

COURS DE PROCEDES GENERAUX DE CONSTRUCTION

Professeur Hubert MAKENGO

Assisté par : BORKWA KILING pour la 1^{ère} partie

KINGOMBE GILBERT pour la 2^{ème} et 3^{ème} parties

MANDA junior pour la partie liée à la base aérienne

1ère PARTIE : 1. FONDATIONS ET EXCAVATIONS

2. PROCEDES DE CONSOLIDAION, DRAINAGE, COMPACTAGE
3. LES INJECTIONS (coulis)
4. LES PAROIS MOULEES
5. LES PAROIS D'ETANCHEITE
6. LES OUTILLAGES DE PAROI
7. LES PALPLANCHES
8. PIEUX, PUITES ET APPUIS
9. LES RABATTEMENTS
10. LES TIRANTS ET ANCRAGES
11. LES CAISSONS

2ème PARTIE : LA CONSTRUCTION DES PONTS EN BETON

1. LA CONSTRUCTION SUR ECHAFFAUDAGE AU SOL OU CINTRE
2. LA CONSTRUCTION PAR POUTRES PREFABRIQUEES LANCEES
3. LA CONSTRUCTION PAR POUSSAGE
4. LA CONSTRUCTION SUR CINTRES AUTOLANCEURS
5. LA CONSTRUCTION PAR ENCORBELLEMENTS SUCCESSIFS

3ème PARTIE : LES TRAVAUX SOUTERRAINS

1. FACTEURS DONT DEPEND UN PROJET ET ETUDES PREALABLES
2. CLASSIFICATION DES TUNNELS SELON LEUR MODE D'EXECUTION
3. EXECUTION DES TUNNELS EN TERRAINS DURS OU ROCHEUX
4. EXECUTION DES TUNNELS EN TERRAINS MEUBLES

4ème PARTIE : CONSTRUCTION LIEE A LA BASE AERIENNE (cfr COURS DE BASES AERIENNES)

1^{ère} PARTIE : FONDATIONS ET EXCAVATIONS

I .FONDATIONS ET EXCAVATIONS

1.1 Généralités-Définitions(Rappels)

On appelle **fondation**, la partie de l'ouvrage qui repose sur le sol et lui transmet les efforts dus aux charges et surcharges.

La stabilité d'un ouvrage est donc fonction de la bonne tenue des fondations, dont l'étude et la conception d'une part (voir mécanique des sols ou géo mécanique) la réalisation d'autre part sont essentiels. La réalisation pratique concerne les "procédés généraux de construction" .

Intérêt du cours :

La connaissance des procédés de construction est indispensable pour résoudre des problèmes de plus en plus délicats que posent les maîtres d'ouvrage, à savoir :

- l'augmentation des dimensions et des efforts
- la diminution des tolérances de déplacement
- l'exploitation optimale des sites difficiles

On distingue :

-Les fondations superficielles : accessibles à l'homme et désignent les massifs, les

Semelles (filantes ou isolées) et les radiers.

*le taux de travail (pression portante) est modéré ($\leq 1\text{MPa}$) . $1\text{MPa}=10^6\text{ Pa}$

*le rapport H (hauteur) sur S (surface) de la fondation est faible ($H/S \leq 1$).

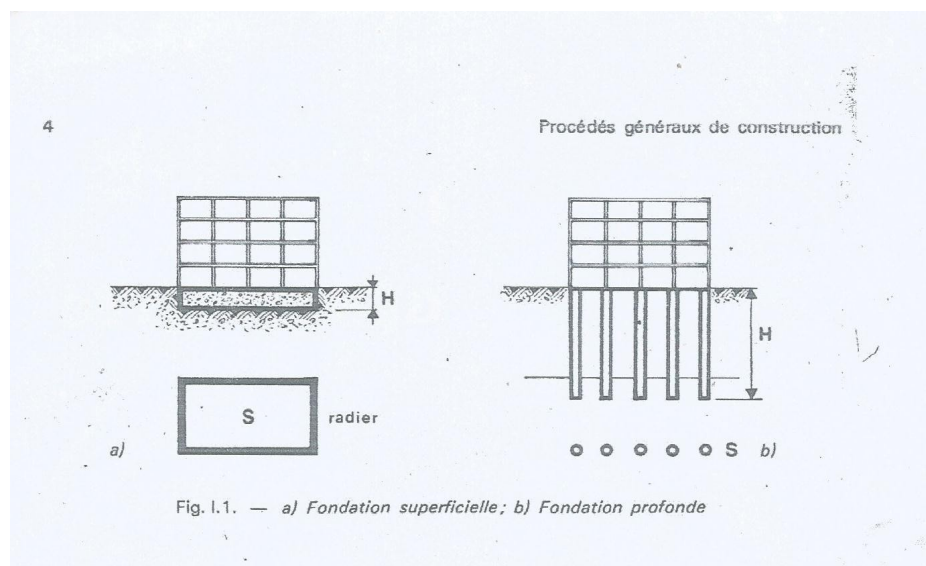
- les fondations profondes : accès indirect, impossible à l'homme, à l'aide des machines

On réalise les pieux, les appuis isolés et les caissons.

*le taux de travail (pression portante) est élevé (5 à 7MPa).

*le rapport H/S est élevé ($H/S \geq 10$).

Les fondations profondes encaissent des efforts particuliers tels que les arrachements et les effets sismiques.



1.2 Réalisations des fondations superficielles

Une fondation superficielle peut se réaliser directement sur le sol naturel si celui-ci présente des caractéristiques suffisantes.

NATURE DU TERRAIN	CAPACITE PORTANTE EN MPa
Boue, tourbe ; terrains marécageux	0,00
Remblais anciens en terre	0,05
Sable fin ($\varnothing < 1\text{mm}$)	0,1 à 0,2
Sable grossier ($1 < \varnothing < 3\text{mm}$)	0,2 à 0,3
Sable et gravier (1/3 de gravier, $\varnothing = 70\text{mm}$)	0,3 à 0,4
Glaise, argile, marne molle	0,00
Glaise, argile et marne consolidée	0,001 à 0,005
Marne dure (non immergée)	0,3
Roches tendres (avec fissure = 50-50%)	1
Roches dures en masse compacte, si fissuration = 50%	3

Tableau 1

Si le sol naturel présente des caractéristiques insuffisantes, on peut chercher à le consolider au préalable

PROCEDES DE CONSOLIDATION	TYPE DE SOLS
1. Drainage (drains de sable ; drains de carton)	Argile, tourbe, vase
2. Surcharge + drainage	Argile, tourbe, vase
3. Surcharge du terrain naturel (masse de terre)	Argile, tourbe, vase
4. Injection de consolidation	Sable moyens fins
5. Compactage mécanique	Sable et graviers
6. Compactage dynamique	Remblais récents
7. Vibroflottation	Sables lâches
8. Electro osmose Electro drainage	Argile
9. Congélation	Vase, argile molle
10. Explosifs	Fond marin avec gaz occlus

Tableau 2

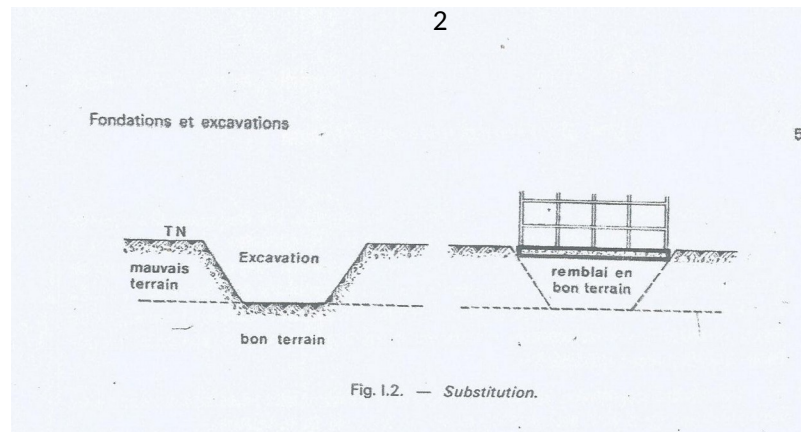
Le choix d'une technique de consolidation est conditionné par les facteurs ci-après :

- la nature du terrain
- l'environnement

- la vitesse désirée
- le coût
- le degré de consolidation souhaité

On peut aussi pratiquer un procédé voisin à la consolidation'' la substitution''

Il consiste à enlever les couches médiocres et les remplacer par des couches successives des matériaux sablo-graveleux soigneusement compactées.



Pour réaliser des fondations superficielles en profondeur .ce qui est différent des fondations profondes (cas des constructions avec sous sol en site urbain), il peut être question de creuser une fouille ou une enceinte ou de réaliser une excavation à l'air libre, accessible à l'homme.

1.3 Réalisations des fondations profondes

Entre dans cette catégorie, les pieux, les appuis et les caissons.

Un **pieu** est un élément de construction de section circulaire en béton, acier, bois ou mixte permettant de fonder un bâtiment ou un ouvrage. Ils sont utilisés lorsque le terrain ne peut pas supporter superficiellement les contraintes dues à la masse de l'ouvrage. Il peut être possible de d'utiliser les pieux pour renforcer des fondations.

Un **appui** = fondation profonde de formes diverses : rectangulaires (barrette), H, L, T

Un **caisson** = appui de section circulaire, creux en B.A le plus souvent ou métallique quelquefois.

Suivant le mode de réalisation ; il existe différents types de pieux.

- **Pieux battus façonnés à l'avance** : sont réalisés à partir d'éléments préfabriqués qui sont battus en force dans le sol ou enfoncé par vibration. C'est le type de pieu est le plus ancien à être utilisé notamment pour la construction des d'habitation sur pilotis.
- **Pieux à tube battu exécutés en place** : sont réalisés à l'aide d'un tube métallique creux fermé à la base, battu en force dans le sol et qui sert ensuite à couler du béton dans le sol à mesure de la remontée du tube.
- **Pieux forés** : sont réalisés par excavation de matériaux puis coulage de béton dans le sol. Différents outils sont utilisés selon la dureté des sols (**tarière creuse**, etc.). Dans le cas de sols de faible cohésion, un tubage ou l'utilisation de boues permet d'assurer la tenue des terres durant les opérations de forage.

- **Pieux forcés** : sont réalisés à partir des éléments préfabriqués ou coulés en place à l'avancement et forcés hydrauliquement à l'aide d'un vérin. Cette technique est relativement peu utilisée du fait d'importantes charges fixes nécessaires pour assurer la poussée du vérin. Elle a l'avantage de pouvoir être mise en œuvre dans les espaces réduits.
- **Micro pieux** : les micro pieux sont de pieux de faible diamètre réalisés par forage puis injection d'un coulis de ciment.

3

1.4 Excavations à l'air libre

Les problèmes à résoudre au cours de la réalisation d'une excavation sont :

- a) contenir les poussées latérales des terres en encaissant l'excavation
- b) encaisser les efforts extérieurs environnants (surcharges et mitoyens en ville)
- c) contenir ou éliminer l'eau baignant les terres
- d) assurer la stabilité et l'étanchéité du fond de fouille

Tous ces problèmes sont à résoudre tant en phase provisoire qu'en phase définitive d'exploitation.

Procédés permettant la réalisation d'une excavation

	En présence d'eau	Hors -nappe
Soutènement vertical souhaité (soutènement résistant)	-paroi moulée } boutons+tirants -paroi préfabriquée -pieux jointifs -palplanches -injection/consolidation -congélation	-fouille blindée - reprise-en sous-œuvre -paroi berlinoise et dérivés
Talutage possible (talus auto stables)	-paroi d'étanchéité -palplanches -Rabattement de nappe -injections d'étanchéité latérales	-talus seul (parce qu'il est auto stable)

Tableau 3

Le choix de ces différents procédés est fonction de : **délais impartis, environnement, coût, caractère provisoire ou définitif**

Procédés devant assurer l'étanchéité et la stabilité du fond de la fouille

	En présence d'eau
Phase provisoire d'excavation	-rabattement nappe (puits, pointes ; pompages) -injection d'étanchéité (fond étanche artificiel) -béton coulé sous eau
Phase d'exploitation définitive (étanchéité et ou sous pression éventuelle)	-rabattement permanent (par drainage) -ancrage et radier étanche -radier poids étanche (lutte contre le

	phénomène de renard)
--	----------------------

Tableau 4

4

1.5 Réalisation des fondations "off-shore"

Ce sont des fondations en site aquatique (maritime ou fluvial)

Les ouvrages à fonder sont :

- a) les digues et les batardeaux c.à.d. les ouvrages encaissant uniquement les efforts de l'eau
- b) les murs de quai, les écluses maritimes et les formes de radoub c.à.d. les ouvrages recevant essentiellement les poussées de terre (soutènement particulier avec "terre" côté poussée "eau" côté butée.
- c) les piles de ponts, les plateformes pétrolières et les appontements c.à.d. des structures apportant des efforts ponctuels de compression ou de traction.

Les procédés d'exécution de ces ouvrages ou structures sont généralement ceux employés en site terrestre adaptés au cas particulier considéré : terrassement, dragage, palplanches, parois moulées, ancrages, pieux en béton ou métal

2. PROCEDES DIVERS DE CONSOLIDATION DES SOLS NATURELS

2.1 La congélation

La congélation des terrains acquires instables est un procédé ancien à caractère provisoire employé pour le creusement des fouilles, puits ou galeries.

Elle permet également le "sauvetage " d'ouvrages à la suite d'incidents (phénomène de renard).

Intérêt du procédé : Ce procédé rend le sol étanche et résistant.

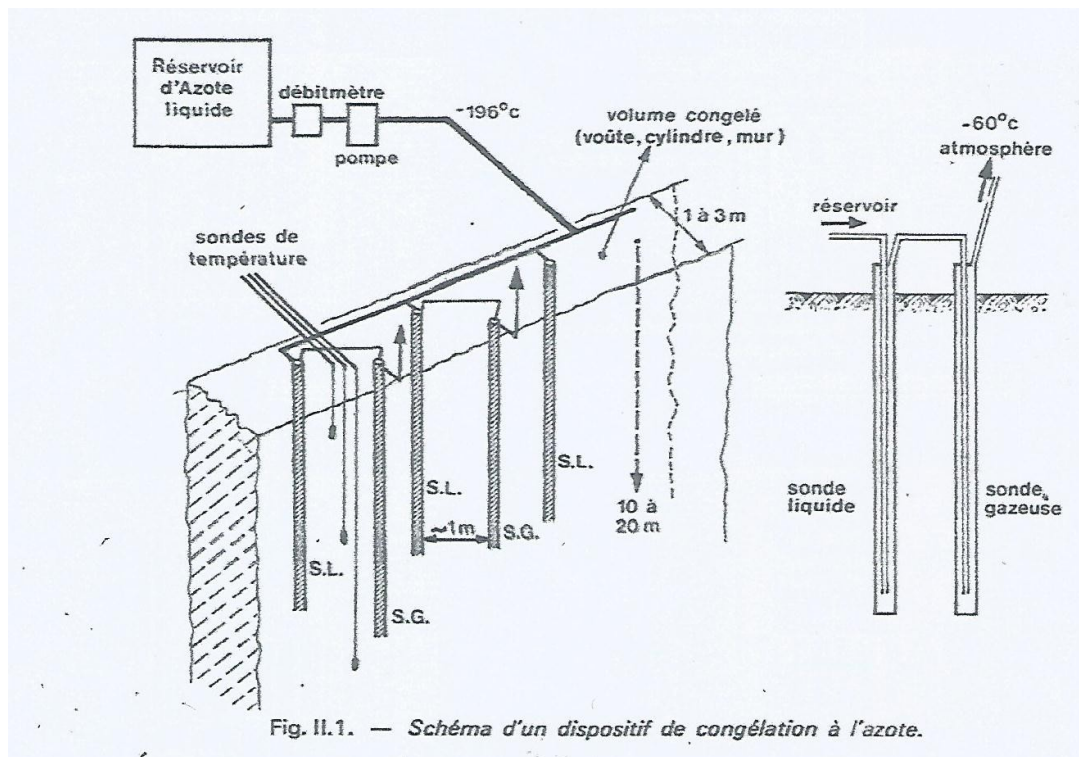
On procède selon le principe articulé ci-après :

- exécution de sondages encaissant l'ouvrage à construire, sur la hauteur des couches aquifères avec un espacement de forage de 1m,
- mise en place des tubes réfrigérants (sondes) : fermés à leur base, ils contiennent des tubes plus petits ouverts à leur extrémité inférieure,
- mise en circulation d'un liquide (azote liquide) à basse température arrivant par le tube intérieur et remontant dans l'espace annulaire en empruntant la chaleur au terrain encaissant.
- congélation progressive des couches autour des sondes et on obtient une paroi de terrain gelé dur et imperméable.
- maintien de cette paroi durant les travaux de génie civil.

Il existe plusieurs méthodes :

- la méthode ouverte à l'azote liquide (température de liquéfaction -190°C)
- la méthode fermée à la saumure ($\text{NaCl} + \text{KCl}$ à l'état liquide)
- la méthode dite combinée

5



2.2 Le drainage

a) Drains verticaux

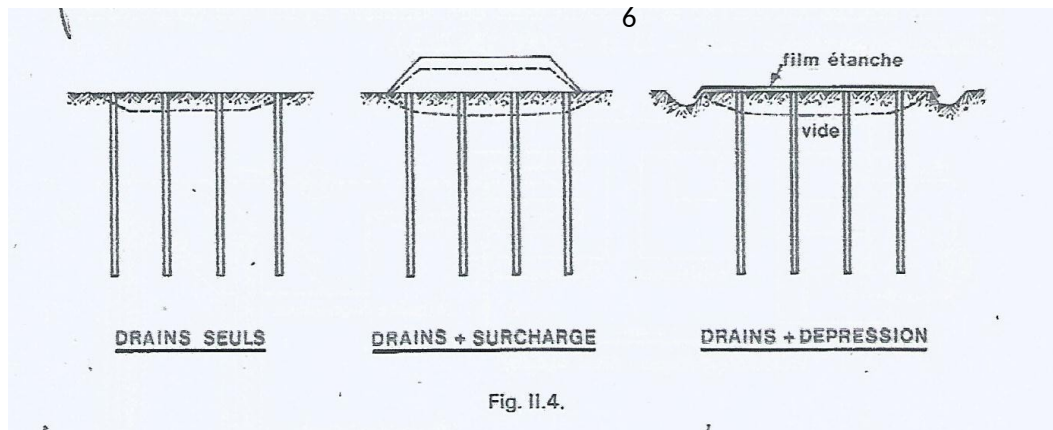
- la consolidation naturelle d'un terrain argileux implique une surcharge et une expulsion d'eau. La dissipation de l'eau est généralement fort longue du fait de la très faible perméabilité de ce type de sol ; on peut accélérer le phénomène grâce à un drainage en profondeur.
- le procédé consiste à augmenter la perméabilité du sol dans le sens vertical par la pose des drains perméables sur toute la hauteur de la couche à stabiliser.

Deux types de drains sont utilisés :

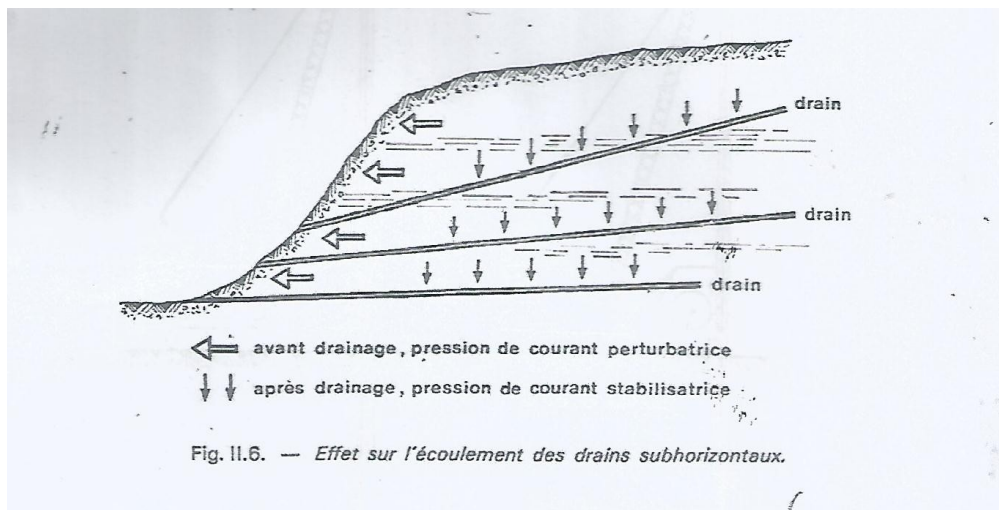
- les drains de sable réalisés par forages, $\varnothing 0,50\text{m}$
- les drains "mèches" en cartons, textiles non tissés ou structures mixtes (mis en place mécaniquement par des outillages à grand rendement).

Dans le cas des remblais argileux récents, on ne peut pas utiliser les drains seuls ; il faut ajouter une surcharge .Celle -ci peut provenir :

- des couches de matériaux d'apport qui devront être enlevés après consolidation sauf dans le cas de construction d'une plate forme routière (le remblai est utilisé pour la construction elle-même).
- de la pression atmosphérique : un film étanche est posé sur le sol et on fait un vide en dessous, ceci permet de mobiliser jusqu'à 8 t/m^2 de surcharge équivalente et
- évite une double manipulation des terres. Dans ces cas, la consolidation s'accompagne toujours d'un tassement.



b) Drains subhorizontaux



Lorsqu'on est en présence de masse de terres peu perméable (limon, sable argileux, terre végétale, marnes) qu'une ou plusieurs nappes rendent instables (remblais, talus) ; l'emploi de drains subhorizontaux permet d'en améliorer la stabilité en captant l'eau des nappes.

Il s'agit des forages remontants faits avec des sondeuses rotatives, équipées des tubes spéciaux imputrescibles ($\varnothing 10 \text{ cm}$ et longueur pouvant atteindre 100m). Leur efficacité est due non seulement au captage et à l'élimination de l'eau , mais aussi à la modification des écoulements à l'intérieur de la masse de terre :une pression de courant verticale stabilisatrice se substituant à une pression de courant horizontale perturbatrice .

2.3 Le compactage dynamique (procédé mis au point par Louis Menard)

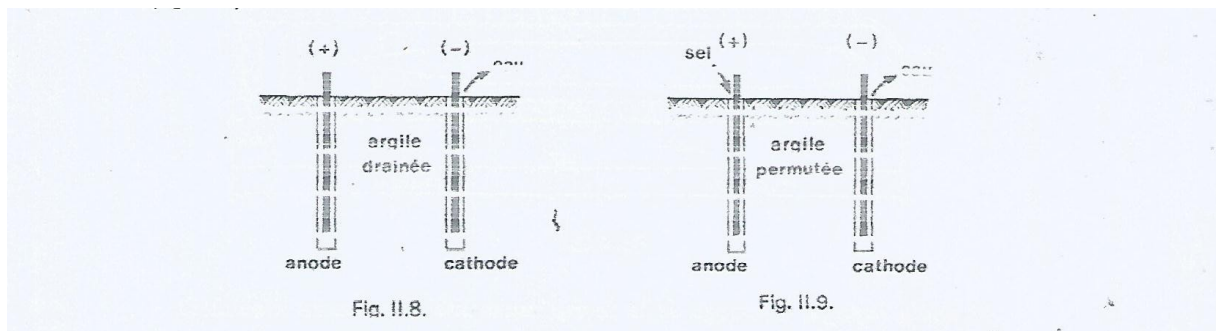
- Consiste à pilonner le sol en surface avec une masse, l'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours (ou semaines) ; une restructuration s'opère et aboutit à l'amélioration des caractéristiques de portance.
- le matériel est constitué d'un pilon de 8 à 50t (coque d'acier cubique ou cylindrique pleine de B.A) manipulée par un engin de levage (jusqu'à 40m de hauteur de chute). Énergie de compactage 200tm-2000tm ; hauteur courante de couche à compacter : 10/15 m et peut aller jusqu'à 25/30m.

7

2.4 Le compactage par explosion et la consolidation électrique

2.4.1 La consolidation du sol par explosion consiste à placer à une profondeur donnée une charge explosive telle qu'il n'y ait pas un cratère en surface. Elle s'applique alors sous eau, dans ce cas, on place alors une charge à quelques mètres au dessus du fond. La présence du gaz occlus dans le sol à considérer influence l'efficacité du phénomène. C'est une solution brutale simple. Elle est aussi appropriée pour le compactage des grandes masses non cohérentes de sols en des lieux éloignés des villes (pour la mise en « œuvre, la quantité d'explosif à utiliser est de 30g d'explosifs /m³ de sol traité).

2.4.2 La consolidation électrique ou électro-osmose consiste en un drainage de l'eau contenue dans un sol argileux saturé sous l'influence d'un champ électrique. L'eau migre des anodes (+) vers les cathodes (-) qui sont équipés en forages drainants. L'élimination de l'eau améliore les caractéristiques mécaniques du sol. Et donc la consolidation par électro drainage est une consolidation provisoire. Pour obtenir une consolidation définitive, il faut injecter par l'anode un sel (saumure) convenablement choisi entraînant une permutation ionique et modifiant irréversiblement les propriétés mécaniques de l'argile à teneur en eau constante. On parle de procédé d'électro-consolidation par échange d'ions. Fig.



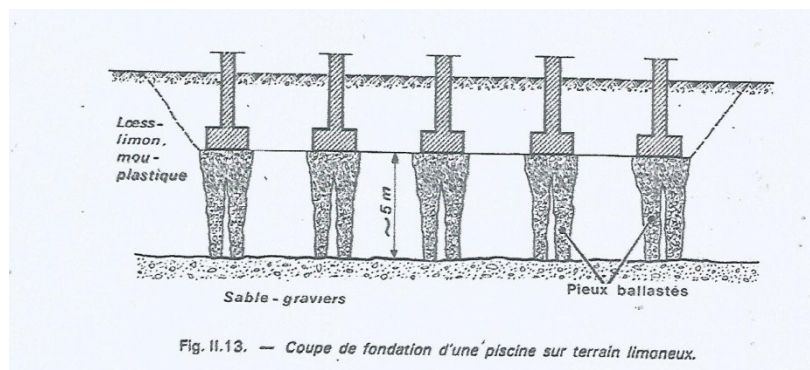
2.5 La vibrocompaction

Une installation de vibro compaction comporte essentiellement :

- le vibreur (électrique ou hydraulique) avec ses tubes allonge (Ø 0,30m). Des appareils perforateurs à axe vertical permettent de développer des vibrations dans le sol jusqu'à des profondeurs de 25/30.
- l'engin approprié (grue de faible flèche appropriée à la profondeur). En général, on associe à la vibration une action de lançage d'eau sous pression par la base du vibreur, on parle alors de vibroflottation.

- Dans les terrains non cohérents (sable lâches avec quelques fines), l'action de la vibration et du lançage engendre une augmentation de densité et donc une amélioration des caractéristiques mécaniques. En plus ; on incorpore des matériaux d'apport pour compenser la réduction de volume du terrain, on parle de **vibroconsolidation**.
- Dans les terrains cohérents (limons, argiles) la vibration ne produit pas de modification sensibles de caractéristiques mécaniques. On utilise la vibrocompaction pour faire des forages ($\varnothing 500\text{mm}$) que l'on remplit de cailloux ou de ballast ($\varnothing$ entre 10 et 100mm). On réalise ainsi des pieux colonnes ballastés assimilables à des pieux de faible capacité portante (quelques dizaines des tonnes) sur les quels il est possible de fonder. On parle ainsi de "pieux de gravier". Pour une fondation, on peut injecter un coulis de ciment au cœur du ballast pour conférer une certaine cohésion.

8



3. LES INJECTIONS

- L'introduction dans les vides du sol d'un produit liquide se rigidifiant par la suite appelé "coulis" permet de réaliser une injection de ce sol.

3.1 Injection du sol

Elle peut viser la consolidation et ou l'étanchéité.

- 1^{er} paramètre : quel est l'objet du traitement des sols par injection
 2^{ème} paramètre : l'ouvrage à réaliser peut être :

- un voile vertical
- une masse de terre au sein de laquelle on excavera une galerie ou un puits.
- un fond horizontal
- une masse de terre au sein de laquelle on viendra ériger une fondation.

3^{ème} paramètre (le plus important) : la nature du terrain peut être :

- une roche fissurée
- des cavités
- des masses d'alluvions

En fonction de ces paramètres, l'ingénieur choisit :

- le procédé

- le ou les coulis
- la disposition des forages
- les quantités à injecter
- les pressions

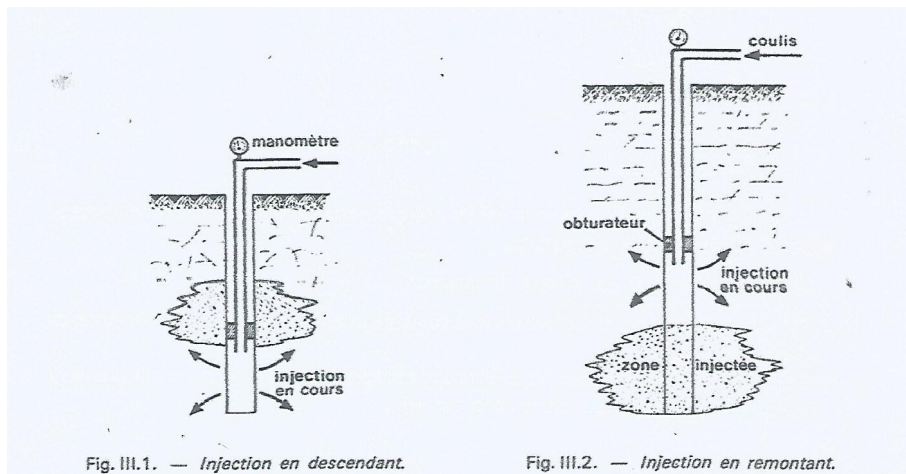
3.2 Procédés

En règle générale, le coulis est amené en profondeur dans le sol par l'intermédiaire des forages. Ceux-ci d'un $\varnothing$ variant entre 5 et 15cm sont équipés selon la nature du terrain.

a) **En roche fissurée**, le forage exécuté reste ouvert sur une grande longueur du fait de la bonne tenue de ses parois. Il est possible d'injecter en une seule fois une "une passe d'injection" de 3 à 5m de longueur. Lors d'une **injection à l'avancement** "la perforation et l'injection se succèdent de haut en bas du forage (ou **injection descendant**) et après chaque injection il faut perforer le coulis durcis qui obstrue le forage et c'est donc un problème (le gaspillage du coulis).

9

Lors d'une **injection en remontant**, on exécute le forage sur toute la longueur, puis on injecte le coulis en commençant par le bas. C'est la solution, elle présente l'intérêt de séparer la perforation et l'injection mais n'est pas applicable aux roches très fissurées ((risque du court-circuit de l'obturateur par le coulis). Dans les 2 méthodes, le coulis de base utilisé est une simple suspension de ciment dans l'eau, une suspension instable. Le remplissage des fissures se fait par sédimentation de grains de ciment. La suspension est toujours diluée de 1/10 à 1/1 pour le rapport Ciment/Eau.



b) **En cavités**, une 1^{ère} solution = injection à l'avancement

Une 2^{ème} solution = tubé provisoirement le forage jusqu'à sa base, puis injecter en remontant progressivement le tubage.

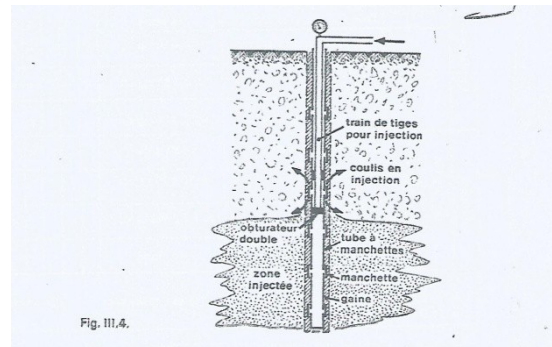
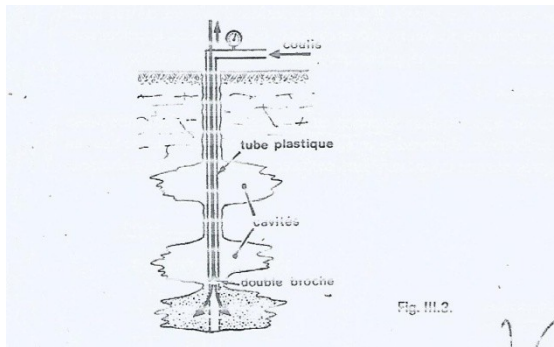
"**Le tube à brocher**" est un tube plastique perdu dans lequel une broche pratique des fentes à travers les quelles le coulis d'injection (ce qui permet de séparer les opérations de perforation et d'injection).

Le coulis utilisé est à base de ciment :

- on injecte un mortier résistant (ciment, sable fin, adjuvants chimiques) s'il s'agit d'une consolidation.
- on injecte des mélanges légers à base de ciment (ciment, sciure de bois, produits chimiques) s'il s'agit d'une étanchéité.

c) **En alluvions**, un forage ouvert ne permet pas la tenue d'un obturateur.

L'injection est toujours faite par l'intermédiaire d'un tube de revêtement, le tube à manchettes, tube en plastic Ø25 à 50cm, la manchette en caoutchouc.



10

4. LES PAROIS MOULEES

Elles assurent 3 fonctions : étanchéité, soutènement, portance.

On distingue :

- les parois moulées, armées "classiques" (procédé de base)
- les parois préfabriquées
- les parois d'étanchéité
- les parois composites (association du béton avec du plastic ou du métal)

4.1 Procédé de base

On doit réaliser in situ un mur de béton armé vertical situé sous la plateforme de travail à partir de la quelle la machine opère.

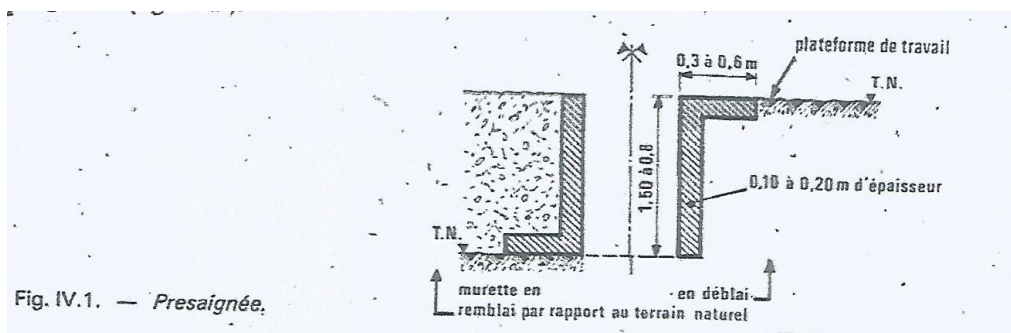
Les opérations élémentaires principales se succèdent comme suit :

1. le creusement d'une tranchée à l'abri d'une boue de forage
2. la mise en place dans la tranchée d'une cage d'armatures
3. la substitution de la boue de forage par du béton

Les travaux préparatoires consistent en l'aménagement de la plate-forme de travail et dans l'exécution de la "prétranchée" ou murettes-guide " ou encore de la pré saignée ; haute d'1m en moyenne, généralement en B.A est en légère sur largeur par rapport à la future paroi.

Le pré saignée remplit 4 fonctions :

1. matérialiser l'implantation et permettre repérages et nivellements
2. servir d'appui pour certaines manœuvres
3. sert de réserve de boue en début de perforation
4. assure la stabilité des terres en tête

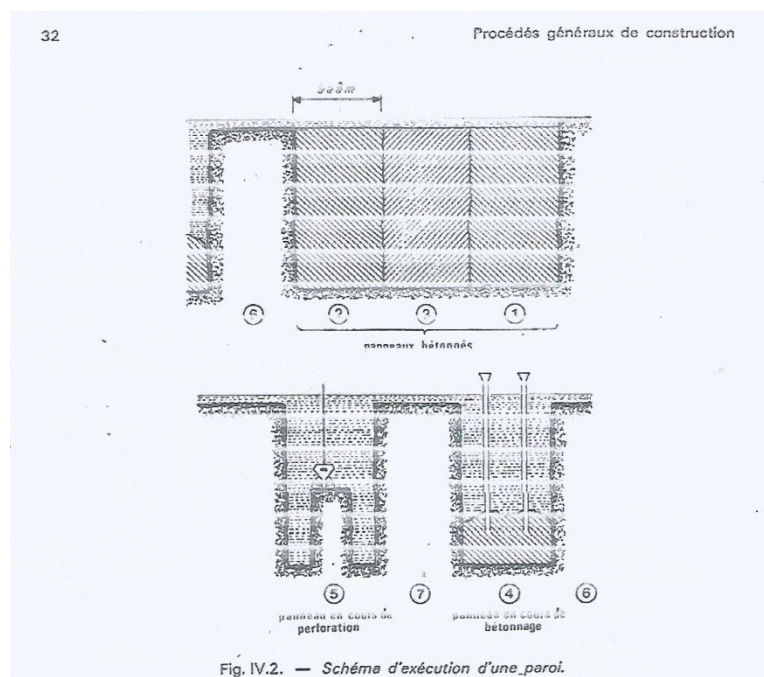


Si on fait une paroi sous un mur existant, on se placera à 0,10m minimum de son extrados.

La perforation :

- largeurs usuelles : 0,60 à 0,80m
- profondeur habituelle : 30m
- panneaux juxtaposés : 5 à 6m

11



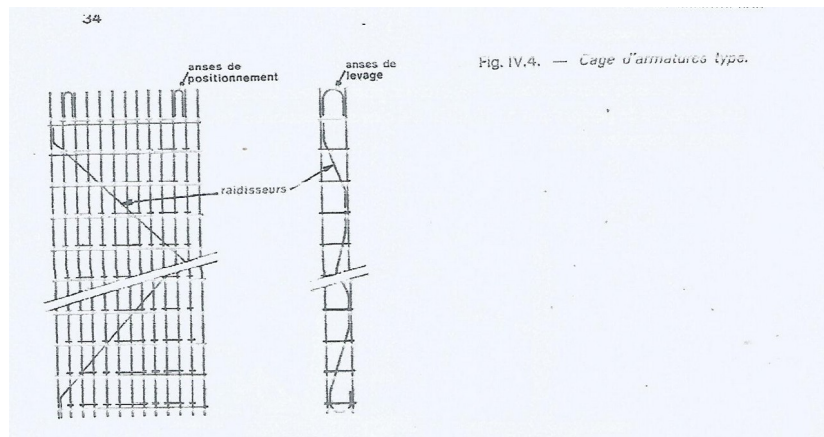
La boue de forage

- elle est généralement une solution de bentonite à 50kg/m³ d'eau
- sa densité de la boue neuve varie de 1,04 à 1,05
- elle véhicule les sédiments de perforation et doit donc être dessablée avant l'opération du bétonnage.
- son niveau doit être maintenu au dessus de celui de la nappe ; elle dépose sur les parois un cake perméable qui participe à la stabilité de la saignée.
- quantité utilisée : 0,5 à 1m³/m² de tranchée (ou 25 à 50kg de bentonite)

Les armatures

Laisser 10 à 15 cm d'espace entre les armatures horizontaux et les armatures verticaux pour que le béton puisse passer sans jamais être vibré.

- largeur des cages < de 10cm à celle de la paroi pour un bon enrobage latéral.
- ajouter des centreurs et des raidisseurs de levage.



12

Le bétonnage

Le béton super fluidifiant (c.à.d. dans lequel on a ajouté les adjuvants) est mis en place par le procédé du tube plongeur (ou colonne de bétonnage) de $\varnothing$ 0,20 à 0,30m. Le tube descend jusqu'à quelques centimètres près de la base et le **béton remonte dans la tranchée**.

Une opération de bétonnage ne peut être interrompue, elle doit être faite en une seule fois de la base jusqu'au sommet. Il faut pour cela assurer un retard de prise du béton > 10 heures et assurer de fortes cadences de bétonnage ($> 50\text{m}^3/\text{h}$).

Au-delà de 5 à 6 m d'ouverture, le béton chemine mal à l'horizontale et on doit prévoir deux colonnes.

Le béton a un dosage moyen constitué de :

Sable (0-5mm)	: 900 à 950 kg/m^3
Graviers (5-25mm)	: 900 à 950 kg/m^3
Ciment	: 350 à 450 kg/m^3
Eau	: 200L/ m^3

On peut ajouter des ciments spéciaux pour travaux sous l'eau (ciment à 70% clinker)

On doit obtenir un béton de $> 200 \text{ daN}/\text{cm}^2$ à 28 jours.

Les Joints : ce sont les clavettes simples ou doubles en polystyrène ou encore des joints préfabriqués qui sont plus utilisés.

L'étanchéité définitive d'une paroi située sous une nappe peut être assurée de 3 manières :

- soit adjoindre un cuvelage interne
- soit prévoir un contremur avec drainage à l'interface
- soit à recouvrir à la paroi préfabriquée

Cas d'applications : (types de parois moulées classiques)

- paroi avec butons
- paroi avec tirants
- paroi associée à une méthode de construction en taupe :
- "jambes de pantalon"
- paroi à contrefort
- paroi à tirants plans

- paroi circulaire

4.2 Les parois préfabriquées

a) les avantages de l'utilisation des panneaux préfabriqués à la place de béton moulé sont :

- contrôle de qualité du béton aisée et sécurité améliorée
- meilleur emploi des matériaux (béton vibré, acier parfaitement enrobé)
- gain de place (épaisseur moindre à moment résistant égal)
- précision d'ensemble et des attentes
- aspect amélioré (plus de ragréage ni de recépage)
- étanchéité améliorée (en particulier en usage permanent)
- simplification des opérations de chantier

13

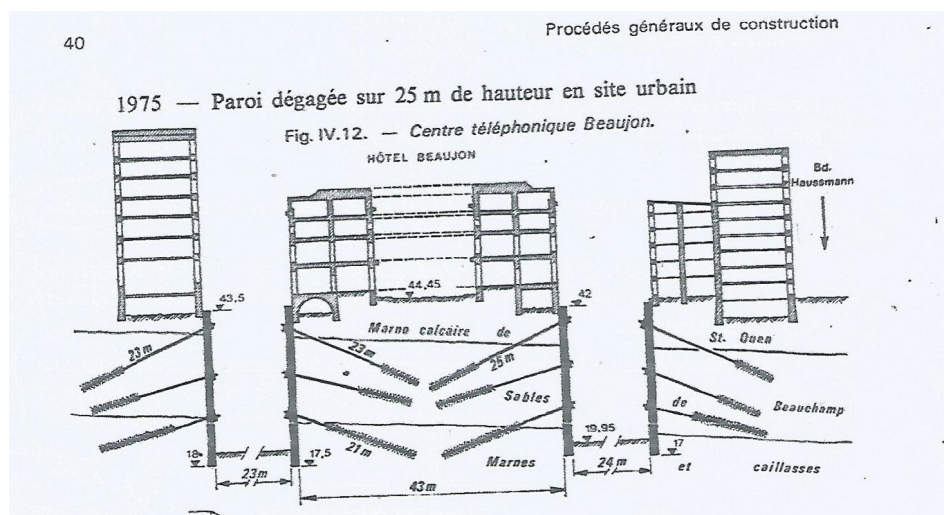
b) utilisation courante des parois préfabriquées lors des travaux de tranchées ouvertes en ville : réseaux routiers, voies ferrées, métros, canaux.

Le procédé est le suivant :

- réalisation depuis la surface des murs latéraux,
- coulage de la dalle reposant sur les murs
- poursuite des autres travaux en souterrain.

Les avantages de la méthode sont :

- emprise minimale et fractionnable
- rétablissement rapide de circulation de surface sur la dalle
- minimum de nuisance pour l'environnement



4.3 Les parois d'étanchéité

a) le procédé "paroi d'étanchéité" est le plus utilisé (par rapport à l'injection et les palplanches) pour réaliser les écrans d'étanchéité.

Divers types de technologies sont :

- la paroi à la bentonite (mélange de la chaux à l'état naturel avec la terre noire à prise rapide)

- la paroi en béton plastique
- la paroi en coulis (le coulis a un double avantage : consolidation et étanchéité)
- la paroi mince (0,1 à 0,25m d'épaisseur)

b) les applications les plus courantes portent sur :

- les murs de quai
- les écrans de barrage
- les canaux
- la protection des nappes
- la protection contre les pollutions d'hydrocarbures au droit du stockage, d'une raffinerie
- la protection contre les pollutions dues à des stockages de déchets (sels dissous)

14

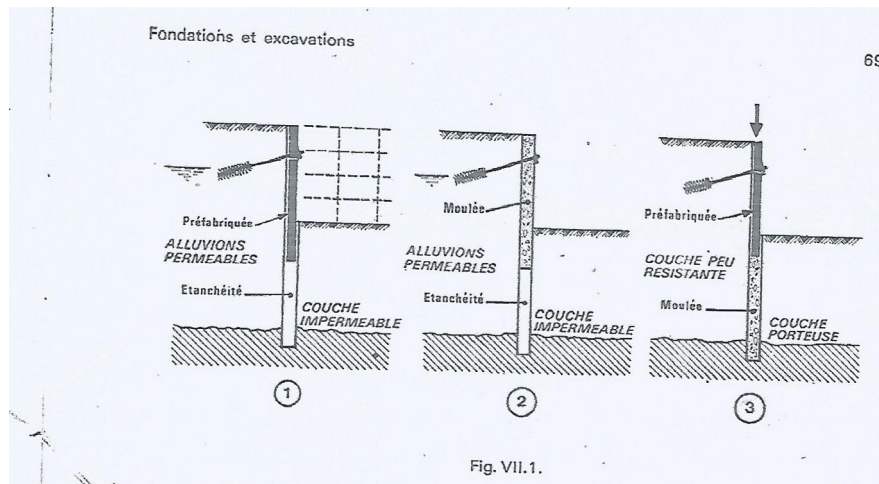
4.4 Les parois composites (à soutènement composés)

Ce sont -les parois composites "préfabriquée étanchéité"

"moulée-étanchéité"

"préfabriquée-moulée"

- L'idée de base consiste à faire, depuis la surface, avant **tout creusement**, une partie du soutènement : pieu, poteau moulée ou préfabriquée, qui assurera l'équilibre des efforts de **butée(en pied) et de poussée (tirants ou butons multiples)**.
- Ensuite, on creuse par tranches horizontales et on complète le soutènement **par pose des butons ou des tirants sur les appuis verticaux déjà en place** et par blindage des talus dégagés entre les appuis verticaux.



4.5 Les Outillages pour ériger les parois

- l'outil à benne comprend (outillage de forage)
- un engin porteur (grue à chenilles)
- un dispositif de sustentation et guidage de la benne (câbles)
- une benne

- du matériel annexe, une **station de préparation-régénération -stockage des boues ou coulis de forage** et de remplissage de la saignée.
- un outillage (grue) pour manipulation des cages d'armatures, des panneaux préfabriqués, tubes joints...

* Deux nouveaux outillages

- "**L'hydro fraise** " outil de forage animé par 3 moteurs hydrauliques "fond de trou" avec circulation inverse de boue. Une pelle mécanique porte et manipule le bâti-(2 moteurs entraînent les tambours et 1 moteur entraîne la pompe).
- "**La tone Boring**" outil de forage animé par des moteurs électriques immergés avec circulation inverse de la boue. Elle convient uniquement pour les terrains tendres.

15

5. LES PALPLANCHES

5.1 Comparaison d'emploi technique parois/palplanches

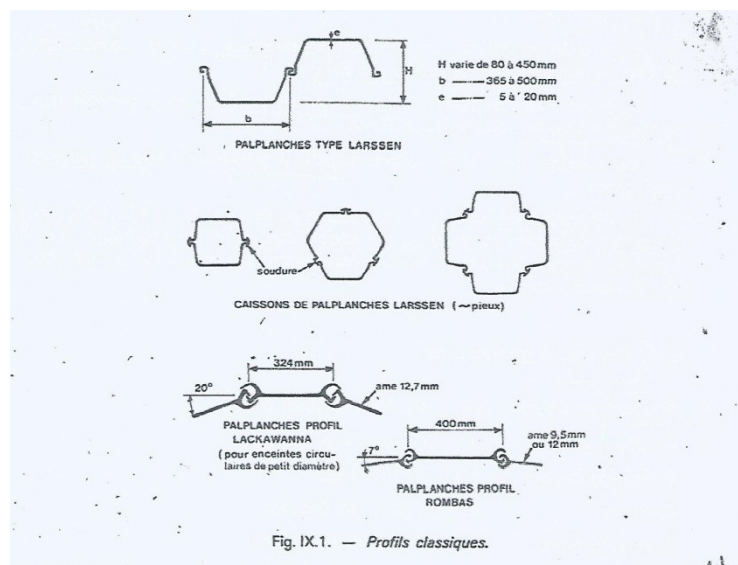
Le facteur qui détermine l'emploi de l'un ou de l'autre de 2 procédés (parois/palplanches) est la **mise en œuvre**.

La mise en fiche des palplanches s'accompagne nuisances (**bruits, vibrations, chocs, déformations**) qui s'accommodent mal d'un environnement urbain.

- Les parois sont plus indiquées en sites urbains et terrestres
- Les palplanches sont indiquées en sites fluviaux et maritimes

5.2 Structure et fabrication des palplanches

- On peut encore trouver des palplanches en bois dans certains pays tropicaux.
- Les palplanches en B.A, lourdes et fragiles trouvent quelques applications en protection des berges ou para fouilles dans la navigation intérieure.
- En général, les palplanches sont en acier et leurs profils sont nombreux. On distingue les palplanches plates et les palplanches à module d'inertie avec les quelles on réalise, par soudure des caissons de formes multiples.



- La mise en œuvre des palplanches peut se faire de trois façons :

- * par battage classique (percussion par moutons et marteaux)
- * par modification des caractéristiques du sol (vibration ou lançage)
- * par forage (association parois/palplanches)

5.3 Exemples d'applications

a) **En site fluvial**, la réalisation d'une "pile de pont" se fait à l'intérieur d'une enceinte rectangulaire "étanche" constituée de palplanches. La nappe à l'intérieur est rabattue par pompage ; cette méthode exige de s'assurer que la fiche est suffisante pour éviter le phénomène de **renard**.

16

Une deuxième méthode fait appel au coulage sous l'eau d'une galette d'étanchéité en béton. Dans ce cas, l'épaisseur de la galette est fixée de manière à contenir **les sous pressions**.

Une troisième méthode consiste à réaliser un fond étanche artificiel **par injection**.

b) En site maritime, le cas courant est la construction d'un mur de quai en palplanches, en rideau plan simple soutènement ou **en batardeau** pour une grande fouille ou une grande enceinte en site portuaire.

c) Lors de la construction d'un barrage ou lorsque le fond rocheux ne permet pas la mise en fiche des palplanches, on **prévoit des batardeaux** en cellules de palplanches (**des gabions circulaires raccordés**)

d) **En site urbain**, les palplanches sont utilisées en voirie pour des soutènements étanches provisoires lors des terrassements.

6. Pieux-puits-appuis

Le pieu a une section circulaire.

Les puits sont des pieux de grand diamètre ($\varnothing \geq 1\text{m}$)

Les appuis sont des pieux de formes diverses : rectangulaire (barrette), T, H, L

6.1 On distingue :

- pieu battu sur terrain refoulé (mise en place par battage jusqu'à refus)
- pieu foré sur terrain excavé (mise par tubage)

Les malfaçons de pieux ou appuis proviennent de :

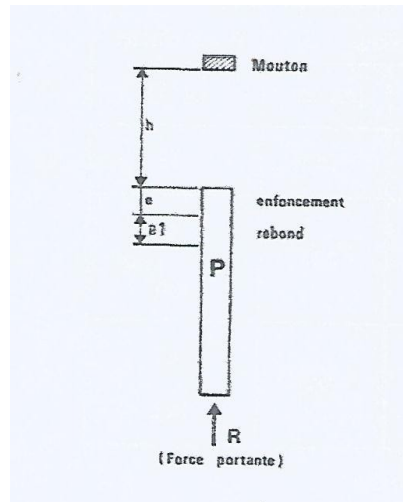
- forage et bétonnage mal adaptés aux conditions du terrain
- difficultés non remontées pour aller vite
- équipes de mauvaise qualité (personnel ou ouvriers)

D'où il faut prévoir un contrôle des pieux par des méthodes non destructives (ultrason, radiographie, etc.) pendant et après exécution.

6.2 Calcul des pieux (mobilisation de la force portante par la longueur d'ancrage)

On distingue : - **pieux "colonnes"** ; **mobilisation de force portante par la base** (ancrée sur la roche dure)

-pieux "flottants" : la force portante est mobilisée par frottement latéral en terrain homogène.



17

Pieu battu

Formule générale de CUMMINGS

$$Mh = (R - M - P)e + R(e_1/2) + MPh(1 - k^2)/(M + P)$$

$K=0$, le choc est mou

$K=1$, le choc est élastique

Energie de battage = Energie utile + pertes élastiques + chocs

Les Hollandais considèrent que $k=0$ et cela entraîne que $R = M^2h / (M + P)e$ et prennent un coefficient de sécurité ≥ 6 .

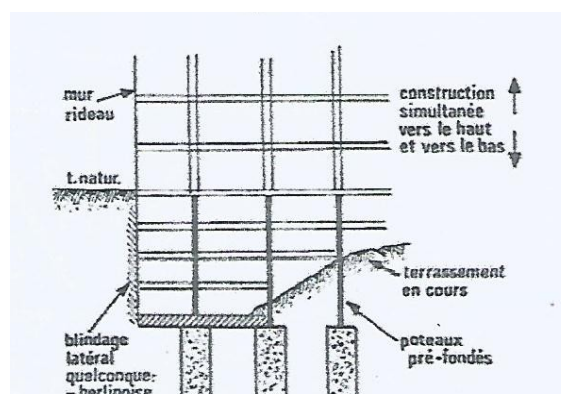
Pieu foré : formules basées sur les caractéristiques du sol (cohésion du sol, angle de frottement, pression limite, pression de fluage,...) il s'agit des calculs à la rupture pour lesquels on applique des coefficients de sécurité 3 à 4.

Il faut ajouter un dimensionnement interne des pieux en fonction des N, M (voir B.A avec un taux d'armatures $\leq 1\%$)

- Appuis résistants uniquement à des efforts verticaux (N)
- Appuis résistants aux N et M

6.3 Exemples d'application des pieux et appuis

a) Poteaux pré fondés "pour la construction avec sous sol dont on veut différer la réalisation de certains niveaux. Ce procédé consiste réaliser depuis le terrain naturel en une seule opération (forage, équipement, bétonnage), l'appui profond enterré et le poteau correspondant de la structure en sous sol.

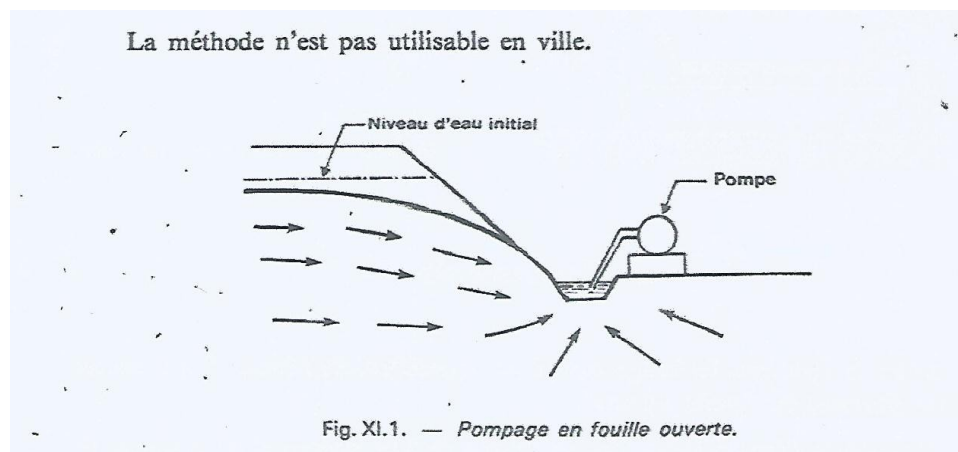


b) Pieux jointifs (pieux tubés) et pieux sécants (éléments pré fabriqués) rideau des pieux jointifs

c) Fondation off-shore en pieux

- semelles immergées (en pieux métalliques battus, en pieux forés et moulés, en pieux en B.A à tube perdu vibrofoncé et battu)
- semelles apparentes (pieux en caissons de palplanches vibrofoncés et battus, pieux forés et moulés)
- superstructure apparente (pieux métalliques battus et pieux métalliques scellés par injection.

7. LES Rabattements de nappes



7.1 Un rabattement selon les règles de l'art assure 3 conditions :

1. non entraînement des fines (précaution sur le tassement du terrain environnant)
2. fond de fouille sec
3. fond et talus stables

Pour ce faire, on ceinture la fouille partiellement ou totalement au moyen de forage équipés par les quels on extrait de l'eau (par pompage)

7.2 Les paramètres nécessaires à l'établissement d'un projet de dispositif de rabattement de nappe sont de 2 ordres :

1. les données inhérentes à la construction du puits filtrant : forme et dimensions de la fouille ,niveau de fond, talus, environnement, circulation et durée d'exécution des travaux

2. les données naturelles : épaisseur(H) et perméabilité(K) des couches aquifères, coupe stratigraphique, niveau de la nappe et ses fluctuations naturelles. Les alimentations particulières (mer, lac, rivière) et les pompages voisins.

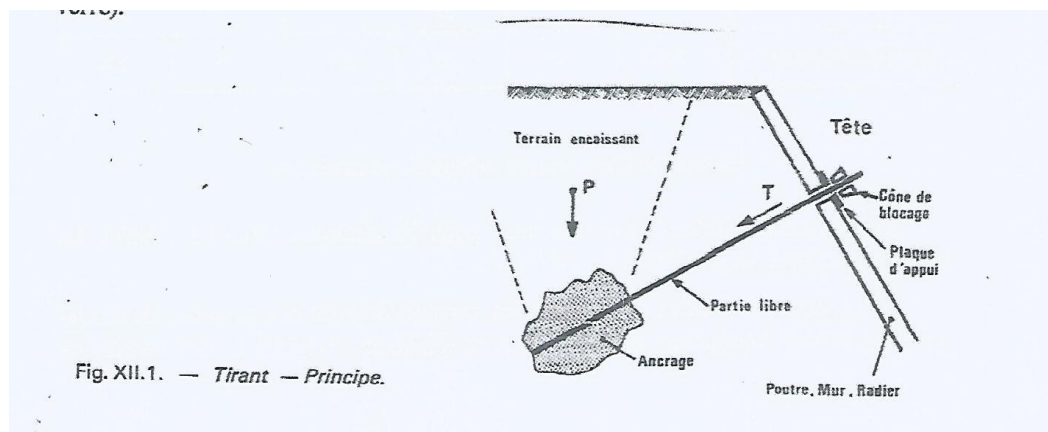
- L'équipement (**crépine + tube**) est généralement "métallique". Il peut être en "plastique" en cas des eaux agressives.
- Le matériau constituant le massif filtrant est un gravillon dont la granulométrie est fonction du terrain encaissant.

19

- Le pompage peut être fait de plusieurs façons :

- * mise sous vide (faible débit unitaire)
- * hydro-éjecteur (robuste et économique, mais faible débit)
- * pompe de surface aspirante (hauteur de rabattement limitée)
- * pompe électrique immergée ($\varnothing \leq 350\text{mm}$ $Q=50$ à $400\text{m}^3/\text{h}$ et 30 à 100m de refoulement).

8. LES tirants et ancrages



Un tirant ou un ancrage, destiné à reprendre les efforts de **traction**, est constitué de 3 parties :

- * **partie passive, zone d'ancrage ou terrain en caisson**
- * **partie libre**
- * **partie active ou tête**

La tête comprend une plaque d'appui et des cônes de blocage de l'armature en acier constituant le tirant.

- la mise en œuvre d'un tirant se déroule en plusieurs phases :

- * la perforation d'un forage par outillage rotatif
- * la mise en place de l'armature (barre, fils parallèles, torons) à l'aide d'une grue, d'un enrouleur ou par une équipe de 10 à 15 hommes
- * la mise en contrainte effectuée par un vérin s'appuyant sur la structure
- * la protection contre la corrosion par gainage ; tubage ou injection des produits anticorrosifs.

- pour le dimensionnement, il faut déterminer
 - * la section d'acier
 - * la longueur d'ancrage
 - * la longueur de la partie libre

Les tirants et les ancrages trouvent leurs applications :

- en soutènement classique (paroi moulée ; paroi préfabriquée)
- pylônes et constructions de grandes hauteurs
- épingles (tirants passifs de faible capacité)
- ancrage d'un radier (tirants actifs)
- su élévation de barrages (tirants actifs à usage définitif)

20

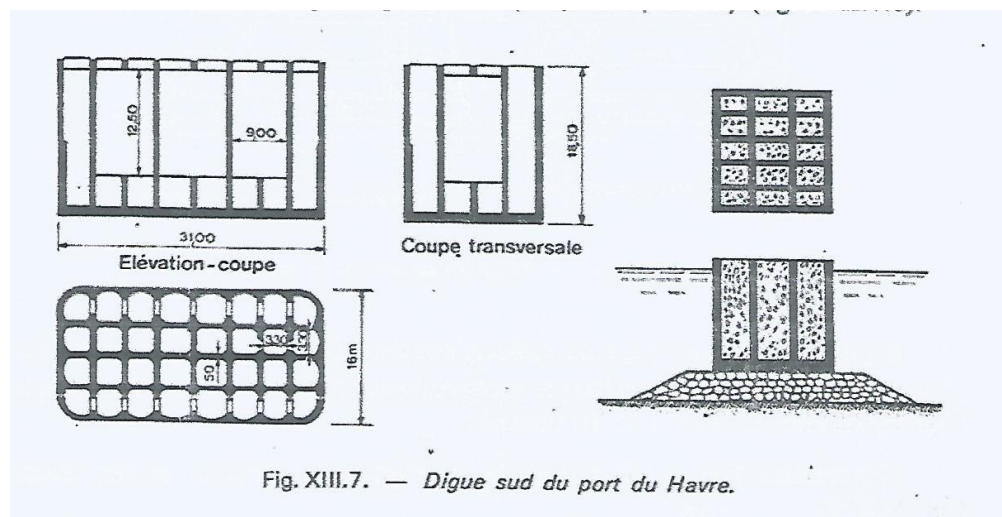
9. LES CAISSONS

- procédé classique utilisé pour les fondations profondes en site aquatique
- 2 techniques :
 - * moyen permettant aux hommes de travailler sous la nappe, dans ce cas, le caisson peut être perdu ou récupéré (caisson à air comprimé)
 - * caisson perdu constituant partie ou totalité de la fondation proprement dite

Cas de .caisson de palplanches

.caisson havé (excavé, moulé sur site)

.caisson immergé



II^{ème} PARTIE : PROCÉDES DE CONSTRUCTION DES PONTS EN BETON ARME

1. Classification des ponts suivant leur procédé de construction

1.1 5 familles de ponts suivant leur procédé de construction

1° Les ponts construits sur échafaudage au sol ou sur cintres porteurs

2° Les ponts à poutres préfabriquées lancées

3° Les ponts poussés

4° Les ponts construits sur cintres autoporteurs et auto lanceurs (combinaison de 2 et 3)

5° Les ponts construits par encorbellements successifs

1.2 D'autres procédés particuliers sont :

- la mise en place des tabliers par rotation

- et la construction des tabliers à l'avancement par haubanage provisoire.

1.3 Construction sur échafaudage au sol ou sur cintres directement appuyé sur le sol.

.C'est une méthode de construction la plus simple et la plus économique lorsque le tablier est situé à une hauteur au-dessus d'un sol de bonne portance.

.Le tablier est construit par phases successives pour les raisons suivantes :

* la durée de bétonnage est inférieure à 10 heures pour ne pas multiplier des équipes et limiter le volume à bétonner.

* le phasage permet un meilleur réemploi des coffrages et des échafaudages (le phasage permet la construction travée par travée).

* ce procédé devient coûteux et onéreux si le tablier franchit une vallée profonde ou une rivière.

1.4 Mise en place des tabliers par déplacement (tabliers réalisés ailleurs de son emplacement définitif) La mise en place se fait de 2 côtés

- une transformation horizontale, longitudinalement, poussage du tablier suivant son axe longitudinal, transversalement, ripage des poutres préfabriquées à partir d'une passerelle de bétonnage ,une passerelle de lancement .
- une translation verticale ,le tablier est descendu de sa cale vers appuis par vérinage.
- une rotation du tablier autour de ses appuis autour d'une pile qui supporte tout le tablier au cours de l'opération (**inconvénient de cette technologie**).Cependant la méthode est particulièrement bien adaptée pour le franchissement des rivières navigables et des voies ferrées.

1.5 Construction des tabliers à l'avancement par haubanage provisoire (se fait d'une extrémité à l'autre : ponts de grande portée)

- Elle consiste à effectuer le montage du tablier de manière continue d'une extrémité de l'ouvrage à l'autre, en exécutant les voussoirs par encorbellement du même côté de divers piles.
- on déplace le mât supportant les haubans (comme dans le cas de construction par poussage) et les haubans d'une pile à l'autre , au lieu de déplacer l'ensemble du tablier ,à l'aide d'une potence orientable .

2. La construction des ponts par poutres préfabriquées lancées

2.1 Principe de construction

Ce procédé consiste à réaliser le tablier au moyen des poutres préfabriquées , mises en place sur leurs appuis définitifs avec des dispositifs de manutention et de pose appropriés, et reliés entre elles dans le sens transversal par un hourdis sous chaussée et des entretoises

*l'ouvrage ainsi réalisé comporte :

- des travées isostatiques indépendantes séparées par des joints de dilatation
- ou des travées isostatiques dont le hourdis sous chaussée est rendu continu par l'intermédiaire des dalettes souples dans le but d'améliorer le confort des usagers en supprimant les joints de dilatation (affelage des travées) ,

*Deux types d'ouvrage ressortent de cette méthode de construction :

- .les ouvrages autoroutiers (passages supérieurs et inférieurs)
- .et les viaducs en béton précontraint par post tension

2.2 Domaines d'application, avantages et inconvénients du procédé

-le domaine d'emploi des ponts à poutres préfabriquées lancées d'étend de 25 à 50m de portée.

Au delà de 50m, **il faut des moyens de manutention puissants et coûteux.**

Pour des raisons économiques le nombre minimal des poutres égal 12.

-les avantages principaux des ouvrages à poutres préfabriquées lancées **résident dans la suppression des cintres et dans la rapidité d'exécution.** La répétitivité, souvent à une échelle importante d'éléments identiques (les poutres), permettent une certaine industrialisation, est aussi la garantie d'une meilleure qualité et une source d'économie au niveau de la main-d'œuvre.

-les inconvénients sont essentiellement la multiplicité des joints de dilatation et l'incertitude de déformation différée des poutres par fluage du béton et relaxation des armatures des armatures de précontrainte.

Ces déformations entraînent dans le temps un relèvement du profil en long de la chaussée au voisinage de la clé de chaque travée qui est néfaste à la sécurité et au confort des usagers.

2.3 Préfabrication des poutres en atelier ou en usine

-une installation type se compose de :

- * un atelier de fabrication des poutres
- * une zone d'assemblage des armatures et des câbles de précontrainte
- * une zone de construction des plaques d'about
- * un parc de stockage des poutres
- * une centrale à béton et des engins de manutention (grue, portique)

2.4 Transport et mise en place des poutres préfabriquées (assemblées en usine éventuellement)

- par engins autonomes terrestre ou nautique ;grue, derricks, bigues ;pontons
- mis en place des poutres par levage avec déplacement vertical le long des piles ou avec mât et Contrepoids
- mise en place des poutres par ripage à partir d'une passerelle de bétonnage ou une passerelle de lancement(ou une poutre de lancement métallique)
- lancement discontinu par travées successives
- lancement continu de toutes les poutres préfabriquées.

3.La construction des ponts par poussage

3.1Principe de construction

Ce procédé consiste à construire le tablier par des éléments successifs sur une aire située à l'arrière d'une des culées et orienté e suivant l'axe de l'ouvrage ,puis à l'amener dans sa position définitive en lui faisant subir une translation longitudinale.

*Le tablier est généralement réalisé par des éléments bétonnés en place ,dont la longueur est conditionnée par des considérations de retrait de béton et d'amortissement des coffrages.

Les éléments peuvent être fabriqués en un endroit différent .Dans tous les cas ,les éléments sont assemblés par une précontrainte provisoire, déterminée de façon à éviter l'apparition des contraintes de traction sous l'effet du poids propre lors des opérations de lancement puis au fur et à mesure du bétonnage ou de la mise en place des éléments ,le tablier est placé par glissement sur les piles et culées ,grâce à l'action des vérins fixés sur des appuis .Selon, on tire ou on pousse sur le tablier.

3.2 Domaines d'emploi-Avantages et Inconvénients du procédé.

-la technique de "poussage" est limitée aux ouvrages dont la géométrie est superposable à elle - même par déplacements et , c.à.d aux tabliers de hauteur constante et à courbure constante, la portée courante varie de 40 à 80m.

-Les avantages du procédé sont :

- *la suppression des cintres et échafaudages en libérant totalement l'espace situé au-dessus de l'ouvrage .On évite le risque de chute du matériel divers en site urbain et la réduction des gabarits routiers, ferroviaires ou de navigation,
- *l'utilisation d'un matériel de lancement léger et réutilisable (économie)
- *la construction du tablier sur une aire facilement accessible avec répétition d'opérations identiques permettant une meilleure organisation du travail et plus de sécurité et qualité,
- *la préfabrication des poutres est simplifiée du fait que le moule demeure à un poste fixe
- * la rapidité d'exécution due à la possibilité de construire simultanément les appuis et le tablier et de réaliser les éléments de grande longueur.

-Les inconvénients du poussage sont :

- *la nécessité de disposer en arrière des culées ou de l'une d'entre elles , d'une zone de longueur suffisante (=au moins la portée d'une travée) pour permettre la construction des différents éléments.
- *la mise en œuvre d'une précontrainte provisoire dont une partie est gaspillée.

L'imposition au niveau du chantier d'un respect strict des tolérances d'exécution pour l'intrados du tablier et un contrôle rigoureux des phases du poussage (vérifier la déformation des piles et du guidage latéral, mesurer l'effort de translation...)

*les opérations de poussage demandent une grande vigilance et une excellente coordination entre le bureau d'études du projet et l'équipe de construction.

3.3 Le matériel de poussage

- un dispositif de glissement
- un dispositif de translation
- un dispositif gde guidage en plan
- un avant bec d'extrémité
- un dispositif de haubanage à tensions variables
- des dispositifs : dispositif de freinage et de retenue du tablier
- dispositif de stabilisation des piles

4. La construction des ponts sur cintres auto lanceurs

4.1 Principe de construction

Ce procédé consiste à construire le tablier sur un cintre métallique autoporteur en s'appuyant sur les appuis définitifs de l'ouvrage, d'où son nom de cintre auto lanceur.

- le tablier est généralement bétonné sur ce cintre par tronçons (cintre de bétonnage), mais peut exceptionnellement être exécuté par assemblage d'éléments préfabriqués (cintre d'assemblage)
- les cintres auto lanceurs sont constitués des poutres porteuses longitudinales et un platelage supportant les coffrages ou les éléments préfabriqués.

Il peut s'agir de cintre à poutres supérieures ou cintre à poutres inférieures selon la position relative des poutres porteuses et du platelage.

Les poutres porteuses peuvent être à âme pleine ou triangulée (éléments assemblés par des boulons HR démontables et réemployables) ce qui est un avantage. H.R = haute résistance

- les cintres auto lanceurs sont généralement munis d'avant bec et parfois d'un arrière bec destinés à faciliter leur lancement.

4.2 Domaines d'emploi-Avantages et Inconvénients du procédé.

- portées optimales pour l'emploi des cintres auto lanceurs sont compris entre 40 et 50m.

Ce procédé s'applique économiquement aux ouvrages rectilignes de grande longueur et généralement à section constante.

- les avantages de la construction sur cintres auto lanceurs sont :

- *la suppression des échafaudages avec appuis au sol

- *facilité de construction du tablier sur platelage accessible à partir des travées déjà réalisées avec répétition d'opérations identiques.

- *rapidité d'exécution

L'inconvénient majeur réside dans l'important investissement en matériel , les cintres auto lanceurs étant des engins lourds et coûteux .

Les vérins ;les treillis et monorails sont nécessaires alors que le réemploi d'un cintre est aléatoire suite à la déformation des cintres de bétonnage .

4.3 Le cycle de construction d'un cintre de bétonnage (construction d'une travée)

- mise en tension des armatures de précontrainte et décintrement
- lancement du cintre et réglage des coffrages,
- ferraillage câblage et bétonnage (hourdis inférieur, puis âme, enfin hourdis supérieur)
- mise en tension des armatures de précontrainte (utilisation d'une plaque d'about préfabriquée)

*Avec un cintre d'assemblage, la cadence de fabrication est d'un voussoir par jour et par cellule.

Voussoir= tranche de pont préfabriquée et prête pour le montage

5. La Construction des ponts par encorbellements successifs

5.1 Principe de construction

Ce procédé de construction consiste à construire le tablier d'un pont à l'avancement à partir de ses appuis par tranches successives construites par encorbellement par rapport aux précédents voussoirs , en faisant supporter à ces derniers le poids propre des tranches en construction et le cas échéant celui des coffrages ou des appareils permettant leur exécution. Chaque tranche, appelée couramment "voussoir" est solidarisée à la précédente dès qu'elle a atteint une certaine résistance suffisante. Elle devient autoporteuse et sert de base de départ pour une nouvelle avancée.

-les voussoirs peuvent être :

.bétonnés en place dans les équipages mobiles servant de coffrages

.préfabriqués, transportés et mis en place au moyen des dispositifs appropriés

5.2 Domaines d'emploi-Avantages et Inconvénients du procédé

L'encorbellement couvre les portées optimales de 70 à 90m

Les principaux avantages de l'encorbellement sont :

- 1.la suppression des cintres et échafaudages libérant ainsi l'espace situé en dessous de l'ouvrage.

=> Procédé particulièrement adapté aux conditions locales suivantes :

. ouvrages comportant des piles hautes et franchissant des vallées larges et profondes

(Cintres onéreux)

.rivières à crues violentes et soudaines (cintres dangereux)

.nécessité de dégager sur la voie franchie un gabarit de circulation ou de navigation

pendant la construction (cintre gênant)

2. réduction et meilleure utilisation des coffrages limités à la longueur d'un voussoir
3. augmentation du rendement de la main-d'œuvre due à la mécanisation des tôles à l'intérieur d'un cycle répétitif
4. souplesse d'exécution liée à la possibilité d'accélérer la construction en multipliant le nombre des bases de départ.
5. rapidité de construction des voussoirs préfabriqués

Les inconvénients du procédé :

Le procédé est discontinu c.à.d. la construction de chaque fléau est indépendante de la partie du tablier déjà réalisé => la multiplicité des joints de dilatation, fragilité des articulations-verrou qui

sont des organes délicats, introduction d'une cassure dans le profil en long de la chaussée

(Déformations différées)

5.3 Méthode de pose des voussoirs préfabriqués

-le transport par terre ou par eau des voussoirs et leur mise en place à l'aide d'un dispositif

Autonome (grue, bigue,..) indépendant du tablier,

-le transport par terre ou par eau des voussoirs et leur mis en place à l'aide d'un équipage mobile de levage porté par le tablier lui-même.

- le transport par terre ou par eau des voussoirs déjà construits et leur mis en place à l'aide d'une poutre de lancement.

5.4 Applications variantes des ponts construits par encorbellements successifs (selon les schémas statiques)

-portiques avec articulation en clés des travées

-portiques avec travées suspendue en clé

-poutres et portiques continus

-ponts à haubans

Les ponts à béquille et en arcs

