

07. LES APPUIS DE PONTS - PILES ET CULEES

La conception des appuis des ponts ne peut pas être dissociée de la conception de tablier. On distingue les appuis d'extrémités que sont les culées, qui en plus de leur rôle de soutien du tablier, constituent la jonction entre le terrain naturel et l'ouvrage, des piles, qui sont les appuis intermédiaires dont le rôle se limite à transmettre les efforts apportés par le tablier aux fondations.

Nous nous limiterons ici à la description des appuis, piles et culées, des ouvrages les plus courants, en excluant les appuis très spéciaux tels que les pylônes de ponts à haubans, les massifs d'ancrages de ponts suspendus, etc...

7.1 LES CULEES

L'implantation des culées est un point important dans un projet, puisqu'elle conditionne la longueur totale de l'ouvrage. Une fois les culées implantées, il est possible de commencer à ébaucher les premières solutions en implantant les appuis intermédiaires et en dessinant le tablier.

7.1.1 Fonction des culées

La fonction première d'une culée est sa fonction mécanique qui consiste à transmettre les efforts au sol de fondation tout en limitant les déplacements tant horizontaux que verticaux.

Une bonne conception nécessite de bien répartir les efforts entre les différents éléments de la culée elle-même et entre les différents éléments de sa fondation.

Les efforts horizontaux sont apportés d'une part par le tablier, par l'intermédiaire des appareils d'appuis. Ces efforts sont généralement assez faibles. Par contre, les efforts horizontaux engendrés par la poussée des terres peuvent être très importants et il est impératif de limiter les déplacements horizontaux pour éviter de dégrader les appareils d'appuis, les joints de chaussée et le mur garde-grève.

Il apparaît ici l'importance de la connaissance des données géotechniques du sol de fondation dès les premiers stades de l'élaboration du projet.

Outre cette fonction mécanique, la culée doit permettre un accès au tablier, notamment dans les cas des poutres caissons, et également permettre la visite des appareils d'appuis.

7.1.2 Dimensionnement des têtes de culées

La tête de culée est composée *d'un sommier d'appui* sur lequel reposent les appareils d'appuis et d'un *mur garde-grève* en arrière du tablier.

Le sommier d'appui reçoit l'about du tablier. Il doit permettre de disposer les appareils d'appuis, ce qui est évident, et également de mettre en place des vérins hydrauliques pour permettre le soulèvement du tablier pour permettre de changer les appareils d'appui, dont la durée de vie est moindre que celle du tablier.

La dimension minimale du sommier est la somme :

De la distance du nu intérieur des appareils d'appui au nu du sommier qui ne doit pas descendre en dessous de 10 cm pour éviter le fendage du coin. Cette distance peut être portée à 20 cm lorsque les descentes de charge sont importantes.

De la distance de l'about au nu intérieur des appareils d'appuis (de 50 cm à 80 cm en général).

De la distance entre l'about et le mur garde-grève qui est réduite au strict minimum dans le cas des ponts dalles (quelques centimètres) et qui est couramment de l'ordre de 50 à 60 cm dans le cas des grands ouvrages, pour permettre l'accès à l'arrière du tablier.

Cette distance peut être fortement augmentée dans le cas où l'on prévoit la possibilité de démonter et de remplacer une partie des armatures de précontrainte. Pour permettre d'effectuer les mises en tension, compte tenu de l'encombrement des vérins, on réalise une chambre de tirage, sorte de culée creuse en arrière du tablier. Une telle possibilité est assez courante dans le cas des grands ouvrages en béton précontraint du type caisson (ponts poussés ou ponts construits par encorbellements successifs).

Le sommier d'appui présente une pente de **2 à 3%** vers le mur garde-grève, de manière à recueillir les eaux dans une cunette au pied du garde-grève.

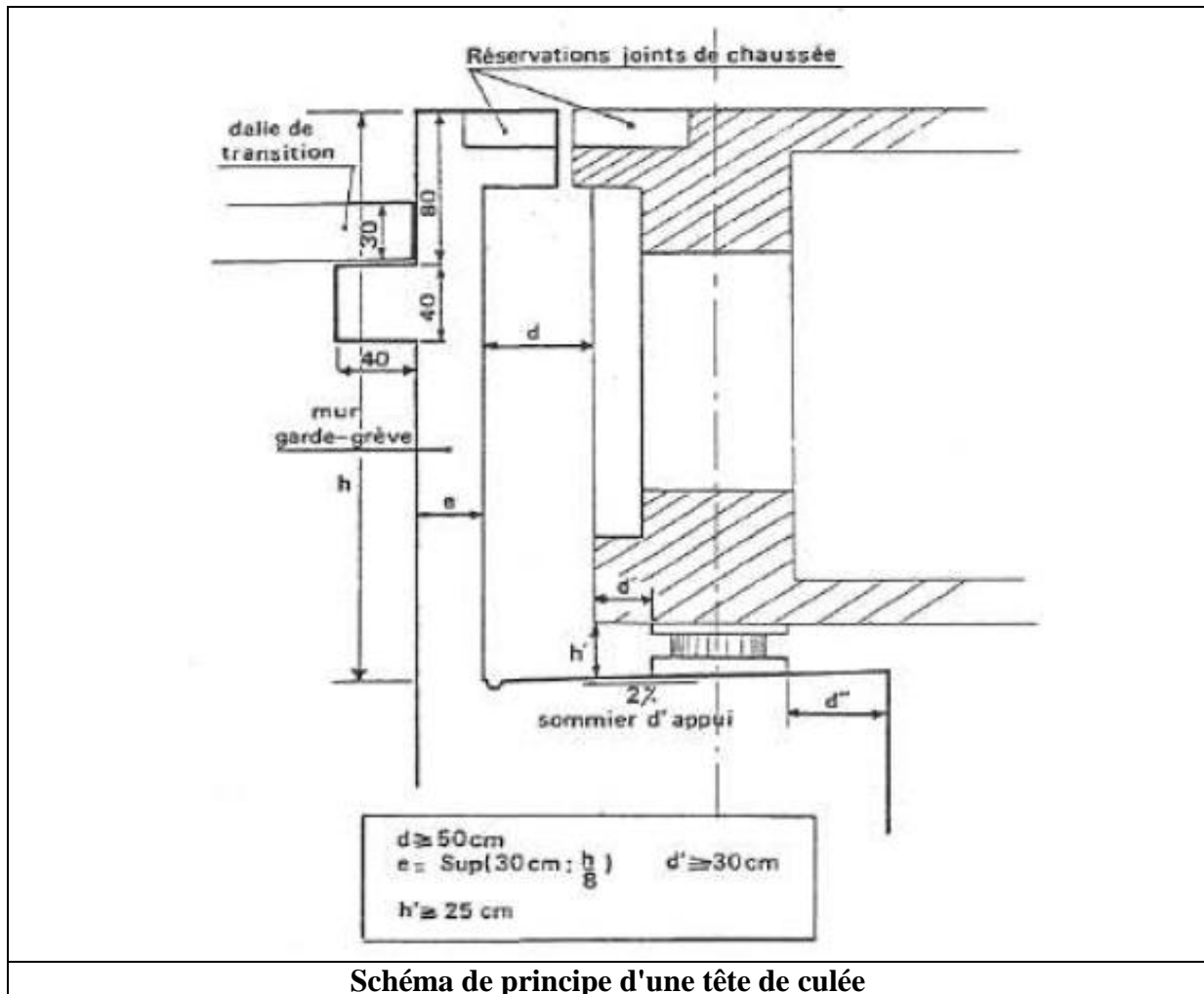
Le mur garde-grève a pour fonction de séparer le remblai d'accès du tablier lui-même. Il s'agit d'un voile en béton armé dont l'épaisseur est fonction de la hauteur h :

$$e = \max (0,30 \text{ m}; h/8)$$

En partie supérieure, une console courte, appelée *corbeau*, permet de recevoir la réservation du joint de chaussée, du côté du tablier. A l'arrière, un autre *corbeau* permet l'appui de la dalle

de transition, par l'intermédiaire de goujons métalliques, et dont le rôle est d'atténuer la jonction entre un matériau souple, le remblai, et un matériau rigide, le béton du tablier.

La tête de culée est complétée par des murs en retour suspendus à l'arrière du mur garde-grève qui retiennent les terres situées au-dessus du sommier d'appui. La corniche est en général prolongée sur ces murs. A l'avant de petits murs-caches masquent les extrémités du sommier d'appui



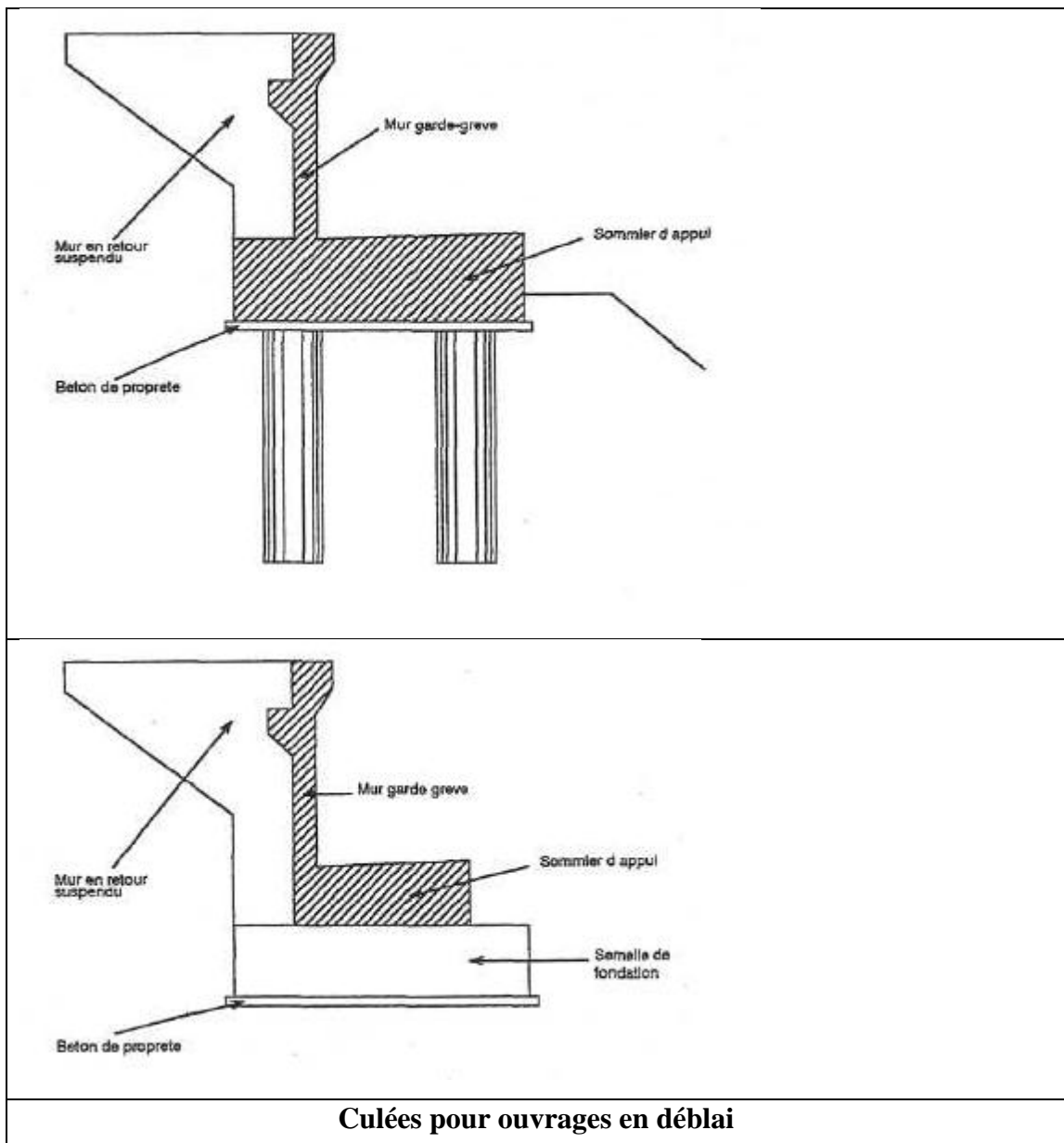
7.1.3 Les culées enterrées

On appelle culée enterrée une culée dont la structure porteuse est noyée dans le remblai d'accès de l'ouvrage. Elle assure essentiellement une fonction porteuse car elle est relativement peu sollicitée par des efforts horizontaux de poussée des terres.

a) Culées sur déblai

Dans le cas d'un ouvrage en déblai, la tête de culée est implantée au voisinage de la crête de talus. Elle est fondée directement en tête de talus lorsque celui-ci présente de bonnes caractéristiques mécaniques (terrain rocheux), ce qui constitue la solution la plus économique.

Il convient toutefois de s'assurer de la stabilité globale de la tête de talus à un glissement d'ensemble. Lorsqu'en surface le terrain ne présente pas les caractéristiques mécaniques suffisantes, la culée est fondée le plus souvent *sur deux files de pieux* forés ou battus. Une solution reposant sur une seule file de pieux est envisageable lorsque les descentes de charges sont modérées et si les déplacements horizontaux attendus sont faibles.



b) Culées sur remblai

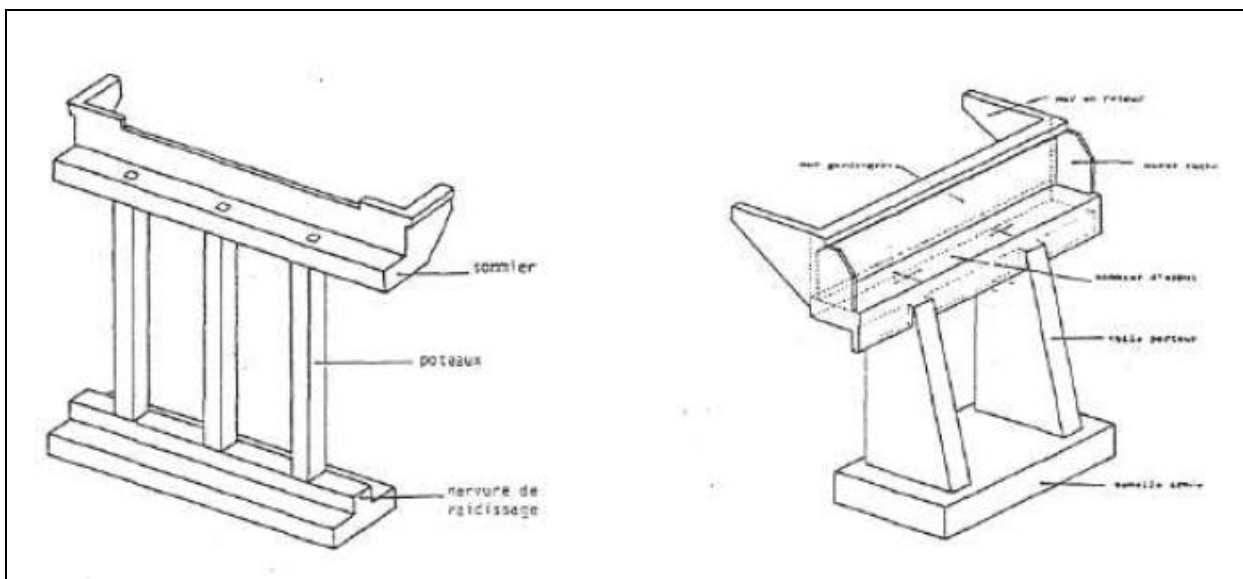
Dans le cas d'un *ouvrage en remblai*, il est rare que la capacité portante du remblai rapporté, même lorsqu'il a été réalisé suffisamment à l'avance, soit suffisante pour permettre de réaliser une fondation en tête de talus.

Si le sol présente une bonne capacité portante au niveau du terrain naturel on est amené à descendre à travers le remblai jusqu'à ce niveau et de s'y fonder superficiellement. Le sommier d'appui repose sur des éléments intermédiaires normalement au droit des appareils d'appuis, qui traversent le remblai et transmettent la descente de charge à la semelle de fondation. Ces éléments intermédiaires sont coffrés, ce qui oblige à remblayer après réalisation de la culée.

Dans le cas des petits ouvrages, (ponts dalles, PRAD, dalles nervurées), ces éléments intermédiaires sont de simples poteaux de section carrée ou circulaire qu'il est préférable de fonder ces poteaux sur une semelle commune, pour prévenir tout risque de tassements différentiels.

La largeur de la semelle ne descend pas en dessous de 1,50 m, pour des raisons de stabilité, dimension qu'il n'est nécessaire de renforcer que pour les culées dépassant 7 mètres.

Ce type de culée est parfois appelée **pile-culée**.



<i>Pile culée</i>	<i>Culée sur voiles rectangulaires</i>
-------------------	--

Lorsque les descentes de charges sont plus importantes, et que la hauteur de ces éléments porteurs atteint 8 à 9 mètres, on préfère une section rectangulaire s'élargissant vers la base. Ce dernier type de culée est employé pour les grands ouvrages.

Lorsque le sol en place est de mauvaise qualité sur une profondeur telle qu'il n'est pas économique de le purger, il convient de recourir à une fondation profonde sur pieux ou barrettes. Les pieux ou barrettes sont réalisés à travers le remblai et recevront directement le sommier d'appui : Il n'y a plus de colonnes ou de voiles intermédiaires. Dans ce cas, pour éviter le développement d'efforts parasites, il est nécessaire de pouvoir ériger le remblai suffisamment à l'avance pour qu'il puisse se mettre en place. De plus, du fait des risques liés à ces efforts parasites, il est déconseillé d'avoir recours à une fondation sur une seule file de pieux.

10.1.3.2 Eléments de dimensionnement des culées enterrées

L'épaisseur du sommier d'appui dépend du type de fondation, superficielle ou profonde et surtout du nombre d'appuis (voiles ou poteaux) et d'appareils d'appuis portés par le chevêtre et de leurs positions relatives.

Dans le cas des piles-culées d'ouvrages courants, cette épaisseur est de l'ordre de 0,60 m puisque le sommier est faiblement sollicité du fait que les éléments porteurs sont placés au droit des appareils d'appui. Les dimensions transversales des poteaux sont voisines de 0,50 m pour les poteaux carrés et de 0,60 m pour les poteaux circulaires. Ces dimensions, valables pour des hauteurs courantes de l'ordre de 5 m, doivent être augmentées proportionnellement à la hauteur pour des hauteurs plus importantes.

Dans le cas des culées sur voiles porteurs des grands ouvrages, cette épaisseur est plus importante, et dépend de la distance entre voiles et des descentes de charges. A titre d'ordre de grandeur, une épaisseur voisine du $\frac{1}{6}$ de la portée du sommier entre voiles constitue une bonne valeur de prédimensionnement et correspond à des épaisseurs de 0,60 m à 1,20 m.

Les voiles porteurs ont une largeur égale à celle du sommier en tête et s'élargissent à la base pour atteindre sensiblement la largeur de la semelle de fondation en pied. Le parement arrière

est généralement vertical et le parement avant est incliné, ce qui permet d'excentrer la réaction verticale et ainsi d'apporter un moment stabilisateur s'opposant aux moments de poussée horizontale des terres. L'épaisseur des voiles porteurs est voisine du huitième de leur hauteur, sans descendre en dessous de 0,60 m.

Dans le cas des culées fondées sur pieux, et comme nous l'avons vu dans le chapitre sur les fondations, le sommier d'appui joue le rôle de semelle de répartition et son épaisseur minimale est sensiblement égale à 1,2 fois le diamètre des pieux utilisés.

7.1.4 Les culées remblayées ou apparentes

Les culées remblayées encore appelées culées apparentes jouent le double rôle de soutènement et de structure porteuse. Le tablier de l'ouvrage s'appuie sur un sommier solidaire d'un mur de front massif qui soutient les terres du remblai. Elle est complétée par des murs en retour suspendus, qui sont préférables du fait de leur effet stabilisateur ou par des murs en ailes indépendants.

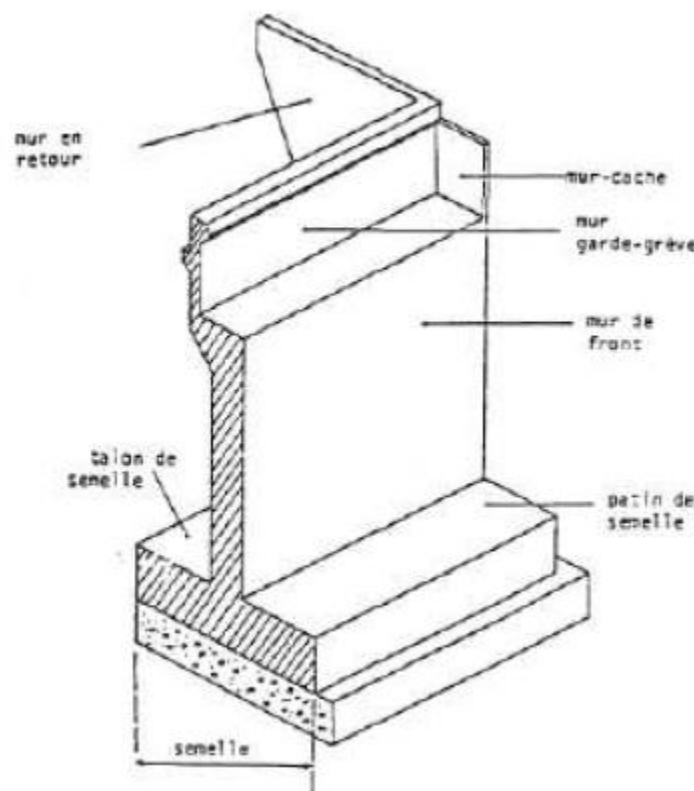


Schéma de principe d'une culée remblayée

Le mur de front est un voile de forte épaisseur (0,80 m à 1,20 m) qui présente une surlargeur au niveau du sommier d'appui, pour pouvoir recevoir l'about du tablier. On peut également envisager un voile plus mince renforcé par des contreforts à l'arrière, solution économique du point de vue de la consommation de matériaux, mais qui complique considérablement les coffrages et qui se justifie rarement.

Une telle culée est généralement fondée superficiellement, compte tenu des efforts horizontaux importants, ce qui limite son emploi au cas des bons sols. Dans tous les cas on ne pourra pas l'envisager si la hauteur du soutènement dépasse une dizaine de mètres.

Dans la pratique son emploi reste limité au cas où l'on souhaite limiter la longueur du tablier au strict nécessaire, ce qui peut être le cas lorsque l'emprise au sol est limitée. En règle générale, il est souvent plus économique de réaliser une culée remblayée malgré l'allongement du tablier qui découle de ce choix.

7.2 LES PILES

Une pile comporte deux éléments principaux qui sont le fût et le sommier d'appui. Le sommier d'appui, comme en ce qui concerne les culées doit permettre de recevoir les appareils d'appuis et des vérins nécessaires au soulèvement du tablier (transfert d'appuis ou changement des appareils d'appuis). Ses dimensions dépendent assez étroitement de la géométrie du tablier lui-même.

Le fût a pour rôle principal de transmettre les efforts horizontaux et verticaux apportés par le tablier jusqu'à la fondation. Le corps de pile peut être sollicité directement par des chocs de véhicules ou de bateaux.

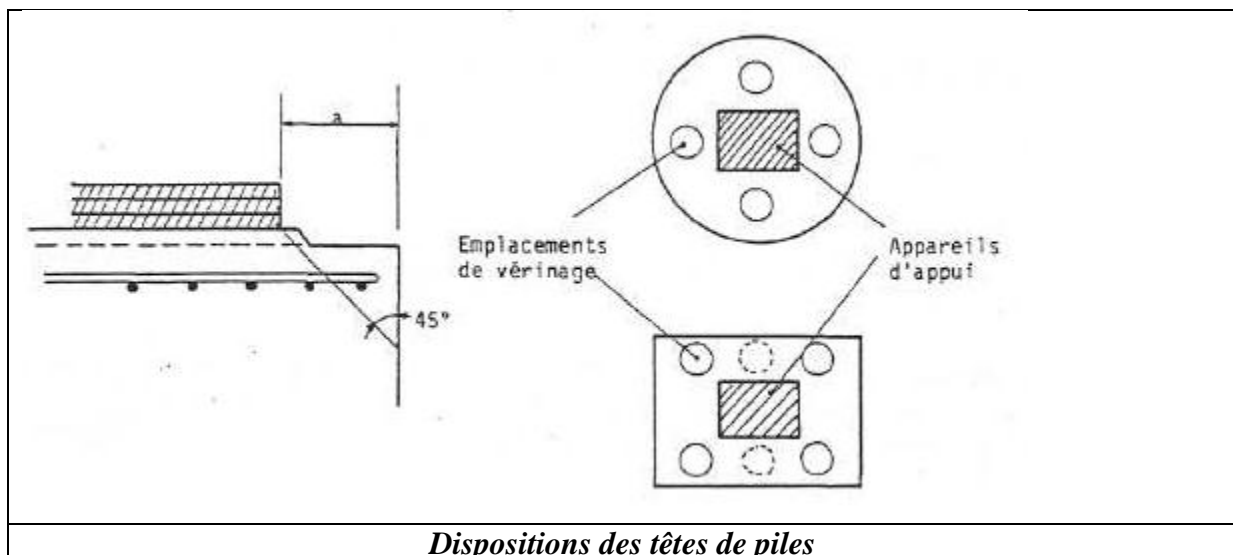
La conception des piles dépend de nombreux facteurs :

- Le type de tablier peut influencer sur les dimensions de la tête et du fût de pile.
- Le mode de construction du tablier peut imposer des formes particulières ou engendrer des efforts de construction que les appuis devront reprendre.
- Dans le cas de piles de grande hauteur l'effet des efforts horizontaux est accentué et des risques de flambement sont à prendre en compte.
- Des contraintes liées au site telles que des chocs de bateaux

7.2.1 Dispositions des têtes de piles

Le dimensionnement de la tête de pile doit permettre l'implantation des appareils d'appui définitifs, éventuellement des appareils d'appuis provisoires et des niches à vérins pour permettre le changement des appareils d'appuis ou le passage des appareils d'appuis provisoires aux appareils d'appuis définitifs. Dans tous les cas, on veillera à ce que le nu de l'appareil d'appui soit éloigné d'au moins 10 cm du nu de l'appui, pour éviter toute épaufrure de l'arête non armée de l'appui.

Dans le cas des ouvrages courants, les dimensions correspondantes sont relativement modestes (0,50 x 0,50 m).



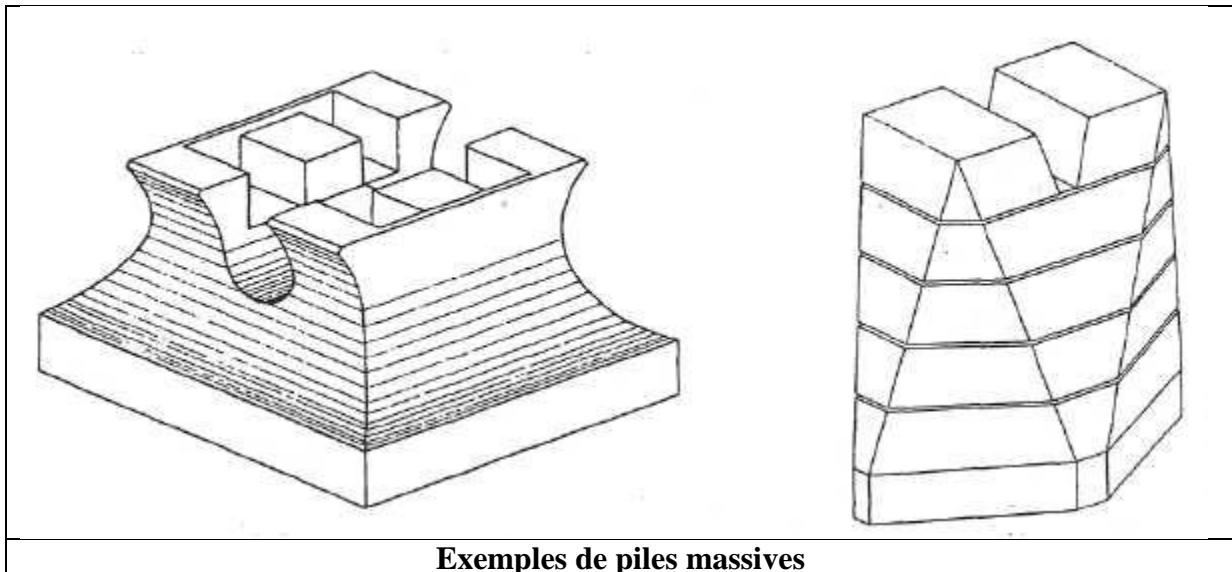
Dans le cas des grands ouvrages, ces dimensions sont à adapter aux dimensions des appareils d'appui, ce qui nécessite une connaissance de la descente de charge. Les dimensions résultant de l'implantation physique des appareils d'appui ou des vérins doivent être considérées comme des dimensions minimales qui pourront être augmentées si les piles sont de grande hauteur de façon à offrir une surface de travail plus confortable au personnel d'exécution.

7.2.2 Aspects particuliers

a) Piles massives

Lorsque les piles peuvent être soumises à des chocs de bateaux, il est nécessaire de concevoir des piles massives afin de limiter les efforts locaux dus aux chocs. Dans le cas d'appuis en

rivière, la forme des fûts de piles doit être profilée pour favoriser l'écoulement des eaux afin de limiter l'affouillement local.



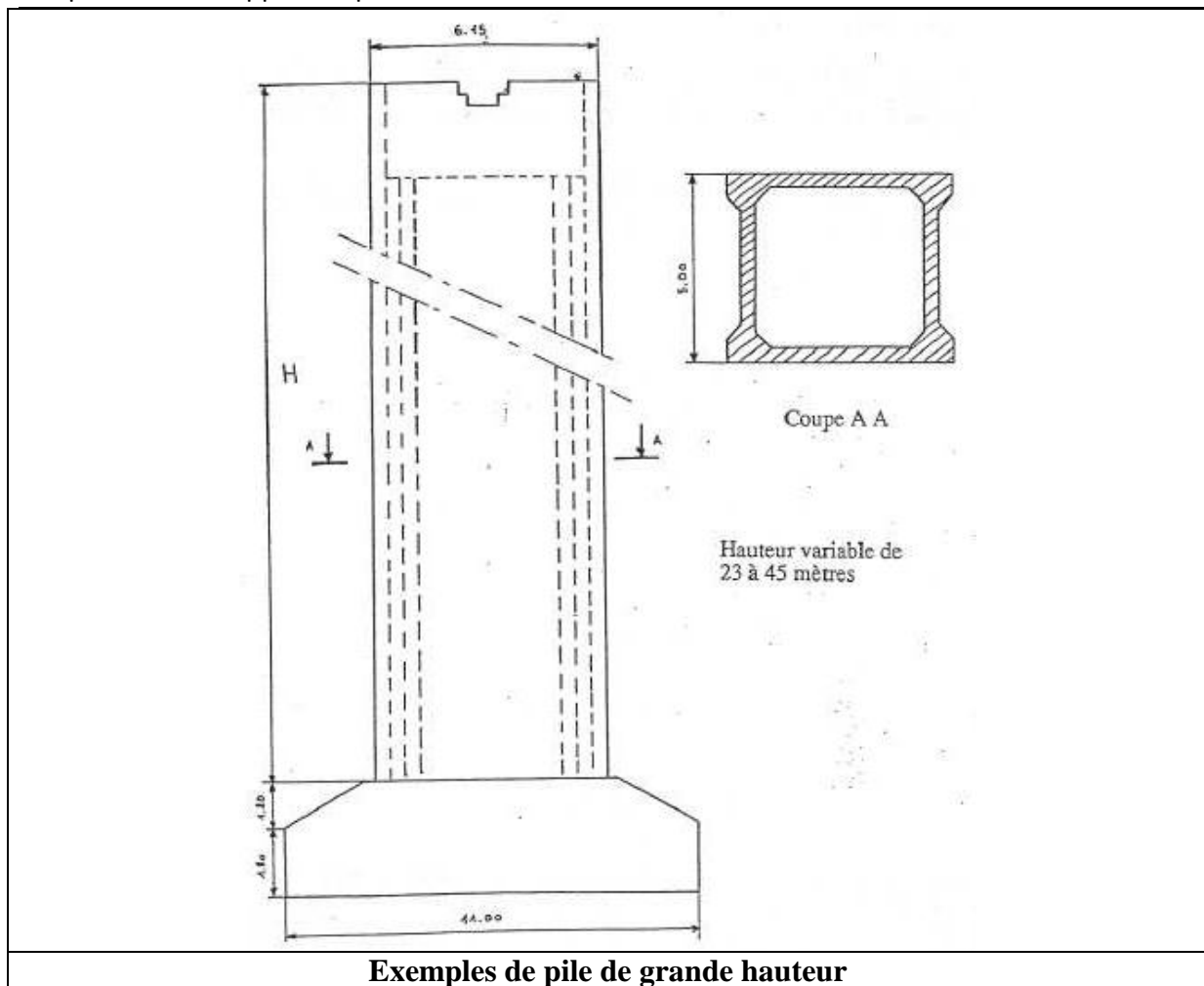
Ce type de pile est relativement peu ferraillé (40 à 50 kg/m³)

b) Piles de grande hauteur

Dès que la hauteur des piles est importante, au-delà d'une quinzaine de mètres, les efforts horizontaux engendrent des moments très importants en pied de pile et il est nécessaire d'adapter l'inertie des piles aux efforts. Ce type de pile doit de plus être justifié vis-à-vis du risque de flambement.

On a alors recours à des piles en H ou à des piles caisson de section constante ou variable, coiffées en partie supérieure par un sommier d'appui de forte épaisseur (1,00 m à 1,50 m), recevant le tablier. Les dimensions des voiles sont à adapter aux efforts et ne descendent pas en dessous de 0,40 m.

Lorsque ce type de piles est soumis à des chocs, la partie inférieure des piles-caisson est généralement remplie de béton sur toute la zone susceptible de recevoir le choc, pour réaliser un fût massif et assurer une résistance par la masse.



Ce type de pile est naturellement fortement ferrailé (100 à 120 kg/m³).

L'accès aux têtes de telles piles s'effectue habituellement par le tablier, en ménageant un "trou d'homme" dans le hourdis inférieur du caisson.

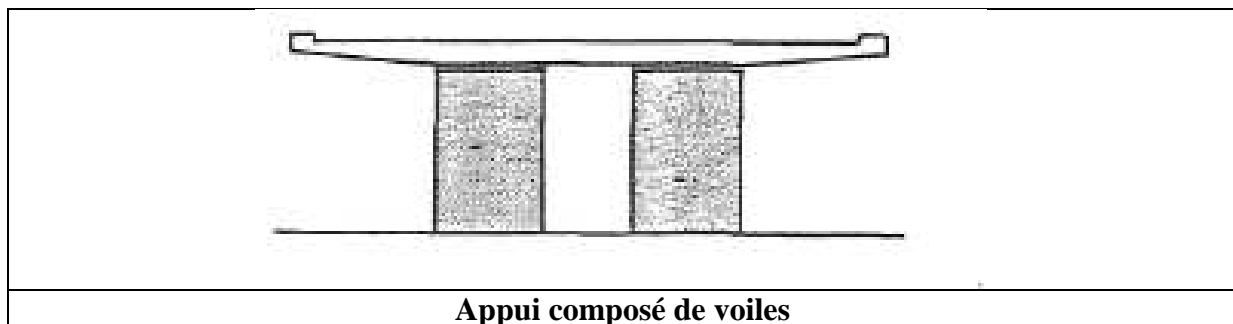
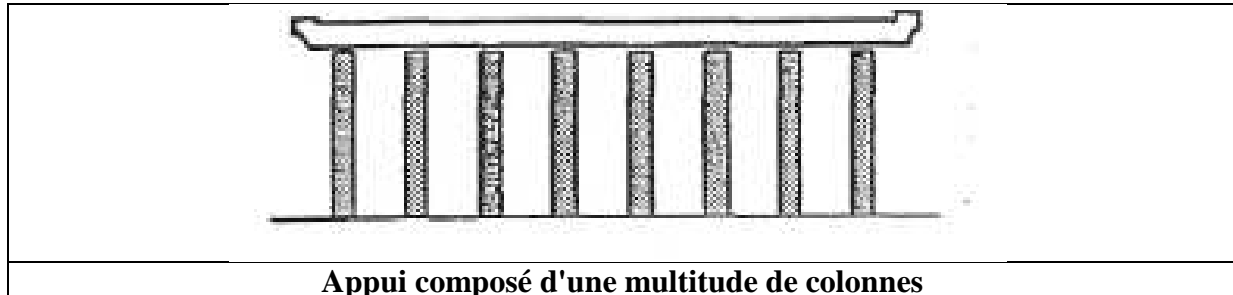
7.2.3 Particularités liées aux types de tabliers

a) Ponts dalles - Dalles nervurées

Les réactions d'appui de ce type d'ouvrage sont relativement faibles et sont, pour un mètre de largeur du tablier, de l'ordre de 70 t pour les appuis intermédiaires et de 20 t pour les culées.

Les formes habituelles des appuis intermédiaires sont le plus souvent basées sur des voiles quasi-rectangulaires de faible épaisseur.

Il est préférables d'adopter des appuis composés de voiles et non de colonnes, car ils résistent mieux aux chocs de véhicules et ont tendance à dévier le véhicule plutôt que de le stopper, ce qui est plus satisfaisant du point de vue de la sécurité.



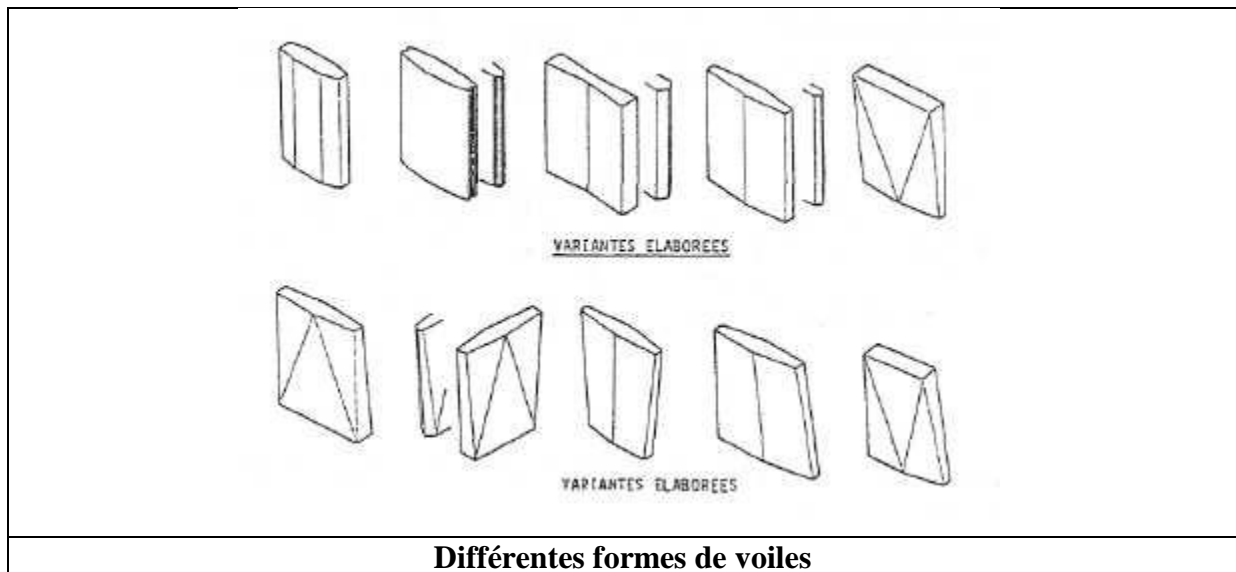
Mais l'épaisseur du voile dépend également de critères esthétiques, dans le but d'harmoniser l'épaisseur du voile à la hauteur de la pile et à l'épaisseur du tablier. Il convient notamment d'éviter des piles trop grêles dans le cas d'une pile haute ou d'un tablier relativement épais.

Ainsi, si du point de vue mécanique, une épaisseur de 0,50 m est généralement suffisante, elle pourra ainsi atteindre 0,80 m dans certains cas.

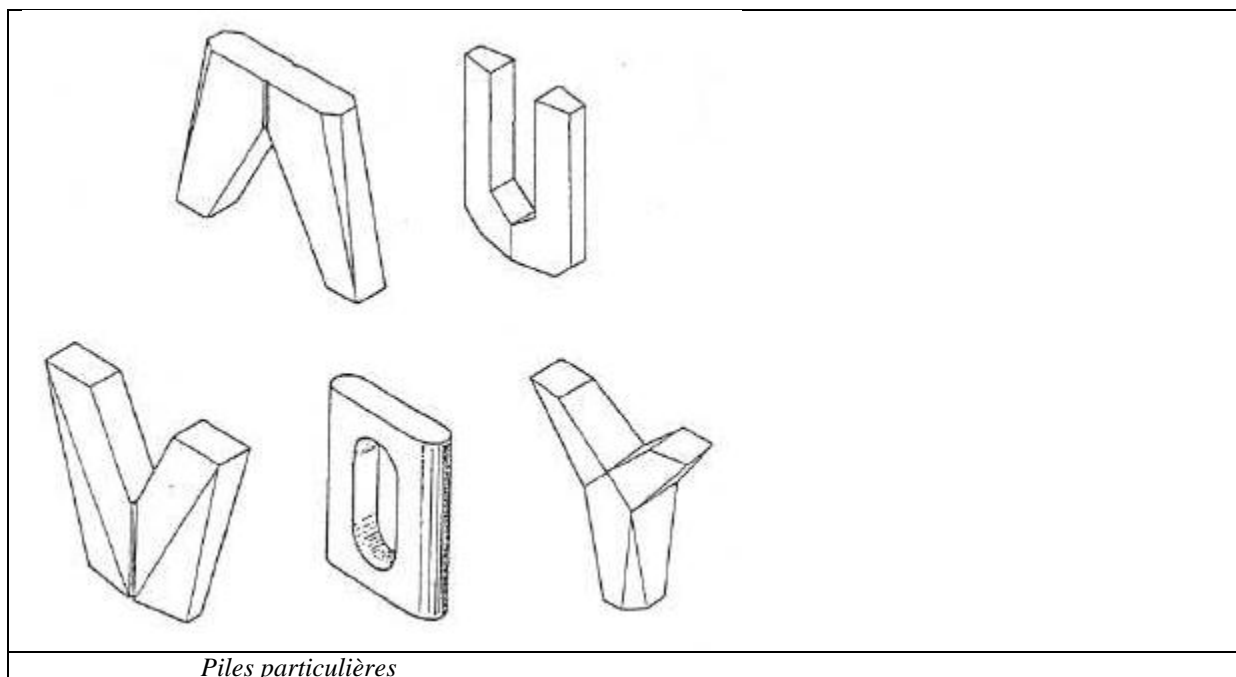
Du point de vue esthétique également, il est souhaitable d'éviter les voiles uniques dans le cas de tablier très larges, ce qui donnerait un effet de tunnel désagréable. A titre indicatif on aura recours à un voile unique lorsque le tablier est étroit, puis deux voiles à partir de 6 mètres de largeur jusqu'à trois au-delà de 12 mètres.

Leurs dimensions précises résultent des dispositions des appareils d'appui (nombre, espacement, distance de l'appareil d'appui au nu de l'appui), et de choix esthétiques permettant d'envisager des formes très diverses. Le dossier pilote PP 73 (Piles et Palées) traite de la question de façon relativement exhaustive, et on s'y reportera pour plus de détails.

La section rectangulaire constitue le modèle de base. Les exemples ci-dessous montrent différentes solutions plus ou moins élaborées permettant d'animer les parements.



D'autres formes de piles ont pu être envisagées dans le cas où, par exemple, on cherche à limiter l'emprise au sol ou que des raisons architecturales aient imposé ces choix. Les dessins ci-dessous montrent différentes formes possibles.



b) Ponts à poutres préfabriquées

Dans le cas des VIPP, les contraintes dimensionnelles de la tête de pile sont relativement importantes puisqu'on doit réaliser deux lignes d'appuis par appui et placer un appareil d'appui sous chaque poutre.

Compte tenu des dimensions courantes des abouts de poutres (environ 0,50 m), les deux lignes d'appuis sont distantes d'un mètre environ. La largeur des têtes de piles est donc voisine de 2 mètres. Transversalement, la largeur totale de la tête de pile est très voisine de la largeur totale du tablier. Dans le cas des ouvrages courbes, la tête de pile présente une forme trapézoïdale en plan.

La forme du fût de pile relève de nombreux critères, d'ordres mécaniques et esthétiques. Du point de vue mécanique, les charges sont relativement modérées et correspondent environ à 2 à 3 t/m² de tablier. Le nombre de fûts dépend de la largeur du tablier. De façon simplifiée, si la largeur du tablier est modérée (nombre de poutres inférieur à 5) les piles sont à fût unique, du type pile-marteau. Si l'ouvrage est large, les piles sont essentiellement du type portique, à deux fûts.

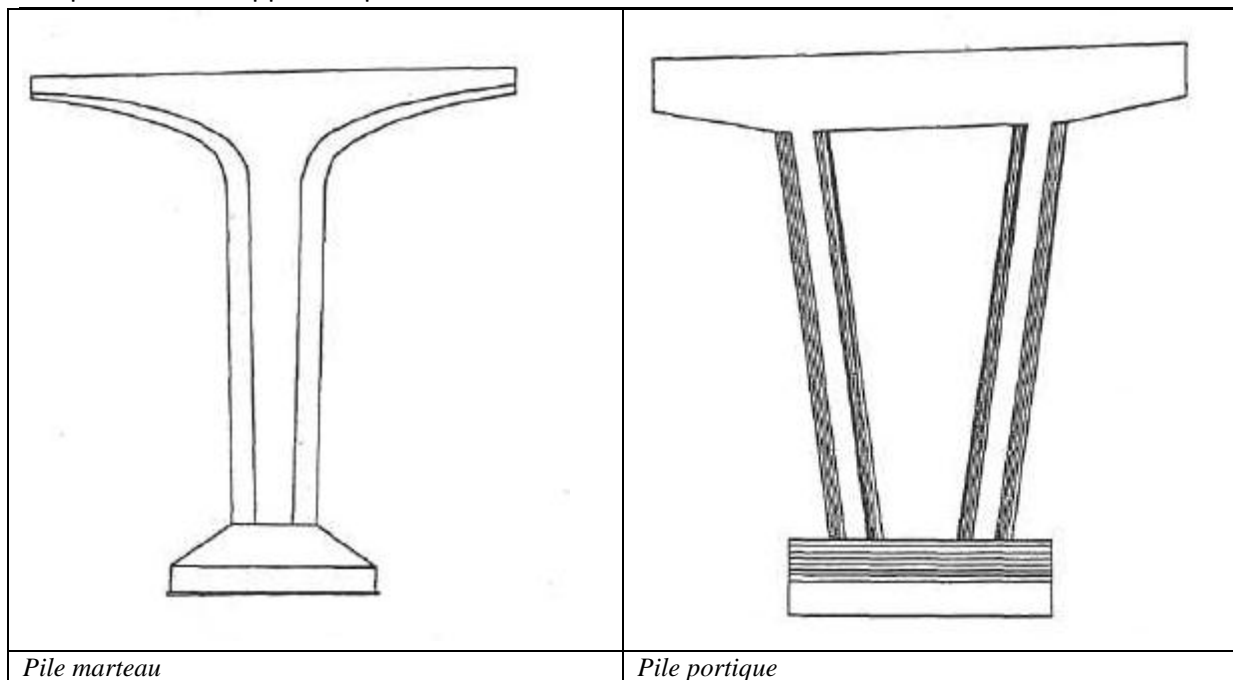
c) Piles-marteaux

Ce type de pile est intéressant à plusieurs titres : Tout d'abord, sa forme est esthétique, mais surtout elle présente une faible emprise au sol.

Le fût de pile est sensiblement cylindrique ou assimilable et de dimensions sensiblement constantes avec la hauteur. Pour des hauteurs maximales de 25 mètres, un diamètre de 2,00 convient. Si ce diamètre extérieur de 2,00 m devient insuffisant, on pourra recourir à une forme légèrement tronconique pour ne pas élargir inutilement le chevêtre. Naturellement, un traitement architectural particulier peut leur conférer des formes plus sophistiquées ou comporter des parements ouvragés renforçant la qualité esthétique de ce type d'appui. On rencontre ainsi fréquemment des formes polygonales plus ou moins régulière.

d) Portiques :

Lorsque le tablier est très large, on a recours à des piles portiques de façon à diminuer la portée du chevêtre. La forme des fûts et leur inclinaison peuvent être très diverses que ce soit pour des raisons architecturales ou pour un problème d'emprise au sol.



Dans le cas des poutres PRAD, de portée plus modeste, on adopte des dispositions semblables lorsque l'on conserve une structure isostatique. Dans certains cas, on rend la structure hyperstatique par réalisation d'un clavage en béton armé au droit des piles intermédiaires.

Dans ce cas, on procède à un vérinage du tablier pour le placer sur ses appuis définitifs dans l'axe de la pile. On peut alors adopter des piles voiles analogues à celles employées pour les ponts dalles, dont la largeur est plus faible.

e) Ponts poussés

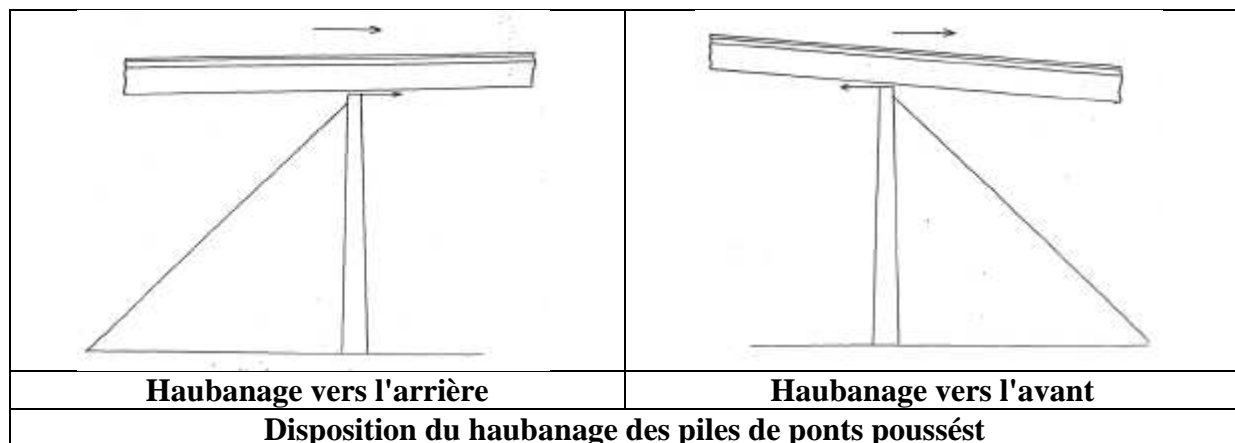
Les têtes de piles des ponts poussés doivent permettre de mettre en place les dispositifs de glissement et de guidage latéral du tablier et des vérins permettant de soulever le tablier.

Les dispositifs de glissements sont disposés sous les âmes des caissons ou sous les nervures et leurs dimensions sont adaptées aux descentes de charge compte tenu du taux de travail limite des plaques de Néoprène-Téflon.

Il convient de prévoir la possibilité de soulever le tablier quelle que soit sa position au cours du poussage, de manière à pouvoir intervenir en cas d'incident. En tout état de cause, un vérinage est nécessaire en fin de poussage pour remplacer les appuis provisoires de poussage par les appareils d'appuis définitifs. Le vérinage s'effectue au droit des âmes.

Lorsque les dimensions des têtes de piles prévues initialement sont insuffisantes, on peut élargir provisoirement la tête de pile par mise en place de consoles serrées sur la pile par des barres de précontrainte, solution qui peut se révéler coûteuse.

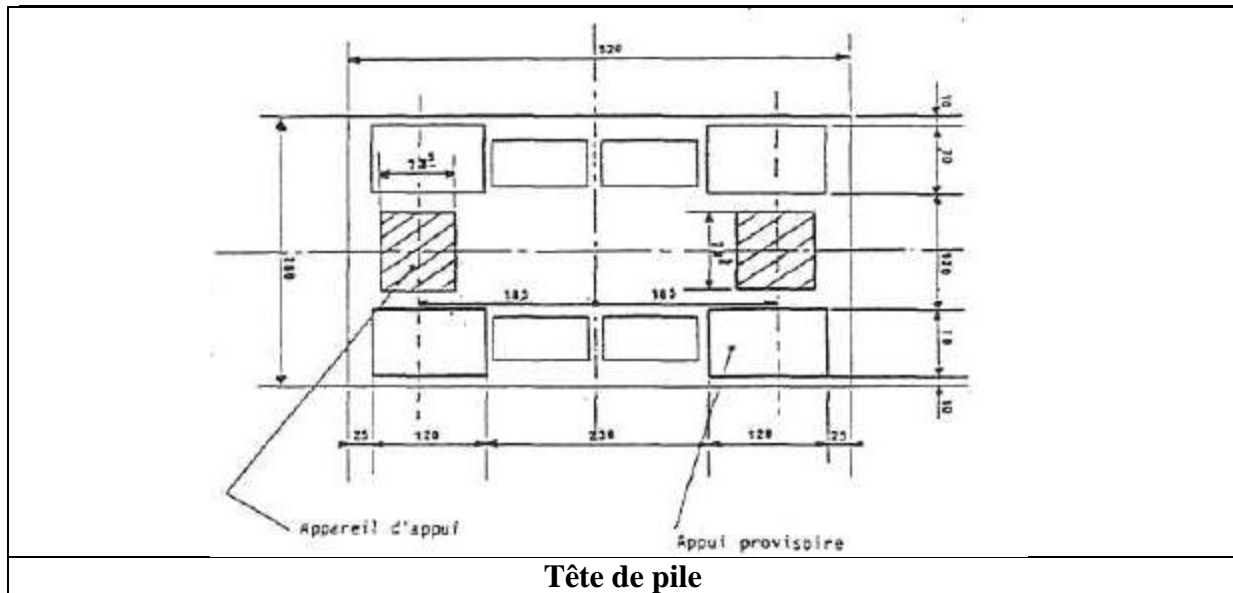
Les piles sont soumises à des efforts horizontaux importants au cours du poussage, qui atteignent 1 à 4% de la réaction verticale. La justification des piles et le dimensionnement des dispositifs de glissement et de poussage sont généralement effectués avec un coefficient de frottement de 5%.



Pour ne pas sur-dimensionner inutilement les fûts de piles, et notamment dans le cas de piles de grande hauteur, les têtes de piles peuvent être haubanées en cours de poussage, les haubans étant ancrés dans la semelle de la pile voisine. Ces haubans retiennent les piles vers l'aire de préfabrication dans les cas courants où la résultante de la réaction de poids propre et l'effort de frottement est dirigée vers l'avant. Lorsque le tablier est poussé en descendant une forte pente supérieure à l'angle de frottement, la tête de pile a au contraire tendance à chasser vers l'arrière et il est nécessaire de la hauber vers l'avant.

f) Ponts construits par encorbellements successifs

La conception de la tête de pile est différente selon que les dispositifs de stabilité de fléaux sont mis en place sur la tête de pile ou lui sont extérieurs. Dans le cas d'ouvrage de faible hauteur, il est possible en effet de réaliser des palées provisoires ou de mettre en place des haubans extérieurs à la pile. Les têtes de pile ont alors une largeur minimale permettant de loger les appuis définitifs et provisoires. Une largeur de l'ordre de 3 m est alors suffisante.



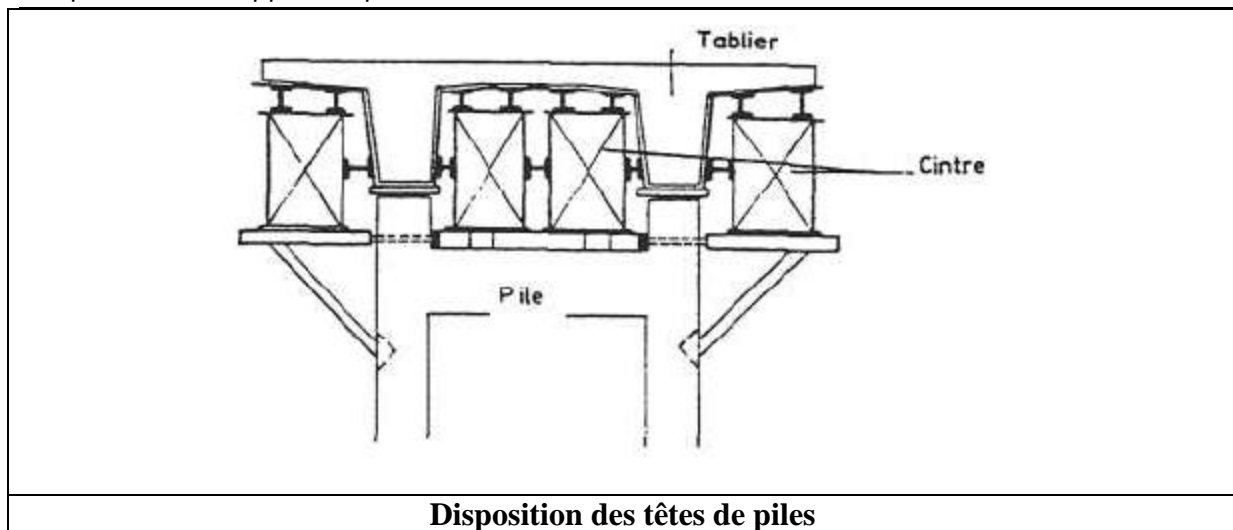
Dans le cas de piles de grande hauteur, ces dispositifs ne sont plus envisageables, et il est nécessaire d'écarter les appuis provisoires pour assurer la stabilité des fléaux. La largeur de la tête de pile atteint alors couramment 5 à 6 mètres. Mais dans ce cas, il est également intéressant d'encastrier le tablier si la souplesse des piles le permettent.

Dans l'autre direction, la longueur de la tête de pile est voisine de celle de la largeur de la base du caisson.

Les descentes de charges deviennent assez importantes, et selon les portées varient de 500 à 2000 tonnes.

g) Ponts construits sur cintres auto-lanceurs

La tête de pile d'un ouvrage construit sur cintre auto-lanceur doit être adaptée dans le cas des cintres par dessous pour permettre le passage des poutres métalliques porteuses. Dans certains cas, la structure porteuse comporte également des poutres latérales qui sont fixées sur des corbeaux serrés sur les piles.



Dans le cas des cintres par-dessus, la plate-forme de travail est suspendue aux poutres supérieures et est généralement conçue pour éviter les piles lors de l'avancement du cintre.