



ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

Niveaux : ingénieur et Master

COURS : PONTS-OUVRAGES D'ART



Enseignant :

Monsieur ISSOUFOU TAMBOURA

Ingénieur diplômé de l'ENI de Bamako (Mali)

Master Spécialisé en Infrastructure de Transport de l'ENPC Paris (France)

Ingénieur Général des TP de classe exceptionnelle

Ministère Equipement

Niamey –Niger

Année académique 2014-2015

Programme

Chapitre 1 : **GENERALITES**

Chapitre 2 : **CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES PONTS**

Chapitre 1 : GENERALITES

I. INTRODUCTION : le concept ouvrage d'Art

1) Définition du concept

Un ouvrage d'art se définit comme une construction de grande importance nécessitée par le rétablissement d'une voie de communication (route, voie ferreuse, canal etc....), un dispositif de protection contre l'action de la terre ou de l'eau, un dispositif de retenue des eaux, et autre.

Le terme « d'Art » qui accompagne le mot ouvrage pour traduire que leur conception et leur réalisation font intervenir des connaissances ou l'expérience joue un rôle aussi important que la théorie, connaissances appelées « **art de l'ingénieur** ».

Un ouvrage d'art peut être qualifié selon le milieu dans lequel il est construit : ouvrage d'art terrestre, ouvrage maritime, ouvrage d'art de montagne, ouvrage d'art fluvial etc....

2) **Les différents types d'ouvrages d'art**

Selon leur nature et leur rôle on distingue :

- a) **Les ouvrages de franchissement ou lié a des voies de communications** : pont, tunnel, écran acoustique.
- b) **Les ouvrages de protection ou de soutènement** : destiné a la stabilisation des pentes ou des soutènements des terres afin de se prémunir des effets des mouvements des terres (écroulements, glissements, coulées des boues etc....) : mur, rideaux de palplanche, parois moulé, clouage de massif etc....
- c) **Ouvrages de retenues d'eau** : barrage (en béton ou en terre et enrochements), digues (remblais longitudinaux naturels ou artificiels).
- d) **Autres ouvrages d'arts** : tranchée ouverte ou couverte, quais, réservoir, structure paré-pierre ou paré-bloc.

II. LE PONT : un ouvrage de franchissement

1) **Un minimum de terminologie**

a) Le pont

C'est un ouvrage destiné à franchir un obstacle naturel (ravin, rivière) ou à franchir une autre voie de circulation terrestre, fluviale ou maritime.

Dans le cas du croisement de 2 voies de communications on distingue :

- a- Les passages supérieurs (PS)
- b- Les passages inférieurs (PI)

Le niveau de référence est la voie la plus importante ou celle qui a le classement le plus élevé vis-à-vis de l'administration ; dans le cas où l'une des voies est une voie ferrée, le niveau de référence sera la voie ferrée.

- ❖ Un ponceau est un pont de petites dimensions (de l'ordre de quelques mètres)
- ❖ Les buses ou aqueduc sont des ouvrages de forme cylindrique permettant de faire passer un ruisseau ou une petite voie de circulation à travers un remblai, ou bien un canal.
- ❖ Un viaduc est un ouvrage de franchissement à grande hauteur au dessus d'une brèche ou constitué de nombreuses travées successives.
- ❖ Une passerelle est un ouvrage en général réservé aux piétons.

b) Travée :

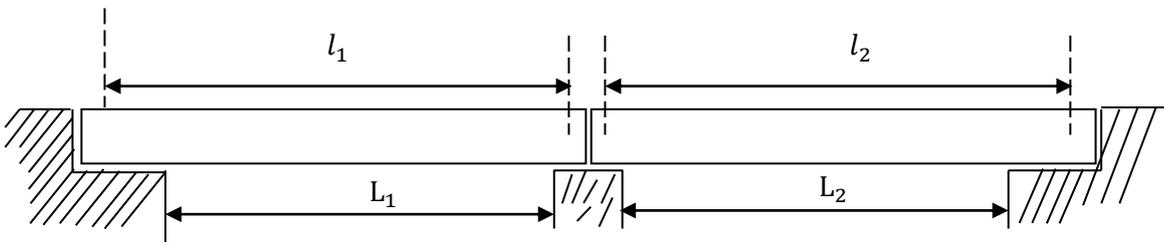
C'est la partie de pont comprise entre 2 appuis successifs

c) Ouverture L_1, L_2

C'est la distance entre parements de 2 appuis successifs

d) portée l_1, l_2

C'est la distance entre axes d'appareils d'appuis successifs :

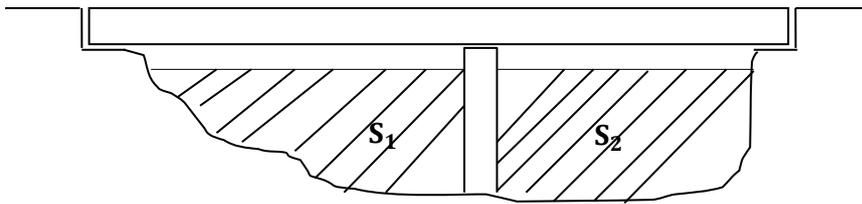


e) **Gabarit de circulation**

Il indique quels sont les dimensions du passage que l'on doit laisser sous l'ouvrage pour le mouvement des véhicules ou de bateaux

f) **Débouché**

Dans le cas d'un ouvrage sur une rivière, c'est la surface que l'on doit laisser pour l'écoulement des eaux. Ici $S_1 + S_2 = S$



Le débouché se déterminera à partir de l'étude hydrologique de la rivière.

g) **Tirant d'air**

C'est la hauteur libre entre le parement inférieur des poutres du tablier et le fond de la brèche.

Dans le cas du franchissement d'une voie de circulation, le tirant d'air minimum dépendra du gabarit de circulation : dans le cas d'un ouvrage sur une rivière, le tirant d'air minimum au dessus des plus hautes eaux dépend du gabarit de navigation, si la rivière est navigable ou alors de la possibilité d'évacuation des corps flottants si la rivière n'est pas navigable, c'est-à-dire on laissera environ 1,50m.

2) **Principaux éléments constitutifs d'un pont**

Les ponts comprennent essentiellement des éléments porteurs constitués par les poutres principales, les arcs, les câbles (éléments porteurs principaux).

Les entretoises ; les pièces de pont, les longerons qui servent à répartir les charges entre les éléments porteurs principaux, qui les transmettent aux appuis qui les transmettent au sol par les fondations.

Le tablier est la partie quasi horizontale située sous la voie portée : il comprend les éléments porteurs dans le cas des ponts à poutre ou est supportée par eux dans le cas des ponts en arc ou des ponts à câbles.

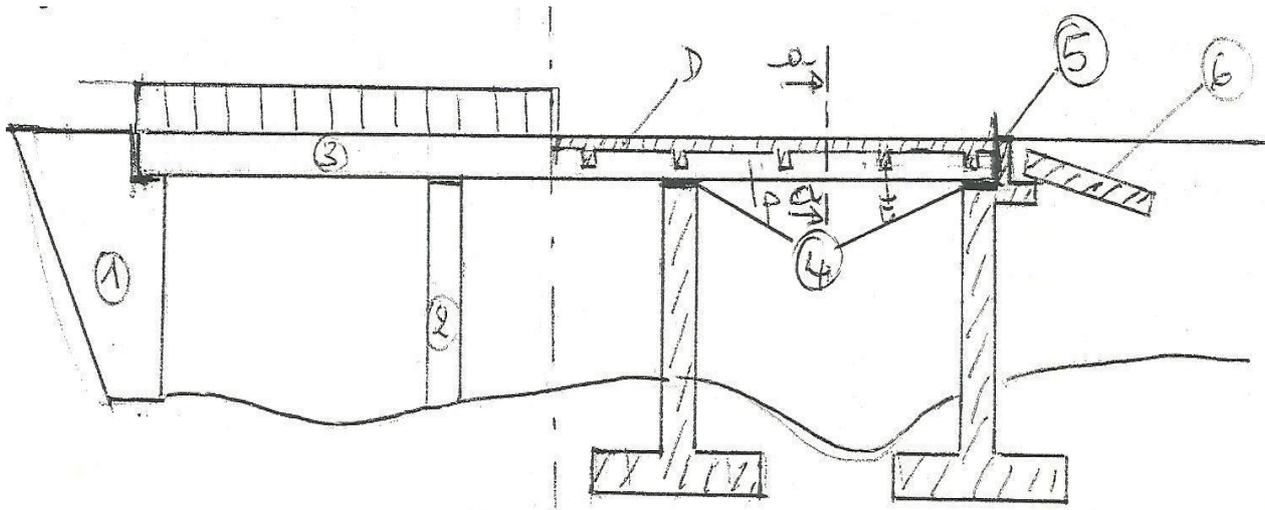
La couverture ou platelage est la partie supérieure du tablier destinée à supporter les efforts dû à la circulation (dalle en béton, dalle orthotrope etc.)

Les appuis : ce sont les culées (appuis de rive), les piles (appuis intermédiaires) et les pylones des ponts à câbles.

Les fondations : qui peuvent être superficielles ou profondes.

Les équipements sont des éléments indispensables à l'utilisation au fonctionnement et à la durabilité du pont : appareils d'appui, garde-corps, joints, gargouilles etc...

Parmi les appuis on distingue les culées qui sont les appuis d'extrémités (de rive) et les piles qui sont les appuis intermédiaires.

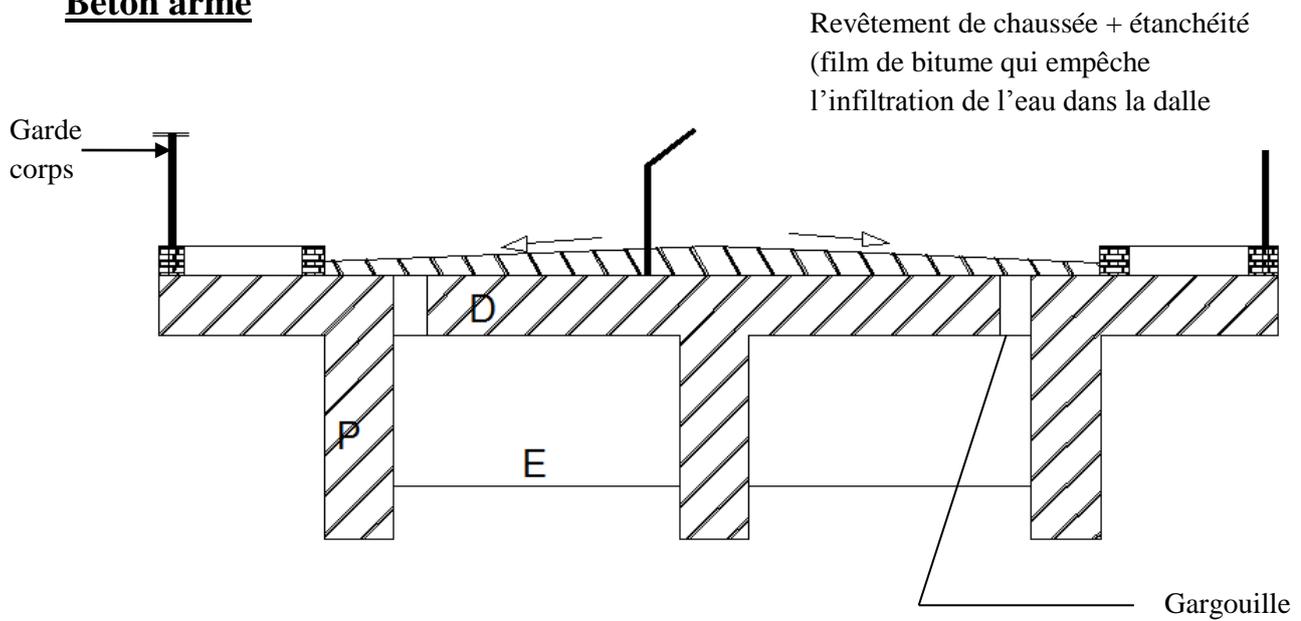


- (1) Culée : qui joue généralement un rôle double d'appui de rive du tablier et de soutènement des remblais d'accès
- (2) Piles qui constituent les appuis intermédiaires
- (3) Tablier élément sur lequel circulent les véhicules ; il est constitué d'une dalle reposant sur un quadrillage de poutres : les poutres principales dans le sens de la circulation et les entretoises placés transversalement
- (4) Appareil d'appui en général constitués par des plaques élastonières (néoprènes)

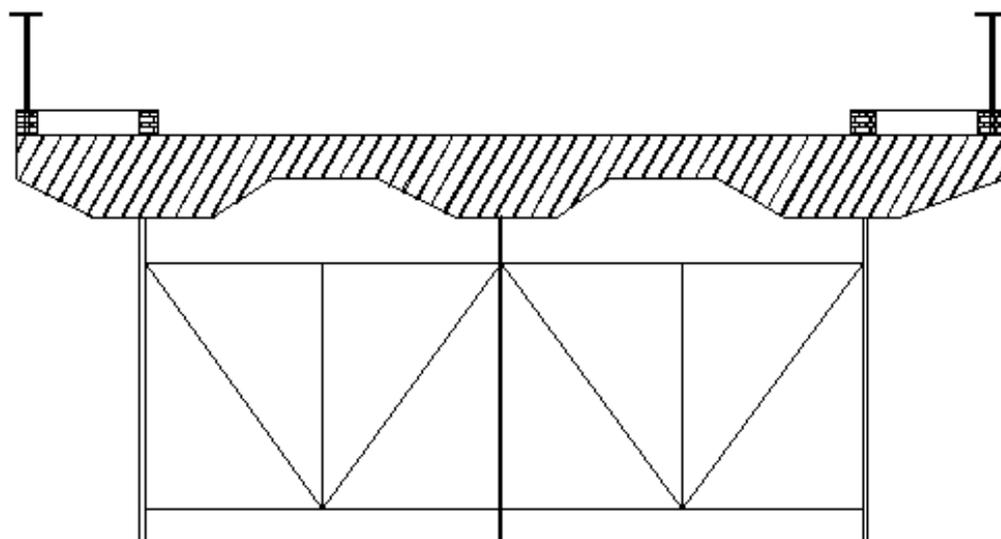
- (5) Joint de chaussée
- (6) Dalle de transition

Coupes a-a sur tablier

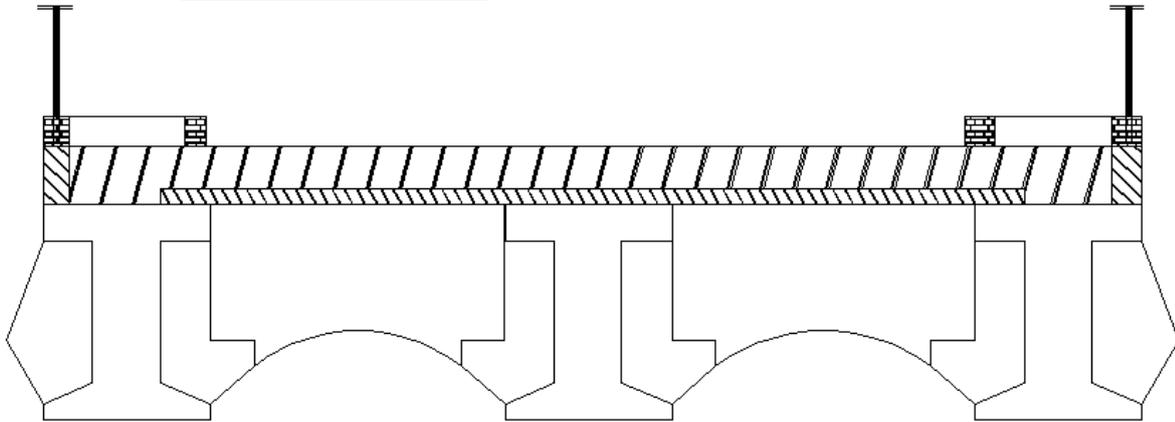
Béton armé



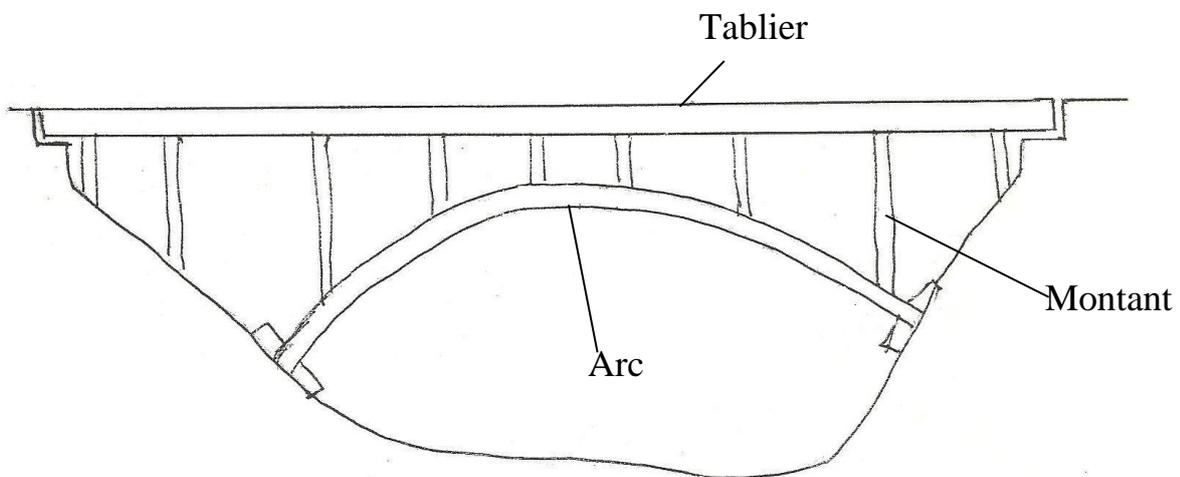
Construction métalliques ou ossature Mixte



Béton Précontraint



Pont en arc



III. CLASSIFICATIONS DES PONTS

Les ponts sont classés de diverses manières

1) suivant la longueur

Nous considérons que nous avons :

- ❖ Des petits ouvrages dont la longueur est inférieure à 8m
- ❖ Des ouvrages moyens lorsque $8\text{ m} < L < 25\text{ m}$
- ❖ Des grands ouvrages $25 < L < 40\text{ m}$
- ❖ Des ouvrages exceptionnels $L > 40\text{m}$

2) suivant la nature de la voie portée

- ❖ Pont-rail si le pont porte une voie ferrée
- ❖ Pont-route si le pont porte une route (PI, PS)
- ❖ Pont-canal
- ❖ Passerelles pour piétons
- ❖ Passerelles pour conduites

3) suivant le matériau principal dont ils sont constitués

Selon les matériaux constituant les éléments porteurs principaux :

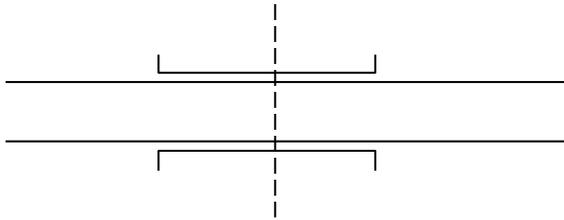
- ❖ Ponts en bois
 - ❖ Ponts en maçonnerie
 - ❖ Ponts en fonte
 - ❖ Ponts en fer
 - ❖ Ponts en acier
 - ❖ Ponts en alliage d'aluminium
 - ❖ Ponts en béton armé
 - ❖ Ponts en béton précontraint
- } Ponts métalliques

4) suivant la durée de vie

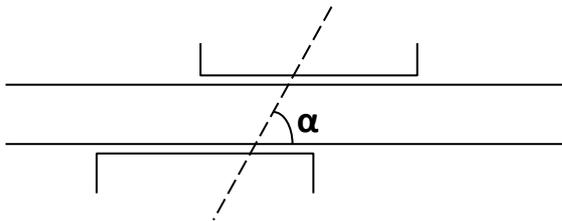
- ❖ Ponts provisoires en métal, bois, métal + bois
- ❖ Ponts semi-définitifs métalliques (ex VMD ou Toboggan ou Auto pont)
- ❖ Ponts définitifs en BA, BP, CM ou OM

5) suitant caractéristiques géométriques (tracé)

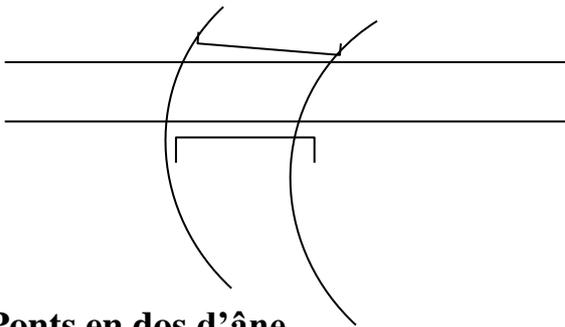
- ❖ Ponts droits quand la route franchit perpendiculairement l'obstacle



- ❖ Ponts biais quand la route ne franchit pas perpendiculairement l'obstacle.



- ❖ Ponts courbes quand la route franchit l'obstacle en courbe

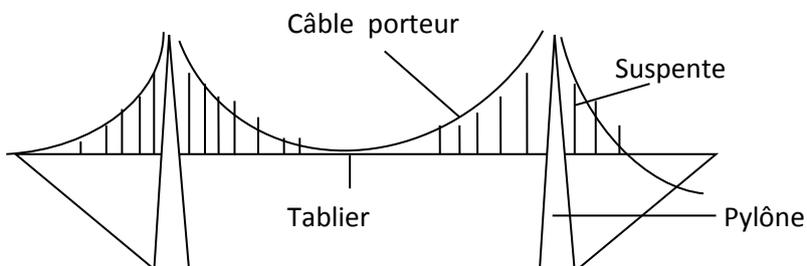


- ❖ Ponts en dos d'âne

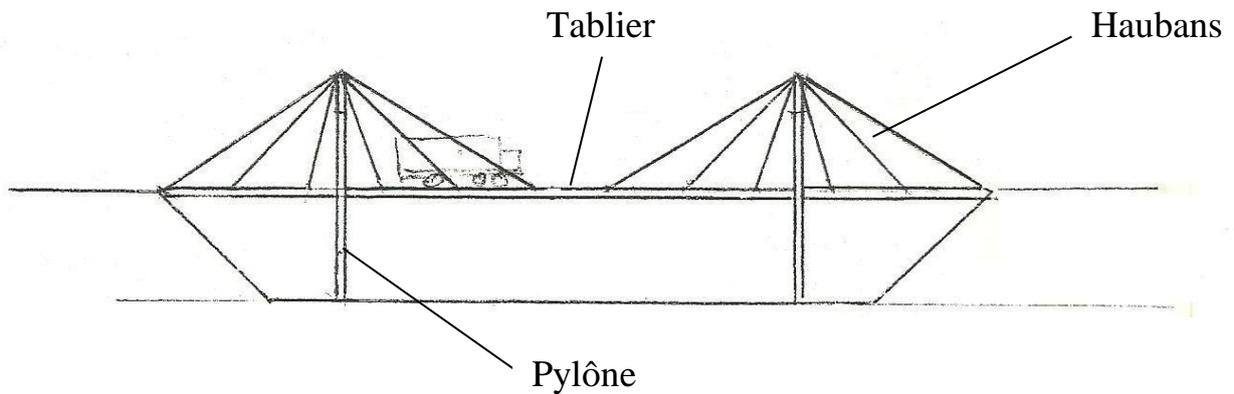
6) suitant la structure

6.1 Ouvrages souples

-Ponts suspendus



- Pont à Haubans



6-2 Ponts rigides

a) Ponts à poutres et ponts dalles

α) ponts isostatique

- travées indépendantes

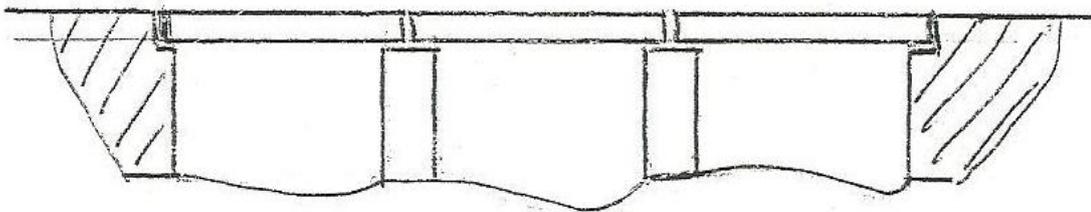
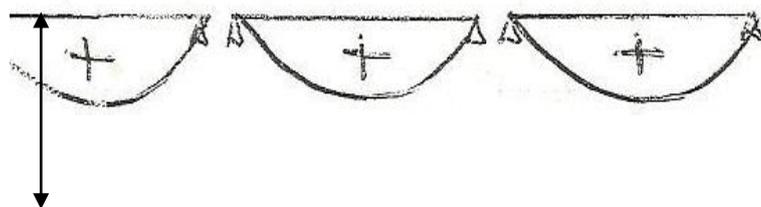
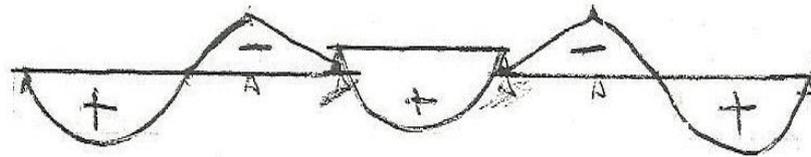
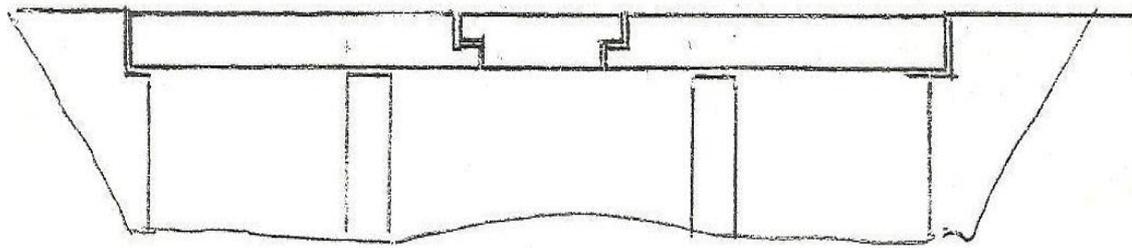


Diagramme
des Moments
fléchissant

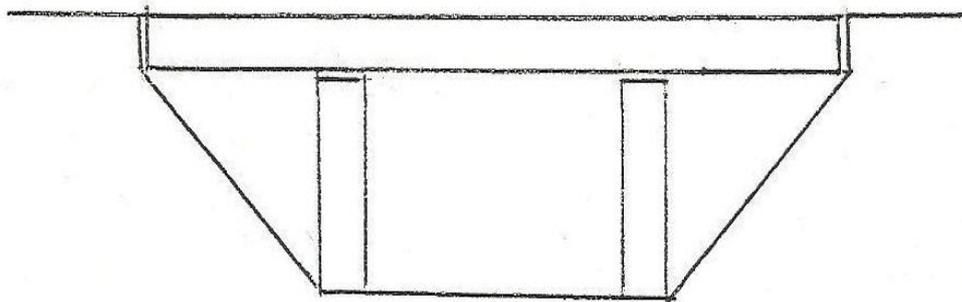


Il y aura
uniquement des
moments positifs en
travée

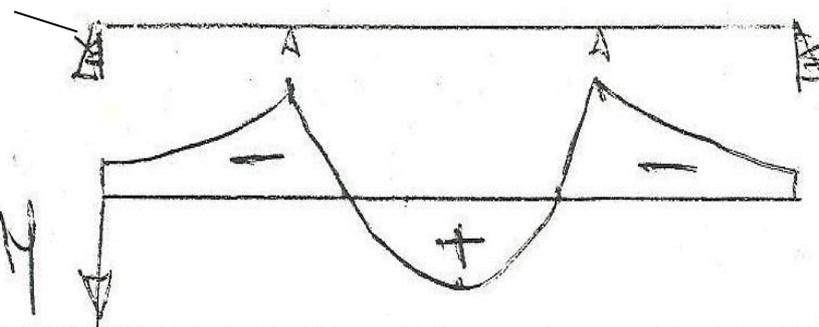
- Ponts cantilever



Il y a des moments négatifs sur appuis et consoles

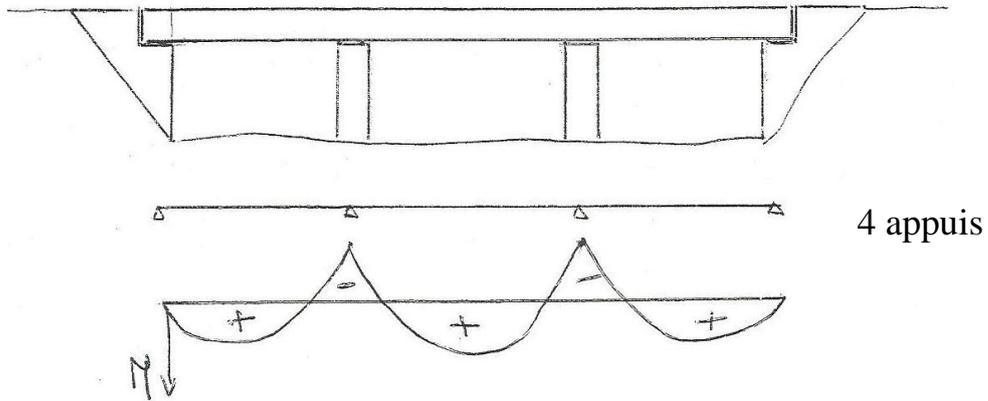


Poussée des terres

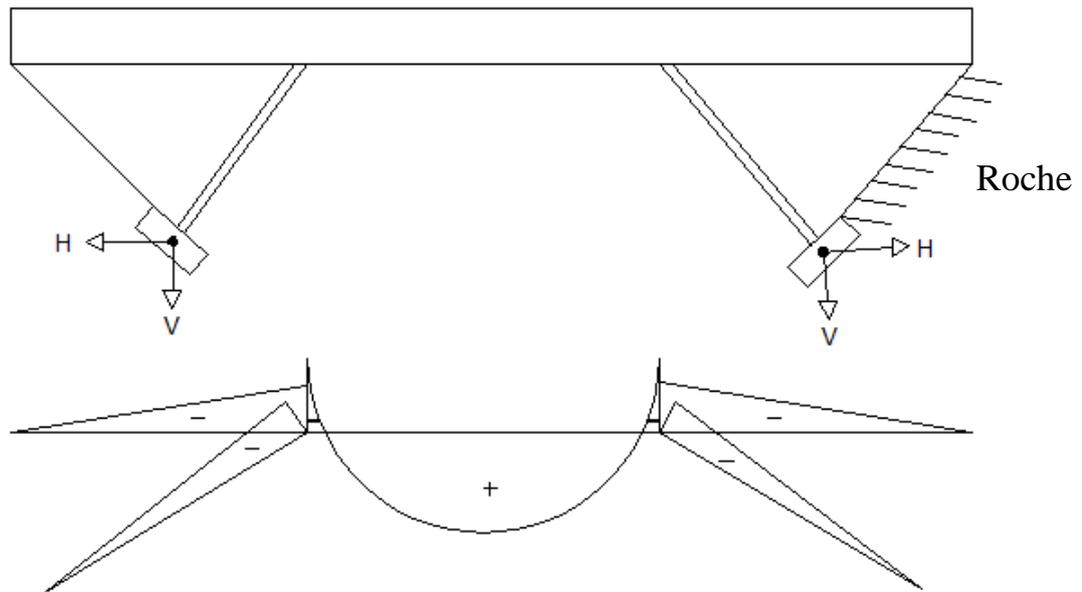


β) Ponts hyperstatiques

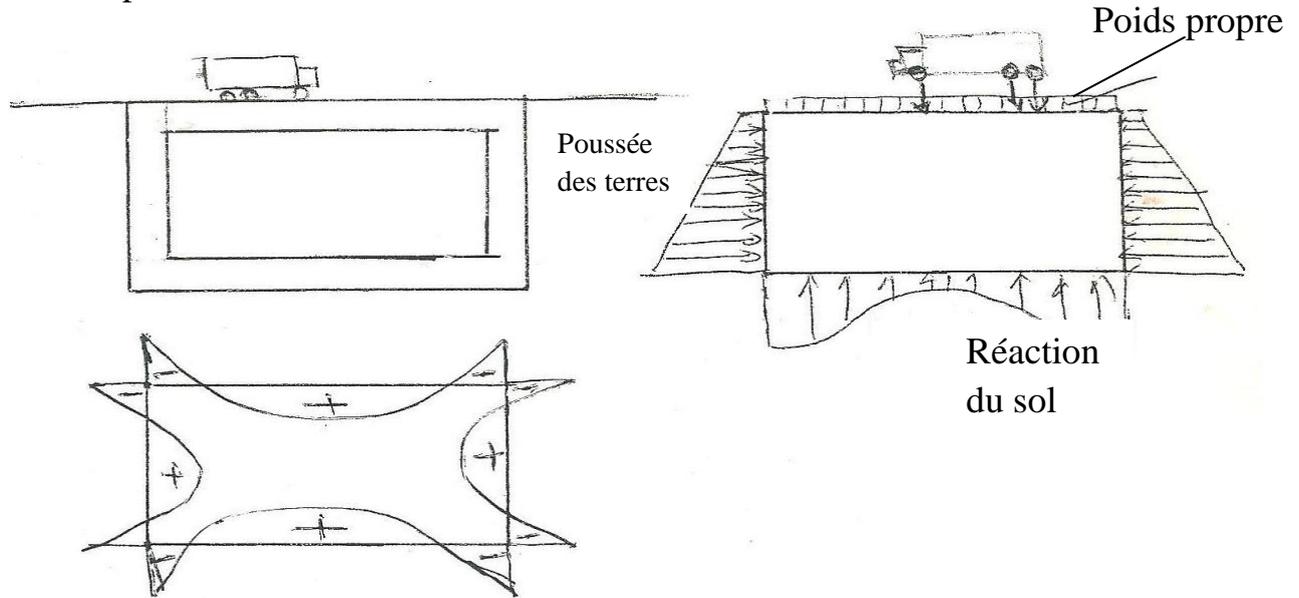
- pont à poutre continues



- Pont à béquille ou portique ouvert



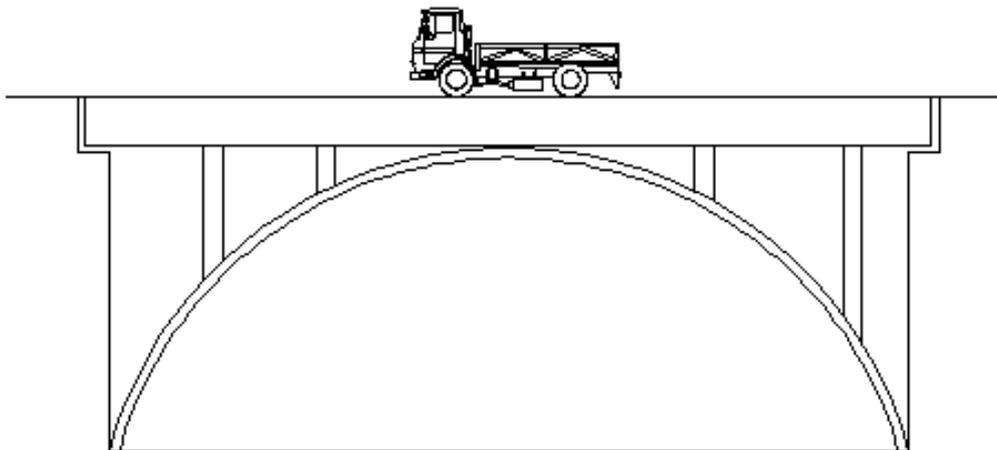
- pont en cadre fermé



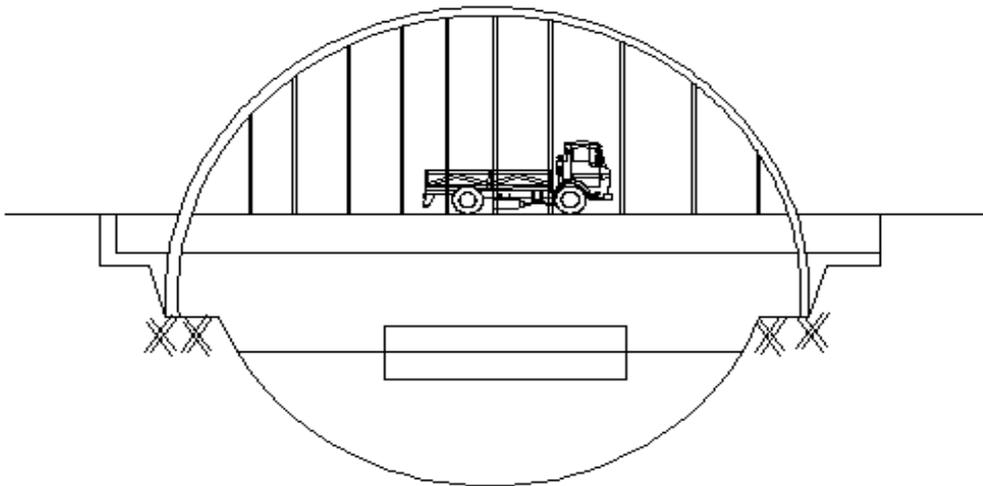
b) Les ponts en arc

α) selon la position de l'arc

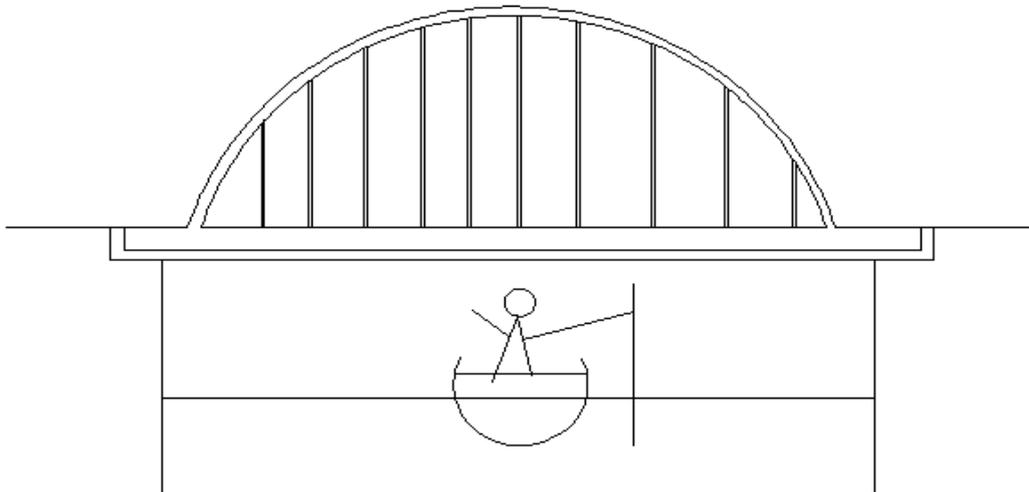
- Arc à tablier supérieur



- Arc à tablier inférieur



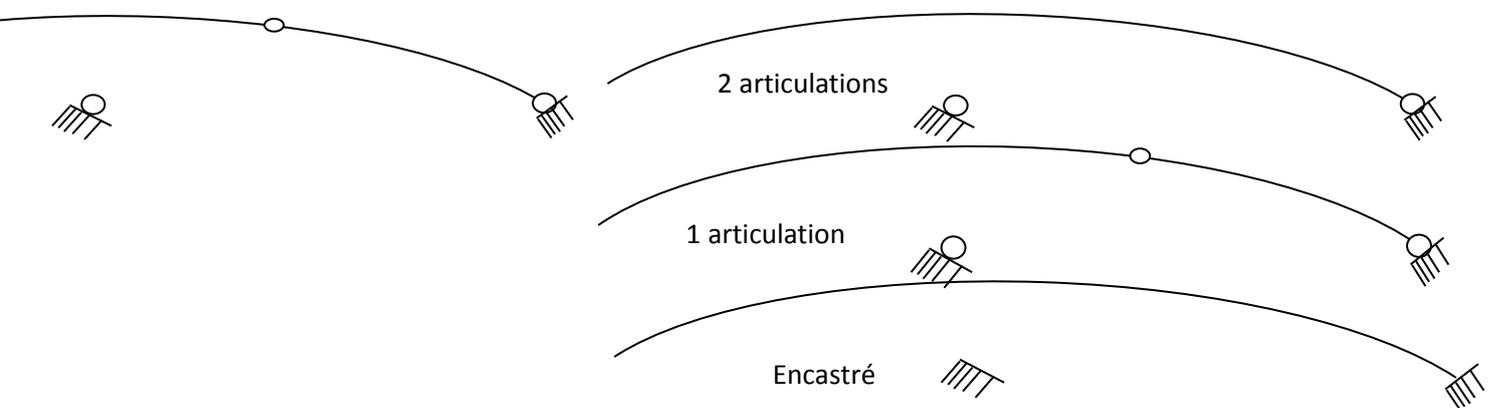
- arc à tirant ou bow-string



β) selon le degré d'hyperstaticité BB-2R

- Arc isostatique

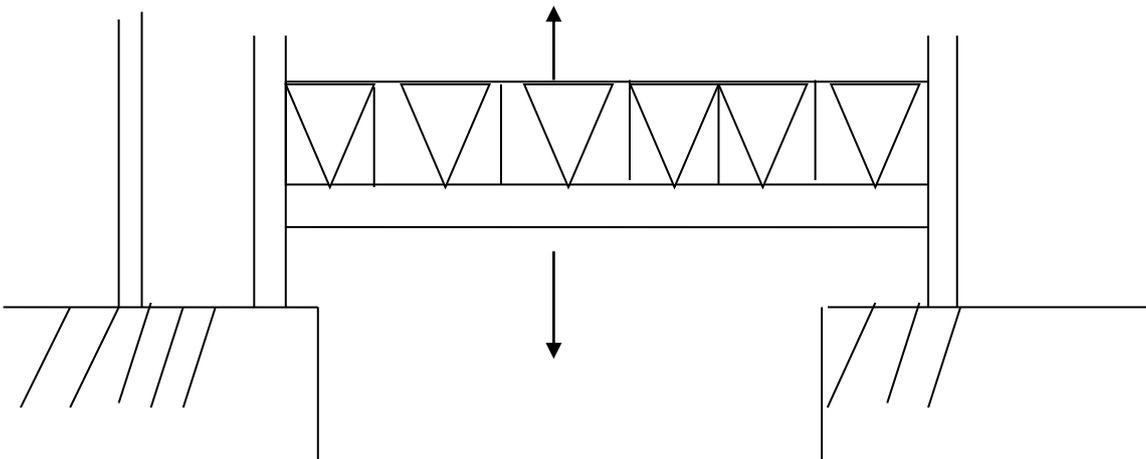
-Arcs hyperstatique



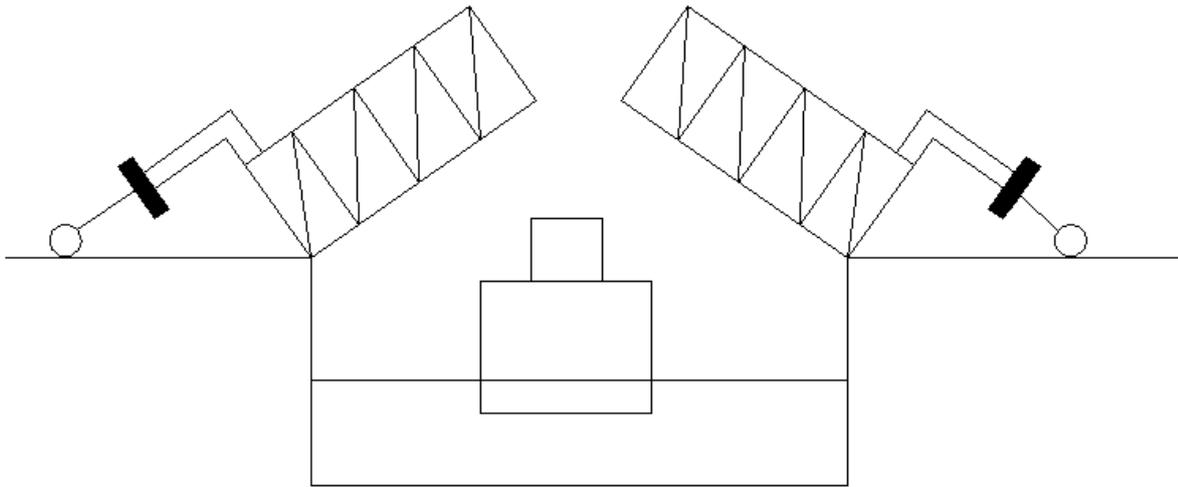
c) **Ouvrages spéciaux** :

Ce sont les ponts dont les tabliers sont mobiles afin de dégager le gabarit de la voie franchie

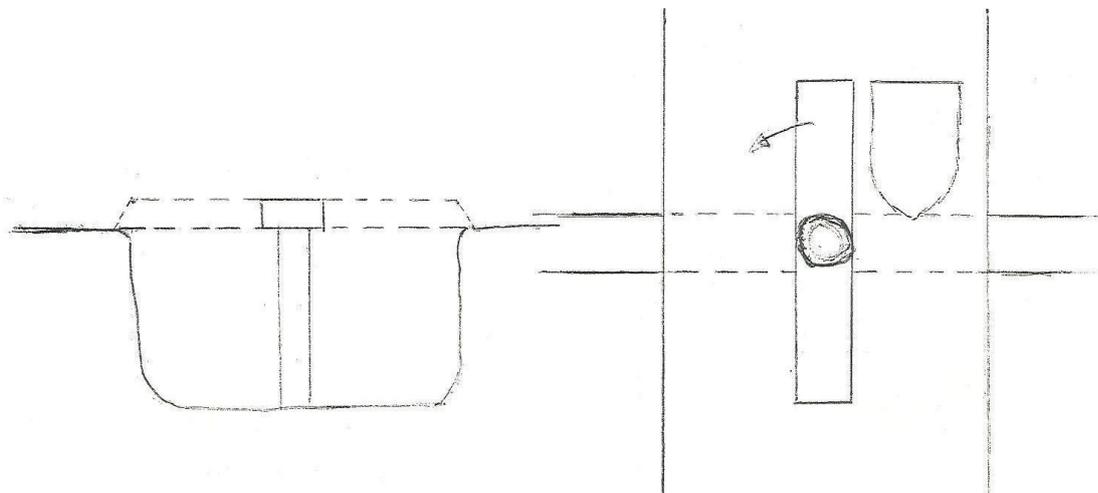
- ❖ **Ponts levants** : Pont mobile dont le tablier se déplace par translation verticale (parfois désigné par le terme « pont ascenseur »)



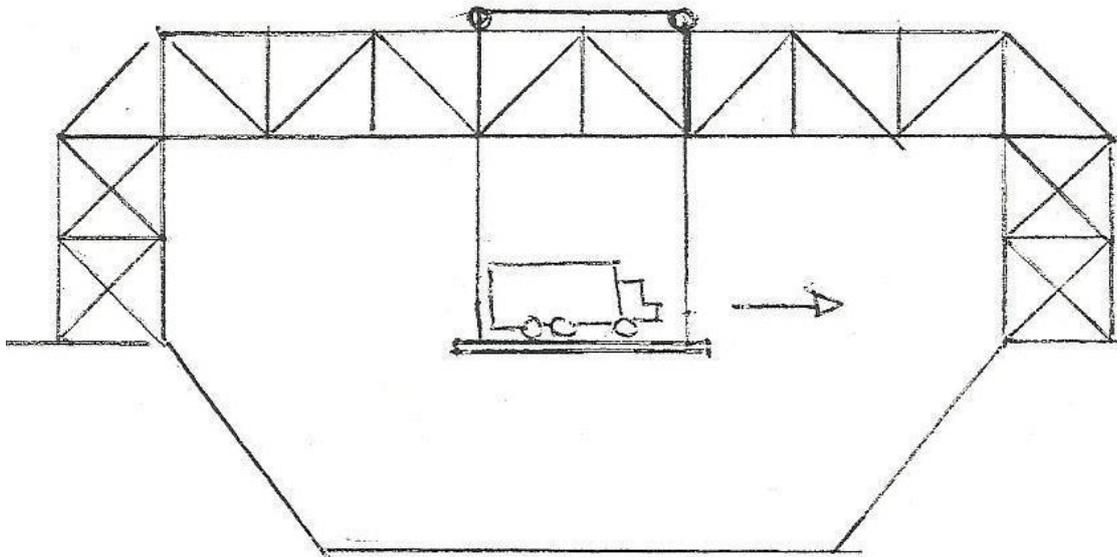
- ❖ **Ponts basculants** : Pont mobile dont le tablier se déplace autour d'axe horizontal à simple ou double volet.



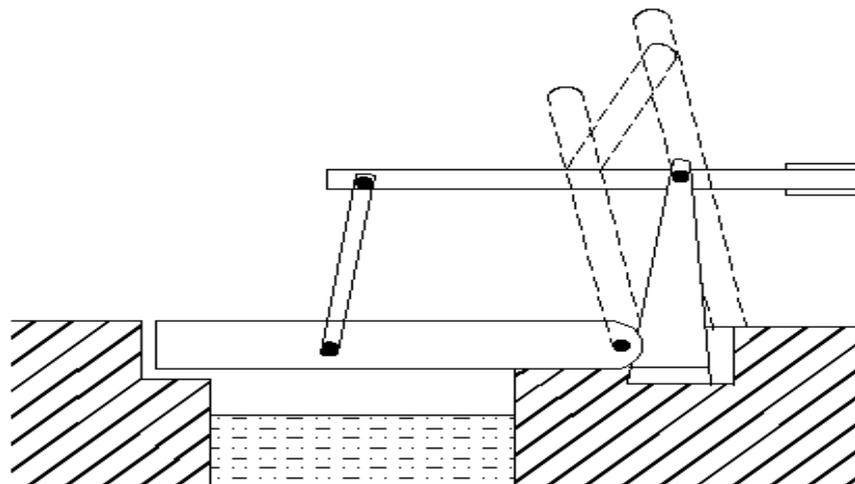
- ❖ **Ponts tournants** : Pont mobile dont le tablier se déplace par rotation autour d'un axe vertical



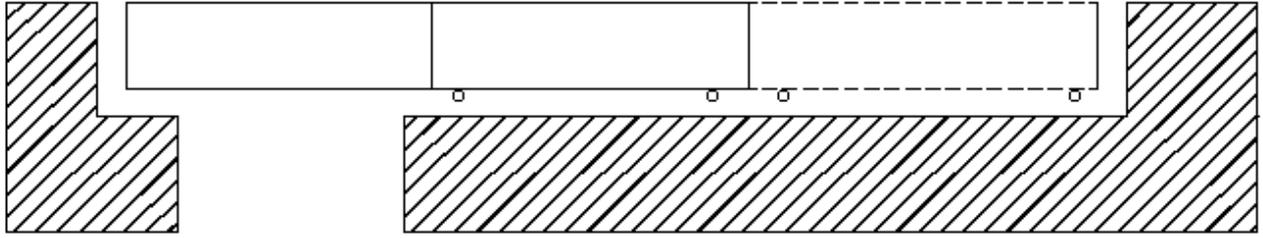
- ❖ **Pont transbordeur** : ouvrage permettant le passage d'une rive à l'autre au moyen d'une nacelle mobile suspendue à une poutre fixe qui franchit un voie d'eau et dégage le gabarit de navigation



- ❖ **Ponts levis** : Pont mobile dont le tablier se déplace par basculement autour d'axe horizontal au moyen d'un balancier supérieur auquel il est relié.



- ❖ **Ponts roulants** : Pont mobile dont le tablier se déplace par translation longitudinale appelé aussi pont brouette ou pont coulissant.



❖ **Ponts flottants** : Pont dont le tablier est appuyé sur des bateaux, en général ce sont des ponts provisoires et rarement définitif comme dans le cas du pont de Galata à Istanbul.

7) Suivant la nature de projet à élaborer

a) **Ouvrage courants conformes à un modèle type** : ponts-type du SETRA

b) **Ouvrages courants non conformes à un modèle-type** : : ouvrages courants pouvant présenter des difficultés particulières de conception ou d'exécution :

- Liées au terrain
- Liées à un emploi limite de solution classique (grandes buses d'ouverture supérieur à 5 ou 6m par exemple)
- Dues à des modifications de solutions types résultant de la géométrie du tracé ou de recherches architectural (Biais ou courbure prononcés, appuis sophistiqués etc....)
- Dues à l'emploi de structures moins classiques (ponts à béquilles, paravalanches etc....) ou au recours de techniques encore peu courantes et non codifiées
- Dues aux caractères innovant de la technique ou du procédé.

c) **Ouvrage non courants** : Ce sont

- Les ponts possédant au moins une travée de plus de 40m de portée (ou 50m pour les ponts conformes au type VIPP du SETRE)
- Les ponts dont la surface dépasse 1200m²
- Les ponts mobiles et les ponts canaux.

IV. HISTORIQUE ET EVOLUTION DES PONTS

L'histoire de la construction des ponts est fonction de l'évolution des matériaux et des techniques de construction c'est-à-dire de l'évolution des moyens de construction. Dans le temps, la technologie suivante peut être proposée :

1) les ponts primitifs (avant 1000 av J C)

Depuis toujours l'homme a construit passerelles puis des ponts pour franchir des rivières ou des ravins.

Les ponts primitifs sont constitués des matériaux qu'on trouve directement dans la nature : pierres, lianes. 2 types de ponts ont marqué cette période : **les passerelles suspendues et les poutres.**

- ❖ **Les passerelles suspendues** dont les éléments porteurs sont des câbles formés de lames ou de bambous tressés attachés des 2 côtés de la brèche à des rochers ou à des troncs d'arbres.
- ❖ **Les passerelles** fonctionnant en poutres dont les éléments porteurs sont soit en dalles de pierre de portées très limitées soit en bois de portées nettement plus grandes.
- ❖ L'existence de la construction en encorbellement doit être soulignée technique utilisée lorsque la longueur de la brèche à franchir dépassant la longueur des troncs disponibles (inexistence d'assemblage bout à bout).

La méthode par encorbellement a été aussi employée avec la pierre.

2) les ponts en maçonnerie

4 périodes successives et distinctes ont été marquées par la construction des ponts en maçonnerie :

- a) La **période romaine** (-1000 AVJC à 1000 APJC) : On a la construction de nombreux ponts pour des raisons militaires. Cette période est caractérisée par l'emploi de la

croûte en pierre pour la construction des ponts, technique importée d'Égypte et du Moyen Orient, dont les inconvénients majeurs sont la nécessité d'un cintre et l'existence de poussée aux retombées.

Ces ponts en pierre étaient préférés aux ponts en bois car plus durable.

37 m de portée a été atteinte par les voûtes de pierre mais surtout aussi par les affouillements des fondations qui étaient pendant longtemps leurs points faible et ce même aujourd'hui.

b) Du moyen âge au 18^e siècle (1000APJC au 18^e siècle)

Pendant cette période, l'initiative de la construction de ponts venait de marchands ou de moines groupés en confréries comme la confrérie des frères pontifes (constructeurs de pont) d'Avignon.

Les ponts en voûtes en plein cintre de tradition romaine et les ponts en arc ont marqué la période vue portée de 72 m a été atteinte.

C'est aussi l'apparition du concept œuvre d'art du pont au delà de celui d'ouvrage utile et fonctionne de Coration, sculpture, recherche de l'équilibre et de l'élégance.

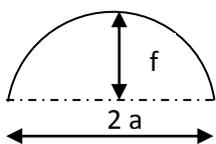
Le développement des transports a entraîné l'apparition des voûtes surbaissées pour rendre les ponts utilisables par les voitures en réduisant le dos d'ânes.

Des précautions par les fondations des piles en rivière ont été prises par protection avec enrochements.

La construction des maisons sur les ponts fut interdite.

Malgré ces efforts, l'insuffisance des fondations continue à caractériser les ponts.

c) **Le 18^e siècle** est marqué par de grands progrès réalisés par Perronet, fondateur de l'École des Ponts et chaussées en 1747 : réduction de l'épaisseur de files en construisant tout le pont sur cintre car au niveau des piles les poussées des voûtes adjacentes s'équilibrent : augmentation du surbaissement passé à 1/10.



$$\text{Surbaissement } T = \frac{f}{2a}$$

La découverte des ponts de cette époque était sobre pour maintenir le caractère mâle qui convient à l'architecture des ponts "selon Perronnet.

d) Du 18^{ème} siècle aux derniers ponts en maçonnerie

La construction des ponts a connu un développement important à cause de la réalisation des lignes de chemins de fer et l'accroissement des transports routes liées à la révolution industrielle.

Les faibles pentes admissible des voies ferrées imposaient de traversée les vallées au moyen de viaducs ouvrages de grandes hauteurs.

La diminution des charges des voûtes de grande portée étaient réalisés par des voûtes d'élargissements.

Les progrès enregistrés dans cette période sont :

- ❖ Améliorations sur les mortiers par l'invention du ciment portland
- ❖ Méthodes de dimensionnement empiriques remplacées par des méthodes rationnelles : statique graphique et résistance des matériaux développés par les professeurs de l'Ecole des Ponts et Chaussées : (Navier, Bresse, Barré de St-Venant)

- ❖ Perfectionnement des dispositions constructives et des méthodes d'exécution

90 m de portée a été atteinte dans cette période qui peut être considérée comme l'apogée des ponts en maçonnerie dont la construction à cesser en 1950. Le coût des matériaux et la disposition des tailleurs de pierre ont permis à d'autres matériaux (béton, acier) de remplacer la pierre qui n'est pas utilisée actuellement qu'en parement ou protection.

3°) les ponts métalliques

- a) Les ponts en fonte apparus à la fin du 18^e siècle des ponts en maçonnerie : arc, voussoirs assembles etc. portée de 72 m atteinte.

Matériaux fragile, la durée de vie des ponts en fonte est très courte et la construction des ponts en fonte a été abandonnée à la fin du 19^e siècle. Ces ponts sont du type pont en arc

b) Les ponts en fer : l'apparition au début du 19^e siècle du fer, matériaux plus élaboré et plus résistant que la fonte a permis la construction de 3 types de ponts : suspendus, poutres, arcs

❖ Les ponts suspendus sont les premiers à être construits en fer

A partir d'une portée de 21 m en 1796 aux USA, les ponts en fer ont atteint 137 m en 1820 pour culminer à 335 m en 1867 à Cincinnati (USA).

Les ponts suspendus en fer ont été l'objet de beaucoup d'effondrement dû au vent, à la l'oxydation des câbles et à l'insuffisance de rigidité du tablier.

❖ Les ponts à poutres constituées de poutres à âne pleine (poutrestriangulés)

❖ les ponts en arc est le type où le fer se prêtait le mieux pour avoir permis d'apporter une solution économique et spectaculaire au franchissement à grande hauteur de vallées profondes ou de larges vallées sans cintre c'est-à-dire par encorbellement.

Portée de 165 m atteinte en 1884 : viaduc de Garabit (France)

c) les ponts en acier

Les meilleures performances mécaniques de l'acier lui ont permis de remplacer progressivement la fonte et le fer dans les 3 types de ponts que sont les ponts suspendus, les ponts à poutres et les ponts en arc.

α) Les ponts suspendus dont la construction a commencé à la fin du 19^e siècle avec des portées de 60 à 300 m ont dépassé le millier de mètres en portée en 1931.

Ils sont en général à 3 travées toutes suspendues le plus souvent ou quelque fois à travées latérales indépendantes non suspendues.

Après de multiples catastrophes au 19^e siècle dues au vent que les constructeurs pensaient connaître et maîtriser, la stabilité acronyque des ponts suspendus est systématiquement examinée :

Recherches théoriques et en soufflerie

Les ponts suspendus sont réservés pour les très grandes portées et on peut citer quelques ouvrages ayant dépassé les 1000 m de portée :

❖ Pont routier sur Forth (Ecosse, 1964) 1006 m

- ❖ Pont sur le Tage à Listone (Portugal 1966) 1031m
- ❖ Pont Georges Washington à New York (USA, 1931) 1067 m
- ❖ Pont sur le Bosphore à Istanbul (Turquie, 1973) 1074
- ❖ Pont de la porte d'or à San Francisco (USA, 1937) 1280 M
- ❖ Pont Verrazano à New York (USA, 1964) 1298 m
- ❖ Pont sur la Humber (Angleterre, 1979) 1410 m

β) les ponts à poutres : pour les portées petites ou moyennes, ils sont constitués de poutres triangulées qui ont remplacé les poutres à âmes pleines du départ.

Les triangulations peuvent avoir des formes variées. Les poutres de hauteur constante ou variables, peuvent être placées sous la chaussée ou latéralement au-dessus de la chaussée.

On distingue les travées indépendantes dont le bow-string est un cas particulier et les travées solidaires soit continués soit cantilever.

Les ponts à poutres continues multiples à âme pleine sous chaussée et aussi sous forme de poutres latérales triangulées. Des portées de 300 m ont été atteintes par les ponts à poutres en acier.

δ) les ponts en arc : les arcs en acier ont été utilisés pour des franchissements à grande hauteur de larges vallées (viaducs) ou lorsque la portée ou le surbaissement étaient prononcés pour une voûte en pierre. Ces arcs sont soit à 2 articulations (aux naissances) soit à 3 articulations aux naissances et à la clé). Les arcs peuvent être :

- à tablier supérieur
- à tablier inférieur
- à tablier intermédiaire

Dans les 2 derniers cas le tablier est attaché à l'arc par des suspentes

γ) les tendances des ponts métalliques : l'acier a totalement remplacé la fonte et le fer.

- l'acier A42 5Tr = 42kgf :cm²) utilisé au départ est remplacé par l'acier A52 beaucoup plus résistant.

- le mode d'assemblage par rivure au départ a laissé la place par le soudage et les bouchons HR plus efficaces
- la couverture des tabliers en bois, en maçonnerie ou en tôles embouties ont laissé la place aux systèmes ci-après :
 - * la dalle Robinso : dalle en RA mince (8cm) couche sur tôle
 - * la dalle participante en BA ou BP intervenant dans la résistance à la flexion
 - * la dalle orthotrope : tôle raidie dans les 2 sens (raidisseurs longitudinaux + entretoises qui sont les raidisseurs transversaux)
- les coupes transversales qui étaient au départ en général constitué de poutres parallèles sous chaussée d'espacement de 3 à 4,5 m encroisées sur lesquels était appuyée la dalle en béton armée ont été remplacées par des ponts à 2 poutres et des ponts en caissons.
- les principaux types de ponts en acier : en travée indépendante l'acier est envisageable pour des portées supérieures à 50 m : ponts à caisson ou à poutres à âmes pleines sous-chaussée, ou bien même Bow-string.

En travées continues le pont à poutres à ossature mixte béton-acier est compétitif pour les petites portées, pendant que les poutres à âmes pleines sous chaussée ont accédé aux ponts à poutres latérales triangulées pour les moyennes portées.

On peut citer les types de ponts en acier construits depuis :

- Pont à 2 poutres sous chaussée
- Ponts en caissons dont le record de portée de 300 est détenu par le Pont de Niteroi (Brésil)
- Ponts à béquilles rarement droites mais en général oblique dont le record est de 376 m être pieds dequillesSfalassa (Italie, 1973)
- Ponts en arc devenus rares : de portée est projet de 528 en virginie (USA)
- Ponts à haubans très divers par leurs tabliers (à poutre, en caissons), par leurs pylônes (axiaux ou latéraux, en H ou en 1, en acier ou en BA), par la disposition

des haubans (en harpe ou éventail). Comme les ponts suspendus la vérification de la stabilité aérodynamique est nécessaire.

- Ponts suspendus qui sont les seuls à permettre les très grandes portées de l'ordre de 1000m actuellement : le record mondial est obtenu par le pont sur le Humber (Angleterre) avec une portée centrale de 1410 m
- Ponts mobiles qui sont toujours métalliques : ponts tournants ponts basculants et pont levants

4) les ponts en béton armé

- a)** Les matériaux : l'utilisation des liants hydrauliques ayant les propriétés du ciment est une technique connue par les romains au 3^e siècle avant JC, qui a été oubliée puis redécouverte à la fin du 19^e siècle de notre ère.

Vicat invente le ciment artificiel comme en 1850 sous le nom de ciment Portland.

Malgré que l'utilisation de pièces de bois ou de fer pour renforcer les maçonneries soit très ancienne, des tirants métalliques ont été utilisés pour équilibrer la poussée de voûtes.

A partir du milieu du 19^e siècle (1849), les premières inventions en béton armé apparemment par les précurseurs que furent les François Lambot (barque en BA en 1849), Coignet (Terrasse en BA en 1852) mais surtout Monnier (caisses à fleurs en BA en 1867).

D'un pont de 15 m de portée construit en 1871 en Angleterre, des milliers de ponts en BA ont été construits à la fin du 19^e siècle et des portées de 50 m ont été atteintes.

Mal connu au départ, l'usage du béton armé a été la première fois en France par les instructions de 1906.

- b)** Evolution des ponts en BA. A partir des instruments de 1906 réglementant l'usage du BA, la construction des ponts en BA s'est développée suivant 3 grands types : dalle, poutre et arc.

- ❖ Les dalles ont longtemps été utilisées pour de petites portées et pour les couvertures de ponts
- ❖ Les ponts à poutres de formes très variées, avec un tablier constitué d'une dalle et de poutres (ou nervures) rectangulaires, ou à talons pour des portées plus grandes.

Les poutres peuvent être :

- Latérales ou sous chaussées
- De hauteurs constantes ou variables
- A âme pleine, en caisson ou triangulé
- A travées indépendantes ou à travées continues ou cantilever comportant une travée indépendante dans la partie centrale appuyée sur des consoles (en prolongement des travées de rive)
- ❖ Les ponts en arc : ont beaucoup été utilisés car le béton comme la pierre se prête bien à la construction en arc où les contraintes développées sont essentiellement des compressions. Les arcs sont à 3 articulations (isostatiques) ou à 2 articulations, ou même à béquilles verticales qui sont en fait des cas particuliers d'arc.

L'arc et le tablier étant en général distincts, on distingue :

- ❖ Les arcs à tablier supérieur (tablier porté par des poteaux ou des voiles transversales ou longitudinales)
- ❖ Les arcs à tablier inférieur ou intermédiaire (tablier suspendu entièrement ou en partie à l'arc).

Avec quelques dizaines de m de portée ou départ les ponts en arc en BA ont été construits avec des portées de plus de 300 m : pont de Grandesvilles 305 m (Australie, 1964).

Actuellement les ponts en arc en BA ont tendance à être abandonnés à cause du prix et des sujétions dues au cintre car concurrencé par les ponts à poutres métalliques ou en béton précontraint.

C) situation actuelle et tendances : le béton armé est actuellement en matériaux très courant dans la construction des ponts et les ponts en BA sont très divers :

Les ponts à poutres sous chaussée : à travées indépendantes ou continues, de hauteurs constantes ou variables, à âmes pleines ou en caisson.

- ❖ Les ponts en arc en BA ont été beaucoup construits pour les portées, moyennes et surtout pour les grandes portées jusqu'aux années 1960. Actuellement ils sont très peu utilisés.
- ❖ Le béton armé ne s'impose actuellement que dans la construction de ponts de petites portées inférieures à 20 m.
- ❖ Le béton armé reste très utilisé pour les dalles de couverture de ponts métalliques et de ponts en BP, mais surtout pour les appuis (culées et îles) de tous les types de ponts.

Le règlement du béton armé de 1906 (instructions de 1906) a connu plusieurs modifications ou révisions en 1934, en 1960, en 1968 (règles CCBA 68), en 1970 (règles CCBA 68modifiées 70), en 1983 et 1991 (règles BAEL).

5) les ponts en béton précontraint

Matériau le plus récent, le BP a été inventé en 1928, résultat de réflexions et d'expériences dans l'objectif de diminuer voire de supprimer les inconvénients de la fissuration du béton. Très redoutée par les constructeurs car apparaissant comme indice de mauvaise construction la fissuration dans le BA est finalement inhérente au fonctionnement du béton et il faut en réduire les ouvertures.

Le principe est donc d'imposer une compression préalable.

Après avoir utilisé dans la réalisation de tuyaux des renforcements de barrage, de caissons de pont, les premiers ponts en BP ont été construits en 1936 avec des portées de 10,20 ; 33 m. en 1946 une portée de 55m est atteinte à Luzancy sur la Marne (France).

En ce qui concerne la techniques de BP, les procédés de précontraints se multipliaient en s'améliorant au niveau des câbles ou des barres et au niveau des ancrages : systèmes Freyssinet, SEEE, Coignet, BBRB à à câbles, système Divy dag à barres.

En ce qui concerne la réglementation, la première Instructions Provisoire (IP N°1) sur l'emploi de BP est paru en 1953 en France, les règles FP N°2 en 1973 et aujourd'hui nous utilisons les règles BP EL 1983.

Les d'ouvrages qui ont marqué l'évolution des ponts en BP sont :

- ❖ Les ponts dalles avec pont-type SETRA dénommée PSI-DP, construit en travée indépendants pour les petites travées et en travées continues (dalles à grands encorbellements, dalles élégies)
- ❖ Les ponts à poutres indépendantes à poutres en générales préfabriquées
- ❖ Les ponts à poutres continues
- ❖ Les ponts construits par encorbellements successifs qui sont le plus répandu pour les portées de 60 à 240 m. cette technique s'est perfectionnée par l'utilisation de voussoirs préfabriqués qui étaient coulés en place. Les coupes transversales sont toujours constituées de caissons.

Le record mondial de portée des ponts de ce type est détenu par le pont Hamara avec 240 m (Japon, 1976).

- ❖ Ponts à béquilles obliques
- ❖ Les ponts en arc
- ❖ Les ponts à haubans pour les grandes portées supérieures à 200 m, un tablier en BP a été associé aux haubans

6) quelques ponts récents remarquables

a) pont le plus long du monde toutes catégories : pont Danyang-Kunshan (chine) construit en 201, c'est un viaduc ferroviaire de la ligne grande vitesse Pékin Shanghai, continu sur 164,8km entre les villes de Danyang et Kunshan avec une section de 9km au-dessus du lac Yang-Tcheng

En Europe le pont le plus long est le pont Vasco de Gama au Portugal (de 12162m construit en 1998)

En France le pont le plus long est le pont de Saint Nazaire long de 3356m construit en 1974.

- b) Le pont le plus grand :** Viaduc de Millau qui a la plus haute pile du monde avec 245m (pile + pylône= 343m)
- c) Le pont le plus haut :** chine (2009) avec 496m de hauteur entre le niveau de la route et le fond de la vallée.
- d) Le pont suspendu le plus long :** pont du Detroit d'Akashi (Japon, 1998) ou la plus grande portée jamais construite est de 1991m , franchi la mer intérieure de Seto entre Kobé et l'île d'Awai du Japon.
- e) Le plus long pont a hauban :** le pont de l'île Rousski (2012, Russie) ; la plus grande portée haubanée est de 1104m au dessus du Bosphore a Vladivostok.
- f) Le plus long pont en arc :** pont en béton de Wanxland (1997, Chine) avec une portée de 420m .
- g) Le plus long pont en béton précontraint :** pont de Shibanpo (Chine) ; portée de 330m sur le Yangzi-juang avec des poutres en caisson en béton précontraint.
- h) Le plus long pont en maçonnerie :** pont de Danhé (2000, Chine) avec une voute d'ouverture de 146m .
- i) Le pont le plus large :** nouveau pont de Bay-bridge (2013, USA) avec un tablier de $77,80\text{m}$ a dix (10) voies de circulation.
- j) Le pont avec le plus grand nombre de circulation :** pont George Washington Bridge (1931, USA) avec quatorze (14) voies sur deux niveaux.

V. LA REGLEMENTATION TECHNIQUE DES PONTS

Pour les travaux relevant d'une maîtrise d'ouvrage d'Etat, le Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) regroupe l'ensemble des textes réglementaires, étant remplacé la précédente généralisés des règlements constituant le Cahier des prescriptions Communes (CPC) le CCTG et le CPC sont équivalentes mais seulement de générations différentes.

V.1 Réglementation technique relatives au calcul et à la justification des ouvrages

1. Les Règlements de charges sur les points

Ces règlements font encore partie de l'ancienne génération et sont regroupés dans le fascicule 61, Titres I, II et III du CPC.

Titre I : Pont Ferroviaires aujourd'hui abrogé et remplacé par des recommandations internationales

Titre II : Ponts - Routes

Titre III Ponts Canaux

Les Ponts routiers : (Titre II du fascicule 61 du CPC) sont définis :

- Les charges routières normales: systèmes A et B
- Les charges routières à caractères particulier : charges militaires, convois exceptionnels.
- Les charges de trottoirs et de pistes cyclables : systèmes local et général.
- Les charges de remblai
- Les charges dues au vent et aux séismes
- Les efforts dues aux chocs de bateaux sur une pile de fait.

2. Les règlements techniques de calcul

La réglementation actuelle est basée sur la justification des ouvrages aux états limites.

- a) **Ouvrages en bétons armés** : calculés et justifiés sur la base des règles du BAEL
- b) **Ponts en béton précontraint** : calculés et justifiés sur la base des règles du BPEL
- c) **Ponts métalliques** : relèvent d'un règlement qui a été le premier en 1972 à être basé sur les états limites même s'il n'est pas tout à fait en harmonie avec les règlements précédemment cités (BAEL BPEL) car plus récents (1979).
- d) **Ponts mixtes** : les tabliers à poutres métalliques sous chaussée et dalle de couverture en béton armé, sont calculés et justifiés selon un règlement qui se réfère au règlement de construction métallique précédent, mais en parfaite harmonie avec les règles BAEL pour ce qui concerne la dalle en béton armé.
- e) **Les fondations** : un règlement de calcul des fondations existe et les calculs se réfèrent au dossier pilote FOND 72 du SETRA.

3. Les règlements techniques d'exécutions

Il existe une réglementation concernant :

- La qualité des matériaux
- L'exécution des ouvrages

Les textes d'usage les plus courants en matière de ponts sont :

- Fascicule 4 du CCTG (Titres I à IV) relatif à la fourniture d'aciers,
- Circulaire de 79 – 23 du 9 mars 1979 relative au contrôle de qualité des bétons,
- Fascicule n°65 du CCTG, relatif à l'exécution des ouvrages et constructions en béton armé et en béton précontraint.

VI. LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DES PONTS

Après l'établissement des études d'exécution par l'entreprise, études approuvées par le maître d'œuvre, c'est le moment de l'exécution des travaux selon les étapes principales ci-après :

- L'exécution des fondations
- La réalisation des appuis
- La construction du tablier
- La mise en place des équipements

Sans entrer dans un cours de procédés généraux de construction (PGC), le présent paragraphe indiquera les principales techniques de construction.

1) Exécution des fondations

L'exécution des fondations démarre par le piquetage général qui consiste à reporter sur le terrain la position des ouvrages définie par le plan d'implantation, au moyen de piquets dont les têtes sont raccordées en plan et en altitude à des repères fixes.

L'exécution des fondations doit faire l'objet d'une surveillance attentive car la qualité des fondations est essentielle pour la tenue et la pérennité de l'ouvrage : l'exécution des fondations comporte des aléas car les caractéristiques réelles du sol ne sont jamais certaines, car susceptibles d'évoluer quelques soit la qualité des études géotechniques menées.

a) Fondations superficielles avec 2 situations

a-1. En Site terrestre

- Une absence de nappe : cas le plus simple en la semelle en BA est exécuté au fond d'une fouille sur une couche de béton de propreté
- En présence de nappe : s'il n'est pas possible de placer la fondation au-dessus de la nappe, ce qui est l'idéal, on exécute à sec la semelle sur un massif de béton non armé pour lequel un blindage de fouille sommaire en cas de faible profondeur. Si la fondation est relativement profonde et lorsque l'emprise est limitée, la semelle est exécutée à l'abri d'un blindage, parfois en bois sur des petits chantiers, mais le plus souvent en palplanches métalliques ou en parois moulées dans le cas de fouilles de grandes dimensions

a-2. En site aquatique

Les fondations superficielles en site aquatique posent essentiellement des problèmes d'exécution : devront être exécutées à sec, les fondations sont réalisées à l'intérieur d'une enceinte étanche appelée batardeau. Les batardeaux sont exécutés soit en parois moulées, soit en pal planches métalliques plus fréquents lorsque la hauteur d'eau est modérée.

Pour des hauteurs très importantes ou passe sert à des fondations sur pieux soit à des caissons havés.

Les différents types de batardeaux en palplanches métalliques sont :

- Les batardeaux en rideaux plans avec étais
- Les batardeaux circulaires
- Les batardeaux exceptionnels

La technique des caissons havés consiste à foncer par havage à l'air libre ou à l'air comprimé une enceinte creuse (caisson) que l'on fait descendre jusqu'à un substration résistant.

b) Fondations profondes sur pieux

Selon la méthode de mise en place, il faut distinguer 2 types de pieux :

b-1. Les pieux mis en place par refoulement des sol appelées aussi pieux R : pieux préfabriqués en BA ou BP, pieux métalliques mis en place par battage (pieux battus) ou par fonçage (pieux foncés)

b-2. Les pieux mis en place par excavation du sol appelés aussi pieux NR : pieux forés sans tubage, pieux forés avec tubage, barrettes moulées dans le sol en général en 2 files.

En site aquatique, les fondations sur pieux doivent être exécutés avec ou sans batardeau.

2) Exécution des appuis

Les appuis, culées et piles, qui sont pratiquement toujours en BA ne posent pas beaucoup de problèmes d'exécution. Néanmoins, il faut être attentif à l'aspect des parements vus et à la parfaite régularité des lignes pour ce faire, les dispositions doivent être prises à l'avance comme par exemple les Coffrages métalliques glissante.

3) Construction des tabliers

a. La construction sur cintre

Cintre en bois appuyé sur le sol pour les voûtes en maçonnerie, technique développée et perfectionnée pour la construction des arcs en béton armé (BA). Progressivement, le bois a tendance à être remplacé par l'acier.

Les cintres et échafaudages essentiellement métalliques sont utilisés encore pour la construction d'un grand nombre de ponts-dalles, de portiques et de ponts à poutres. Lorsque le tablier est très haut au-dessous de la brèche ou si le sol est peu résistant pour supporter un cintre, on utilise un cintre auto lanceur et autoporteur qui s'appuie sur les piles et avance de travée en travée.

b. La construction en place sans cintre

Méthode utilisée et développée à partir de la construction des ponts métalliques (19^{ème} siècle).

- Les ponts suspendus sont construits en commençant d'abord par les pylônes et les massifs d'ancrage, ensuite on met en place les câbles porteurs (par différents moyens), puis on avance progressivement le tablier et les suspentes qui le soutiennent de part et d'autre des pylônes.
- La construction par encorbellements successifs des ponts métalliques, à poutres triangulées, des grands arcs et surtout maintenant pour les ponts de grande portée en béton précontraint, les voussoirs (élément de tablier) successifs sont coulés en place ou préfabriqués.

- Méthode rarement utilisée lorsque la route nouvelle à franchir est en déblai. On creuse le terrain pour construire les appuis (culées et piles) puis on coule le tablier en s'appuyant directement sur le sol et on déblaie ensuite le dessous du pont.

c. La construction en dehors de l'emplacement du pont

- La construction par lançage souvent employée pour les ponts métalliques : le tablier est construit sur la berge, puis il est poussé (ou tiré) au moyen de vérin et avance au-dessus de la brèche en s'appuyant sur les piles successives (ou sur des palées provisoires). Méthode utilisable lorsque l'intrados est rectiligne et on doit munir le tablier d'un avant-bec et prévoir un contrepoids pour éviter le basculement. Pour franchir un cours d'eau, il y a intérêt si c'est possible, à appuyer l'extrémité du tablier sur un bateau et à le déplacer jusqu'à l'autre rive.
- Le poussage des tabliers en béton précontraint très analogue au lançage : le glissement se fait sur des plaques de téflon et si nécessaire, l'extrémité du tablier peut être soutenue par des haubans provisoires.
- La méthode du ripage latéral est utilisée lorsqu'il s'agit de remplacer un pont vétuste et que l'opération doit se faire rapidement. On construit le nouveau tablier à côté de l'ancien, sur des appuis provisoires, puis on enlève l'ancien et on met à sa place le nouveau en le déplaçant transversalement (justifiée pour des ponts de chemin de fer de lignes importantes).
- Toutes les méthodes qui utilisent la préfabrication plus ou moins poussée d'éléments du pont et qui sont très variées.

En acier, il est avantageux de construire en atelier des tronçons de tablier si les moyens de transport et de mise en place le permettent.

En béton précontraint, la préfabrication s'est développée pour les poutres d'ouvrages à travées indépendantes et pour les voussoirs des ponts construits par encorbellements successifs.

Chapitre 2 : CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES PONTS

I) LES ETAPES D'ELABORATION DE PROJET

Comme tout ouvrage de Génie Civil, l'élaboration d'un projet de pont s'effectue par étapes. Il faut rappeler que dans le cadre de l'élaboration de projet, les ponts sont classés en ouvrages courants et ouvrages non courants :

- **Les ouvrages courants** qui se subdivisent en 2 sous classes :
 - **Les ouvrages courants conformes à un modèle type** : les ponts types du SETRA sont des ouvrages à dossier pilote disponible en fichier électronique qu'il suffit d'utiliser ce sont : **PSI-BA, PSI-DA, PSI-DP, PSI-DE, PSI-DN, PRAD, VIPP, PIPO, PICF.**
 - **Les ouvrages courants non conformes** à un modèle type : les ponts types sont ceux qui présentent des difficultés particulières de conception ou d'exécution : terrain, modifications de solution types, structures peu classiques, techniques innovantes etc...
- **Les ouvrages non courants** : Ce sont :
 - Les ponts ayant une travée de plus de 40m de portée
 - Les ponts dont la surface dépasse 1200m²
 - Les ponts mobiles et les ponts canaux.

L'étude d'une opération routière s'effectue selon 2 étapes principales correspondant à des dossiers techniques :

1) **L'Avant-projet** qui permet de fixer les caractéristiques techniques, l'estimation de l'opération, d'engager la procédure de Déclaration d'Utilité Publique (DUP)

L'Avant-projet correspond pour les ouvrages d'art à l'étude préliminaire dont la consistance diffère selon le type de projet :

a) Dans le cas des ouvrages courants conformes à un modèle type :

- Le tableau récapitulatif des ouvrages courants (numérotés) et de la nature des obstacles franchis avec, pour chacun d'eux.

- Les caractéristiques du fonctionnelles du franchissement (PI ou PS), largeur des trottoirs ou BAU, biais, ouverture biaise, hauteur libre minimale sous ouvrage ;
- Le type envisage et l'estimation
- Le mémoire

- Le cas échéant, en cas de recherche architecturale poussée, les documents graphiques.

b) Dans le cas des ouvrages courants non conformes à un modèle type :

En général, la consistance est analogue au cas précédent mais le mémoire est plus étoffé.

c) Dans le cas des ouvrages non courants

- Mémoire étoffé
- coupe longitudinale et coupe transversale de chaque ouvrage envisagé avec indication du profil en long des hauteurs libres et des éléments relatifs au sol
- Le cas échéant photographies du site et photomontages
- Estimation sommairement décomposée de la ou des solutions retenues pour faire l'objet d'un APOA (Avant-projet d'ouvrage d'Art).

2) Le projet de définition

Il fournit tous les éléments nécessaires à l'établissement des données du dossier de consultation des entreprises (DCE)

C'est l'étape qui suit l'avant – projet pour les ouvrages d'art Courants conformes à un modèle type et certains ouvrages courants non conformes à un modèle type

Cette étape basée sur des études élaborées, aboutit à la définition complète des ponts projetés et à leur estimation fine. Pour chaque ouvrage courant le projet de définition comporte :

- Plan de situation
- vue en plan définissant l'implantation à l'échelle 1/100 à 1/500
- Elévation (échelle 1/100 à 1/500)
- Coupe longitudinale sur l'axe de la chaussée avec report du TN et sondages (échelle 1/100 à 1/500)
- Coupe transversale (échelle 1/20 ou 1/50)
- Dessins de détails (échelle 1/20 ou 1/50)
- Estimation
- Note justifiant les dispositions adoptées, notamment au niveau des fondations, note à laquelle sont annexés les rapports de laboratoire et coupes de sondages.

Le Projet de définition sert de base à l'élaboration du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE).

3) L'avant-projet d'ouvrage d'art non courant (APOA) qui précède le projet de définition

Pour chaque ouvrage non courant et pour les ouvrages courants non conformes à un modèle type spécifié dans la DM (Décision Ministérielle) relative à l'Avant-projet, l'APOA est établi sur la base des conclusions de l'étude préliminaire. Une ou plusieurs (souvent 2) solutions sont choisies et sont étudiées en détail de façon à :

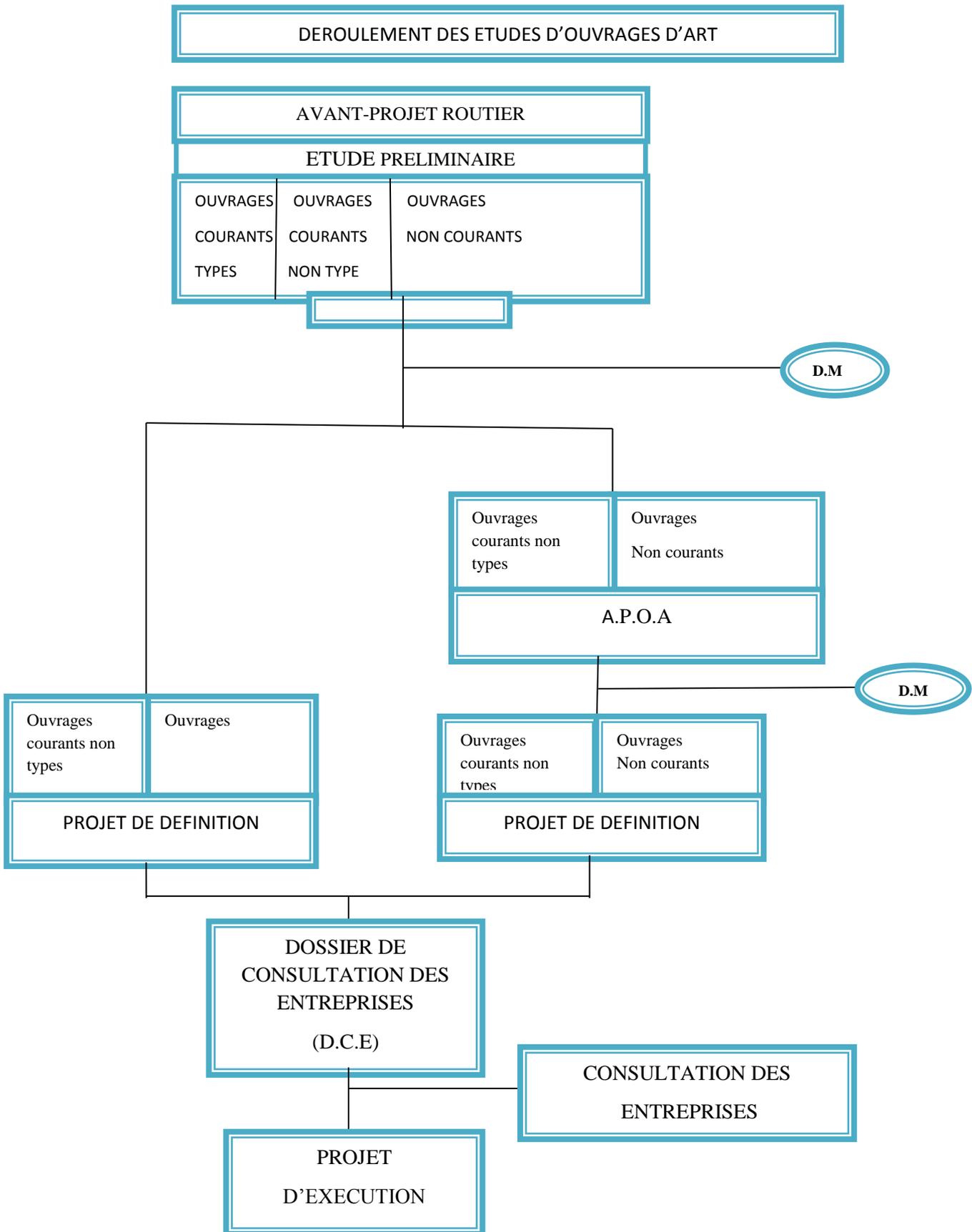
- aboutir à une estimation précise des dépenses
- fixer définitivement les caractéristiques fonctionnelles et géométriques du franchissement.

L'APOA a la consistance ci-après :

- Rapport de synthèse
- Plan de situation
- Vue en plan et définition de l'implantation de l'ouvrage au 1/200 ou au 1/500
- Profil en long : échelle longueurs = échelle élévation et échelle hauteurs = quintuple ou décuple échelle longueurs.
- Coupe longitudinale dans l'axe de la chaussée au 1/200 ou au 1/500.
- Coupe(s) transversale (s) au 1/20 ou 1/50
- Note sur les conclusions des études géologiques et géotechniques
- Etude paysagère et architecturales accompagnée de documents graphiques et photographiques
- Mémoire justificatif
- Estimation

La consistance de l'APOA peut être beaucoup plus étoffée pour certains ouvrages d'importance exceptionnelle.

L'étape d'APOA est destinée à figer toutes les caractéristiques de l'ouvrage.



4) Le dossier de consultation des entreprises (DCE)

Établi sur la base des éléments du Projet de Définitions

En général les marchés de travaux relatifs à la construction de ponts sont attribués sur Appel d'Offres selon les 3 types ci-après :

- Appel d'Offres sur projet de base sans variante
- Appel d'Offres sur projet de base avec variante
- Appel d'Offres sur concours

5) Le Projet d'exécution

Il est établi par l'entreprise déclarée adjudicataire pour tous les types d'ouvrage entreprise qui procède au calcul et à la justification de toutes les parties de la structure en tenant compte de ses méthodes, de son matériel et de la cinématique de construction prévue.

Le projet d'exécution est soumis au visa du maître d'œuvre qui est chargé de sa vérification.

II. LES DONNEES D'ETUDES DE PROJET

La conception d'un pont doit satisfaire à des exigences ou données fonctionnelles, naturelles et autres.

1°) Les données fonctionnelles

a) Données relatives à la voie portée :

- Le tracé en plan
- Le profil en long
- Le profil en travers

Ces caractéristiques doivent respecter les textes normatifs (ici normes géométriques des routes).

b) Données relatives à l'obstacle franchi

Lorsque l'ouvrage franchit une voie de communication (route, voie ferrée, voie navigable), il est nécessaire de respecter les caractéristiques fonctionnelles relatives à cette voie, c'est-à-dire les hauteurs libres et les ouvertures (gabarit).

- Hauteur libre ou tirant d'air est fonction des gabarits de circulation ou de navigation à respecter pour la voie franchie : 3 cas peuvent se présenter :
 - ✓ voie franchie = route
 - ✓ voie franchie = voie ferrée
 - ✓ voie franchie = voie navigable

- ouverture comptée entre nus intérieurs des appuis de l'ouvrage qui encadre le profil en travers.

2) Les données naturelles

a) Les données géotechniques : fondamentales pour l'étude des ouvrages, elles sont obtenues par une reconnaissance qui doit donner les informations les plus complètes possibles sur le terrain naturel.

b) Les données hydrauliques : dans le cas d'un franchissement d'un cours d'eau, il est nécessaire de connaître les renseignements ci-après : topographie du lit, les niveaux d'eau (PHEC, PHEN, PBE etc...), le phénomène d'affouillement etc..

c) Les données climatiques : le vent, la température, la neige et certaines conditions climatiques locales (embruns marins par exemple).

d) Les données sismologiques

3) Les données d'intégration au site

a) Considérations d'ordre esthétique d'impact visuel du pont, surtout en site urbain, mais aussi en rase campagne ; un ouvrage architecturalement réussi peut contribuer à un épanouissement touristique de la zone.

Pour que la dénomination « ouvrage d'art » conserve son sens, il importe de soigner l'aspect de la construction. Il est vrai que le calcul d'un pont est capital, mais c'est son apparence qui est perçue par les usagers et qui constitue pour eux le critère de base d'évaluation de sa qualité.

C'est à juste titre que Paul Séjourné écrivait : « De tous les ouvrages d'art, je dis bien de tous, même les petits, l'aspect importe ; il n'est pas permis de faire laid.

C'est une étrange opinion que d'estimer cher ce qui est beau, bon marché ce qui est laid : on a fait laid et cher, beau et bon marché » (Grandes Voutes - 1913).

C'est pourquoi il est nécessaire, s'il le faut, de requérir l'intervention d'un architecte dès le stade des études préliminaires.

b) Considération des problèmes d'environnement qu'il faut séparer en nuisances en cours d'exécution et en nuisances apportées par l'ouvrage en service.

Les études d'impact sur l'environnement (EIE) obligatoires pour tout projet d'envergure, prennent correctement en compte ces questions.

III. CHOIX DU TYPE D'OUVRAGE

1) Analyse des données

Les données ci avant réunies doivent être analysées pour aboutir à l'ouvrage projeté.

a) Les données fonctionnelles

a-1. Mise au point du profil en long

a-2. Mise au point du tracé en plan adaptation du biais ou de la courbure

a-3. Mise au point du profil en travers

b) Les données naturelles

Analyse des caractéristiques géotechniques et hydrauliques

- qualité des sols → choix du mode de fondation (superficielles, semi-profondes, profonds)
- Les contraintes hydrauliques liées à l'écoulement des eaux conduit à prendre en compte.
 - Les niveaux des crues : PHE ou PHEC, PBE, PHEN
 - Les débouchés hydrauliques permettant le passage de la crue de référence et les objets flottants : fixation de la côte minimale de l'intrados.
 - Risques d'affouillement : forme des piles

2) Définition de la brèche

Délimitation de la brèche à franchir après étude des obstacles issus de contraintes qui peuvent être naturelles (cours d'eau, thalweg), fonctionnelles (voie de communication), d'environnement (emprise hydraulique), architecturale ou d'exploitation

3) Etude des possibilités d'implantations des appuis

- Analyse des contraintes du projet et définition de la brèche à franchir : position des appuis extrêmes
- Recherche des zones possibles d'implantation des appuis intermédiaires
- définition des portées du pont et apparition des choix de structures envisageables.

En général, on opte pour une répartition symétrique des travées par rapport au milieu du pont.

4) choix de la structure

- le critère principal de choix est la portée déterminante ou principale (plus grande distance entre 2 appuis successifs)

- autres paramètres : possibilités de construction du pont, caractéristiques géométriques en plan, largeur du tablier, hauteur disponible, nature terrain de fondation, résistance de la structure aux chocs (véhicules, navires etc...)

Tous ces éléments conduisent à définir :

- Le nombre de travées et leurs longueurs
- Le balancement des travées
- Le type de structure (longitudinalement et transversalement) en se basant sur les domaines d'emploi usuels des ouvrages.

Voir tableau qui donne les gammes de portées et les élancements des différents ponts :

$$\alpha = \frac{\text{longueur travée de rive}}{\text{Longueur travée intérieure}} = \text{balancement des travées}$$

$$\theta = \frac{\text{hauteur tablier}}{\text{Portée}} = \text{élancement des travées}$$

Tableau 1 – Domaine d'emploi des principaux types d'ouvrages courants

Type D'ouvrage	PORTEE											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
PSI-BA (1)					—	—						
PRAD					—	—	—					
PSI-DA (2)			—	—	—							
PSI-DP (2)					—	—						
PSI-DE (3)					—	—	—					
PSI-DN					—	—	—	—				
VIPP						—	—	—	—	—	—	
							—	—	—	—	—	—
PIPO				—	—							
PICF												

- (1) Domaine courant —
- Domaine exceptionnel —
- (2) Section rectangulaire —
- Section à encorbellement latéraux —
- (3) Tablier de hauteur constante —
- Tablier de hauteur variable —

Tableau II – Ponts en béton armé ou précontraint

Type D'ouvrage		PORTEES (m)									
		0	5	10	20	30	40	50	100	200	
B A.	PICF										
	PIPO										
	PSI-DA										
	PSI-BA										
B P.	PSI-DP										
	PSI-DE										
	PSI-DN										
	VIPP										
	Contre auto-lanceur										
	Pont poussé (unilatéralement)										
	Pont poussé (bilatéralement)										
	Pont construit en encorbellement										

Tableau III- Ponts métalliques

Type D'ouvrage		PORTEES (m)									
		0	5	10	20	30	40	50	100	200	
<u>TRAVEE INDEPENDANTE</u> Poutrelles enrobées Tablier mixte Dalle orthotrope											
<u>POUTRE CONTINUE</u> Poutrelles enrobées Tablier mixte Dalle orthotrope											

5°) Exemple de démarche de choix d'un ouvrage

ENONCE : soit à réaliser un ouvrage de franchissement routier d'un cours d'eau afin d'assurer la continuité de la circulation routière. Le régime du cours d'eau est fluvial et l'écoulement permanent.

Les données du projet se présentent comme suit :

- Données hydrologiques et hydrauliques : Débit **Q100 = 185m³/s**, cote PHE = **269,41 m**, cote tirant d'air mini + remous = **279,23m**
- Données topographique : largeur brèche = **80m** et profondeur = **8m** en moyenne
- Données géotechniques : 2 sondages effectués jusqu'à 15m font ressortir un sol argileux jusqu'à **11m** et rocheux vers **15 m**.

RESOLUTION

- Paramètre fondamental de choix de type d'ouvrage est la portée qui fait croître le cout de réalisation : avec 80m de franchissement pour rester dans la gamme des portées des ouvrages courants conformes aux ponts – types du SETRA, nous pouvons adopter une portée maximale de 20m soit un pont à 4 travées de 20m de portées chacune.
- Les différents types de ponts pour la gamme de portée pour un pont à 4 travées de 20m de portée, les tableaux permettent d'envisager les solutions ci-après :
Ponts en béton armée BA
 - * le pont en dalle en BA : PSI/DA
 - * Le pont à poutres en BA : PSI-BAPont en béton précontraint BP :
 - * le pont en dalle précontrainte PSI BP
 - * le pont en dalle élégie PSI-DEPont métallique
 - * le pont à poutres enrobées à travées indépendantes
 - * le pont à poutres enrobées à travées continues

La disponibilité sur place des matériaux du BA, la facilité des constructions en BA et la maîtrise de la technique par les entreprises locales rend les ponts en BA très compétitifs

sur le plan économique contrairement aux solutions en BP nécessitant un matériel spécifique et une technique de construction non maîtrisée localement (ce qui entrainera de recourir aux entreprises étrangères) ou la solution métallique avec l'acier qui coûte excessivement cher.

Le tableau ci-après donne la comparaison relative des 2 solutions en BA retenues

Type	Avantages	Inconvénients
Ponts à poutres	-Economie béton -Portée allant de 10 à 25m	- Couteux en main d'œuvre -Consommation de coffrage
Pont - Dalle	-Economie de coffrage -Exécution aisée -Minimise quantité remblai d'accès	-Consommation de béton et d'acier supérieur de 25 à 30% -Portée compétitive =15m

Conclusion : le choix est porté sur le pont à poutres pour l'économie de la consommation e béton et d'acier de 20 à 30%.

IV CONCEPTION DETAILLEE

Après procédé au choix de l'ouvrage, il faut procéder au prédimensionnement des éléments de l'ouvrage à soumettre au calcul de structure (BA, BP ou CM) lors du projet d'exécution.

1) Les Tabliers :

Eléments quasi – horizontal destiné à recevoir la circulation qui définit l'élanement de l'ouvrage par le rapport de la hauteur sur la portée :

$$\text{Elancement} = \frac{\text{Hauteur tablier}}{\text{Portée du pont}}$$

En cas de tablier à hauteur variable on définit 2 élancements : à la clé et sur appui. Selon la coupe transversale du tablier on distingue :

- Le tablier en dalle en BA ou BP
- Le tablier à poutres en BA, BP ou CM
- Le tablier à caisson en BA, BP ou CM.
- Le tablier en ossature mixte (OM)

Les dimensions des éléments de tabliers sont déterminées par des formules empiriques, dimensions susceptibles d'être revues lors des calculs du projet d'exécution.

Ce sont :

- La hauteur qui peut être constante ou variable, fonction de l'élanement.
- L'épaisseur des âmes des poutres ou des caissons.

- L'épaisseur des dalles de couverture ou hourdis.
- La répartition de la poutraison

Tableau IV : Elément de dimensionnement des ouvrages courants

TYPE	ELANCEMENTS
PSI-BA	1/15 A 1/17
PRAD	1/20
PSI-DA	Travée indépendante : 1/22
	tablier à deux travées : 1/23
	tablier à trois travées et plus : 1/28
PSI-DP	Travée indépendante : 1/22
	tablier à deux travées : 1/23
	tablier à trois travées et plus :
	1/33 de la travée centrale, ou
	1/38 de la travée de rive
PSI-DE	Travée indépendante : 1/22
	tablier à deux travées d'épaisseur constante : 1/25
	tablier à deux travées d'épaisseur variable :
ET	1/20 sur appui
	1/30 en travée
	tablier à trois travées ou plus d'épaisseur variable : 1/30
PSI-DN	tablier à trois travées ou plus d'épaisseur variable :
	1/24 sur appui
	1/42 en travée
TYPE	EPAISSEURS
PIPO	Lorsque l'ouverture passe de 8m à 20m
	Traverse : 0,35 à 0,66m
	Piédroit : 0,35 à 0,66m
PICF	Lorsque l'ouverture passe de 5m à 12m
	Traverse supérieur : 0,30 à 0,40m
	Traverse inférieur : 0,30 à 0,45m
	Piédroit : 0,30 à 0,36m

2) Les appuis

La définition des appuis d'un pont, indissociable de celle de l'ensemble de l'ouvrage, résulte de la synthèse englobant

- la nature et le mode de construction du tablier
- les contraintes naturelles du site : terrestre, aquatique, résistance du sol TN etc...

a) **Les culées** (appuis de rive) : En général l'étude d'un pont débute par l'implantation des culées pour définir la longueur totale de la brèche à franchir, d'où la définition de la portée principale, facteur principal de conception.

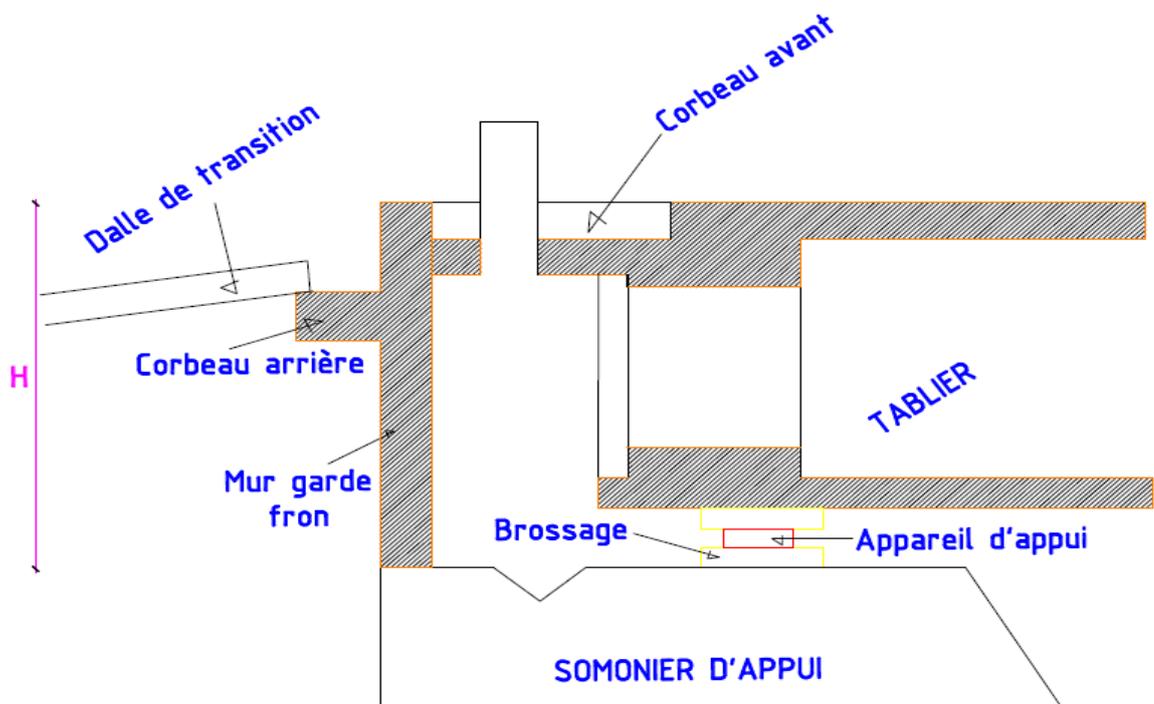
On peut distinguer 2 familles de culées :

- Les culées à réaction principale positive, de loin les plus utilisés $R > 0$
- Les culées à réaction principales négative pour les ponts à travées déséquilibrées $R < 0$.

Une culée doit remplir sa fonction qui se décompose en une fonction mécanique (transmission des efforts en sol, limitation des déplacements horizontaux dues aux poussées, limitation des déplacements verticaux dues aux tassements), une fonction technique (élément d'accès à l'intérieur du pont, possibilité d'association d'une chambre de triage en cas de conduites ou de canalisations à l'intérieur du tablier).

Une tête de culée comporte :

- Un sommier d'appui
- Un mur garde – grève doté d'un corbeau avant contenant une réservation pour joint de chaussées et souvent d'un corbeau arrière pour appui de la dalle de transition.



a-1 La sommier d'appui : élément sur lequel repose l'about du tablier et dans le cas de culées remblayées il est intégré au mur de front.

Sa surface doit être aménagée pour permettre :

- L'implantation des appareils d'appui
- La mise en place de vérins pour changer les appareils d'appui s'il ya lieu ou pour mesurer les réactions d'appui.
- Assurer l'évacuation des eaux en phase de construction du tablier par une pente mini de 2% à l'arase supérieure du sommier et une cunette contre le mur garde grève pour recevoir les eaux.

La largeur du sommier dépend du type de culée et de l'espace à réserver entre l'about du tablier et le mur garde grève, espace destiné à faciliter l'accès pour visite et entretien.

- Petits ouvrages de type ponts dalles : espace minimum de quelques cm.
- Grands ouvrages : espace de 50 à 60cm

a-2. Le mur garde –grève dont la fonction est de séparer physiquement le remblai de l'ouvrage. C'est un voile en BA, construit après achèvement du tablier par reprise de bétonnage sur le sommier (pour faciliter le lancement des travées métalliques ou la mise en tension des câbles de transition) : résiste aux efforts de poussée des terres, de freinage, transmis par la dalle de transition, hauteur mur garde-grève = hauteur tablier et épaisseur mur garde –grève = $\max(0, 30 ; n/8)$.

a-3 les différents types de culées

- Les culées enterrées
- les culées remblayées
- les culées creuses
- les culées en terre armée
- les culées contrepoids à réaction principale $R < 0$

b) Les piles (appuis intermédiaires)

Plus que les culées, la conception des piles est liée au type et au mode de construction du tablier, au type et au mode d'exécution des fondations

b-1 Elément de Prédimensionnement

- Les têtes de piles sont dimensionnées de façon à permettre l'implantation des appareils d'appui, des éventuels appuis provisoires, des niches de vérins.

Pour le cas de piles de ponts courants, s'il n'y a pas de problème d'encombrement dans le cas des piles de type voile, par contre en ce qui concerne les piles de type poteaux sans chevêtre de liaison l'encombrement des appareils d'appui et des niches à vérins impose les dimensions minimales de 0,50m pour zone rectangulaire ou carrée et de 0,60m pour zone circulaire.

Pour le cas des piles grands ouvrages en plus de considérations du cas des ponts courants ci-avant qui sont valables, il faut ajouter des considérations relatives à leur mode de construction qui nécessite l'emploi d'appareils d'appui provisoire ce qui augmente la place nécessaire au niveau de l'assise.

- Le fût de pile est dimensionné selon 3 critères :
- Critère de Résistance mécanique
- Critère de robustesse
- Critère esthétique

b-2 Les piles des ouvrages courants. (**Voir dossier pilote PP73 SETRA**) sont classés en 2 familles

- Les piles de type voile dont le modèle de base est un voile continu d'épaisseur constante
- Les piles de type poteaux constituées de poteaux(ou colonnes) que peuvent être libres en tête ou liées en tête par un chevêtre. Ils doivent être robustes pour résister aux chocs des véhicules.
- Les piles spéciales dessinées par les architectes dans le cas d'ouvrages urbains et qui ne se rangent dans aucune des 2 familles données

b -3 – les piles des grands ouvrages en béton

En fonction du type de tablier qu'elles supportent on distingue :

- Piles des ponts à poutres précontraintes préfabriquées piles –marteaux, piles portiques
- piles des ponts poussés
- piles des ponts construits sur cintre autolancement, confection du tablier de hauteur constante par entière dans travers entière dans un coffrage soutenu par une poutre en acier dite cintre auto lanceur s'appuyant sur les piles de l'ouvrage
- piles des ponts construits par encorbellements successifs : tabliers simplement appuyés, partiellement encastrés et totalement encastrés sur les piles

3) les fondations

Partie visible ou non en contact avec le sol et sur laquelle se fondent les appuis du pont elles transmettent les charges et surcharges du pont au sol support. Pour les calculs des fondations, se référer au cours de mécanique des sols. On distingue

a) les fondations superficielles.

En site terrestre en absence de nappe ou dans la nappe

B= largeur de la semelle

h = épaisseur de la sonnette

b= largeur de l'appui

L'épaisseur semelle $h > \sup(0,60 ; \frac{B-b}{4})$

- En site aquatique : le niveau de la fondation doit se situer en dessous du niveau de l'affouillement local autour des piles

b) les fondations profondes : les pieux mis en place par refoulement du sol : foncés ou battus en BA ou en BP, pieux métalliques

Les pieux mis en place sans refoulement des sols : pieux forés sans tubage, pieux forés avec tubage, barrettes moulés dans le sol.

4) les équipements

Trop souvent considérés comme accessoires les équipements jouent un rôle fondamental dans la conception, le calcul et la vie d'un ouvrage.

a) les revêtements du tablier : la chaussée

Couche d'étanchéité à base d'asphalter (Chape épaisse) ou utilisant des résines synthétiques (Chape minces)

Épaisseur : Chape épaisse : 30 mm

Chape mince : 1,5 à 3 mm

Poids volumique = 24 kN/m^3

-couche de roulement en tapis d'enrobé de 7 à 8 cm d'épaisseur et de poids volumique de 22 à 25 KN/m^3

b) Trottoirs

Rôle protection des piétons en les isolants en général par simple surélévation de la circulation automobile.

On distingue :

- Les trottoirs sur caniveaux
- Les trottoirs pleins

c) Dispositifs de retenue

Equipements placés sur les bords latéraux des ponts destinés à retenir les prêtres ou des véhicules en perdition. On distingue :

- Les gardes corps : sécurité des prêtres, dimensions normalisés par des règlements ;
- Les glissières : sécurité des véhicules légers existant en 2 types : glissières rigides et glissières souples ;
- Les barrières : sécurité des poids lourds : les barrières modernes disponibles sont : BN1, BN2, BN3 et BN4.

d) Les appareils d'appui

Les tabliers reposent en général sur les culées et piles (appuis) par l'intermédiaire des appareils d'appui dont le rôle est de transmettre des efforts verticaux et horizontaux.

On distingue 4 types d'appareils d'appui :

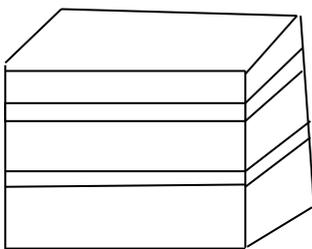
- Les articulations en béton
- Les appareils d'appui en élastomère fretté (néoprène)
- Les appareils d'appui spéciaux
- Les appareils d'appui métalliques

Les articulations en béton appelés aussi articulations Freyssinet, rarement employés et réservés aux ponts de petites dimensions du type dalles armées ou précontraints : il s'agit de sections rétrécies de béton.

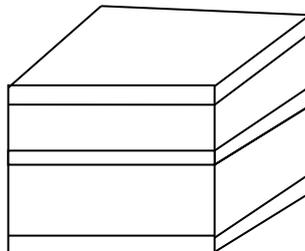
Les appareils d'appui en élastomère fretté : constitués par un empilage de feuilles d'élastomère et de tôles d'acier jouant le rôle de frettes d'épaisseur de 1 à 3 mm, avec des feuilles néoprène d'épaisseur en général de 8, 10, 12mm (parfois même de 20mm).

Les appareils d'appui en élastomère fretté ou néoprène sont couramment utilisés pour tous les ouvrages en béton, car en dehors de leur coût modéré, par leur déformabilité, ils reprennent élastiquement les charges verticales, horizontales et les rotations.

Appareils d'appui en élastomère fretté



STUP



CIPEC

Les appareils d'appui spéciaux : commercialisés par un certain nombre de fabricants dont les principales sont :

- GHH (Allemagne) : appareils d'appui Néotopf
- FIP (Italie)
- PSG (GB) : appareils d'appui Néotron
- Glacier (GB)

Les appareils d'appui métalliques : concentrés dans le cas des ponts métalliques où ils sont très souvent remplacés par les appareils d'appuis en élastomère frettés

e) les Joints de chaussée

Les tabliers subissent des variations dimensionnelles longitudinales dues à la T° (dilatation) les ouvrages en béton dues au retrait et au fluage.

Pour rendre les tabliers librement dilatables, on ménage des jeux à chaque coupure entre 2 parties, ainsi qu'à une ou aux 2 extrémités : on y dispose à chacun de ces coupures un joint de chaussée dont les types sont divers et choisis conformément aux classes de trafic définies par le catalogue 1977 des structures de chaussées du SETRA.

- Les joints pour voies de trafic PL faible ou modéré
- Les joints pour voies à fort trafic PL

f) Les Corniches

Le principal rôle d'une corniche est d'ordre esthétique : en effet situées à la partie haute des tabliers, les corniches dessinent la ligne de l'ouvrage : une corniche mal alignée se remarque très vite à l'œil nu.

Au delà de son rôle esthétique, la corniche sert aussi de larmier pour éviter le ruissellement de l'eau de pluie sur les parements de la structure porteuse. Enfin les garde-corps peuvent être scellés dans la corniche.

Il existe 3 types de corniches

- Les corniches en béton coulées en place
- Les corniches en béton préfabriqués
- Les corniches métalliques

g) L'évacuation des eaux

Sur un tablier de pont, l'évacuation des eaux est nécessaire non seulement pour la durabilité de la structure, mais aussi pour la sécurité des usagers.

En général les eaux sont recueillies par le profil en pente, puis évacués par des gargouilles ou par une corniche – caniveau : les gargouilles peuvent déboucher directement à l'air libre ou être raccordées à un système de recueil ou d'évacuation des eaux à l'intérieur de la structure du tablier.

h) Les dalles de transition

A l'arrière du mur garde – grève se trouve la dalle de transition dont le rôle est d'atténuer les effets des dénivellations entre la chaussée courante et le pont due à de légers tassements du remblai d'accès. La dalle de transition appuyée sur le corbe du mur garde – grève d'un côté et le remblai de l'autre adoucit la dénivellation, préserve ainsi le confort de l'utilisateur et permet d'éviter les nombreuses pressions répétées sur le mur garde – grève par les véhicules lourds qui l'endommageraient à long terme.

La dalle de transition qui a la même dimension transversale que le mur garde – grève a une longueur variant de 3 à 6m selon la hauteur H du remblai :

$L = \text{Min} [6\text{m} ; \text{Max} (3\text{m} ; 0,6H)]$ H = hauteur du remblai.

Directement coulée sur un béton de propreté, elle a une épaisseur de 30cm.