Méthode de la quatrième catégorie, remblai flottant

### 1. Construction du remblai sur une assise plus ou moins rigide

La technique la plus ancienne pour construire sur une couche compressible consiste à poser le remblai sur un matelas végétal. Ceci peut être un matelas de branchages ou de fagots, des lits de fascines superposés, une assise en rondins de bois.

Les matelas de branchages ou les fagots ne sont utilisés que pour les routes forestières. Les lits de fascines et assises en rondins de bois sont utilisés pour la construction de routes secondaires, en particulier de « routes de gravelle ». Ces deux solutions sont montrées figures 17.1 et 17.2.

L'épaisseur du fascinage varie entre 0,50 et 1,50 m suivant la largeur du remblai et l'importance de la voie. Le fascinage, ou l'assise en rondins, se comporte comme une dalle ; il réduit les tassements différentiels transversaux mais il n'augmente que très faiblement la stabilité du remblai vis-à-vis d'une rupture profonde. La susceptibilité du sous-sol à la liquéfaction due au trafic routier est réduite. Le fascinage est souvent plus large que l'emprise du remblai afin de réduire le tassement total. Le travail manuel que leur installation nécessite rend le coût des fascines relativement élevé. Au Canada pour une chaussée de 7,32 m (24 pi) de large et des accotements de 3,05 m (10 pi) on admet un coût par mètre linéaire variant de \$2,30 à \$5 pour un fascinage simple, et variant de \$4 à \$7 pour un fascinage double. Les Ponts et Chaussées en France indiquent, pour un chemin rural de 6 m de large et un fascinage double, un coût de l'ordre de 36 F le mètre linéaire. La méthode implique également des frais de maintenance élevés du fait des rechargements et corrections de niveau périodiques qu'elle nécessite.

Il est généralement moins coûteux de mettre, à la place des fascines et à la partie inférieure du remblai en sable, des grillages métalliques absorbant les efforts horizontaux. Les grillages sont rapidement attaqués par la rouille, il est nécessaire que le sol puisse se consolider avant leur destruction complète. Depuis quelques années des membranes en fibre polyester sont proposées sur le marché. Les membranes sont imputrescibles, elles sont posées entre le remblai et le terrain compressible, dans le but d'éviter la contamination du remblai et de fournir un élément résistant en traction, dont le rôle est proche de celui du fascinage. Les

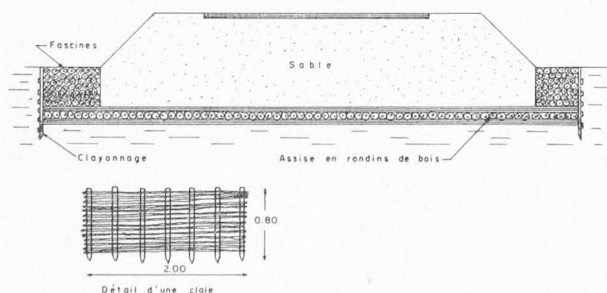


Fig. 17.1. — Plateforme en troncs d'arbres.



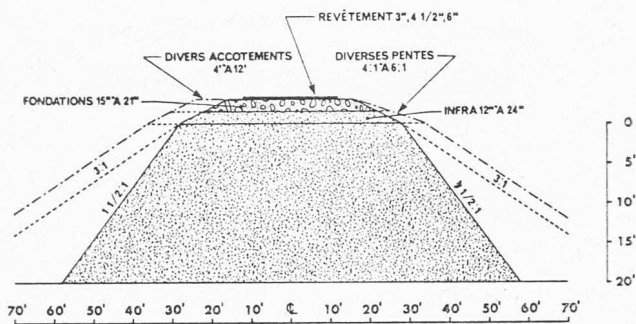


Fig. 18. — Sections types. (D'après Tessier, 1971)

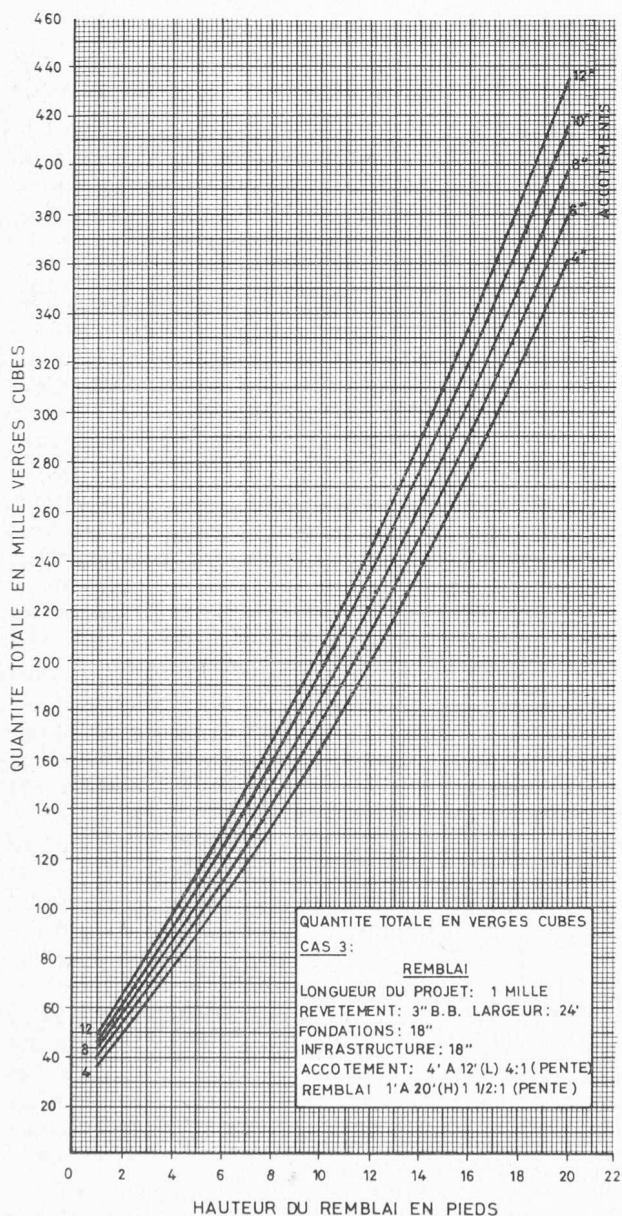


Fig. 19. — Quantité totale de matériaux. (D'après Tessier, 1971)

nappes de Bidim expérimentées par plusieurs laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées en France ont un comportement très satisfaisant. Le Bidim est perméable, il évite donc la contamination des premières couches de remblai tout en permettant la consolidation des couches compressibles, il permet une évolution convenable des engins avec des épaisseurs plus faibles de remblai. Le coût de revient de ce textile synthétique est inférieur à celui d'un fascinage léger. Rolland (1970) cite les prix suivants relatifs à l'aménagement du marais de Redon dans la Basse-Vilaine. Pour un chemin rural de 6 m de largeur, la fourniture par mètre linéaire serait de 22,20 F. Le prix du fascinage traditionnel est de 36 F par mètre linéaire. Une économie de remblai de 2 à 3 m<sup>3</sup> par mètre linéaire a été réalisée, soit une économie financière de l'ordre de 35 F. Bien que le coût de pose du Bidim ne soit pas précisé, l'utilisation de ce textile devrait permettre une économie appréciable.

Le corps de chaussée peut dans certains cas être établi directement sur le massif compressible. Le matériau de base de fondation peut être du sable ou, mieux, du laitier de haut fourneau dont la capacité de répartition des charges est meilleure. On peut également avoir recours à une fondation en béton. Des dalles de 20 à 25 cm d'épaisseur sont placées sur une couche de sable de 30 à 50 cm d'épaisseur. Les dalles de 5 m de longueur environ sont liées entre elles par goujons. Un procédé plus coûteux consiste à utiliser une dalle de béton maigre de 20 cm d'épaisseur établie sur un lit de sable de 20 à 30 cm d'épaisseur. Le corps de chaussée est construit sur une couche de sable de 20 à 30 cm d'épaisseur reposant sur la dalle de béton maigre. Ces méthodes ne sont utilisées que dans le cas où le sous-sol ne tasse que faiblement et présente peu de risques de rupture latérale. Dans le cas des tourbes, les tassements n'étant pas réguliers, on est amené à interposer entre la fondation de la route et le massif de tourbe une couche d'argile de 1 à 2 m d'épaisseur. Les tassements résultant du chargement supplémentaire imposé au sol posent généralement le problème de la remise à niveau. Les méthodes décrites dans ce paragraphe ne sont utilisées que pour des routes secondaires.

## 2. Remplissage avec de la pierre

La méthode a été utilisée par le Ministère de la Voirie du Québec dans les conditions suivantes :

- la couche de tourbe a une épaisseur maximum de 4 m
- elle repose sur une couche résistante qui peut supporter la charge due au matériau de remplissage
- le remblai de route a une épaisseur de l'ordre de la profondeur de la tourbe ; il doit être suffisamment lourd pour défoncer totalement la couche de tourbe et éviter les inclusions de fond qui seraient à l'origine de tassements subséquents indésirables.

La solution a été retenue pour le franchissement en 1940-1941 d'une zone de 3 kilomètres par l'autoroute reliant Montréal (P. Q.) à Champlain (N.Y.). On avait auparavant tenté, sans succès, de drainer la partie supérieure du dépôt pour le consolider. On a enfoncé en moyenne 125 m<sup>3</sup> de pierre par mètre linéaire de remblai. En 1963, il fut décidé d'utiliser la méthode de préconsolidation par surcharge pour construire une seconde chaussée parallèle à la première. Le comportement de cette nouvelle chaussée est actuellement très satisfaisant. La réalisation par surcharge a été plus économique que la méthode du remplissage. La méthode par remplissage devient très coûteuse quand les conditions d'utilisation ne sont pas celles définies précédemment. Une quantité considérable de pierre peut être

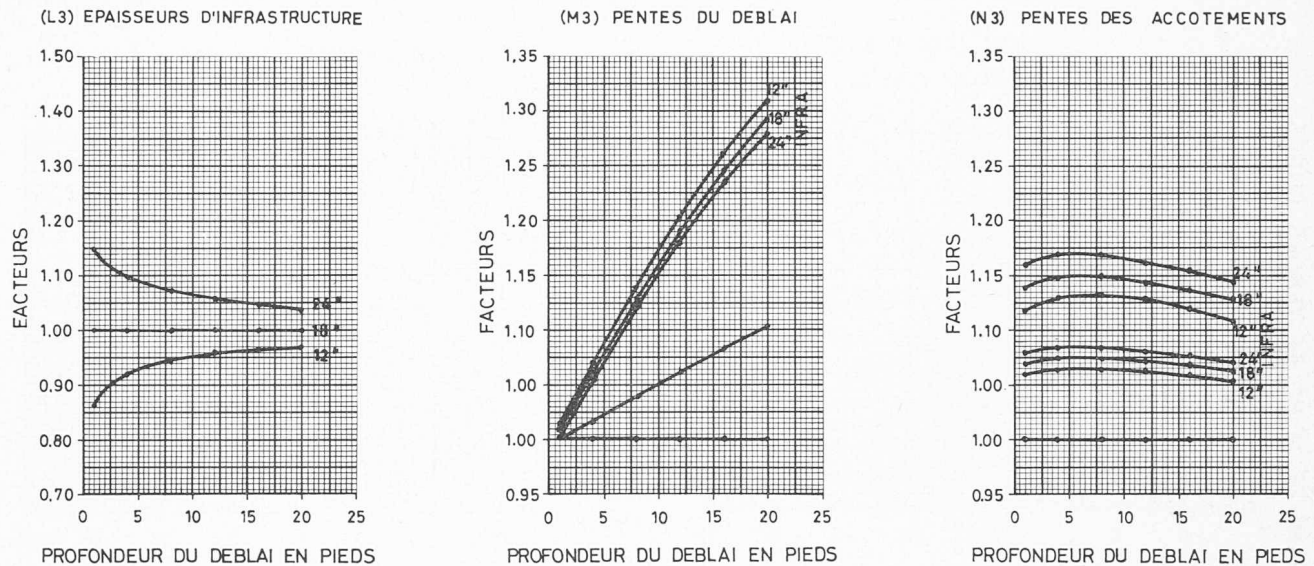


Fig. 20. — Facteurs de corrections (multiplicatifs).

(D'après Tessier, 1971)

perdue dans la couche sous-jacente à la tourbe si cette couche n'est pas suffisamment résistante pour supporter le poids du remblai. Les tassements qui en résultent nécessitent alors un coût de maintenance élevé. Tessier (1971) a établi une méthode graphique pour calculer rapidement le coût d'un remblai construit par remplissage. La méthode est basée sur l'analyse du coût de revient de plusieurs remblais déjà construits suivant cette méthode. Elle permet d'obtenir très rapidement un estimé fiable du coût du projet. La figure 18 donne les plages de variation considérées de chacune des variables géométriques caractérisant le projet. La figure 19 donne les quantités totales de matériau de remblai, en milliers de verges cubes,<sup>1</sup> pour un projet de 1 mille de longueur. La figure 20 donne les facteurs de correction pour tenir compte de la profondeur et des pentes du déblai, de l'épaisseur de l'infrastructure et de la pente des accotements. La figure 21 donne la répartition des quantités totales, en matériau de remblai, matériau de fondation, matériau d'infrastructure, afin d'allouer à chacun d'eux leur propre coût. Les figures 22.1 et 22.2 donnent les quantités additionnelles à allouer pour l'épaisseur de la fondation, l'épaisseur de l'infrastructure, la largeur des accotements et l'épaisseur du revêtement.

Afin de pouvoir comparer les coûts de construction par la méthode du remplissage et par la méthode de préconsolidation avec surcharge, nous utilisons un exemple pour lequel le profil de route et l'épaisseur de tourbe sont identiques.

**Exemple**

- niveau de la chaussée : 4 pi (1,20 m)
- épaisseur de tourbe : 8 pi (2,40 m)
- pente du remblai : 2 dans 1
- revêtement : largeur 24 pi (7,2 m) épaisseur 4,5 po (11,5 cm)
- accotement : largeur 8 pi (2,40 m) pente 4 dans 1
- infrastructure : 18 po (45 cm)
- fondation : épaisseur 21 po (53 cm)
- coût pour l'emprunt : \$0,75/vg<sup>3</sup> transport 2,5 milles (\$1/m<sup>3</sup> transport 4 km)
- coût pour les fondations: \$1,25/vg<sup>3</sup> transport 5 milles (\$1,65/m<sup>3</sup> transport 8 km)
- coût pour le transport : \$0,07/vg<sup>3</sup>/mille (\$0,06/m<sup>3</sup>/km)
- coût du revêtement : \$11,50/vg<sup>3</sup> (\$15/m<sup>3</sup>).

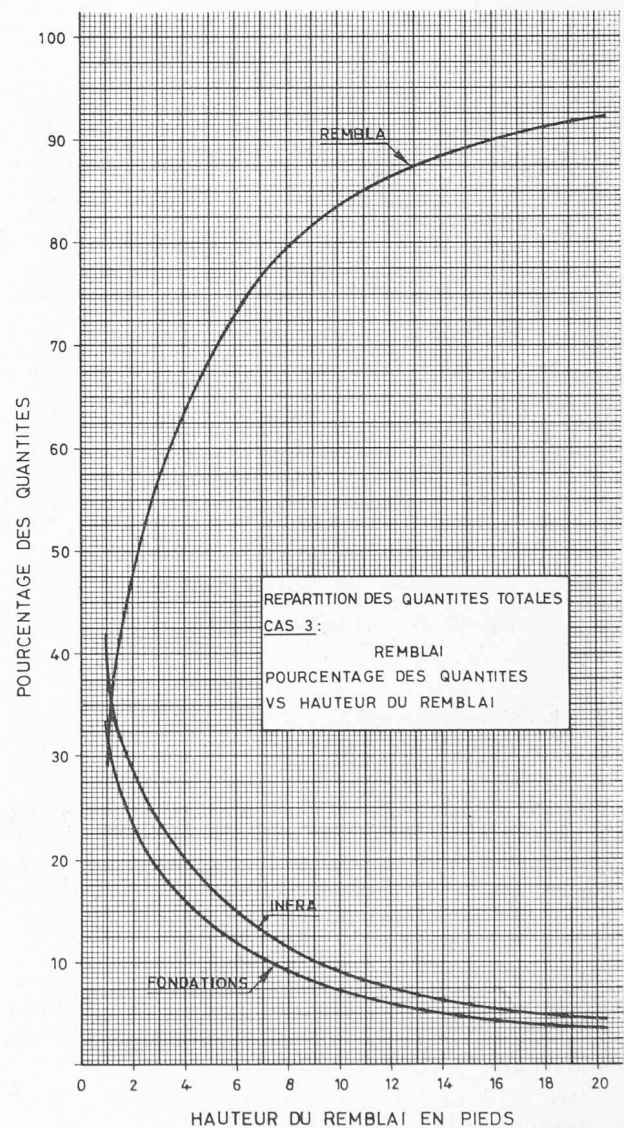


Fig. 21. — Répartition des quantités totales. (D'après Tessier, 1971)

<sup>1</sup> 1 verge cube (vg<sup>3</sup>) = 0,76 mètre cube.



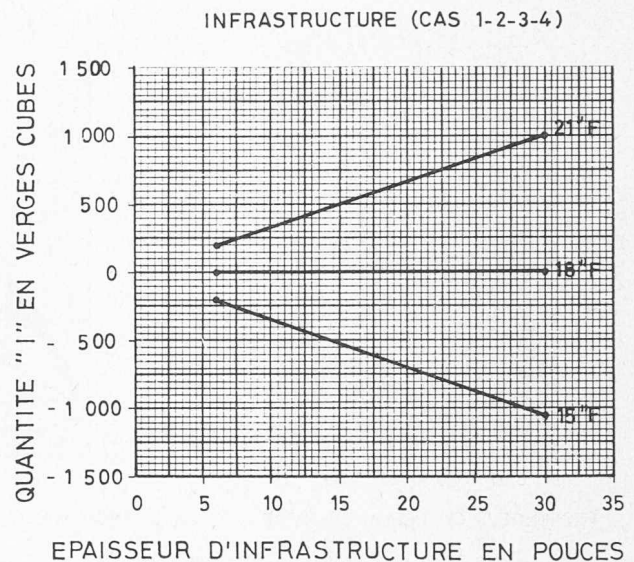
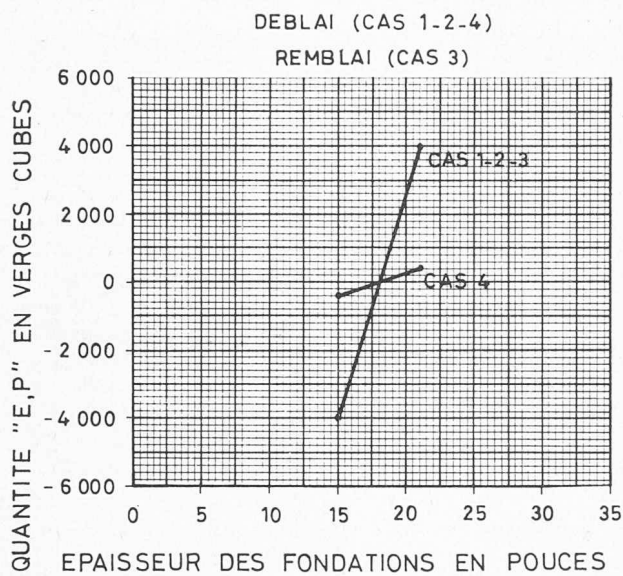


Fig. 22.1. — Quantités additionnelles. (D'après Tessier, 1971)

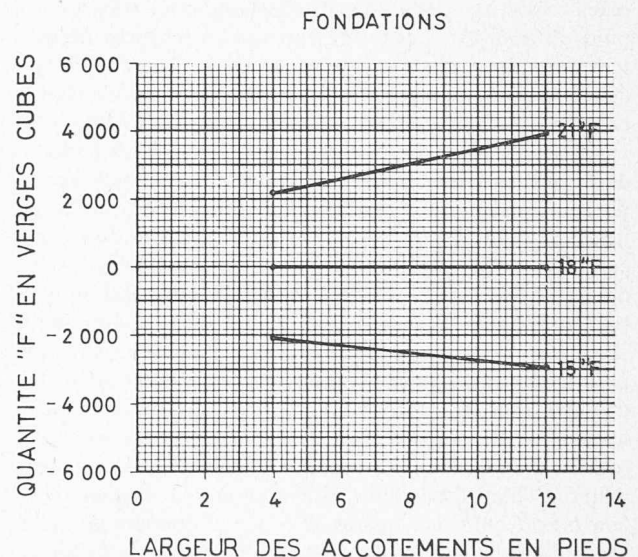
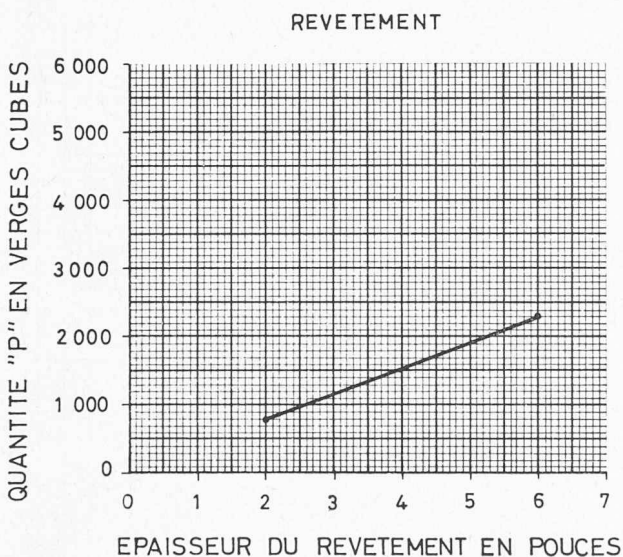


Fig. 22.2. — Quantités additionnelles. (D'après Tessier, 1971)

Par la méthode du remplissage avec de la pierre, le coût par mètre linéaire de route est \$114 (\$36 par pied linéaire). Par la méthode de préconsolidation avec surcharge temporaire, le coût par mètre linéaire de route est \$112 (\$34 par pied linéaire). Pour l'épaisseur de tourbe considérée (2,5 mètres, 8 pieds) les deux méthodes sont équivalentes. Pour des épaisseurs de tourbe de l'ordre de 5 à 6 mètres (15 à 18 pieds), la méthode par surcharge devient nettement plus économique quand elle est possible.

La méthode par remplissage n'est retenue que lorsque la méthode par surcharge ne peut être utilisée et qu'il existe un banc d'emprunt de pierre à proximité immédiate du site de construction.

### 3. Remblais légers

En réduisant les charges imposées aux sols compressibles de fondation, on peut conférer au remblai une stabilité suffisante et éviter des tassements trop importants. L'allègement est obtenu, soit en utilisant comme matériau de remblai des agrégats légers, soit en créant des vides au sein

du remblai avec des buses ou des pontons. La pose d'un remblai léger ne peut être intéressante que sur des dépôts importants de tourbe reposant sur une argile très molle et profonde, dépôts pour lesquels la stabilité d'un remblai conventionnel ne peut être assurée et les tassements sont inacceptables.

- 1) *Remblai de matériaux légers.* L'utilisation de matériaux légers, dont le poids unitaire est environ moitié du poids unitaire des matériaux granulaires courants, permet, à hauteur égale de remblai, d'imposer une charge moitié moindre au massif de fondation compressible ou, à charge égale, de construire un remblai plus élevé. Une telle méthode n'est économiquement réalisable que si les matériaux légers sont disponibles en grande quantité à proximité du site de construction. Au voisinage d'une aciérie on pourra se procurer soit des scories, soit du laitier expansé dont le poids unitaire est faible.

Hanrahan (1964) suggéra d'utiliser des balles de tourbe d'horticulture comme fondation de remblai

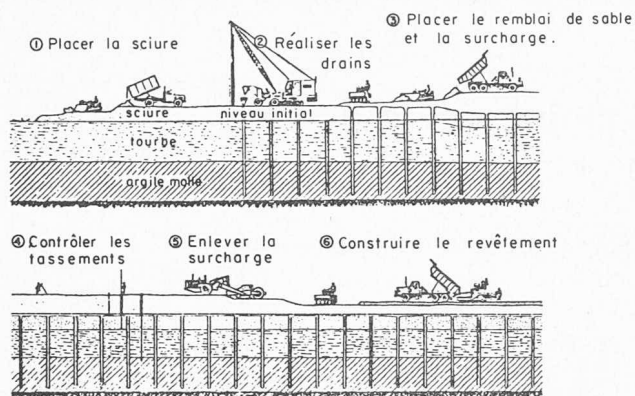


Fig. 23. — Technique de construction utilisant la sciure de bois. (D'après Lea & Brawner)

lors d'un projet d'élargissement de route établie sur une tourbière. Les balles sont parallélépipédiques (1 m × 0,60 m × 0,50 m), leur poids volumique dans l'air est très faible, de l'ordre de 0,17 T/m<sup>3</sup>. La solution fut considérée très satisfaisante.

Une autre technique fut utilisée lors de la construction d'une section de l'autoroute transcanadienne près de Vancouver. Les conditions de sol sont particulièrement défavorables : 12 m de tourbe fibreuse et amorphe reposent sur un dépôt de 13 m d'argile silteuse très molle et sensible. Un remblai de 2 m de hauteur en matériau granulaire conduirait à des tassements de l'ordre de 3,30 m (2,4 m pour la tourbe et 0,90 m pour l'argile). Un tel remblai causerait également une rupture profonde dans la couche d'argile. La méthode de construction retenue utilise de la sciure de bois pour construire une partie du remblai, une surcharge granulaire et des drains de sable tel que montré figure 23. La couche de sciure de bois a une épaisseur variant de 1 à 4 m. Après compactage, elle donne du volume au remblai sans apport important de poids. Il est nécessaire de s'assurer que la couche de sciure soit totalement immergée après tassement afin d'éviter un risque de décomposition et éventuellement de combustion spontanée.

La sciure de bois s'est révélée être un bon matériau de construction sur les chantiers où elle fut utilisée. Sa mise en place est possible par tous les temps, sa traficabilité est excellente, même pour les véhicules automobiles courants. Les camions assurant son transport sont suffisants pour la compacter. Quand des drains de sable sont utilisés conjointement, le battage des tubages dans la sciure est difficile car il y a rebondissement. Une foreuse à tarière doit être utilisée pour la traversée de cette couche. Le projet mentionné portait sur plusieurs kilomètres ; le coût fut de l'ordre de \$0,70 par mètre cube de sciure, mis en place et compacté.

- 2) *Remblais évidés.* Une solution de ce type est exceptionnelle. Elle est très coûteuse mais néanmoins l'est deux fois moins qu'un ouvrage d'art. Elle n'est généralement retenue que lorsque le dépôt de tourbe est situé au-dessus d'un dépôt d'argile molle auquel on ne veut pas imposer un chargement supérieur à la pression de préconsolidation. La solution préconisée par Tanguay (1971) a été adoptée par le Ministère de la Voirie du Québec au site de Saint-Vallier

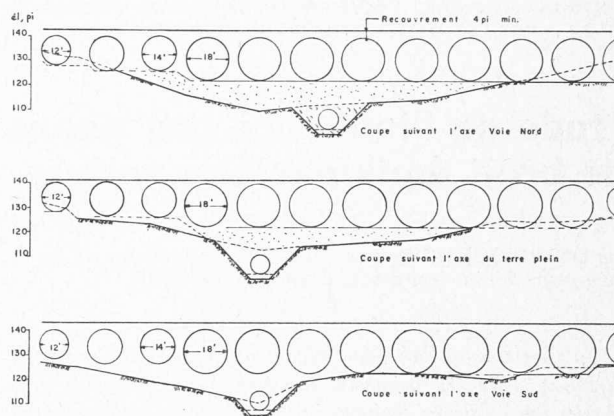


Fig. 24. — Sections longitudinales du remblai de St. Vallier. (D'après Tanguay, 1971)

pour le franchissement par la route transcanadienne de la vallée de la rivière Blanche. Au site, 38,5 m d'argile marine recouvrent un mince dépôt morainique dans lequel existe une forte pression artésienne. Les pentes de la vallée à traverser sont fréquemment bouleversées par des glissements de terrain. La résistance au cisaillement de l'argile augmente légèrement avec la profondeur ; elle varie de 0,25 kg/cm<sup>2</sup> (500 lb/pi<sup>2</sup>) à 0,50 kg/cm<sup>2</sup>. La pression de préconsolidation est de l'ordre de 1,0 kg/cm<sup>2</sup> (1,0 tonne/pi<sup>2</sup>). La longueur de crête du remblai est de l'ordre de 165 m (500 pi) ; sa hauteur devant être de l'ordre de 6 m (20 pi), il était nécessaire d'avoir recours à un remblai allégé. L'allégement est obtenu en créant des vides au moyen de buses d'acier ondulé de type Armco. Le volume des vides étant fonction du carré du diamètre et la quantité d'acier du diamètre seulement (si l'on fait abstraction de l'augmentation d'épaisseur du voile avec le diamètre), il est avantageux de placer les buses ayant le plus grand diamètre possible et de jouer avec l'espacement entre buses. L'espacement minimum est fixé par la largeur de voie de l'équipement de mise en place et de compactage. Il est avantageux de placer les buses aussi haut que possible dans le remblai, afin de limiter leur longueur, et de les installer courbées longitudinalement afin de tenir compte des tassements supérieurs au centre que sur les côtés. La figure 24 donne les sections de remblai au site de Saint-Vallier. Trois diamètres de buses ont été utilisés, soit 3,66 m (12 pi), 4,27 m (14 pi) et 5,5 m (18 pi). La distance entre buses varie de 2,44 m à 1,22 m.

Le tassement prévu du remblai est 0,3 m (1 pi). Le tassement mesuré au droit de l'axe longitudinal du remblai, seize mois après sa mise en service, est de l'ordre de 4 po.

La durée des travaux fut de l'ordre de quatre mois. Le coût de réalisation du projet fut de l'ordre de \$450 000. Le coût de franchissement par ouvrages d'art d'autres vallées très similaires à celle considérée fut de l'ordre de \$900 000. L'économie réalisée est considérable ; de plus, quand des ouvrages d'art ont été construits, les remblais d'approche ont nécessité une maintenance importante.

Bien qu'il ne s'agisse pas ici d'un remblai établi sur massif de tourbe, il est probable que la méthode peut être utilisée quand la couche de tourbe repose sur un dépôt d'argile molle, faiblement ou non préconsolidé et de grande épaisseur.

(A suivre)