

BÉTONS ET OUVRAGES D'ART

Tome 1

Les ponts courants en béton



BÉTONS ET OUVRAGES D'ART

Tome 1

Les ponts courants en béton

Ce guide technique synthétise les principales règles de conception, les informations essentielles sur les matériaux et les équipements ainsi que les recommandations pour la maîtrise esthétique des parements et la durabilité des bétons.

La démarche architecturale adaptée à ces ouvrages courants est illustrée par des témoignages d'architectes.

Contributions à l'ouvrage

Ce document a été rédigé par un groupe de travail composé d'experts de la FIB, du CERIB, du SNBPE, du SNPB et de CIMBETON.

Pour CIMBETON

Fabrice AGNESINA
Marc CHIGNON
Claude DERACHE
Patrick GUIRAUD
Michel PIGEAT
Jean-Marc POTIER

Pour la FIB et le CERIB

Marc LAINE
Lionel MONFRONT
Pierre PASSEMAN
Patrick ROUGEAU

Pour le SNBPE et le SNPB

Jean Paul LUCAS
Daniel MARTINEZ
Benoît THOMAS

Nous remercions pour leur collaboration

Christophe AUBAGNAC - **LRPC D'AUTUN**
VU LE KHAC - **SETRA**
Michel FRAGNET - **SETRA**
Jean Claude FERTE - **QUILLE**

Et pour leur témoignage

Laurent BARBIER
Jean-Louis JOLIN
Pierre MILLION
Guy MURAIL
Alain SPIELMANN
Frédéric ZIRK

Sommaire

● 1 - Définition des ponts courants	7
● 2 - Différents types de ponts courants routiers, autoroutiers et ferroviaires	13
2.1 - Ponts types du SETRA	14
2.2 - Différents types de ponts routiers et autoroutiers	15
2.2.1 - Les Passages Inférieurs en Cadre Fermé	15
2.2.2 - Les Passages Inférieurs en Portique Ouvert	16
2.2.3 - Les Portiques Ouverts Doubles	17
2.2.4 - Les ponts dalles armées	17
2.2.5 - Les ponts dalles précontraintes	18
2.2.6 - Les dalles nervurées	19
2.2.7 - Les ponts à poutres en béton armé	20
2.2.8 - Les ponts PRAD	21
2.2.9 - Les viaducs à travées indépendantes à poutres préfabriquées	23
2.2.10 - Les bipoutres mixtes	25
2.2.11 - Les ponts à béquilles	26
2.2.12 - Les dalles élégies	27
2.2.13 - Les passages inférieurs voûtes	28
2.2.14 - Les ponts à poutrelles enrobées	28
2.2.15 - Les ouvrages de faible portée ou à gabarit réduit	29
2.3 - Différents types de ponts ferroviaires	29
2.3.1 - Les cadres en béton armé	30
2.3.2 - Les portiques en béton armé	30
2.3.3 - Les tabliers à dalle en béton armé	31
2.3.4 - Les tabliers à dalle en béton précontraint	31
2.3.5 - Les tabliers à poutrelles enrobées	31
2.3.6 - Les tabliers à poutres en béton armé	32
2.3.7 - Les tabliers à poutres précontraintes par post tension	32
2.3.8 - Les tabliers à poutres PRAD	33
2.3.9 - Les tabliers mixtes acier-béton	33
2.3.10 - Les tabliers à poutres latérales en béton précontraint	34
2.4 - Passerelles piétons	35
2.4.1 - Les passerelles à dalle supérieure à poutres sous chaussée	35
2.4.2 - Les passerelles à dalle inférieure à poutres latérales	35
2.5 - Passages à faune	36
2.5.1 - Les passages à faune en passage inférieur	36
2.5.2 - Les passages à faune en passage supérieur	36
● 3 - Eléments de conception et de dimensionnement	37
3.1 - Généralités	38
3.2 - Conception générale	39
3.2.1 - Etape 1 : détermination de l'implantation des appuis	39
3.2.2 - Etape 2 : choix du type d'ouvrage et de la coupe transversale	45
3.2.3 - Etape 3 : choix des fondations	50
3.3 - Conception détaillée	51
3.3.1 - Conception des piles et des culées	51
3.3.2 - Conception des murs de têtes	54
3.3.3 - Equipements	58

3.4 - Spécificités du dimensionnement des ouvrages ferroviaires	61
3.4.1 - Règles de conception et de calculs des ponts ferroviaires	61
3.4.2 - Contraintes spécifiques de dimensionnement des ouvrages ferroviaires	61
<hr/>	
● 4 - Architecture des ponts courants en béton	65
4.1 - Quelques règles élémentaires	66
4.2 - Témoignages	70
<hr/>	
● 5 - Maîtrise esthétique des parements	85
5.1 - Qualité esthétique des parements	86
5.2 - Différents types de parements	87
5.3 - Caractérisation des parements	89
5.3.1 - Aspect de surface et appréciation des parements	89
5.3.2 - Teinte des parements	90
5.3.3 - Texture des parements	91
5.4 - Facteurs influençant la teinte des parements	91
5.4.1 - Constituants des bétons	92
5.4.2 - Formulation des bétons	93
5.4.3 - Fabrication et mise en œuvre des bétons	93
5.4.4 - Conditions de maturation	94
5.5 - Facteurs influençant la texture des parements	94
5.5.1 - Composition du béton	95
5.5.2 - Coffrages et moules	95
5.5.3 - Produits démoulants	96
5.5.4 - Mise en œuvre et vibration des bétons sur chantier	96
5.5.5 - Réalisation des parements préfabriqués en usine	97
5.6 - Animations de surface	97
5.6.1 - Principaux traitements de surface	97
5.6.2 - Moules et matrices	99
5.6.3 - Calepinages	99
5.6.4 - Matérialisation des joints	100
5.6.5 - Différenciation des traitements de surface	100
5.6.6 - Jeux de lumière	100
5.6.7 - Incrustations et motifs sculptés	101
<hr/>	
● 6 - Matériaux	103
6.1 - Les ciments	104
6.1.1 - Définition du ciment	104
6.1.2 - Un peu d'histoire	104
6.1.3 - La fabrication des ciments courants	105
6.1.4 - Le marquage CE et la norme NF EN 197-1 (ciments courants)	106
6.1.5 - Les différents types de ciments	107
6.1.6 - Les classes de résistance	107
6.1.7 - Les autres ciments	108
<hr/>	

6.1.8 - Les ciments à caractéristiques complémentaires normalisés	109
6.1.9 - La désignation d'un ciment	109
6.1.10 - Les ciments conformes à la norme NF EN 197-4	110
6.2 - Les granulats	111
6.2.1 - Définitions	111
6.2.2 - Le rôle des granulats pour bétons	112
6.2.3 - Les normes de références	112
6.2.4 - Les caractéristiques des granulats	113
6.2.5 - Le marquage CE des granulats	114
6.3 - les adjuvants	114
6.3.1 - Définition	114
6.3.2 - Un peu d'histoire	115
6.3.3 - La classification	115
6.4 - Les additions	118
6.4.1 - Les pigments	118
6.4.2 - Les fillers	118
6.4.3 - Les fumées de silice	118
6.4.4 - Les cendres volantes	118
6.5 - Les produits de cure	119
6.6 - Les armatures passives	119
6.6.1 - Les différents types d'armatures	119
6.6.2 - Les références normatives	120
6.6.3 - La désignation des armatures	121
6.6.4 - Les caractéristiques certifiées des aciers	121
6.6.5 - Les caractéristiques de forme	121
6.6.6 - Les caractéristiques géométriques	123
6.7 - Les fibres	124
6.7.1 - La classification des fibres	124
6.7.2 - Le rôle des fibres	124
6.8 - Les bétons	125
6.8.1 - L'ouvrabilité du béton	125
6.8.2 - Le retrait	126
6.8.3 - Les déformations sous charge instantanée	127
6.8.4 - Les déformations sous charge de longue durée : le fluage	127
6.8.5 - La résistance mécanique	128
6.9 - Les Bétons à Hautes Performances	128
6.9.1 - La formulation et les constituants	129
6.9.2 - Les propriétés des BHP	130
6.10 - Les Bétons Autoplaçants	131
6.10.1 - La formulation des BAP	132
6.10.2 - Le contrôle des BAP	132
6.10.3 - Le dimensionnement des ouvrages	132
6.10.4 - La mise en œuvre des bétons autoplaçants sur chantier	133
6.11 - Les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances	133
6.11.1 - Le principe de formulation des BFUP	134
6.11.2 - La fabrication des BFUP	135
6.11.3 - Les caractéristiques mécaniques	135
6.11.4 - La durabilité des BFUP	135
6.11.5 - Les domaines d'applications potentiels des BFUP	135

● 7 - Recommandations pour la durabilité des bétons	137
7.1 - Notion de durabilité des bétons et de durée de service des ouvrages	138
7.2 - Contexte normatif	139
7.2.1 - Norme NF EN 206-1	139
7.2.2 - Normes pour les produits préfabriqués en béton	144
7.3 - Durabilité des bétons vis-à-vis des eaux agressives	145
7.4 - Durabilité des bétons soumis au gel et aux sels de déverglaçage	146
7.5 - Prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction	151
7.5.1 - Document de référence	151
7.5.2 - Principe de prévention	151
7.6 - Prévention contre les phénomènes de gonflement interne sulfatique	153
7.7 - Durabilité des bétons en site maritime	155

● 8 - Les équipements des ponts	157
8.1 - Etanchéité	159
8.2 - Couches de roulement	162
8.3 - Joints de chaussées	162
8.4 - Dispositifs de retenue	164
8.5 - Corniches	165
8.6 - Appareils d'appui	167
8.7 - Dispositifs d'évacuation des eaux	167
8.8 - Dispositifs de dilatation de la voie ferroviaire	168
8.9 - Dispositifs d'abouts de tablier ferroviaire	169
8.10 - Dispositifs de visite	169
8.11 - Dalles de transition	170
8.12 - Ecrans acoustiques	170
8.13 - Grilles centrales	170
8.14 - Canalisations de services publics	171
8.15 - Equipements électriques pour ouvrages ferroviaires	171
8.16 - Ecrans-garde ballast	171

● 9 - Annexes	173
Annexe 1 - Glossaire	174
Annexe 2 - Ponts courants routiers en béton	192
Eléments de prédimensionnement	
Annexe 3 - Les différents types de ponts courants	194
Domaines d'utilisation	
Spécificités de mise en œuvre	
Atouts et particularités	



Chapitre

1

Définition des ponts courants

Les PONTS COURANTS désignent la majorité des ouvrages d'art aussi bien en surface totale de tablier, qu'en nombre. Ils représentent de l'ordre de 75 % en nombre du patrimoine d'ouvrages et plus de 50 % en surface.

Leur définition se déduit généralement par complémentarité de celle des ouvrages d'art non courants.

Sont considérés comme ouvrages non courants :

- les ponts possédant au moins une travée de 40 m de portée,
- les ponts de longueur totale supérieure à 100 m,
- les ponts dont la surface totale du tablier dépasse 1 200 m²,
- Les ponts mobiles,
- les ponts canaux,
- et les ouvrages se caractérisant par des difficultés particulières de dimensionnement, de conception ou de réalisation, relevant de techniques de construction ou de procédés innovants, présentant des géométries complexes (biais important, courbure prononcée...), nécessitant des travaux de fondations spéciaux, des études particulières (effets dynamiques), des phasages d'exécution complexes (contrainte d'exploitation, maintien de la circulation...), ayant un fonctionnement structurel complexe ou répondant à des contraintes architecturales spécifiques.

Les PONTS COURANTS en béton peuvent être classés en **trois principales familles** :

- **les PONTS CADRES, les PORTIQUES et les OUVRAGES VOÛTES.**



Ces ouvrages sont destinés au franchissement de petites ouvertures en passage inférieur.

- **Les PONTS DALLES**

Les dalles des tabliers sont en béton armé ou en béton précontraint.

Ces ouvrages sont utilisés pour des franchissements de moyennes portées en passage inférieur ou en passage supérieur.

• Les PONTS À POUTRES

Ces ouvrages sont adaptés à de plus grandes portées, en passage supérieur ou inférieur. Les poutres sont en général précontraintes par pré-tension ou post-tension. Cette famille regroupe aussi les ponts à poutrelles enrobées et les bi-poutres mixtes.

Les ponts courants ont en général des largeurs transversales inférieures à 20 mètres et des piles présentant un faible élancement.

Parmi les ouvrages courants, on distingue deux familles :

• Les ouvrages courants types

Ces ouvrages font l'objet de guide spécifique de conception (cf. ponts types du SETRA).

• Les ouvrages courants non types

Ces ouvrages ont des caractéristiques courantes mais qui ne correspondent pas à celles d'un ouvrage courant type. Leur dimensionnement nécessite une étude particulière.

La circulaire n° 94 - 56 du 5 mai 1994 de la Direction des Routes (définissant les modalités d'élaboration, d'instruction et d'approbation des opérations d'investissement sur le réseau routier national non concédé) précise les critères de classification des ouvrages en deux catégories selon leur importance :

- ouvrage d'art courant,
- ouvrage d'art non courant.



Éléments d'appréciation pour la classification des ouvrages courants types et non types

Nota

Le guide du projeteur ouvrages d'art "Ponts Courants" du SETRA précise les éléments d'appréciation pour la classification des ouvrages en ouvrages courants types, ouvrages courants non types et ouvrages non courants (annexes I - 1). Des extraits de ce document sont repris dans le tableau ci-dessous.

■ Type d'ouvrage	Cadres et portiques
Ouvrages types	<ul style="list-style-type: none">• Coulés sur cintres• Biais modéré• Faible épaisseur de remblai sur la traverse• Ouvrages préfabriqués partiellement ou totalement
Ouvrages non types	<ul style="list-style-type: none">• Biais important• Ouvrages ripés, foncés ou poussés

■ Type d'ouvrage	Ouvrages voûtés minces
Ouvrages types	<ul style="list-style-type: none">• Simple arche• Ouverture modeste• Faible remblai• Ouvrage préfabriqué partiellement ou totalement
Ouvrages non types	<ul style="list-style-type: none">• Simple arche de moyenne ouverture• Multiarche de petite ouverture• Remblai modéré

■ Type d'ouvrage	Ponts dalles en béton armé ou en béton précontraint
Ouvrages types	<ul style="list-style-type: none"> • Coulés sur cintres en une phase • Biais et courbure modérés
Ouvrages non types	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrages à plusieurs nervures • Ouvrages de largeur fortement variable • Biais ou courbure prononcés

■ Type d'ouvrage	Ponts à poutres de type PRAD : poutres préfabriquées précontraintes par pré-tension
Ouvrages types	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrages isostatiques ou continus • Biais et courbure modérés • Appuis simples
Ouvrages non types	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrages de largeur fortement variable • Hourdis préfabriqué • Biais ou courbure prononcés

■ Type d'ouvrage	Ponts à poutres de type VIPP : poutres préfabriquées précontraintes par post-tension
Ouvrages types	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrages isostatiques • Biais et courbure modérés
Ouvrages non types	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrages continus • Ouvrages de largeur fortement variable • Hourdis préfabriqué • Biais ou courbure prononcés

Différents types de ponts courants routiers, autoroutiers et ferroviaires

2.1 - Ponts types du SETRA

2.2 - Différents types de ponts routiers et autoroutiers

2.3 - Différents types de ponts ferroviaires

2.4 - Passerelles piétons

2.5 - Passages à faune

2.1 - Ponts types du SETRA

Les ponts types du SETRA (Services d'Études Techniques des Routes et Autoroutes) sont apparus dans les années 60 lorsque le programme de construction des autoroutes françaises s'accéléra, nécessitant la construction d'ouvrages de plus en plus nombreux répondant à des besoins très diversifiés.

Dans un souci d'uniformisation des ouvrages, de simplification de leur exécution et de recherche d'économie, le SETRA a défini un catalogue très complet de ponts types dont les études ont pu être standardisées grâce au développement des moyens informatiques.

Les Ponts types du SETRA sont classés en 12 familles d'ouvrages :

- Les PI-CF et PI-PO : Passage Inférieur en Cadre Fermé ;
Passage Inférieur en Portique Ouvert ;
- Les POD : Portique Ouvert Double ;
- Les PSI-DA et PSI-DP : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Armée ;
Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Précontrainte.

Les autres ponts types :

- PSI-DN : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Nervurée ;
- PSI-BA : Passage Supérieur ou Inférieur à Poutres en Béton Armé ;
- PR-AD : Poutres Précontraintes par Adhérence ;
- VI-PP : Viaducs à travées Indépendantes à Poutres Précontraintes ;
- PSI-OM : Passage Supérieur ou Inférieur à Ossature Mixte ;
- PS-BQ : Passage Supérieur à Béquilles ;
- PSI-DE : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Elégie.

Le SETRA a mis au point des DOSSIERS PILOTES d'éléments types standardisés qui permettent de dimensionner la totalité des ouvrages dans les moindres détails (fondations, appuis, tabliers, équipements...).

Les ponts types sont des structures simples, faciles à entretenir, pouvant être réalisées par des entreprises d'importance moyenne.

2.2 - Différents types de ponts routiers et autoroutiers

2.2.1 - Les Passages Inférieurs en Cadre Fermé

Les Passages Inférieurs en Cadre Fermé (PI-CF) sont des cadres rectangulaires en béton armé. Ils sont associés à des murs de soutènement retenant les terres qui constituent le remblai de la plate forme de la voie franchie.

Ce type d'ouvrage est le passage inférieur le plus courant pour le rétablissement de petites voies de communication. Les PI-CF conviennent pour le franchissement de voies de faible largeur (inférieure à 12 mètres).

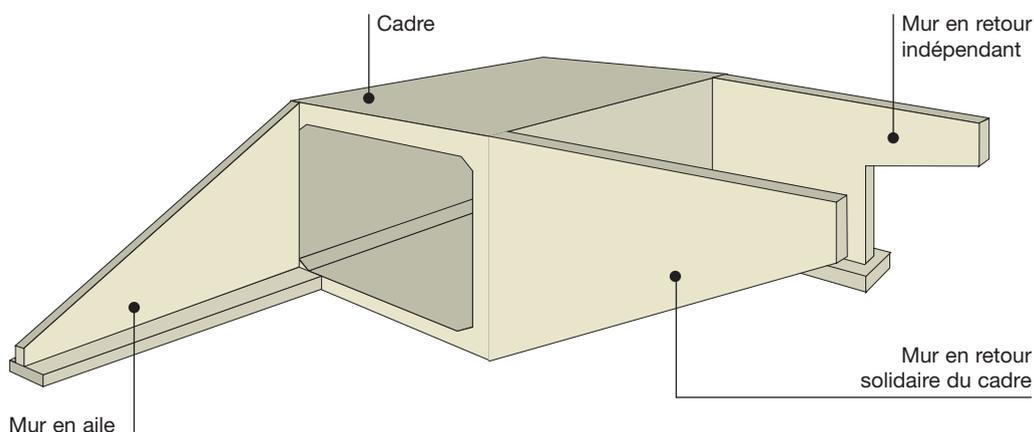


Figure n°1 : Schéma type d'un PI-CF

Le radier servant de fondation est coulé sur un béton de propreté. Les piédroits soutiennent les terres et supportent la traverse supérieure. Tous ces éléments sont reliés par des goussets.

Les murs de soutènement peuvent être des murs en retour (parallèles à la voie portée), suspendus et liés mécaniquement au cadre, ou des murs en aile, généralement fondés superficiellement et indépendants de la structure.

Ce type d'ouvrage peut faire l'objet d'une préfabrication totale ou partielle.

2.2.2 - Les Passages Inférieurs en Portique Ouvert

Les Passages Inférieurs en Portique Ouvert (PI-PO) sont des ouvrages en forme de U inversé. Les piédroits, fondés sur semelles superficielles ou sur fondations profondes (1 ou 2 files de pieux par piédroit) selon les caractéristiques du sol, sont reliés à la traverse supérieure par un gousset.

Ils sont utilisés pour le franchissement de voies de largeur moyenne (largeur comprise entre 10 et 20 m).

Ils sont en général, coulés en place mais ils peuvent être aussi préfabriqués.

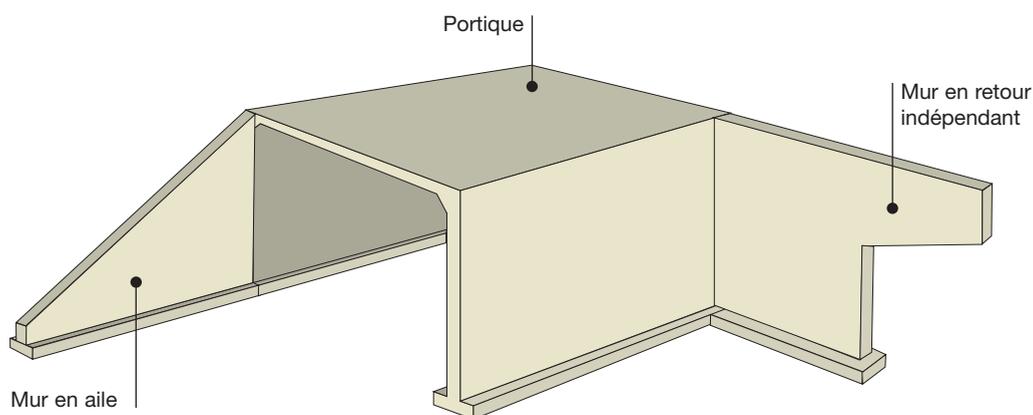


Figure n°2 : Schéma type d'un PI-PO

Le portique est associé à des murs de tête, en aile ou en retour, en général indépendant.



2.2.3 - Les Portiques Ouverts Doubles

Les Portiques Ouverts Doubles sont constitués d'un portique ouvert dans lequel est créé un appui intermédiaire sous la traverse.

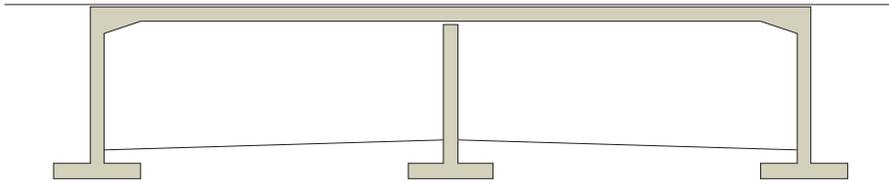


Figure n°3 : Schéma du Portique Ouvert Doubles

Ils sont en général coulés en place mais peuvent être aussi constitués d'éléments préfabriqués en béton.

Les piédroits, fondés sur pieux ou sur semelles filantes, sont prolongés par des murs de tête, en aile ou en retour indépendants du portique.

L'appui intermédiaire est constitué d'un voile fondé sur semelle ou sur pieux.

2.2.4 - Les ponts dalles armées

Les Passages Supérieurs ou Inférieurs en Dalle Armée (PSI-DA) sont constitués d'une dalle d'épaisseur constante en béton armé généralement de section rectangulaire (avec ou sans chanfreins latéraux).

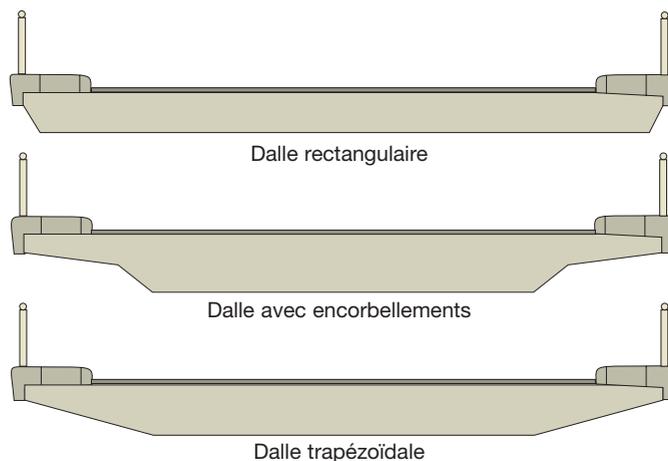


Figure n°4 : coupes types d'un pont dalle

Ces ouvrages sont coulés sur cintres. Ils peuvent être constitués de 2, 3 ou 4 travées selon les caractéristiques de la voie à franchir et le biais de franchissement.

La solution à trois travées permet, dans le cas de franchissement routier ou autoroutier, de supprimer l'appui intermédiaire sur le terre plein central.

2.2.5 - Les ponts dalles précontraintes

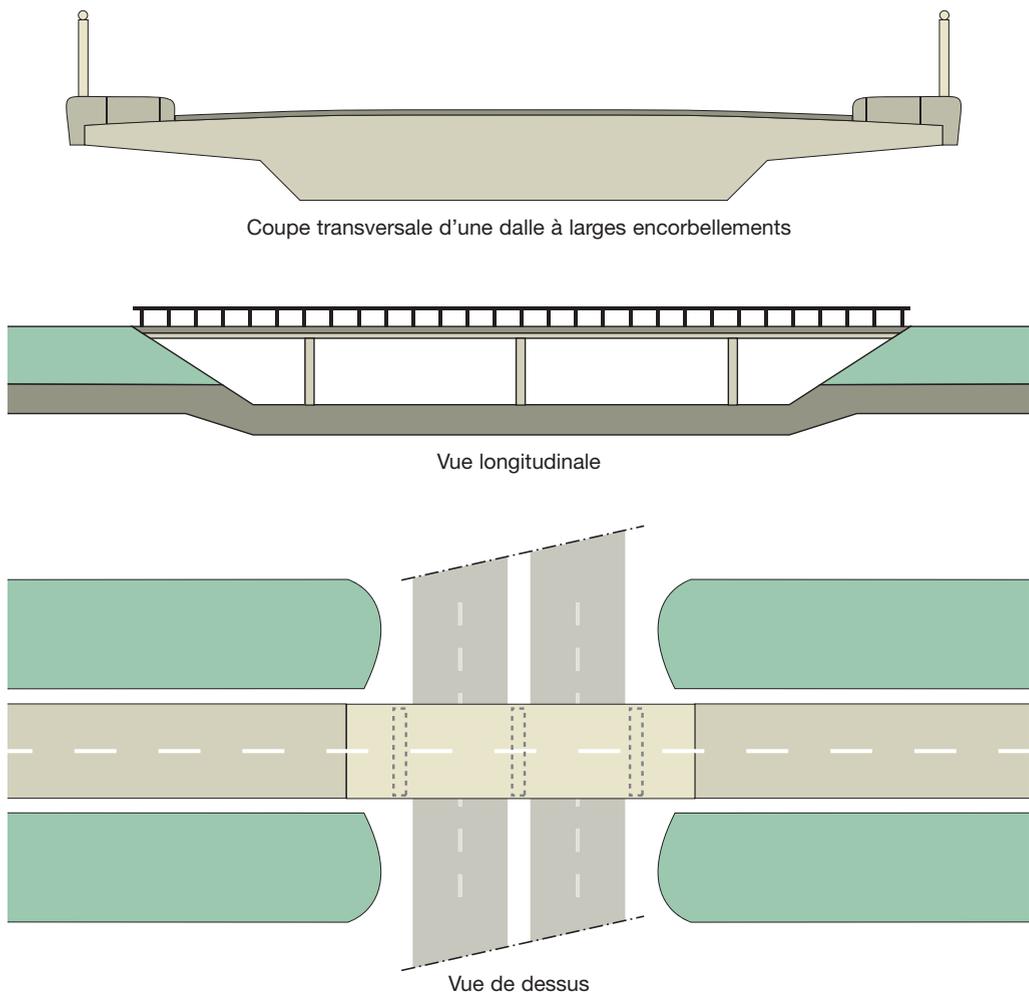


Figure n°5 : Schémas d'un pont dalle précontrainte

Les Passages Supérieurs ou Inférieurs en Dalle Précontrainte (PSI-DP) sont constitués d'une dalle précontrainte longitudinalement et armée transversalement, de hauteur constante. La section transversale comprend généralement des encorbellements.

Les ouvrages sont coulés sur cintre. Dans certains cas particuliers, ils peuvent être mis en place par poussage. Ils peuvent être constitués de 2, 3 ou 4 travées, selon les caractéristiques de la voie à franchir et le biais de franchissement.

Nota

les ponts dalles en béton armé ou en béton précontraint sont les ouvrages les plus utilisés pour la réalisation des passages supérieurs autoroutiers.

2.2.6 - Les dalles nervurées

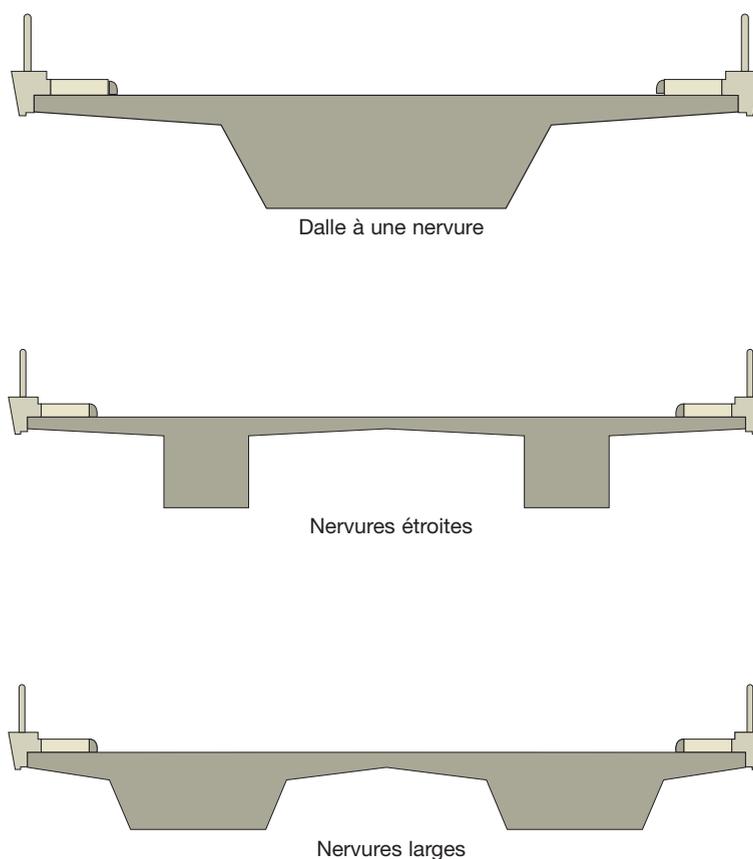


Figure n°6 : Shéma de dalles nervurées

Les tabliers des ponts à dalles nervurées sont constitués :

- soit d'une dalle à une nervure à larges encorbellements ;
- soit d'une dalle à plusieurs nervures larges ou étroites de formes trapézoïdales ou rectangulaires.

Le tablier peut être longitudinalement de hauteur constante ou variable.

2.2.7 - Les ponts à poutres en béton armé

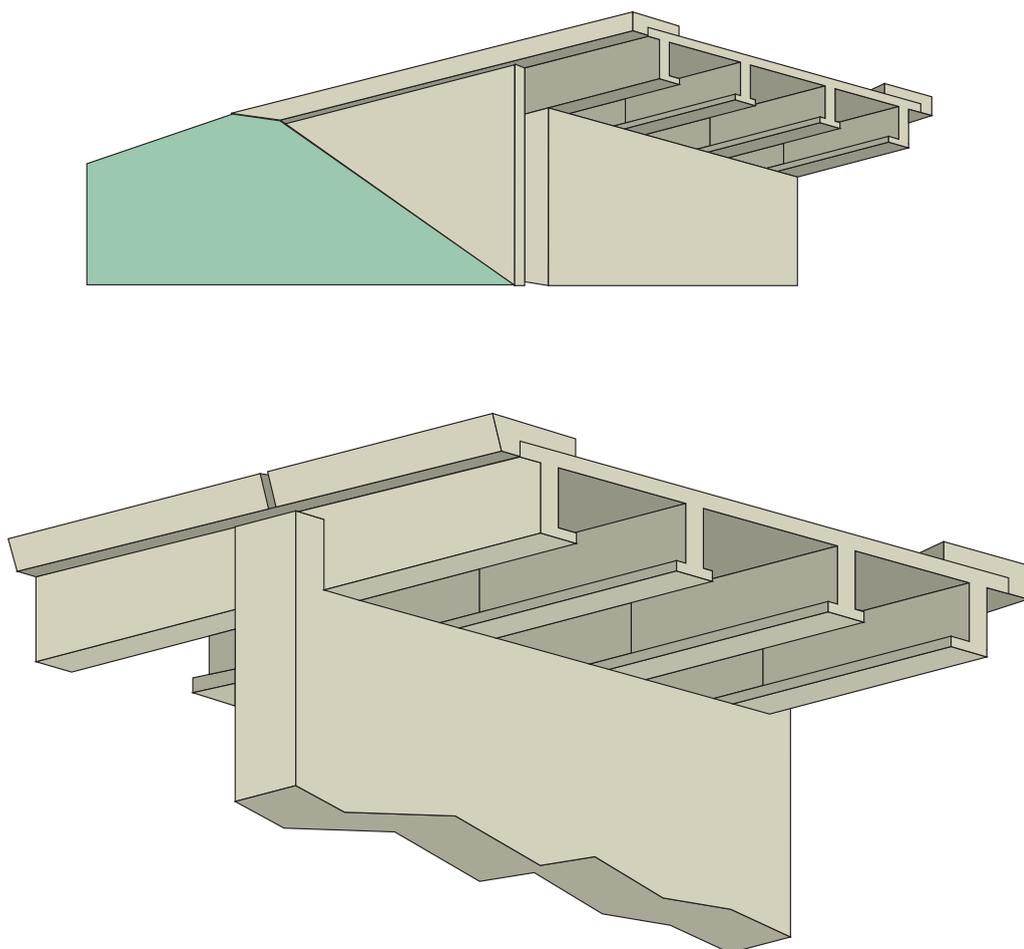


Figure n°7 : Schémas d'un pont à poutres en béton armé

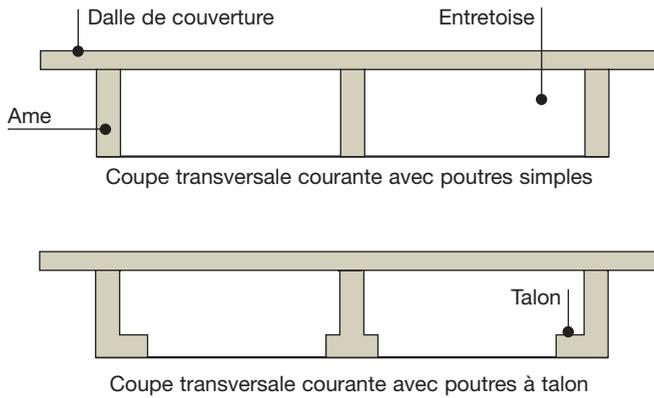


Figure n°8 : Coupes transversales des poutres simples et à talon

Le tablier est constitué de poutres longitudinales en béton armé généralement préfabriquées, de hauteur constante, solidarisiées par des entretoises en travées, sur appui et par une dalle supérieure.

Les travées peuvent être indépendantes ou continues.

Actuellement, ces ouvrages ne sont pratiquement plus construits.

2.2.8 - Les ponts PRAD

Les tabliers des ponts PRAD (PRécontrainte par ADhérence) sont constitués de poutres préfabriquées précontraintes par pré-tension.

La précontrainte des poutres est assurée par des torons mis en tension avant bétonnage, puis relâchés dès que le béton a acquis une résistance suffisante (de l'ordre de 30 MPa).

Les poutres, régulièrement espacées (entraxe de l'ordre de 1 m), sont solidarisiées par une dalle coulée en place sur des coffrages perdus.

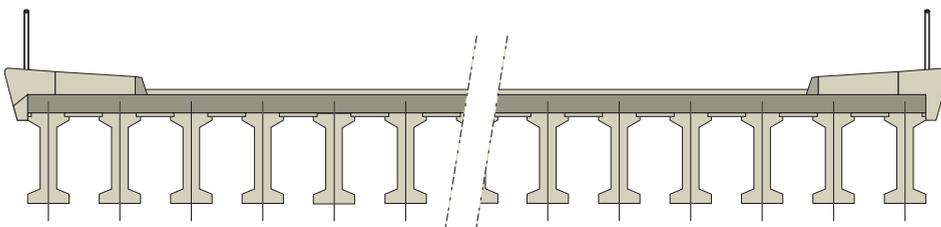


Figure n°9 : Coupe type d'un pont routier PRAD

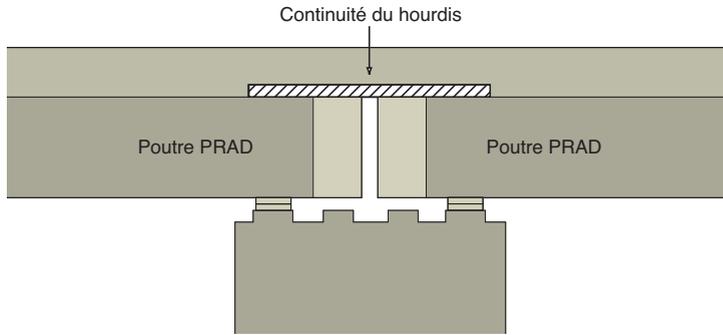


Figure n°10
Pont PRAD : Travées indépendantes reliées par des dalettes en béton armé

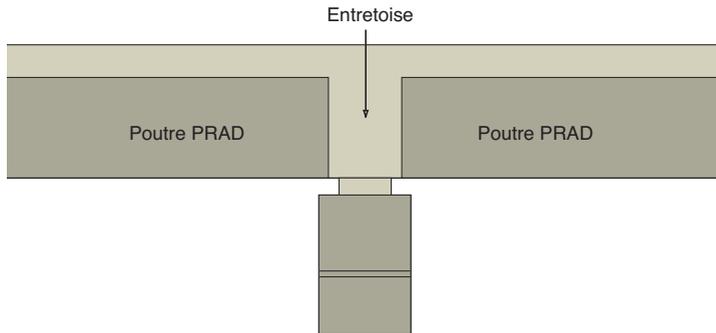


Figure n°11
Pont PRAD : Travées rendues continues par clavage

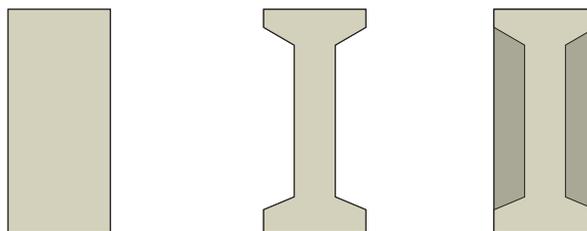


Figure n°12
Pont PRAD : Poutre rectangulaire et poutres en I

Les poutres peuvent être de section rectangulaire, ou en forme de double T en section courante et rectangulaire aux extrémités.

Les poutres préfabriquées en T inversé et remplies de béton permettent de réaliser des tabliers monolithiques.

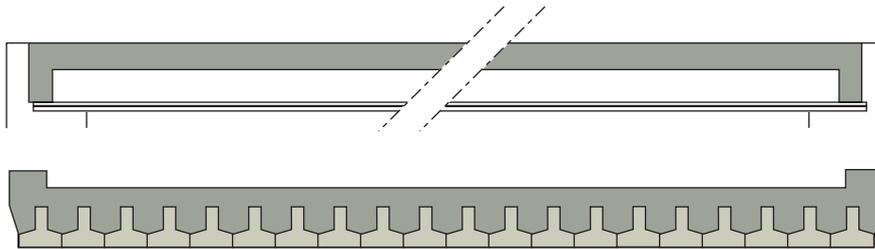
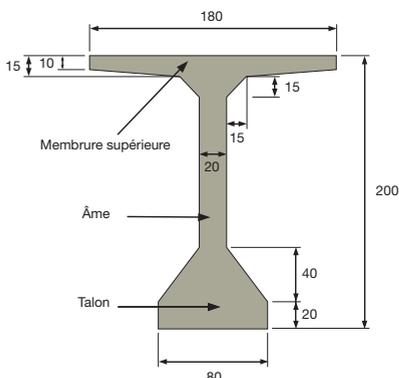


Figure n°13 : Schémas types d'un tablier en poutres en T inversé

Les travées des tabliers peuvent être isostatiques ou hyperstatiques. Dans ce dernier cas, les poutres sont rendues continues au droit des piles intermédiaires et il ne subsiste qu'une seule ligne d'appuis par pile.

2.2.9 - Les viaducs à travées indépendantes à poutres préfabriquées

Les tabliers des Viaducs à travées Indépendantes à Poutres Préfabriquées (VI-PP) sont constitués de poutres précontraintes par post-tension de hauteur constante, solidarisées entre elles par des entretoises d'abouts et une dalle supérieure coulée en place en béton armé ou précontrainte transversalement.



Les poutres ont un espacement de l'ordre de 3 à 4 mètres. Le hourdis peut être coulé entre les tables de compression des poutres (hourdis intermédiaire), ou par-dessus les tables (hourdis général). Les poutres sont généralement mises en œuvre à l'aide d'une "poutre de lancement".

Figure n°14 : Poutre de VI-PP

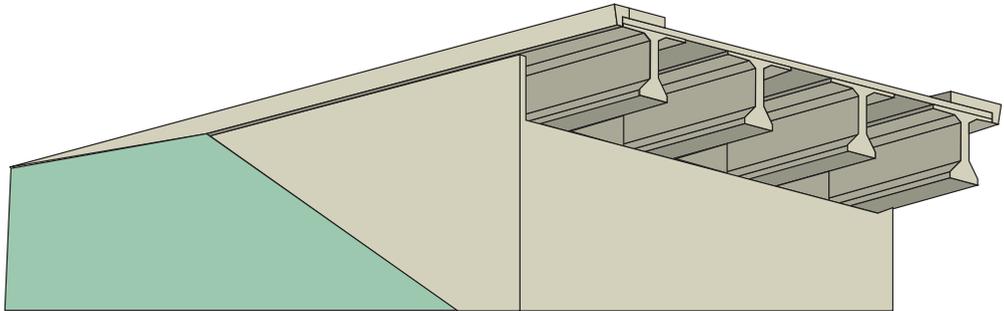
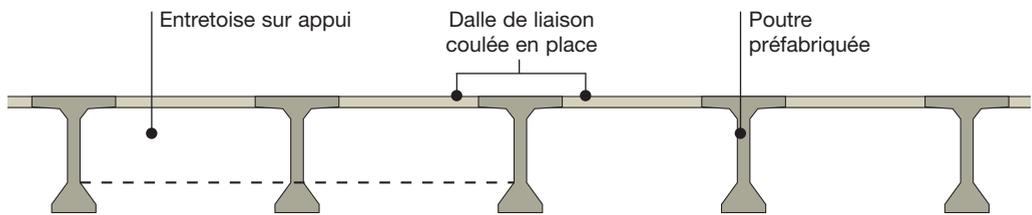


Figure n°15 : Schéma type d'un VI-PP



**Figure n°16
VI-PP : Coupe transversale courante**

Hourdis général



Hourdis intermédiaire



**Figure n°17
VI-PP : Hourdis intermédiaire ou général**

Les tabliers sont réalisés avec des entretoises d'about qui permettent de répartir les charges entre les poutres et de les encastrer à la torsion sur appui.

Le tracé des câbles de précontrainte est généralement constitué d'une partie rectiligne dans le talon des poutres dans la zone médiane suivie d'une déviation verticale, souvent parabolique, dans l'âme de la poutre.

2.2.10 - Les bipoutres mixtes

Le tablier des bipoutres mixtes est constitué d'une dalle (de couverture) en béton, connectée à 2 poutres métalliques (poutres sous chaussée), de manière à former un ensemble monolithique. Il peut être à travées indépendantes ou continues.

La dalle est en général en béton armé (parfois en béton précontraint : précontrainte transversale). Elle est coulée en place à l'aide d'un outil de coffrage mobile (elle est parfois constituée de dalles préfabriquées).

La dalle participe à la résistance de l'ouvrage en flexion longitudinale et locale, grâce à sa connexion aux poutres métalliques par des goujons ou des cornières. Elle a une épaisseur de 20 à 30 cm (l'épaisseur peut être réduite dans le cas d'utilisation de dalles préfabriquées précontraintes en BHP).

Les poutres métalliques sont en général de hauteur constante (parfois de hauteur variable), à âme pleine (PRS en forme de I), le plus souvent continues sur appui. Elles sont entretoisées tous les 8 à 10 m par des entretoises ou des pièces de pont.

Les poutres sont préfabriquées en usine et transportées sur le site par tronçons de 20 à 40 m de longueur. Elles sont raboutées par soudage sur le site, assemblées aux entretoises et mises en place à l'aide d'une grue (ou lancées ou ripées).

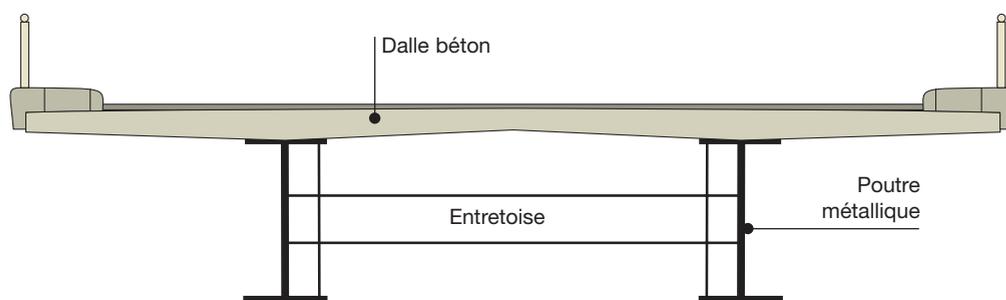


Figure n°18 : Bipoutres mixtes

La solution dalles préfabriquées permet la réduction des opérations réalisées sur l'ouvrage et de mieux maîtriser les phénomènes de fissuration de la dalle.

Les dalles préfabriquées comportent des réservations qui permettent, après leur mise en place, de réaliser la connexion aux poutres métalliques. Les clavages entre dalles sont ensuite bétonnés pour assurer la continuité de la dalle.

2.2.11 - Les ponts à béquilles

Les Passages Supérieurs à Béquilles (PS-BQ) sont constitués d'un tablier précontraint (dalle pleine, dalle nervurée ou caisson) de hauteur constante ou variable.

Les appuis intermédiaires sont constitués de béquilles encastrées dans le tablier, inclinées à environ 50 degrés et généralement articulées en pied dans un massif de fondation.

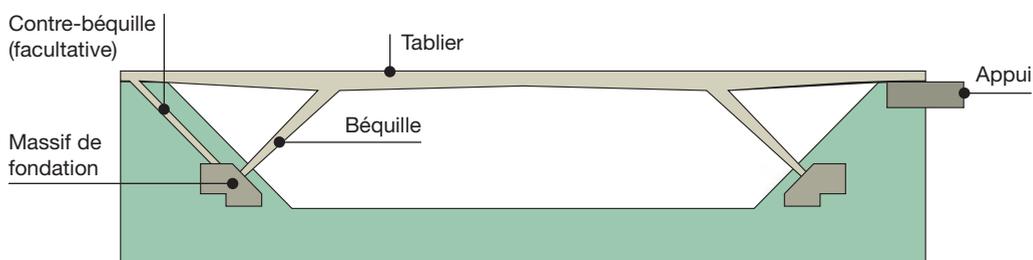


Figure n°19 : Schéma type d'un PS-BQ

Le tablier est, aux extrémités, soit en appui simple sur des culées, soit encasturé dans des contre-béquilles.

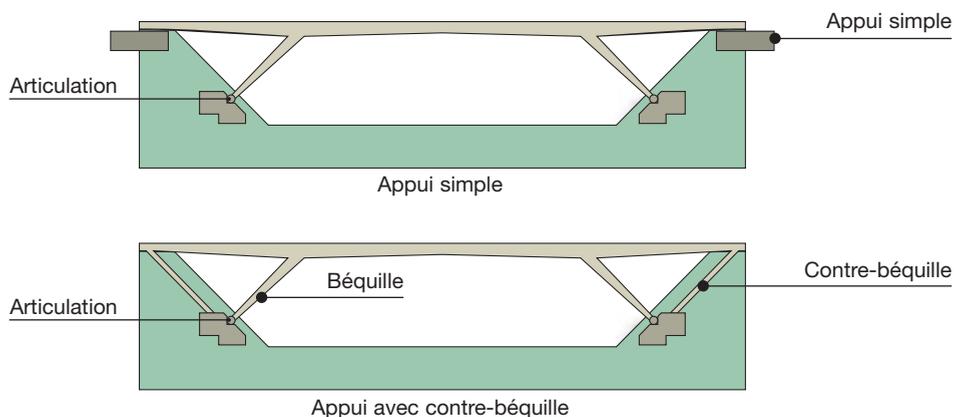


Figure n°20 : Schémas types d'un PS-BQ en appui simple ou avec contre-béquille

2.2.12 - Les dalles élégies

Les tabliers de pont à dalles élégies se caractérisent par la présence de vides longitudinaux dans la section du béton, ce qui permet un gain de poids propre.

Ce type d'ouvrage n'est plus réalisé.

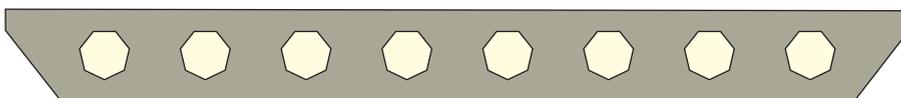


Figure n°21 : Schéma d'une dalle élégie

2.2.13 - Les passages inférieurs voûtes

Ces ouvrages sont constitués d'une voûte en béton armé articulée ou encastree sur deux pîedroits. La voûte a une épaisseur de l'ordre de 20 à 30 cm.

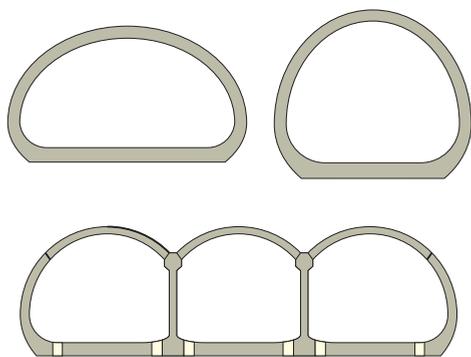


Figure n°22 :
Schémas de passages
inférieurs voûtes

Ils sont fondés en fonction des caractéristiques du sol, soit sur un radier général soit sur des semelles, des longrines ou des semelles sur pieux sous chaque pîedroit.

Ils sont soit coulés en place, soit partiellement ou entièrement préfabriqués.

2.2.14 - Les ponts à poutrelles enrobées

Ces tabliers étaient initialement réservés aux ouvrages ferroviaires (portée de 30 à 35 m), ils sont aussi utilisés pour les ponts routes (portée de 40 à 45 m).

Ils conviennent en particulier pour les ouvrages à épaisseur limitée et devant supporter un trafic élevé.

2.2.15 - Les ouvrages de faible portée ou à gabarit réduit

Les ponceaux voûtés massif en béton sont réalisés pour le rétablissement d'un chemin d'intérêt local ou pour la réalisation d'ouvrages hydrauliques, dans la gamme des faibles portées (de l'ordre de 5 m). Ces ouvrages simples et robustes peuvent supporter des remblais de forte hauteur.

2.3 - Différents types de ponts ferroviaires

Les tabliers de ponts ferroviaires courants en béton peuvent être classés en deux catégories :

▶ Les tabliers dans lesquels le béton constitue l'élément porteur principal.

Pont en béton armé

Parmi les plus représentatifs de ce type d'ouvrage, on distingue :

- les CADRES ;
- les PORTIQUES ;
- les DALLES ;
- les PONTS à POUTRES.

Ces ouvrages sont généralement construits sur cintres ou sur échafaudage. Ils peuvent faire l'objet d'une préfabrication totale ou partielle.

Pont en béton précontraint

Ces ouvrages sont constitués de poutres-caisson mono ou multicellulaire. Ils sont utilisés pour des portées plus importantes que celles des ponts en béton armé.



- » Les tabliers dans lesquels le béton est associé à un élément porteur métallique

Ponts à poutrelles enrobées

Ponts mixtes acier-béton

Ponts à poutres latérales

Pour ces ouvrages courants de petite et moyenne portée, la SNCF a concrétisé l'application des prescriptions générales, concernant les conditions d'études et de réalisation, sous la forme de dossiers types ou de guides aux projeteurs.

Ces documents ont un double but :

- donner aux maîtres d'œuvre, aux concepteurs et aux entrepreneurs des indications de détail qui évitent de se poser, à chaque fois, de nouvelles questions pour les ouvrages courants. Ces documents ne dispensent pas des études de projet, mais ils facilitent grandement la mise au point du projet ou des études d'exécution ;
- fixer un grand nombre de points de détail qui se retrouvent dans tous les ouvrages de même nature et de même type.

2.3.1 - Les cadres en béton armé

Les cadres en béton armé sont constitués de murs de front, formant culées, encastrés dans la dalle en partie haute et dans un radier répartissant les pressions sur le sol.

Les cadres peuvent être utilisés sur des sols de faible portance.

2.3.2 - Les portiques en béton armé

Les portiques en béton armé sont constitués par une dalle (ou traverse) encastrée dans deux murs de front opposés formant culées (ou piédroits). Ils sont fondés soit sur semelles superficielles, soit sur un système de fondations profondes (pieux ou barrettes).

2.3.3 - Les tabliers à dalle en béton armé

Les tabliers à dalle en béton armé sont constitués soit par une dalle pleine, soit par une dalle élagie à inertie constante. Ils peuvent être à travée isostatique unique ou à plusieurs travées continues.

2.3.4 - Les tabliers à dalle en béton précontraint

Les tabliers à dalle en béton précontraint sont constitués soit d'une dalle pleine, soit d'une dalle élagie à inertie constante. La dalle est précontrainte dans le sens longitudinal.

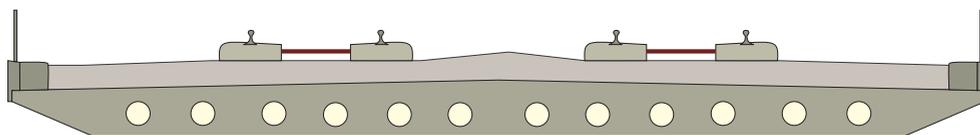


Figure n°23 : Pont ferroviaire à dalle élagie

2.3.5 - Les tabliers à poutrelles enrobées

Le tablier d'un pont à poutrelles enrobées est constitué d'une dalle en béton armé comportant une armature longitudinale constituée de poutrelles laminées (faiblement espacées - entraxe maximum 75 cm et des armatures transversales en acier). Les poutrelles et le béton collaborent en formant une structure composite. La connexion acier-béton est assurée par adhérence.

L'aile supérieure de chaque poutre est noyée dans le béton. L'aile inférieure est visible sous l'ouvrage fini. Le coffrage inférieur du tablier est constitué de plaques ou de prédalles laissées en place après le bétonnage. La reprise des efforts dus à la flexion transversale est assurée par des armatures transversales situées au-dessus des semelles supérieures pour les armatures supérieures et traversant les âmes dans leur partie basse pour les armatures inférieures. L'espace entre les poutrelles est rempli de béton avec un enrobage de la semelle supérieure d'au moins 7 cm.

Ces ouvrages présentent un aspect extérieur et des caractéristiques voisines de celles des ponts-dalle en béton armé.

Les ouvrages peuvent être à une travée, à plusieurs travées ou continues.

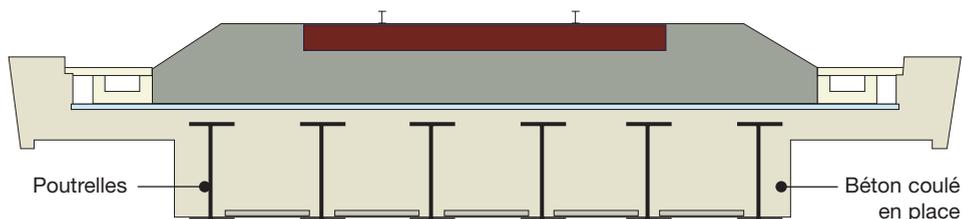


Figure n°24 : Tablier à poutrelles enrobées

2.3.6 - Les tabliers à poutres en béton armé

Le tablier est constitué de poutres en béton armé (dont l'âme a une épaisseur de l'ordre de 40 cm) supportant un hourdis en béton armé (d'épaisseur moyenne de l'ordre de 20 à 25 cm).

Les poutres présentent des épaisissements au niveau des zones d'appui. Elles sont encastées au droit des lignes d'appui dans une entretoise transversale en béton armé.

2.3.7 - Les tabliers à poutres précontraintes par post tension

Le tablier est constitué de poutres en béton précontraint par post tension supportant un hourdis en béton armé.

Les poutres sont assemblées au niveau des lignes d'appuis par une entretoise transversale.

Le tablier peut être isostatique ou hyperstatique.

2.3.8 - Les tabliers à poutres PRAD

Ce nouveau type de tablier ferroviaire est constitué de poutres préfabriquées précontraintes par adhérence, surmontées d'un hourdis coulé en place de 25 cm minimum d'épaisseur.

Les tabliers comportant plusieurs travées sont obligatoirement rendus continus au droit des piles intermédiaires. La continuité est réalisée en ancrant des armatures en attente des poutres dans une entretoise en béton armé coulée en place en même temps que le hourdis.



La longueur totale des tabliers rendus continus doit rester inférieure à 90 mètres. Les tabliers à une voie de circulation comportent 7 poutres par travée et ceux à deux voies 13 poutres. Les premiers ouvrages de ce type ont été réalisés en 2003 et 2004 sur la LGV Est.

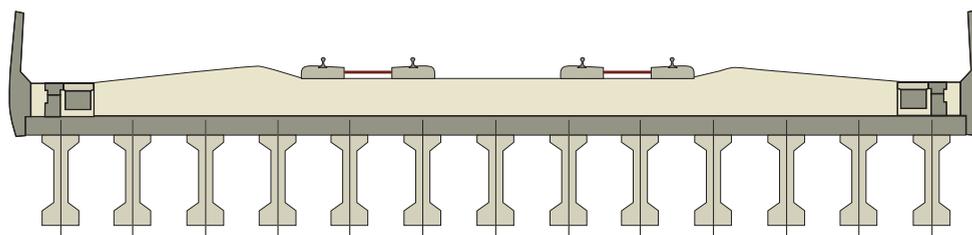


Figure n°25
Pont PRAD : Coupe type d'un pont ferroviaire PRAD

2.3.9 - Les tabliers mixtes acier-béton

Les tabliers mixtes acier-béton sont constitués de poutres métalliques (2 à 8 poutres) solidarisiées à une dalle supérieure en béton, par des connecteurs.

Les poutres sont en général de hauteur constante (ou de hauteur variable pour les grandes portées), elles sont entretoisées dans le sens transversal au niveau des appuis par des entretoises métalliques ou en béton armé.

Les poutres peuvent être remplacées par des caissons métalliques.

La structure la plus courante, pour les tabliers supportant 2 voies, est le bi-poutre mixte avec un élanement quasi-identique à celui d'un pont en béton précontraint et un entraxe de poutres de l'ordre de 6 mètres.

Les tabliers sont constitués de travées indépendantes ou continues. Le hourdis supérieur d'épaisseur de l'ordre de 40 cm est en général coulé en place après mise en place des poutres. Certains ouvrages comportent aussi un hourdis inférieur constitué de dalles préfabriquées en béton clavées aux membrures inférieures des poutres.

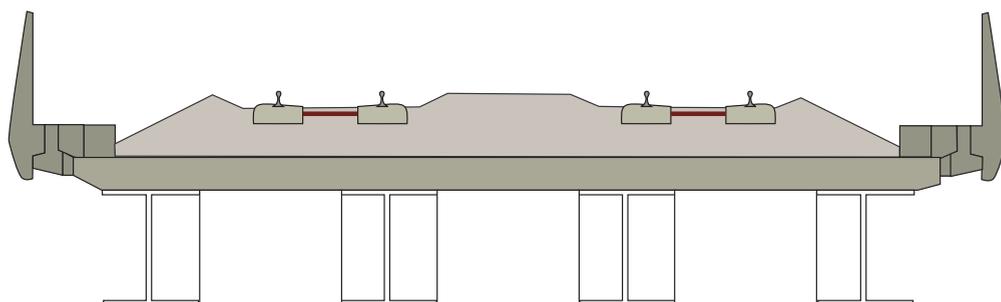


Figure n°26 : Tablier mixte acier béton

2.3.10 - Les tabliers à poutres latérales en béton précontraint

Le tablier est constitué de deux poutres (de section rectangulaire ou en forme de I avec un épaissement au niveau des appuis), reliées en partie inférieure par un hourdis nervuré en béton de l'ordre de 1,20 m d'épaisseur.

La dalle est généralement constituée de poutrelles enrobées qui sont liaisonnées aux poutres latérales principales, placées hors du gabarit ferroviaire.

Ce type d'ouvrage est utilisé en particulier lorsque des contraintes de gabarit sont imposées.



2.4 - Passerelles piétons

On distingue parmi les passerelles piétons deux types de structures les plus utilisées :

- tablier à dalle supérieure à poutres sous chaussée,
- tablier à dalle inférieure à poutres latérales.

2.4.1 - Les passerelles à dalle supérieure à poutres sous chaussée

Ces structures sont en général composées de deux poutres en béton armé, préfabriquées précontraintes par pré-tension ou en acier, associées à une dalle en béton armé coulée en place ou constituée d'éléments préfabriqués.

2.4.2 - Les passerelles à dalle inférieure à poutres latérales

La structure a la forme d'un U (ou d'un cadre inversé). Les poutres latérales en béton ou en acier servent aussi de garde-corps. La dalle inférieure est en béton armé coulée en place ou constituée d'éléments préfabriqués.

2.5 - Passages à faune

Ces ouvrages sont destinés à permettre le franchissement des réseaux routiers, autoroutiers et ferroviaires par les animaux en liberté (cerf, chevreuil, sanglier, etc.).



On distingue deux types d'ouvrages.

2.5.1 Les passages à faune en passage inférieur

Ce sont des ouvrages de types cadres en béton armé ou des ouvrages voûtés en béton armé.

2.5.2 Les passages à faune en passage supérieur

Les tabliers sont en général des dalles en béton précontraint. Ces ouvrages se caractérisent par une forme (en plan) en "diabolo" du tablier, une charge de terre importante et des écrans latéraux de grande hauteur.



Chapitre

3

Éléments de conception et de dimensionnement

3.1 - Généralités

3.2 - Conception générale

3.3 - Conception détaillée

**3.4 - Spécificités du dimensionnement
des ouvrages ferroviaires**

3.1 - Généralités

Les études de faisabilité des ouvrages d'art et de la voie associée (route, autoroute, ligne ferroviaire, ...) résultent d'un travail préalable et commun entre les responsables de tracé et les concepteurs d'ouvrage.

Les études préliminaires sont complétées par des études détaillées, qui permettent d'affiner la conception des ouvrages, en fonction des caractéristiques naturelles (paramètres techniques de l'environnement de l'ouvrage) et fonctionnelles (paramètres intégrant les données d'exploitation) de la brèche et des diverses contraintes du franchissement, en prenant en compte les exigences de qualité architecturale et d'intégration paysagère ainsi que les spécificités environnementales du site.

Les études détaillées font l'objet d'un projet d'ouvrage d'art qui, une fois approuvé, constitue l'essentiel du dossier de consultation des entreprises. La construction de l'ouvrage s'accomplit ensuite à partir des études et plans d'exécution.

Nota

La circulaire n° 94-56 du 5 mai 1994 de la Direction des Routes définit les modalités d'élaboration, d'instruction et d'approbation des opérations d'investissements sur le réseau routier national non concédé.

Malgré la différence de consistance entre les études préliminaires et détaillées, elles peuvent toutes s'inspirer de la démarche suivante :

- la conception des ouvrages courants s'effectue, comme pour tout ouvrage, en allant des grandes lignes vers le détail, par étapes et par affinements successifs,
- la conception générale (implantation des appuis, rapport entre les portées, proportion entre la largeur et la longueur des tirants d'air, choix du type d'ouvrage et des fondations) doit précéder la conception de détail (choix du type de murs de tête ainsi que leur implantation, architecture des appuis, proportion des ouvertures entre les parements vus, choix des équipements etc.).

Il ne faut évidemment pas en conclure qu'il faille négliger des éléments apparemment peu importants pour l'ouvrage tels que, par exemple l'étanchéité, les dispositifs de retenue ou les corniches. En effet, le choix d'un dispositif de retenue conditionne la largeur du tablier et entraîne une modification importante de l'aspect de la face vue. Il en va de même pour les corniches qui contribuent à modifier la face vue du tablier et à animer ainsi le profil longitudinal de l'ouvrage.

3.2 - Conception générale

Cette conception peut s'effectuer selon une démarche en trois étapes, chacune d'elles étant suivie d'un tri en intégrant successivement un grand nombre de paramètres de dimensionnement.

ÉTAPE 1 : détermination de l'implantation des appuis.

ÉTAPE 2 : choix du type d'ouvrage et de la coupe transversale.

ÉTAPE 3 : choix des fondations.

3.2.1 - Étape 1 : détermination de l'implantation des appuis

L'implantation des appuis constitue une étape complexe, mais importante dans la conception des ouvrages, puisque le choix du type d'ouvrage ainsi que son aspect général en dépend pour une large part. L'optimisation de l'implantation des appuis résulte généralement d'un compromis entre plusieurs exigences parfois contradictoires.

Cette implantation s'effectue à partir de nombreuses données :

▶ **Des données géométriques et géographiques**

Les données géométriques et géographiques concernent aussi bien le tracé en plan, le profil en long, le profil en travers, les hauteurs libres et les ouvertures à réserver (gabarit routier, ferroviaire ou de navigation) ainsi que les obstacles à franchir.

Ces obstacles peuvent être des routes ou des autoroutes (élargissables ou non), des voies ferrées (électrifiées ou non), des cours d'eau (navigables ou non) ou d'autres ouvrages d'art (en site urbain ou en zone d'échangeur notamment).

L'objectif principal est non seulement de conserver la régularité et l'harmonie du profil en long, mais aussi de ménager des ouvertures suffisantes pour respecter les gabarits imposés, les conditions de visibilité, ainsi que toutes les contraintes spécifiques au franchissement.

Nota

En particulier, la circulaire du 17 octobre 1986 de la Direction des Routes fixe les gabarits en hauteur des ouvrages routiers sur le réseau national.

Pour les gabarits en largeur, ils peuvent être déduits selon les cas des Instructions sur les Conditions Techniques d'Aménagement :

- des Autoroutes de Liaison (I.C.T.A.A.L.),
- des Voies Rapides Urbaines (I.C.T.A.V.R.U.),
- des Roues Nationales (I.C.T.A.R.N.).

Les contraintes spécifiques peuvent résulter :

- d'une situation particulière (proximité d'une voie d'insertion ou d'un virage par exemple),
- d'une possibilité d'élargissement dans le futur,
- ou des considérations imposées par les phases de travaux sous circulation (possibilité d'accès au chantier, stabilité de la plate-forme franchie pendant l'exécution des fondations, etc.).

► Des données géotechniques

Les données géotechniques concernent non seulement la portance du sol de fondation, ses tassements et sa déformabilité, mais aussi les risques éventuels d'affouillements, le niveau de la nappe phréatique et la présence éventuelle de zones instables.

Lors de l'étude préliminaire, le concepteur doit en particulier collecter les sondages (carottages, essais pressiométriques, essais au pénétromètre) de la campagne générale de tracé réalisés à proximité de l'ouvrage ainsi que toutes les données existantes (carte géologique, sondages d'ouvrages déjà réalisés...). La difficulté de certains sites (zones karstiques ou sols compressibles) plaide en faveur d'un nombre minimal d'appuis.

Ces données conditionnent les possibilités et le type de fondation.

» Des données hydrologiques

Les données hydrologiques résultent des renseignements relatifs au cours d'eau franchis tels que le débit, la fréquence et le niveau des crues, pour lesquels il convient de réserver des sections mouillées et des revanches suffisantes. Ces dernières deviennent indispensables lorsqu'en période de crue, le cours d'eau charrie des corps solides tels que troncs d'arbres, blocs de glace... qui peuvent heurter les piles.

Il convient aussi d'estimer les hauteurs d'affouillement potentielles au voisinage des appuis et les cheminements d'eau préférentiels.

» D'autres données

D'autres données peuvent concerner, par exemple, les réseaux des divers concessionnaires. En site urbain, ceux-ci posent parfois un problème lorsqu'un appui doit être implanté juste sur leur tracé et qu'il est impossible de les éviter ou de les déplacer. Dans un tel cas, la solution doit être recherchée au niveau des fondations pour assurer la transmission des charges jusqu'au sol de fondation en présence de ces obstacles.

Les actions naturelles pouvant solliciter l'ouvrage, tels que les effets du vent ou de la neige doivent aussi être prises en compte.

Cette première étape permet, en analysant les contraintes d'implantation des appuis :

- d'évaluer la longueur totale du pont (comprise entre les appuis d'extrémité) ainsi que le nombre de travées et leur distribution, la répartition et la longueur des portées.

Pour une même brèche, les franchissements biais ou courbes en plan nécessitent une longueur d'ouvrage plus longue que pour un franchissement droit et rectiligne. Cette longueur détermine bien entendu le choix du type d'ouvrage au même titre que les caractéristiques de la brèche. Mais un ouvrage biais ou courbe nécessite, outre des problèmes de calcul, des soins à apporter à la conception technique et esthétique des appuis plus importants que pour les ouvrages droits et rectilignes.

- d'étudier, en fonction de la longueur d'ouvrage, l'opportunité d'un découpage longitudinal en tronçons, séparés les uns des autres par des joints de dilatation.

Le découpage doit être conçu de façon à limiter le nombre de joints intermédiaires sur l'ouvrage, pour les raisons suivantes :

- ces joints, d'un coût relativement élevé, nuisent au confort des usagers et renchérissent l'entretien de l'ouvrage,
- le dédoublement des appareils d'appui (de part et d'autre du joint) au niveau d'un appui intermédiaire entraîne un sur-épaississement, soit du sommier, soit de l'appui lui-même, ce qui nuit en général à l'aspect esthétique de l'ouvrage,
- sur le plan du comportement de la structure, la continuité (ouvrage hyperstatique) est préférable à l'isostaticité (ouvrage isostatique). L'hyperstaticité permet de réduire les efforts dans le tablier et donc d'optimiser les quantités de matériau.

C'est pour ces raisons que, même dans le cas particulier des terrains comportant des risques de tassements et d'affaissements, la continuité n'est pas à exclure à priori.

Cependant, dans le domaine des ouvrages courants, il est avantageux de limiter la longueur des tronçons à une centaine de mètres.

Nota

- Le rapport entre la portée de la travée de rive et celle de la travée adjacente est fonction du type de structure. Il est en général supérieur à 0,55 et inférieur à 0,80.
- Des contraintes de sécurité en phase de travaux peuvent imposer l'augmentation des portées afin d'éviter d'avoir à réaliser des fondations délicates en bordure de voies circulées.

PREMIER TRI :

A l'issue de l'étape 1, plusieurs solutions d'implantation sont possibles.

On retient celles qui respectent les proportions relatives à la répartition des travées d'une part et au rapport de la portée à la hauteur du tirant d'air d'autre part.

Conseils :

Dans le cas d'un nombre pair de travées, l'aspect de l'ouvrage peut être amélioré par un équilibrage des deux travées centrales et par une répartition décroissante en longueur des travées, depuis le milieu du pont vers chacune des culées.

Plusieurs travées de longueurs inégales produisent un effet de désordre, à l'inverse, de nombreuses travées égales engendrent une sensation de monotonie. Celle-ci se trouve encore accentuée lorsque le tablier et les appuis délimitent des tirants d'air (rapport hauteur/portée) mal proportionnés. Le rapport harmonieux semble se situer entre 0,6 et 0,7.

Par ailleurs, pour maintenir l'équilibre statique, le rapport de la portée des travées de rive à celle de la travée adjacente ne doit pas descendre au-dessous de 0,5 dans les cas courants ou 0,6 dans le cas de biais prononcé. Ce rapport ne doit pas non plus dépasser 0,85 pour des raisons d'économie.

Exemple de sélection d'implantation des appuis :

L'exemple suivant porte sur un cas très courant de franchissement d'une plateforme autoroutière à 2 fois 2 voies.

Plusieurs solutions d'implantation d'appuis sont envisageables a priori (voir figure n°27) :

- Solution 1 : quatre travées, avec appui sur le TPC (Terre Plein Central)
Une solution à quatre travées égales est d'emblée à écarter, en raison de son aspect monotone.
- Solution 2 : trois travées, sans appui sur le TPC.
- Solution 3 : deux travées, avec appui sur le TPC.
- Solution 4 : travée unique, sans appui sur le TPC.

Les solutions 2 et 4 conduisent à une travée trop longue pour un tel franchissement, d'où son aspect peu satisfaisant, car la travée trop basse sur ses appuis donne un effet d'écrasement perçu par les usagers de l'autoroute.

Il reste donc les solutions 1 et 3 qui semblent les mieux adaptées. En particulier, la solution 3 correspond à une longueur d'ouvrage réduite par une implantation des culées légèrement à mi-hauteur des talus. Comme on le verra par la suite, ces solutions sont par ailleurs les plus économiques. On s'oriente donc vers ces solutions chaque fois qu'il est possible d'implanter un appui sur le TPC.

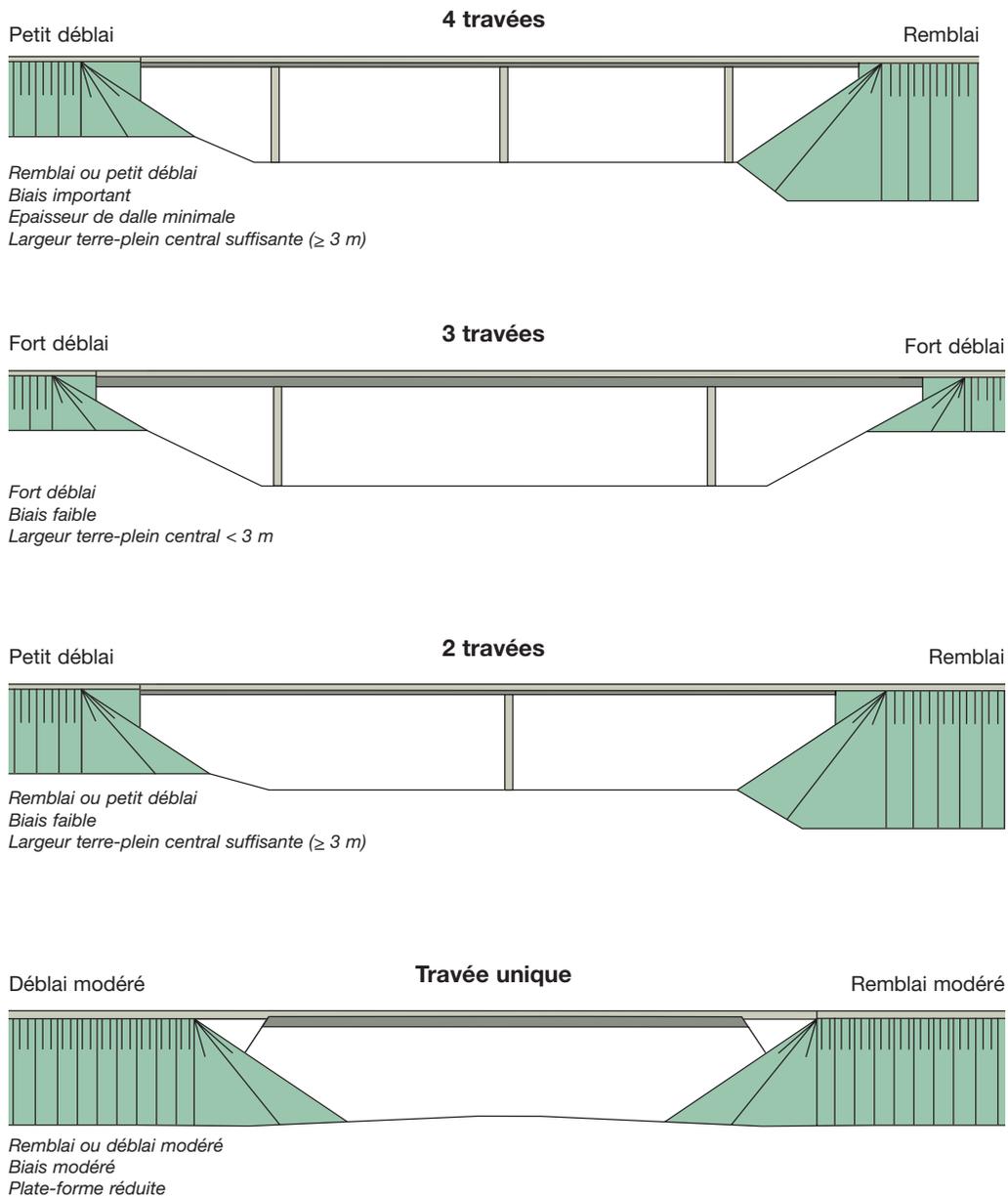


Figure n°27 : Implantation des appuis et choix d'une solution de franchissement d'une plate-forme autoroutière.

Source : Guide de Conception des Ponts dalles édité par le SETRA

Dans cet exemple, deux solutions d'implantation d'appuis répondent aux critères du premier tri.

Pour chacune de ces solutions, il convient ensuite de définir le type d'ouvrage et la coupe transversale en fonction des domaines d'emploi usuels de chaque type de structure (étape 2), ainsi que les fondations (étape 3). Il est possible ensuite d'effectuer une analyse économique, qui permet de comparer définitivement les diverses solutions.

3.2.2 - Étape 2 : choix du type d'ouvrage et de la coupe transversale

Chaque solution d'implantation des appuis correspond à une répartition des travées et de leur longueur (ou portée). La portée la plus longue permet à son tour d'orienter le choix du type d'ouvrage le mieux adapté.

Ce choix est réalisé parmi l'offre des diverses solutions de ponts courants en béton.

Ces ouvrages courants peuvent être construits par coulage en place du béton ou par préfabrication, totale ou partielle.

► Ouvrages à tablier sur appuis simples

Cette famille couvre les gammes de portées suivantes :

Tableau n°1 : les tabliers sur appuis simples et leur gamme de portées				
	Pont dalle	Pont à nervures	Pont à poutres	Pont à poutrelles enrobées
Gamme courante	8 - 25 m	25 - 45 m	15 - 30 m	8 - 25 m
Gamme étendue	7 - 30 m	25 - 50 m	10 - 50 m	8 - 30 m

Cette famille d'ouvrage courant en béton comprend les ponts types PSIDA, PSIDP, PSIDN, PRAD, VIPP du SETRA ainsi que les PPE (Pont à Poutrelles Enrobées).

Nota

Les tabliers à poutrelles enrobées se comportent en service comme une dalle, et non comme un pont à poutres classique. Il en est de même pour les tabliers “poutre dalle composite”, qui sont constitués :

- par des poutres PRAD en T inversé (leurs talons étant disposés jointivement dans le sens transversal),
- et par du béton armé mis en place dans l'espace compris entre ces poutres,

►► **Cadres et portiques**

Cette famille couvre les gammes de portées suivantes :

Tableau n°2 : les cadres et les portiques et leur gamme de portées		
	Cadre	Portique
Gamme courante	2 - 10 m	10 - 20 m
Gamme étendue	2 - 10 m	8 - 22 m

Cette famille comprend les ponts types PICE, PIPO, POD du SETRA, mais également les ponts dalles, les ponts à nervures et les ponts à poutres comportant un ou plusieurs appuis encastrés au tablier. De tels ouvrages fonctionnent en effet comme un portique et non comme un tablier sur appuis simples.

►► **Autres types de pont**

On peut citer :

- les ponts à béquilles dont le tablier, en béton précontraint, est un tablier dalle, un tablier à nervures ou un tablier à poutres,
- les structures voûtées, en béton armé coulé en place ou, plus fréquemment, préfabriqué, qui peuvent supporter un remblai.

Tableau n°3 : les ponts à béquilles et les structures voûtées et leur gamme de portées		
	Pont à béquilles	Structure voûtée
Gamme courante d'ouverture	20 - 40 m	2 - 8 m
Gamme étendue d'ouverture	20 - 50 m	2 - 13 m

SECOND TRI :

Hormis les cas particuliers pour lesquels le choix du ou des types d'ouvrage est évident à ce stade, il n'en est pas de même dans le cas général. En effet plusieurs types d'ouvrage peuvent convenir à une même gamme de portées (la gamme de 20 à 30 m en particulier).

Il convient donc d'écartier les solutions les moins pertinentes sur le double plan technique et économique.

Ce problème peut être résolu en s'appuyant sur les considérations suivantes, qui permettent de dégager d'emblée les solutions les mieux adaptées.

► **Comparaison des diverses solutions de tablier sur appuis simples :** pont dalle, pont à nervures, pont à poutres, poutrelles enrobées, dans leur domaine d'emploi commun :

- à portée égale, dans la gamme de 20 à 30 m par exemple, les poutrelles enrobées et, dans une moindre mesure, les tabliers dalles sont les plus minces. Ces solutions peuvent donc convenir aux franchissements à très faible tirant d'air. En outre, si le site ne permet pas, ou permet mais très difficilement, de poser un cintre appuyé sur le sol, ce sont les poutrelles enrobées ou les tabliers dalles préfabriqués, y compris les tabliers dits à poutre dalle composite, qui figurent parmi les solutions les plus intéressantes.

- lorsque le gabarit n'est pas trop faible et que la mise en place d'un cintre est possible, la solution de tablier dalle coulé en place peut être la plus favorable à la fois sur le plan technique et sur le plan économique. En outre, cette solution devient la plus intéressante si l'ouvrage est de forme complexe (biais prononcé ou forte courbure, ...).

Par ailleurs, ces solutions (poutrelles enrobées, tablier dalle et la poutre dalle composite) sont les plus satisfaisantes tant sur l'aspect que sur la résistance au choc de véhicules lourds en sur-gabarit.

Les tabliers à poutres préfabriquées en béton précontraint par pré-tension (PRAD) ou par post-tension (VIPP) permettent, grâce à la préfabrication de poutres identiques, une standardisation optimale de la construction.

Le tableau n°4 synthétise les solutions possibles, à portées égales, indiquées par une croix, en fonction d'un certain nombre de conditions de réalisation ou d'exigences esthétiques et techniques.

Les cases grisées correspondent selon les cas à des solutions peu satisfaisantes, pas économiques ou difficiles, voire impossibles à réaliser.

Tableau n°4 : Comparaison des solutions possibles à portées égales

Conditions de réalisations ou exigences	Tablier dalle coulé	Tablier dalle préfabriqué	Tablier dalle poussé	Poutre dalle composite	Poutrelles enrobées	Ponts à poutres
Gabarit contraignant	x	x	x	x	x	
Cintre difficile		x	x	x	x	x
Forme complexe	x					
Aspect esthétique	x	x	x	x	x	
Bonne résistance	x	x	x	x	x	
Délai de réalisation court		x	x	x	x	x

► Cadres et portiques

Pour une ouverture ne dépassant pas 8 m, les cadres constituent la solution la plus intéressante.

Au-delà de cette limite, le choix du cadre ou du portique est fonction de la portance du sol de fondation.

► Comparaison des tabliers sur appuis simples et des cadres ou portiques dans leur domaine d'emploi commun.

Cette comparaison concerne un exemple très fréquent de franchissement à deux travées de 20 m de portée.

Les solutions possibles sont a priori le tablier dalle (coulé en place, préfabriqué, poussé), la poutre dalle composite, les poutrelles enrobées, le pont à poutres et le portique ouvert double (POD).

Parmi ces solutions, le POD est la solution la plus favorable lorsqu'il s'agit d'un ouvrage enterré.

Cette solution est la mieux adaptée aux conditions suivantes :

- auto-stabilité des piédroits sous la poussée des terres, grâce à l'effet du butonnage par le tablier,
- rusticité,
- résistance améliorée au séisme.

En l'absence de ces conditions, les autres solutions conviennent aussi.

► Particularités des ponts à béquilles

Cette structure ne convient qu'à des sols de bonne portance en raison des poussées sensibles exercées sur le sol par ce type de pont.

En outre, la brèche franchie doit être suffisamment encaissée, pour que l'ouvrage présente un aspect satisfaisant.

Il reste, à la fin de cette deuxième étape, à déterminer le nombre de nervures ou de poutres lorsque ces solutions ont été sélectionnées.

Le nombre de poutres ou de nervures est principalement déterminé par la largeur du tablier.

Pour les poutres, leur nombre se déduit de leur entraxe couramment pratiqué : de l'ordre du mètre dans le cas du tablier PRAD, et de 2 à 3,50 m environ dans le cas du tablier VIPP.

Dans le cas des tabliers à nervures, on peut adopter la solution :

- à nervure unique, si la largeur du tablier ne dépasse pas une douzaine de mètres,
- à double nervure, si cette largeur est comprise entre 12 et 15 m environ, les nervures pouvant, selon les cas et si les conditions le permettent, être des nervures larges ou étroites,
- à plus de deux nervures, au-delà de 15 m de largeur de tablier ; ce cas devant cependant rester exceptionnel, car les grandes largeurs entraînent un accroissement sensible des efforts transversaux et donc d'armatures dans le tablier, et nécessitent davantage de soin à l'entretien.

3.2.3 - Étape 3 : choix des fondations

Les caractéristiques géotechniques du sol de fondation interviennent au cours de l'étape 1, dans le choix de l'implantation des appuis et de la répartition des travées. Elles contribuent principalement au choix du type de fondations (superficielles ou profondes).

Il convient, par ailleurs, d'intégrer dans ce choix non seulement les conclusions de l'étude de sol, mais également toutes les contraintes de réalisation des fondations (blindage de fouilles, rabattement de nappe), ou celles provenant d'autres parties du projet (caniveau dans le terre-plein central, collecteur sous cunettes par exemple...).

Le type de fondation le plus simple est bien entendu la fondation superficielle lorsque le sol de bonne portance se trouve à une faible profondeur. La semelle qui repose alors sur une couche de béton de propriété non armé (d'une dizaine de centimètres d'épaisseur), doit être suffisamment épaisse pour résister à tout poinçonnement, sans que des armatures verticales (cadres et étriers) soient nécessaires. La base de la semelle doit se situer à un niveau plus bas que la profondeur de pénétration du gel (profondeur hors gel), généralement comprise entre 0,50 et 1,50 m dans les régions à climat tempéré.

En revanche, lorsque le bon sol est profond, la fondation sur pieux s'impose. En fonction de leur portance, les pieux peuvent être soit battus (pour des portances de l'ordre de 1000 kN environ), soit forés (pour des portances allant jusqu'à 5000 kN environ).

Le cas de sols affouillables mérite une attention particulière. Il est, dans ce cas, impératif d'asseoir les fondations, qu'il s'agisse des semelles ou des pieux, à un niveau suffisant pour préserver leur stabilité dans l'hypothèse d'un affouillement maximal.

TRI FINAL :

A l'issue des 3 étapes précédentes, une ou plusieurs solutions d'ouvrage peuvent convenir.

Dans le cas d'une solution unique, le choix est évident.

Dans le cas contraire, on retient celle qui est **la mieux adaptée** aux critères :

- de gabarit (pour son **calage fin** dans le profil longitudinal et transversal),
- **économiques** : solution pas forcément la moins chère, mais d'un coût acceptable, en terme de coût global (investissement et entretien).

3.3 - Conception détaillée

Les grandes lignes de l'ouvrage étant définies, il reste à finaliser la conception détaillée qui concerne :

- les piles et les culées.
- les murs de tête.
- les équipements.

3.3.1 - Conception des piles et des culées

L'étape 1 a permis de déterminer le nombre, la répartition et la hauteur des appuis.

La disposition, et surtout la forme des appuis, résultent pour une large part de considérations esthétiques.

3.3.1.1 - *Disposition des appuis*

Les appuis des ouvrages biais sont souvent disposés suivant le biais. Cependant pour les ouvrages de faible largeur, il est possible de supprimer l'effet du biais sur les piles intermédiaires en adoptant des appuis "ponctuels" à fût unique supportant chacun un seul appareil d'appui.

Les appuis des ouvrages courbes en plan peuvent selon le cas être disposés suivant l'axe de la brèche ou perpendiculairement à l'axe longitudinal du tablier. En site urbain, il est avantageux (emprise minimale au sol, meilleure intégration) d'adopter des appuis ponctuels à fût unique lorsque la largeur du tablier est modérée.

3.3.1.2 - *Forme et proportion des appuis*

▶▶ **Les culées**

Les culées sont constituées de "culées à mur de front apparent" ou plus fréquemment de piles-culées soit semi-apparentes, soit noyées dans les talus.

Dans le cas d'un franchissement biais, la disposition des culées est importante car elle conditionne l'aspect des têtes de l'ouvrage.

Deux cas sont possibles selon que les culées sont placées en retrait par rapport à la voie franchie ou aux abords de la voie franchie. Dans le premier cas, les culées peuvent être disposées selon le biais ou suivant la direction perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'ouvrage, ce qui est plus rationnel. Dans le second cas, l'aspect de l'ouvrage peut être amélioré par une disposition des culées selon le biais, ou selon une direction qui l'approche tout en évitant un biais trop accusé.

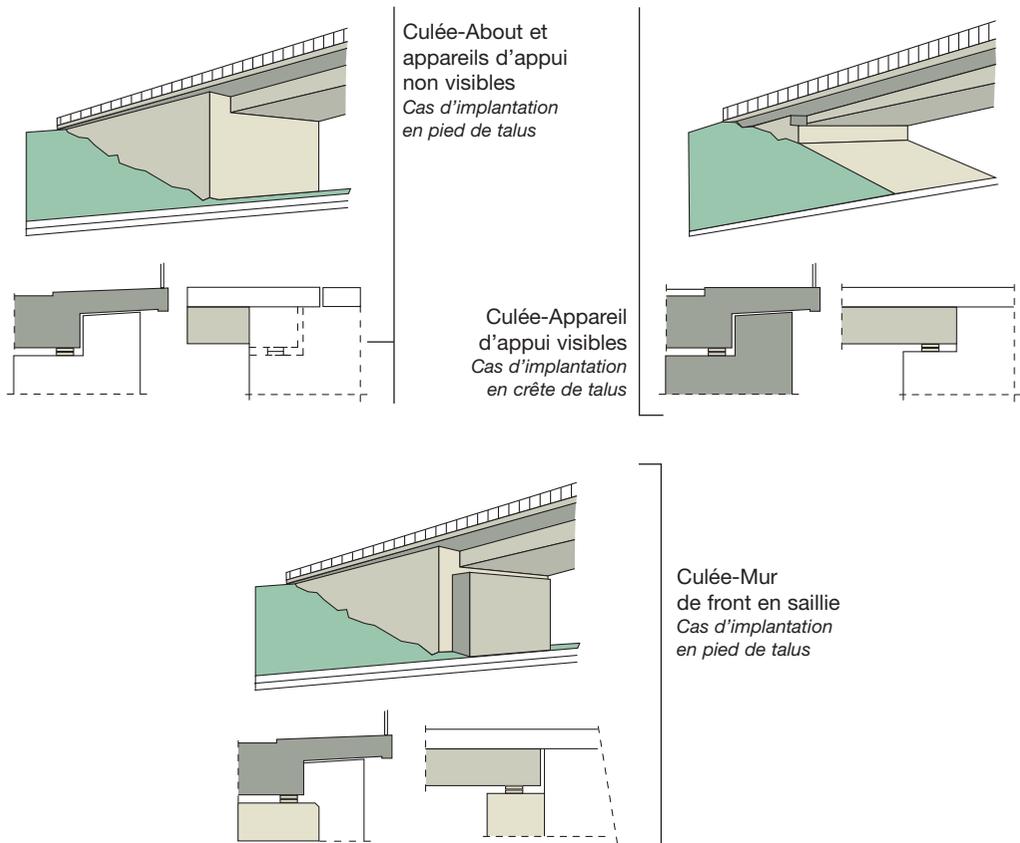


Figure n°28 : Implantation et aspect d'une culée

Source : Guide de Conception des Ponts dalles édité par le SETRA

► Les piles

Les piles sont couramment constituées de voiles (ou fûts) de sections rectangulaires, qui sont plus résistants aux chocs de véhicules que les colonnes. Cependant, d'autres formes peuvent être envisagées pour les piles (forme de V, section polygonale ou elliptique...) lorsqu'un aspect esthétique est recherché.

Pour des raisons d'aspect, les piles sont :

- à fût unique jusqu'à une largeur d'appui (selon le biais) de l'ordre de 5 m,
- à fûts multiples pour les largeurs d'appui plus grandes : par exemple 2 voiles entre 6 et 10 m et 3 voiles au-delà de 12 m.

Dans tous les cas, les fûts de pile doivent présenter une résistance suffisante au choc des véhicules lourds.

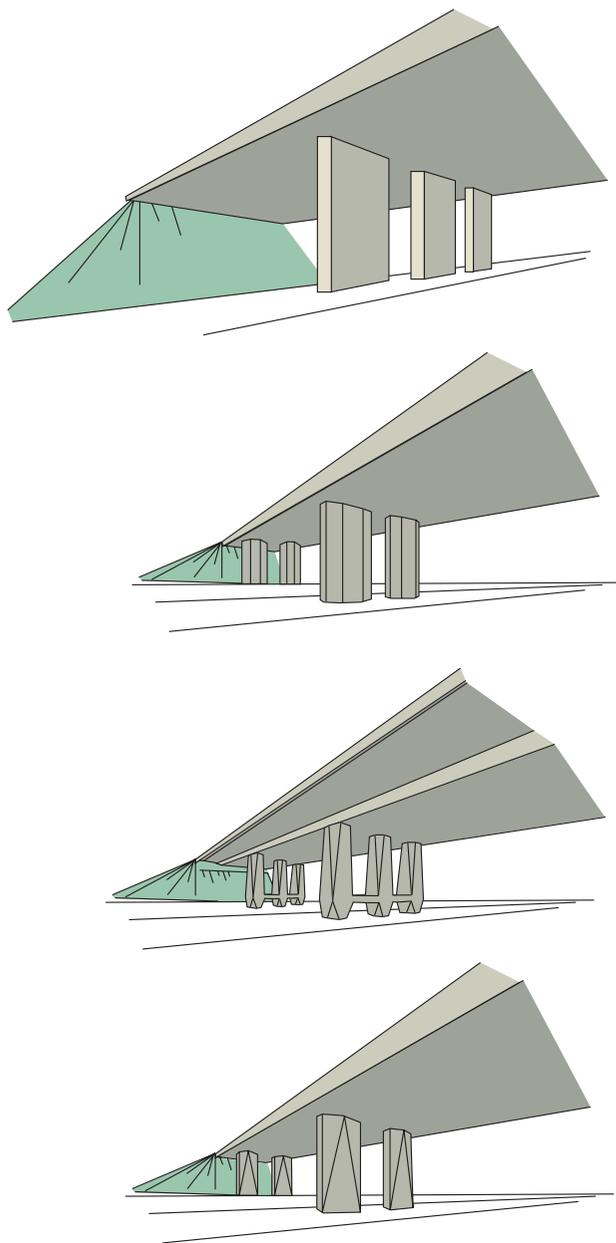


Figure n°29 : Quelques formes de piles

Source : Guide de Conception des Ponts dalles édité par le SETRA

La longueur unitaire des fûts doit être comprise entre 2 m (minimum pour la résistance au choc) et 5 m (maximum pour éviter tout effet d'écran). Dans le cas d'emploi de fûts multiples, une longueur de 2,5 m pour chaque fût répond aux divers critères : résistance au choc, aspect satisfaisant, implantation des appareils d'appui et des niches pour vérins.

L'épaisseur des voiles est en général comprise entre 0,50 et 0,80 m afin de respecter les proportions entre les divers paramètres géométriques : hauteur du tirant d'air, portées, épaisseur du tablier, largeur des fûts.

3.3.2 - Conception des murs de têtes

Les murs de tête ont pour fonction d'assurer le soutènement des remblais situés derrière les culées.

Suivant l'angle qu'ils font avec l'axe de la voie portée, on distingue les **murs en aile** et les **murs en retour**, parmi lesquels figurent, pour les cadres, les **murs en retour suspendus**.

Compte tenu de l'importance de leur surface vue, les murs de tête conditionnent l'aspect de l'ouvrage. Ils doivent donc être traités avec beaucoup de soin, tant au niveau de l'étude, que de l'exécution.

3.3.2.1 - Sélection des murs

Dans la majorité des cas, la différence de coût entre les murs en aile et les murs en retour conduit à adopter la première solution.

Ce choix doit également être dicté par des considérations générales d'esthétique. A ce titre, les murs en retour ne s'adaptent pas aussi bien que les murs en aile aux situations les plus diverses. Dans le cas des petites ouvertures, par exemple, il y a disproportion entre le vide qui est l'ouverture elle-même et les pleins que constituent les triangles formés par les murs.

De ce fait, il est souhaitable de ne pas envisager de murs en retour lorsque la longueur de l'un des deux dépasse une certaine limite, de l'ordre de 2/3 de l'ouverture.

Les murs en retour sont à déconseiller, toujours pour des raisons d'ordre esthétique, dans les cas suivants :

- lorsque le profil en long de la voie portée est en pente sensible : les deux murs étant alors disproportionnés en longueur ;
- lorsque le franchissement est très biais : l'angle aigu que fait l'un des murs avec le piédroit étant difficile à traiter convenablement (notamment en ce qui concerne le coffrage et le ferrailage du nœud de jonction).

3.3.2.2 - Conception des murs

À l'exception des murs en retour suspendus, qui sont encastrés aux piédroits, les autres types de murs doivent être indépendants de la structure. Une liaison rigide des murs avec cette dernière modifie leur fonctionnement, la plupart du temps de façon défavorable.

Pour leur fondation, il est souhaitable de respecter les règles suivantes :

- Dans le cas général, sauf pour les sols de très mauvaise portance, les murs sont fondés superficiellement, si leur longueur reste inférieure à une limite de l'ordre de 9 m. Au-delà de cette valeur, il convient de revoir le choix du type d'ouvrage. Les fondations sur pieux sont exceptionnelles.
- Le niveau des semelles doit être choisi indépendamment de celui des fondations de l'ouvrage. En effet, les pressions exercées sont différentes et, de façon générale, ces murs peuvent accepter sans dommage certains tassements, qui pourraient ne pas être admissibles pour l'ouvrage.

Les murs de tête étant indépendants du reste de l'ouvrage, leur jonction avec ce dernier doit permettre tout mouvement consécutif aux tassements et éviter ainsi toute butée des murs contre la culée.

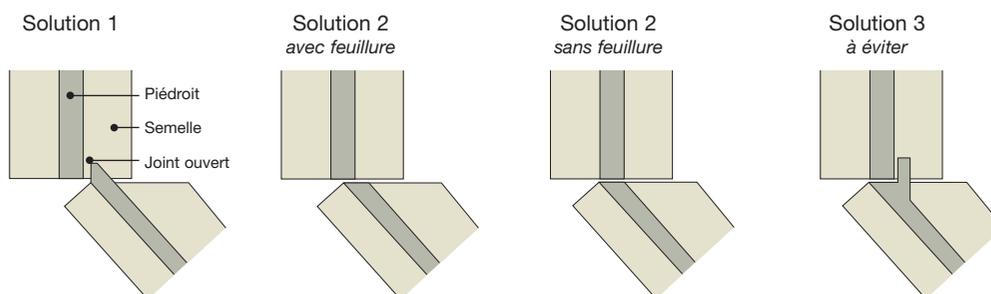


Figure n°30 : Jonction mur en aile et piédroit

Source : Guide de Conception des ponts cadres et portiques édité par le SETRA

En cas de besoin, ces jonctions doivent être étanchées pour éviter toute venue d'eau ou tout passage de fines en provenance du remblai adjacent.

► **Les murs en aile**, en forme de T inversé, sont composés d'un voile vertical de hauteur variable encastré sur une semelle.

En partie supérieure, l'épaisseur minimale des murs de tête est généralement de 25 à 30 cm afin de permettre leur bétonnage correct.

Habituellement, la trace du talus parallèle à l'arête supérieure du mur, est située à une distance verticale de l'ordre de 15 à 20 cm de celle-ci.

Pour les ouvrages totalement en remblai, le mur sera prolongé d'au moins 20 cm au-delà du pied du talus.

Pour les ouvrages en déblai, le mur viendra par contre se perdre dans le talus sans présenter de partie horizontale.

En général, l'épaisseur de la semelle est voisine de celle de la base du mur et sa face inférieure est horizontale. Pour les murs relativement longs, on pourra toutefois prévoir un niveau d'assise variable.

► **Les murs en retour**, également en forme de T inversé mais de hauteur constante, sont disposés dans le prolongement du bord libre du tablier.

Les dispositions constructives à respecter pour les murs en retour sont analogues à celles relatives aux murs en aile.

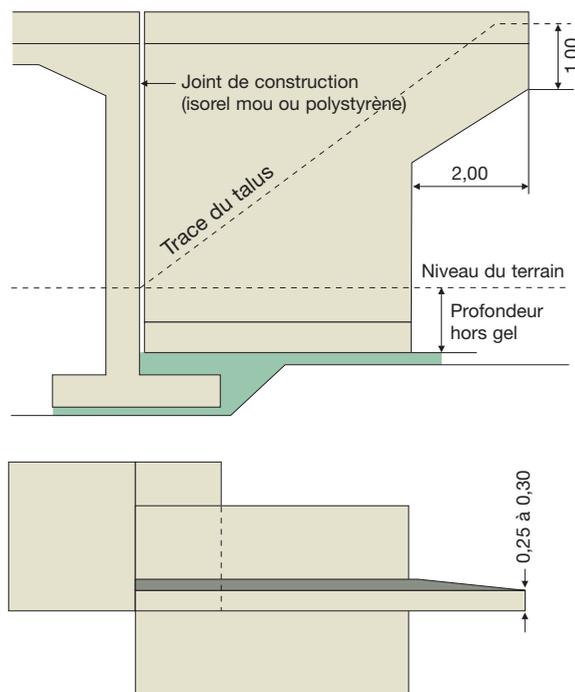


Figure n°31 : Disposition d'un mur en retour

Source : Guide de Conception des ponts cadres et portiques édité par le SETRA

►► **Les murs en retour suspendus**, qui ne conviennent en général qu'aux ponts cadres, sont constitués par une dalle verticale triangulaire, encadrée aux pénétrations du cadre. Ce type de mur n'est adapté que pour des longueurs modérées (inférieures à environ 9 m).

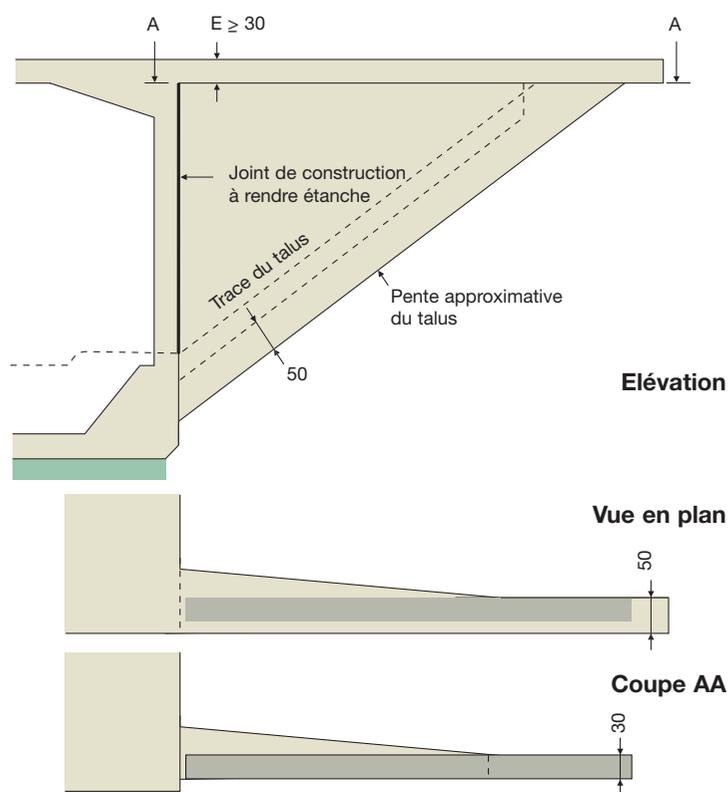


Figure n°32 : Disposition d'un mur en retour suspendu

Source : Guide de Conception des ponts cadres et portiques édité par le SETRA

►► Les murs de tête préfabriqués

Les murs de tête, à l'exception des murs en retour suspendus, peuvent être préfabriqués selon un grand nombre de techniques : murs en béton armé préfabriqués par plots, en terre armée, murs poids constitués d'éléments empilés, etc.

Leurs principaux avantages sont de permettre de mieux maîtriser la qualité et donc l'esthétique des parements, et de réduire les délais d'exécution.

Suivant la technique utilisée, il est ainsi possible de faire varier pratiquement à l'infini l'aspect de ces parties d'ouvrage, dont l'influence est fondamentale sur l'esthétique générale de l'ouvrage.

En pratique, compte tenu de la multiplicité de l'offre des produits proposés, on se restreindra à utiliser des procédés éprouvés, disposant de références sérieuses dans le domaine des ouvrages d'art.

Quelque soit le procédé choisi, la conception globale obéit à une démarche analogue à celle des murs coulés en place, tant en ce qui concerne l'implantation, que le choix du type de mur (murs en aile ou murs en retour).

Il est par contre évident que la conception détaillée et les dispositions constructives varient radicalement en fonction de la technique utilisée. Il convient donc d'adopter les dispositions constructives et les règles de l'art habituelles relatives à la technique utilisée.

La seule remarque de portée générale que l'on puisse faire est que, encore plus que pour les murs coulés en place, on doit s'efforcer de conserver le principe d'indépendance entre l'ouvrage et les murs de tête.

3.3.3 - Équipements

Par définition, ces éléments ne participent pas à la résistance de l'ouvrage. Leur incidence est par contre majeure sur l'aspect (notamment les corniches et les dispositifs de retenue), sur la sécurité des usagers et la pérennité de l'ouvrage (étanchéité, assainissement, ...).

La conception de détail des équipements est de ce fait fondamentale pour parachever l'étude.

Les différents équipements des ouvrages sont présentés dans le chapitre n° 8.

Seuls les paramètres et recommandations essentielles pour leur dimensionnement sont présentés dans ce paragraphe.

3.3.3.1 - Dispositifs de retenue

Les dispositifs de retenue animent la face vue du tablier et présentent donc une forte incidence sur l'aspect de l'ouvrage.

Leur choix doit satisfaire à la fois à des critères de sécurité et d'esthétisme.

En ce qui concerne la sécurité, les critères de choix et d'implantation sont conditionnés d'une part par la destination de l'ouvrage (ponts-routes, ponts-rails, etc.) et d'autre part par la définition des objectifs à atteindre (catégories de véhicules et conditions de choc pour lesquels le dispositif doit être efficace).

La démarche à mener, basée sur la notion de l'indice de danger, est largement développée dans le dossier G.C. du SETRA.

3.3.3.2 - Corniches

Les corniches font partie des éléments les plus visibles de l'ouvrage. Elles ont pour fonction d'habiller et de protéger les bords du tablier, de couronner et de souligner la continuité du profil en long.

Bien entendu, le choix du type, de la forme et de la texture des parements des corniches doit être guidé par des considérations d'aspect et de facilité d'entretien.

Le guide "Corniches" de la collection G.C. du SETRA précise l'ensemble des dispositions constructives à mettre en œuvre.

3.3.3.3 - Appareils d'appui

Le tablier repose sur les piles par l'intermédiaire d'appareils d'appui. Ceux-ci permettent de libérer ou de bloquer, selon une ou plusieurs directions données, les mouvements relatifs entre le tablier et ses appuis.

Dans le domaine des ponts courants, les appareils d'appui en élastomère fretté sont de loin les plus utilisés. Ils permettent de réaliser des liaisons élastiques dans toutes les directions entre le tablier et l'appui.

Nota

Chaque appareil est mis en place entre les deux bossages en regard, le bossage supérieur étant réalisé en sous face du tablier et le bossage inférieur, en tête de l'appui lui-même. Dans le cas des tabliers présentant, en raison du relief du site, une pente longitudinale ou un dévers transversal, c'est le bossage supérieur qui permet d'asseoir horizontalement l'appareil.

3.3.3.4 - Joints de chaussée

Les caractéristiques du joint de chaussée sont déterminées, en particulier, par le souffle du joint et le trafic.

3.3.3.5 - Étanchéité

Le choix du système d'étanchéité doit être compatible avec les conditions thermohygro-métriques dans lesquelles se trouve l'ouvrage.

Un soin tout particulier doit être accordé à la continuité de l'étanchéité sur toute la surface du tablier, ainsi qu'aux relevés d'étanchéité dans les engravures ménagées à cet effet (voir fascicule 67 du C.C.T.G. et le dossier STER du SETRA).

3.3.3.6 - Assainissement

Il est bien sûr indispensable de bien drainer les surfaces horizontales des tabliers ainsi que leur accès, particulièrement pour les ouvrages longs. Ce problème est traité dans le document du SETRA "Assainissement des ponts routes".

3.3.3.7 - Dalles de transition

Les dalles de transition sont destinées à éviter tout risque de formation de marche d'escalier entre l'ouvrage, qui constitue un point dur, et les remblais d'accès.

Pour être efficaces, leur longueur doit être suffisante et le remblai (en matériau drainant et résistant) doit être bien compacté, quelle que soit la profondeur d'implantation de la dalle. Il est ainsi possible d'éviter à la dalle de transition toute rotation nuisible à la tenue du revêtement de chaussée.

Le document du SETRA "Dalles de transition des ponts routes" précise l'ensemble des recommandations à respecter pour concevoir les dalles de transition.

3.4 - Spécificités du dimensionnement des ouvrages ferroviaires

3.4.1 - Règles de conception et de calculs des ponts ferroviaires

Les dispositions générales à respecter pour les études et la réalisation des ouvrages ferroviaires ainsi que les différentes règles de l'art qui leur sont applicables sont définies dans les livrets des Cahiers des Prescriptions Communes (CPC) de la SNCF :

- ▶▶ le Livret 2.01 du CPC pour les ouvrages définitifs
- ▶▶ le livret 2.02 du CPC pour les ouvrages provisoires et les phases de construction

Ces prescriptions s'appliquent à tous les ouvrages, quels qu'ils soient, c'est-à-dire aussi bien les ponts routiers franchissant des voies ferrées et les ponts-rails que les installations ferroviaires, et concernent le tablier, les appuis et les fondations.

3.4.2 - Contraintes spécifiques de dimensionnement des ouvrages ferroviaires

La conception et le dimensionnement des ouvrages ferroviaires doivent respecter les principaux critères suivants :

- simplicité tant en conception qu'en réalisation,
- rigidité importante tant en flexion qu'en torsion,
- durabilité de la structure et des matériaux,
- facilité d'inspection et de surveillance,
- entretien minimum.

Nota

Les données fonctionnelles relatives aux lignes nouvelles à grande vitesse sont précisées dans des dossiers pour la conception des ouvrages d'art pour lignes à grande vitesse mises au point par la Direction de l'Équipement et de l'Aménagement de la SNCF.

Le dimensionnement des ouvrages ferroviaires doit prendre en compte de nombreuses contraintes spécifiques, et en particulier :

- L'importance des charges verticales : poids du ballast et des convois ferroviaires ;
- L'importance des efforts horizontaux : efforts de freinage des trains, effets des dilatations des rails, interaction voie-ouvrage ;
- La limitation des déplacements des tabliers afin d'assurer la continuité de la voie ;
- La limitation des déformations de la structure afin de garantir le confort des usagers, une faible déformabilité et un bon amortissement des mouvements du tablier ;
- La limitation des vibrations du tablier afin d'assurer la stabilité et la sécurité des structures.

Les ouvrages doivent assurer la continuité de la plate-forme ferroviaire et donc permettre en particulier le passage des caténaires (et l'implantation de leur support) et des divers réseaux.

3.4.2.1 - Charges de calcul en phase d'exploitation normale

L'influence de la surcharge ferroviaire est beaucoup plus importante que celle des surcharges routières. Ceci est dû aux caractéristiques suivantes :

- le poids du ballast et des superstructures (18 à 25 t/ml),
- l'intensité des surcharges verticales (8 à 15 t/ml/voie, selon le type de convois),
- l'effet dynamique dû au passage des trains,
- l'effet de fatigue provoqué par les nombreuses variations d'efforts produites par le passage successif des essieux des rames ferroviaires,

- le freinage et le démarrage pour les appuis fixes : ces efforts sont dus à l'adhérence véhicule-rails. L'effort appliqué au rail peut être très élevé et représenter environ 1/4 du poids des trains.
- l'interaction voie-ouvrage d'art. Elle est due au déplacement différentiel sous l'effet thermique entre les rails et leur assise.

3.4.2.2 - Critères de dimensionnement

» Critères de dimensionnement en situation transitoire ou durable.

Viennent s'ajouter aux caractères spécifiques des actions citées ci-dessus, le respect des critères liés à la sécurité vis-à-vis de la circulation des trains et ceux liés au confort des voyageurs, ce qui nécessite une structure beaucoup plus robuste et par conséquent beaucoup plus massive que dans le cas des ponts-routes. Ces principaux critères concernent la limitation :

- des déplacements du tablier sous freinage et démarrage ;
- de la déformation horizontale ;
- des rotations aux deux extrémités de l'ouvrage ;
- de l'accélération verticale du tablier ($3,5 \text{ m/s}^2$ au niveau du tablier pour la stabilité de la structure de la voie et 1 m/s^2 au niveau de la voiture pour le confort des voyageurs).

» Dilatation des voies

La longueur des ouvrages doit être limitée afin de réduire les variations dimensionnelles à des valeurs compatibles avec les appareils de dilatation des voies.

» Déformations et vibrations

Les déformations des ouvrages et les vibrations du tablier doivent être limitées afin de maintenir, en particulier lors du franchissement des ouvrages par les trains à grande vitesse, la continuité du confort des usagers.

Pour les ouvrages courants, le tableau n°5 synthétise en fonction de la portée les solutions les plus régulièrement adaptées.

Tableau n°5 : solutions régulièrement adaptées pour les ouvrages ferroviaires		
Portée inférieure à 15 m	Portée comprise entre 15 et 25 m	Portée supérieure à 25 m
Cadre Portique Dalle en béton armé Poutrelles enrobées	Poutres en béton armé Poutrelles enrobées	Poutre en béton précontraint Ossature mixte acier-béton



Chapitre

4

Architecture des ponts courants en béton

4.1 - Quelques règles élémentaires

4.2 - Témoignages

Associer les architectes à la création des ouvrages d'art, l'idée n'est pas nouvelle et la démarche se généralise même pour les ponts courants. Notre patrimoine et nos paysages sont les principaux bénéficiaires de cette démarche qui associe technique et esthétique pour embellir et bâtir harmonieusement notre cadre de vie.

Un ouvrage d'art courant est devenu le fruit d'un travail d'équipe une œuvre collective, en toute liberté, un dialogue et un échange permanent, en pleine confiance, entre tous les acteurs de l'amont de la conception jusqu'à l'exécution en passant par la phase de mise au point du projet.

Chacun, en faisant preuve d'humilité, intègre l'apport et la connaissance de l'autre. Cette mise en commun des expertises techniques et des sensibilités esthétiques permet de faire les bons choix, de trouver pour un site donné, la solution adaptée, mélange de créativité technique et esthétique.

L'ouvrage prend ainsi sa juste place dans le paysage.

4.1 - Quelques règles élémentaires

La conception d'un ouvrage d'art, même s'il est considéré comme un pont courant, est toujours complexe, elle nécessite le respect de règles élémentaires afin de l'inscrire avec harmonie durablement dans son environnement d'accueil. Le respect de ces règles est nécessaire, bien qu'elles ne soient pas universelles et qu'elles évoluent en particulier avec l'augmentation des performances des matériaux et le développement de nouvelles techniques de conception ou de réalisation des ouvrages. Le matériau béton, par exemple, a bénéficié, cette dernière décennie, d'une forte évolution technologique. Mais cette démarche n'est pas suffisante, elle doit faire l'objet, le plus possible en amont du projet, dès la définition du tracé et les premières esquisses de l'ouvrage, d'un travail d'équipe associant les ingénieurs et les architectes. Ce travail doit intégrer la conception globale de l'ouvrage, les lignes générales et la définition du moindre détail et se poursuivre pendant toute la phase de mise au point du projet et jusqu'à fin de son exécution. Chaque choix technique doit être confronté aux exigences architecturales afin de trouver le meilleur compromis et garantir la pérennité esthétique de l'ouvrage.

▶ Proportions, rapports des dimensions harmonieux et cohérence d'ensemble.

En fonction des rapports entre les dimensions géométriques générales de l'ouvrage : hauteur et largeur des piles, longueur des travées, épaisseur du tablier, volume et emplacement des culées, l'ouvrage va dégager une impression de solidité, de stabilité ou à l'inverse de légèreté, ou à l'extrême de fragilité ou de trop grande rigidité.

Les ouvertures dégagées entre les piles et le tablier (fonction de la hauteur des piles et de la longueur de la travée) ne doivent pas avoir une forme trop carrée, ni à l'inverse une forme de rectangle trop allongé.

A hauteur de pile donnée, la juste répartition des travées permet de trouver le bon équilibre.

L'ouvrage doit dégager une cohérence et une unité entre sa forme générale, les traitements des parements et les détails constructifs.

▶ Transparence

L'ouvrage d'art courant ne doit pas être un obstacle visuel trop marqué dans le paysage d'accueil. Il doit rester modeste et ne pas masquer ou fragmenter le paysage et dégager la plus grande visibilité possible pour les automobilistes. Il convient donc de réduire au maximum le nombre d'appuis (en évitant si possible, dans le cas des passages supérieurs, les piles sur le terre-plein central), de concevoir des culées pas trop massives et des perrés en pente douce. L'ouvrage ne doit pas être pour l'automobiliste et ses passagers, un obstacle à la continuité du paysage.

▶ Sobriété du système structurel

La logique du cheminement des efforts dans l'ouvrage et de son fonctionnement statique doit être évidente, ce qui permet de réaliser des ouvrages donnant une impression de sobriété, de grande stabilité et de simplicité. Chaque constituant de l'ouvrage doit clairement exprimer sa fonction (tablier, pile, corniche, garde-corps, ...). Les appuis de l'ouvrage, par exemple, évasés vers le bas donnent une impression de stabilité et d'ancrage dans le sol. La jonction entre le tablier et les piles doit suggérer le passage des charges.

» Adaptation au site d'accueil

L'ouvrage doit s'intégrer discrètement et aussi naturellement que possible dans son site d'accueil qui peut être urbain, périurbain ou rural. Il peut être situé en rase campagne, en zone vallonnée ou en montagne. Il doit, dans tous les cas, devenir une composante du paysage et donner l'impression d'avoir toujours été là. L'ouvrage ne peut pas être dissocié de son environnement. Pour ce faire, il convient d'analyser, en amont de la conception, les contraintes environnementales locales et les diverses composantes du site : bâti environnant, végétation, morphologie du relief, pratiques constructives locales, caractéristiques de la brèche à franchir...

La conception des formes et le choix des textures des parements doivent intégrer l'orientation de l'ouvrage et son éclairage par le soleil au cours de la journée.

L'ouvrage doit être à l'échelle du paysage, des constructions voisines, du relief, ses équipements et ses détails à l'échelle des riverains et des véhicules qui le franchissent.

» Maîtrise esthétique des parements

Les multiples techniques de traitement de surface des bétons et la palette des teintes permettent d'obtenir des parements en béton répondant aux diverses exigences architecturales. La combinaison des différentes textures et reliefs (incrustation, rainurage, ...), la variation des formes et les contrastes entre les surfaces et leurs orientations créent des effets d'ombre et de lumière qui donnent aux ouvrages une impression de légèreté ou accentuent les courbures.

» Architecture générale soulignée par les équipements

Les divers équipements des ouvrages, tels que, en particulier, les corniches soulignent le parti architectural de l'ouvrage. Leurs dimensions, formes et aspects doivent permettre leur intégration harmonieuse dans la structure. L'ensemble des constituants de l'ouvrage doit donner un assemblage cohérent et homogène. Chaque élément doit avoir une proportion équilibrée vis-à-vis de l'ensemble. Le calepinage des joints des corniches permet d'animer, par exemple, la tranche horizontale du tablier.

► L'ouvrage doit être apprécié par les riverains et les automobilistes

Les ouvrages d'art ne sont pas conçus uniquement pour les automobilistes. Ils ont une position privilégiée sur un tracé routier, autoroutier et ferroviaire et peuvent être admirés de partout, selon de très nombreux angles de vue, par de nombreux riverains, promeneurs ou spectateurs. L'ouvrage doit pouvoir être admiré à grande vitesse par les automobilistes, et de façon statique par les piétons.

Vingt ans de préoccupation architecturale

Valoriser la dimension architecturale des ouvrages d'art n'est pas une idée neuve. Il y a vingt ans (circulaire du 24 septembre 1984) un document a été rédigé par le directeur des Routes, Jean BERTHIER ayant pour titre "La qualité paysagère et architecturale des ouvrages routiers".

Le paragraphe d'introduction de ce document y annonçait, en son heure, la politique de conception des ouvrages d'art telle que nous la connaissons aujourd'hui : "les routes constituent une des traces les plus significatives que laissent les sociétés. En particulier, les ouvrages d'art ont souvent été l'objet de soins dans leur conception comme dans leur aspect ; de nos jours comme autrefois, le tracé, les équipements, les plantations entre autres éléments de la route participent à la qualité de l'environnement et du cadre de vie. Ainsi aux préoccupations fonctionnelles pour créer la route se mêlent des préoccupations paysagères pour la relier à l'environnement, et des préoccupations architecturales pour le choix des formes et des autres aspects".

La circulaire insiste aussi sur le fait que la conception paysagère et architecturale de l'ouvrage ne peut être abordée sans une connaissance et une analyse approfondie du site.

4.2 - Témoignages



Une démarche architecturale au sein d'une équipe de conception

Une démarche architecturale adaptée aux ouvrages courants : un partage de responsabilités et de sensibilités au sein de l'équipe "Architectes - Bureaux d'études".

» L'approche sensible des ouvrages courants est actuellement entrée dans les mœurs et fait partie des paramètres menant à un résultat de qualité où la prise en compte des contraintes techniques, justement appréciées avec leur degré de liberté, a permis une expression sensible adaptée aux sites, aux parcours et à leurs caractéristiques géométriques, fonctionnelles et paysagères.

» Les ouvrages courants forment une famille dont les caractéristiques sont définies réglementairement, encore que l'on voit apparaître des "cas limites", des exceptions et de plus en plus des approches à travers de nouvelles techniques dues à l'évolution des matériaux et des normes de calcul.

Ce sont malgré tout des ouvrages "courants", c'est-à-dire essentiellement la majorité des ouvrages perçus par l'utilisateur et ce surtout sur les routes à fort trafic où la multiplicité des ouvrages répétitifs entraîne des effets visuels, des "messages", que l'utilisateur ou le riverain peuvent enregistrer, apprécier en fonction du rapport au site d'une part, de leur sensibilité et culture d'autre part.

Il y a aussi de nombreux ouvrages isolés ou urbains.



*Cohérence des éléments
(RN 88 - Liaison Rodez Baraqueville - DDE 12)*

►► On citera donc les “familles” principales :

- Les Passages Supérieurs (véhicules, faune, rail).
- Les Passages Inférieurs (véhicules, faune, rail).
- Les Passages Particuliers mais inclus dans le domaine des petits ouvrages “répétitifs ou non”.

L'ensemble de ces ouvrages emploie le ou les bétons de façon importante, soit pour l'ensemble de leurs structures, soit pour leur rapport avec le sol.

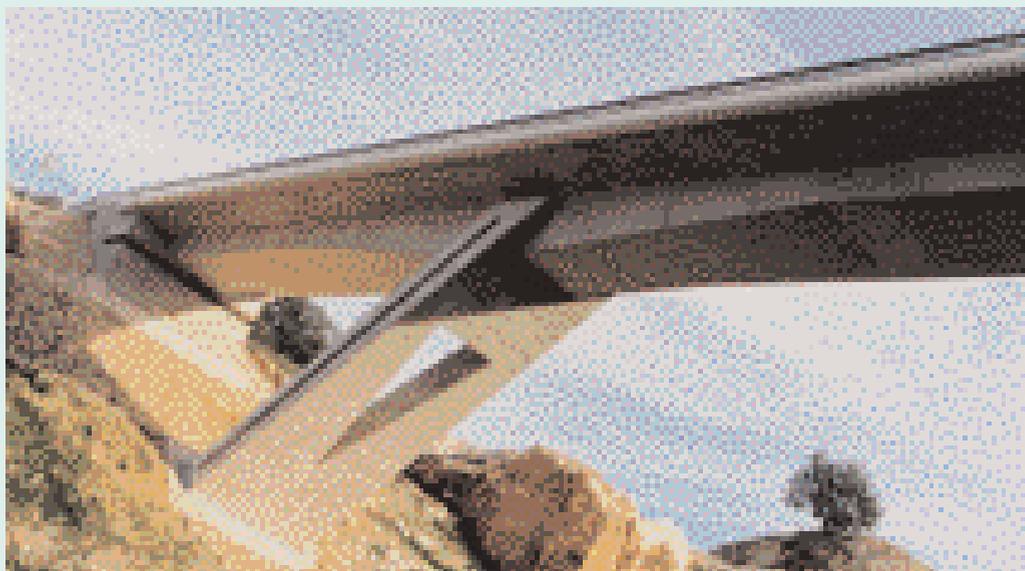
L'approche sensible, culturelle ou le paysage, l'environnement humain, l'histoire font partie du raisonnement qui mènera à travers les choix de structure à définir une politique ou l'approche objective et la sensibilité sont l'explication du subjectif : silhouettes, formes, épidermes, détails et couleurs.

Dans cette expression, les bétons sont notamment sollicités à travers formes, matières, épidermes et mêmes couleurs.

►► L'architecte, associé à la conception des différents types d'ouvrages courants s'investit dans la définition géométrique afin de relier l'impératif technique au programme d'expression qu'il entend mettre en œuvre sans tomber dans un symbolisme ou un maniérisme hors de propos.



*Passage des Templiers
(A75 - La Cavalerie - DDE 12)*



► La réflexion va s'appliquer :

- **aux tabliers** où la coupe transversale est significative après les choix de travures.
- **aux piles** où le degré de liberté est assez grand, tout en tenant compte des impératifs de sécurité et de section horizontale.
- **aux culées, murs d'about et perrés** qui traduisent l'accroche au terrain de l'ouvrage et sa liaison aux voies desservies.
- **aux superstructures** où le détail des garde-corps, corniches, murs d'about permettent une mise en harmonie subtile avec le lieu et le jeu des rapports avec la structure.
- **aux effets colorés et aux épidermes** des bétons, aciers, aluminium et éventuellement aux éléments rétro-réfléchissants.

*Variations d'ouvrages sur un parcours donné
(A20 - Brive Montauban - ASF)*

En résumé, tant à travers les choix structuraux que leur interprétation plastique, la recherche des détails et l'impact des couleurs, les possibilités de traduction esthétique sont grandes et doivent traduire les intentions objectives de l'architecte dans leur expression sensible, vibration esthétique au sens exact du terme.



Frédéric ZIRK
Architecte





L'architecte met en scène un espace, raconte un histoire

Au départ, on s'attache à marquer le paysage, puis on apprend à aller à l'essentiel. C'est une démarche d'apprenti. L'ouvrage d'art est la fois un contenu et un contenant ; il se lit de l'intérieur et de l'extérieur. Il donne des échelles, crée une dimension. L'architecte est là pour un aspect symbolique.

C'est cette dimension académique, historique, qui rend le sujet intéressant. Des ponts, il y en a depuis fort longtemps, et les ouvrages d'aujourd'hui s'inscrivent dans une tradition. Une tradition qui nous a laissé nombre d'ouvrages anciens que l'on apprécie pour leur pureté. Dès lors, la question est comment faire pour durer, pour éviter la pièce rapportée. Au dire des architectes, il semble bien que l'élégance se gagne par la recherche de ces mêmes trames fondamentales. On essaie de sculpter le travail de l'ingénieur en dégagant les lignes essentielles.

L'ouvrage d'art n'est évidemment pas la création absolue de l'architecte.



Pour dompter cette technique, il faut apprivoiser l'anatomie de l'objet, sans quoi l'on ne fait que de l'habillage. D'où l'obligation du travail avec l'ingénieur pour comprendre ce qui est fondamental. D'où aussi ces allers-retours jusqu'à l'ouvrage final. On ne sait plus à la fin qui a apporté les grandes options de départ et cela n'a pas d'importance.

Encore faut-il que la problématique exprimée par la maîtrise d'ouvrage soit suffisamment précise. D'autant qu'une démarche intellectuelle se fait jour et tend à modifier la donne. Car l'ère est à la communication et la volonté se fait plus pressante chez les maîtres d'ouvrage, le plus souvent aussi chez les élus, de laisser une trace de leur passage. C'est l'une des raisons pour lesquelles on fait appel aux architectes.

Le phénomène tendrait à s'amplifier. Charge alors à l'architecte de faire comprendre ce qu'il faudrait faire - et ne pas faire - pour l'ouvrage. Les élus ne doivent pas voir en l'ouvrage d'art une vitrine. C'est la source d'une ambiguïté, on sollicite l'architecte mais on ne l'écoute pas forcément quand il prône la retenue et la discrétion,



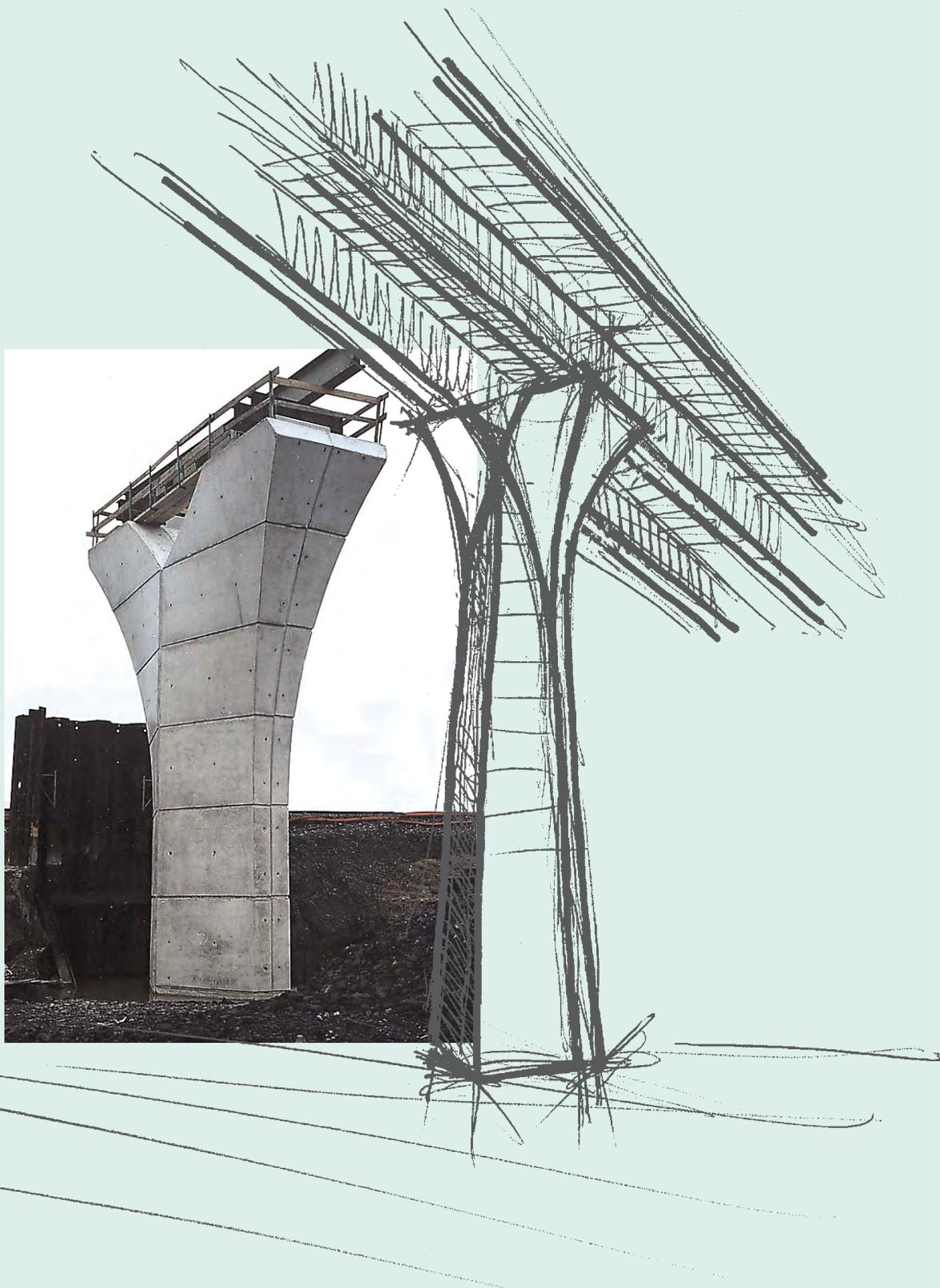
surtout dans les projets urbains. On doit se féliciter pourtant du chemin parcouru car l'architecte n'a plus à défendre l'intérêt de sa mission.

Il ne lui reste donc plus qu'à convaincre la maîtrise d'ouvrage qui fonctionne souvent par référence : on a été séduit par un ouvrage et l'on souhaite avoir le même chez soi. A l'architecte de montrer qu'il ne faut pas retenir le seul aspect cosmétique et qu'il faut au contraire s'atteler à une démarche personnelle, à un scénario propre. Avant d'être un architecte d'ouvrages d'art, on met en scène un espace, on raconte une histoire à des hommes.

On est dans le symbole. Quel plaisir quand le message passe, quand l'objet gagne en âme sans nul besoin de discours explicatif.



Laurent BARBIER
Architecte





L'art du dialogue entre ingénieur et architecte

Une fois un pont ou un viaduc terminé, les problèmes techniques résolus et les difficultés administratives ou politiques oubliées, l'ouvrage, par son aspect, doit se défendre seul.

En effet, c'est son apparence qui donne l'image de marque de l'infrastructure nouvelle et de ceux qui l'ont créé. C'est ce que voit le public. C'est ce qu'ils jugent. Nous ne devons pas avoir à rougir de ce que nous laissons aux générations à venir.

C'est dire - en plus d'une solidité évidente - l'importance qu'ont une bonne insertion dans le site, un dessin harmonieux, l'équilibre des masses, autant que la pertinence de la solution structurelle. L'architecte peut apporter tout cela s'il a le sens de l'ouvrage d'art.

Pour un bon résultat, la collaboration entre ingénieur et architecte est devenue nécessaire. L'un maîtrise la technique, l'autre - imaginant dans l'espace - dessine des formes satisfaisantes. Apportant chacun sa compétence, ils sont complémentaires et collaborent à base de valeur ajoutée. S'ils ont du métier et de l'estime l'un pour l'autre, ils savent la part de liberté qu'ils peuvent laisser à l'autre, de même que le domaine où il importe de pousser plus au fond la mise au point d'un élément particulier, en partant du principe que chaque cas est singulier et qu'il mérite logiquement une solution spécifique. Essayer de réutiliser le projet précédent est une attitude paresseuse génératrice de médiocrité.

Quand, en plus, ingénieur et architecte ont du talent, la collaboration est excitante pour les partenaires et aboutit à des résultats fructueux : l'arc d'Antrenas ou le viaduc de Millau sont là pour le prouver.



Jean-Louis JOLIN
Architecte



Une intervention spécifique pour une collaboration architecte et ingénieur réussie

On constate, depuis plusieurs années, une évolution dans les préoccupations des responsables des pouvoirs publics sous l'effet vraisemblablement des préoccupations environnementales.



L'intervention de l'architecte dans la conception d'ouvrages d'art est spécifique, et surtout plus vaste qu'on ne l'imagine a priori. L'architecte est un homme de synthèse, à même d'envisager l'ensemble des questions techniques, esthétiques, économiques, environnementales et sociales. Sa formation et ses références élargies sont un atout par rapport au spécialiste. Il n'est pas question pour l'architecte d'enjoliver une proposition technique équilibrée par les ingénieurs, mais plutôt de s'associer à la conception du projet le plus tôt possible. L'architecte doit disséquer la démarche et les préoccupations des ingénieurs. Pour comprendre

les raisons qui leur ont fait choisir tel type d'ouvrage, tel matériau, il faut remonter à l'origine, pour comprendre les parties pris ; il faut connaître ces ingrédients qui vont faire émerger le projet et donner un sens architectural à l'ouvrage. L'intervention de l'architecte suscite plutôt l'émulation. C'est une nouvelle donne dans la démarche de conception. Il est évident que le couple architecte-ingénieur sera plus convaincant à faire entendre la faisabilité de ses propositions. L'architecte s'exprime par des références, l'ingénieur démontre par le calcul ; il doit donc s'adapter en permanence, mais l'expérience, au final, réussit.





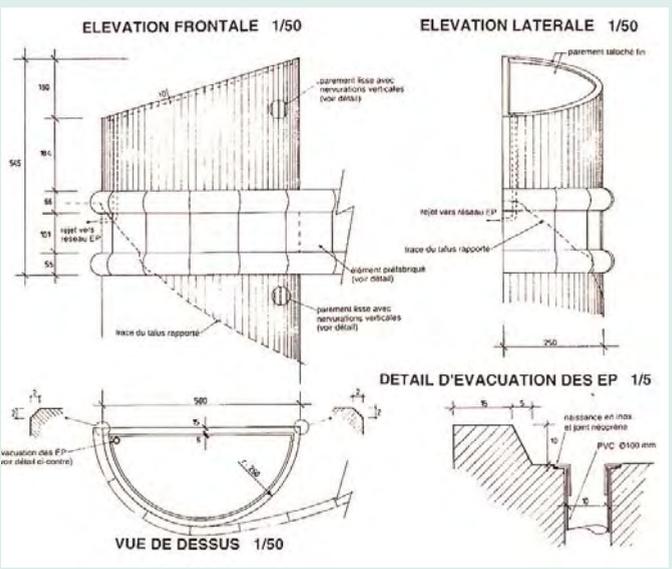
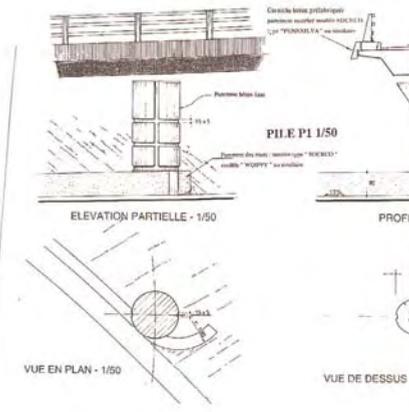
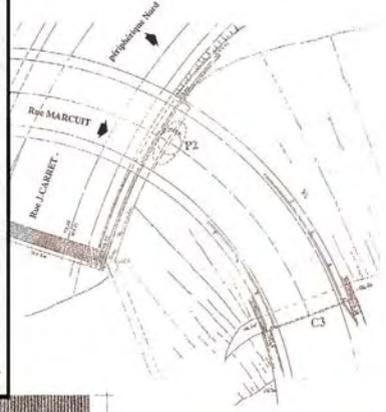
En conclusion et pour reprendre une citation de P. BERGER architecte - Grand Prix National de l'Architecture en 2004 :

“l'architecture est cette discipline où se livre ce combat perpétuel entre l'art de bâtir et l'art pur, l'un recherchant la raison d'être d'une forme par l'usage et les choix constructifs sur un site, l'autre cherchant à suggérer avec la forme une émotion, des sensations, l'expérience sensible des matières et des figures d'espaces”.



Guy MURAIL
Architecte

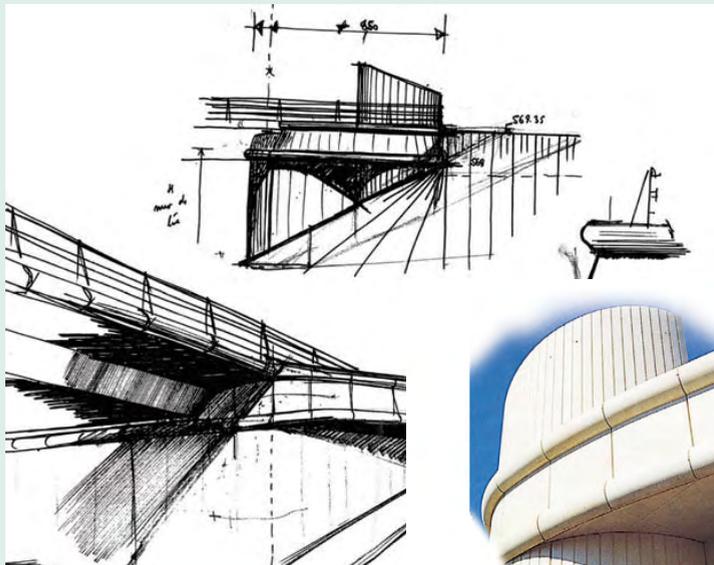




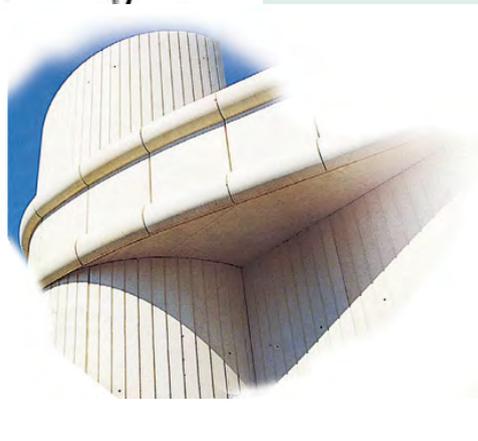
La relation humaine clé de la réussite

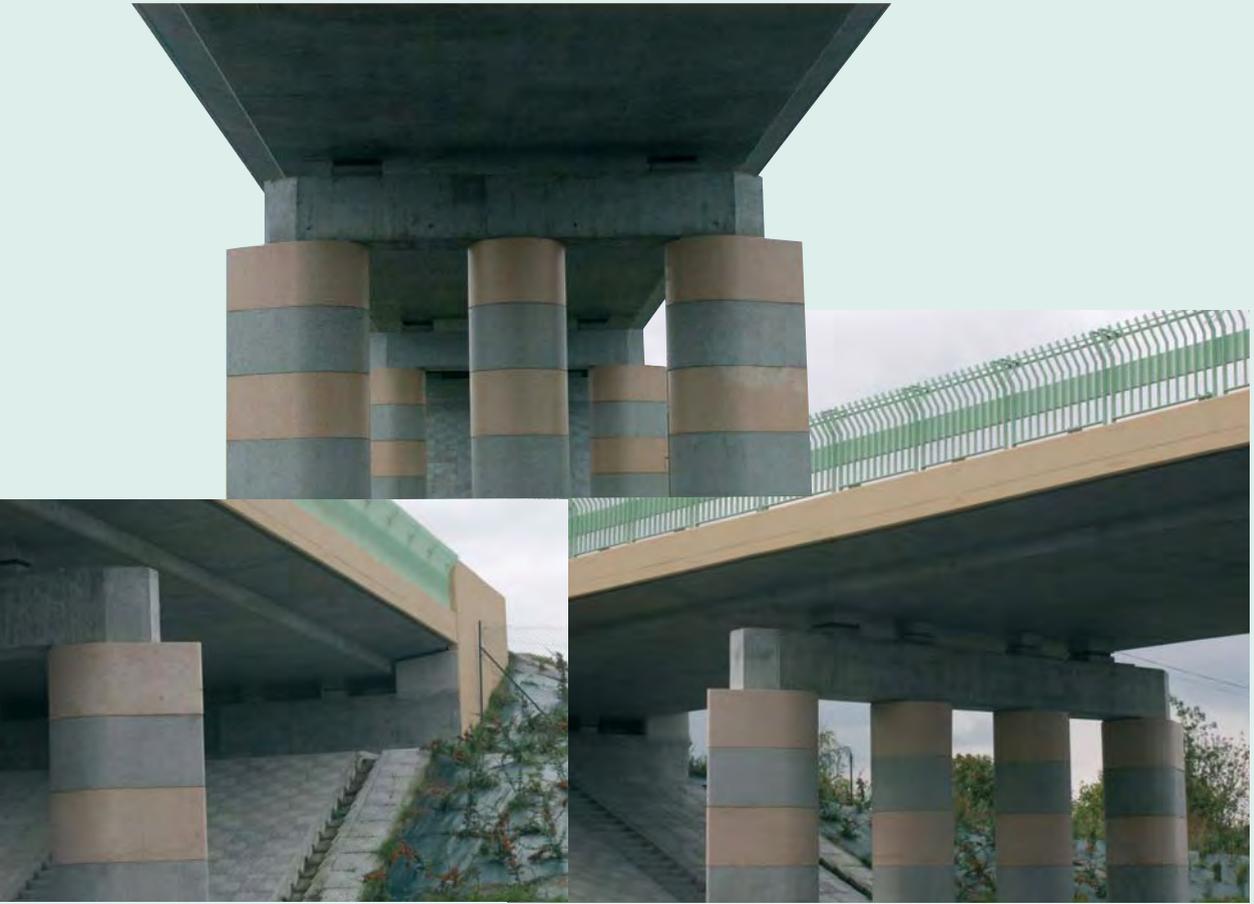
La conception d'un pont, qu'il soit de grande ou de plus modeste dimension, engage toujours un dialogue actif entre l'Architecte et l'Ingénieur. Cette relation humaine est portée par le même souhait d'aboutir à une réalisation cohérente tant avec le site dans lequel elle est implantée qu'avec les modalités techniques appliquées.

Le vocabulaire architectural employé ne peut trouver sa justification que dans l'analyse de la valeur visuelle attendue. Ce n'est que le seul respect de cette dernière qui permettra d'associer aisément des concepts architecturaux et techniques harmonieux. Cette démarche favorise incontestablement la créativité et l'innovation. Ces objectifs sont essentiels bien qu'habituellement fixés pour des ouvrages très majeurs destinés à retenir l'intérêt et attirer l'attention du grand public. Toutefois, on appréciera, pour des ponts plus courants, de trouver dans leurs lignes et modénatures, l'image de la bonne adaptation visuelle au lieu dans lequel ils sont désormais inscrits, sans risquer le travers des effets à seule vocation décorative.



Pierre MILLION
Architecte







L'élément déclencheur, c'est le site



Les idées doivent être liées au site. C'est l'élément déclencheur. Il faut que la structure de l'ouvrage puisse s'y installer simplement. D'où l'intérêt de trouver la forme et l'ossature adaptées. Je ne me sou mets pas à l'esthétique. J'essaie de révéler un site et de proposer le projet le plus simple, celui qui inspire.

En matière d'ouvrage d'art, l'architecte doit exercer son métier avec exigence et humilité.

L'important est de proposer des projets et d'écouter ensuite les réactions du public et des utilisateurs. Mais il peut y avoir contradiction entre originalité et adaptation au site. C'est pourquoi notre bataille, aujourd'hui, doit se situer à deux niveaux, l'un intellectuel, l'autre économique.



Concernant la maîtrise des coûts, les services du ministère de l'Équipement ont rationalisé la conception de certains ouvrages d'art courants, facilitant ainsi la mise au point des passages inférieurs et supérieurs tout en optimisant les calculs.

Résultat, les ouvrages peuvent être à la fois élégants et peu coûteux.

Le travail accompli par le SETRA dans ce domaine s'est montré déterminant.



Alain SPIELMANN
Architecte



Chapitre

5

Maîtrise esthétique des parements

5.1 - Qualité esthétique des parements

5.2 - Différents types de parements

5.3 - Caractérisation des parements

**5.4 - Facteurs influençant la teinte
des parements**

**5.5 - Facteurs influençant la texture
des parements**

5.6 - Animations de surface

5.1 - Qualité esthétique des parements

Le béton, matériau minéral, composite par nature, moulable à volonté, est la matière des parements. Il s'adapte à tous les projets et répond pleinement à la demande esthétique et aux exigences architecturales contemporaines.

Les multiples compositions des bétons, la sélection des composants et de leur dosage, les dispositions adoptées lors du coffrage ou du moulage, les traitements de surface avant ou après démoulage, la teinte apportée par les constituants créent une palette quasi illimitée d'aspects, de textures et de teintes qui sont mis en valeur et accentués par la lumière. Le béton peut être rugueux, lisse, poli ou brillant. La surface peut comporter des creux, des incrustations et des reliefs ou reproduire toutes sortes de motifs décoratifs.

Lors de la conception et de la réalisation d'un ouvrage de nombreux paramètres doivent être maîtrisés pour obtenir des parements conformes, en terme de teintes et de textures, aux attentes des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre et à la volonté esthétique des architectes.

Un parement en béton est une surface coffrée, généralement visible après achèvement de l'ouvrage. Il doit résister aux diverses agressions auxquelles est soumise la structure pendant sa durée de service et s'intégrer le plus naturellement possible dans son environnement.

L'obtention d'un parement de qualité repose sur l'attention que l'on portera lors de la formulation du béton et lors des différentes étapes de sa mise en œuvre. L'homogénéité de l'aspect est induite par celle des constituants du béton. La régularité des caractéristiques des constituants est de ce fait un point essentiel. La qualité des coffrages, des moules et des produits démoulants, des modes de coulage et de la vibration ainsi que les conditions de maturation participent au résultat final.

La technologie du béton progresse régulièrement sous l'impulsion de nombreux programmes de recherche, avec les Bétons à Hautes Performances, les Bétons Fibrés ou encore les Bétons Autoplaçants qui, par leurs qualités plastiques, permettent une mise en place plus facile. Les évolutions qui en résultent se traduisent par une optimisation continue des performances mécaniques et des possibilités esthétiques des bétons.

En plus de leurs qualités physiques et de leurs performances mécaniques, qui répondent aux exigences constructives, les bétons moulables à volonté offrent une variété infinie d'apparences, une multitude d'aspects, de couleurs et de formes. Ils permettent de traduire et d'exprimer en volumes esthétiques simples ou complexes, les souhaits et la volonté des architectes dans un parfait respect de l'environnement.

Les professionnels disposent d'un matériau qui autorise une variété infinie de possibilités d'aspect qui répond pleinement à la demande esthétique, qui s'adapte à chaque type d'ouvrage, à la nature du chantier, aux caractéristiques de l'élément préfabriqué, aux conditions de mise en œuvre, aux exigences architecturales contemporaines et aux besoins et attentes de utilisateurs. Les méthodes de fabrication actuelles permettent de satisfaire la qualité attendue des parements en terme d'aspects et de performances.



5.2 - Différents types de parements

Le parement en béton peut être :

- brut de décoffrage : dans ce cas, il présente un aspect lisse, uniforme et régulier ou une texture moulée obtenue en utilisant une matrice ;
- traité en surface après décoffrage ou démoulage : le traitement de surface peut être appliqué sur le béton frais ou sur le béton durci.

La qualité esthétique des ouvrages est ainsi enrichie en accentuant à l'infini le grain de la matière, les creux et les reliefs, en modelant la surface et en rendant plus ou moins apparents les différents composants.

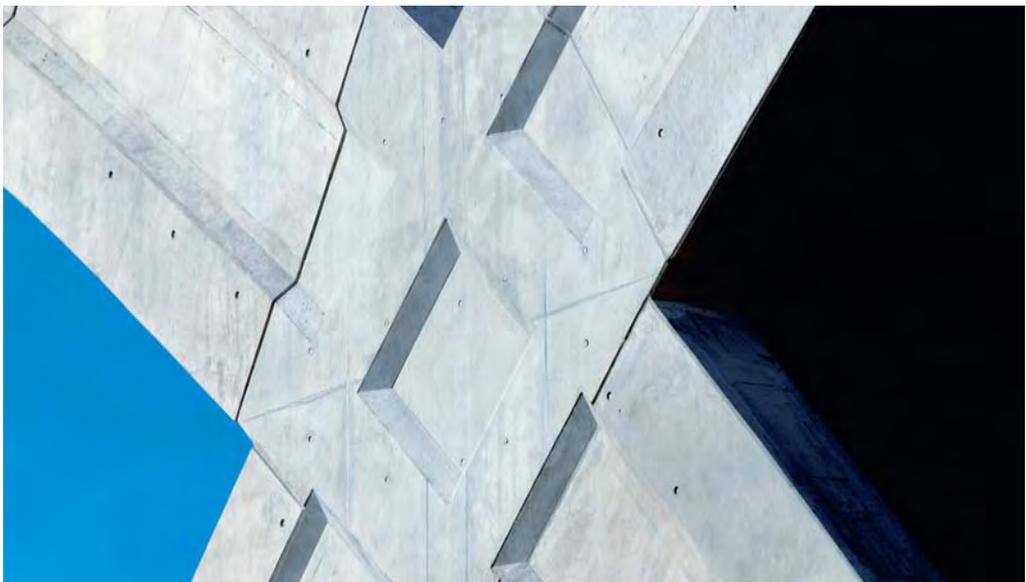
Le fascicule 65. A (chapitre 5 - Parements et autres surfaces coffrées) distingue deux catégories de parements :

- les surfaces qui ne sont soumises qu'à des exigences de précisions **dimensionnelles** (par exemple, les faces internes de caissons d'ouvrages d'art) ;
- les surfaces soumises à des exigences de **qualité d'aspect** (surfaces de béton visibles).

Dans cette catégorie, les parements sont définis selon trois classes correspondant à des degrés de qualité d'état de surface et d'aspect avec des spécifications croissantes.

- ▶ Parements soignés simples ou parements simples laissés bruts de décoffrage et dont l'aspect ne fait l'objet que d'une exigence de régularité.
- ▶ Parements soignés fins ou parements fins faisant l'objet d'exigences concernant la texture, la teinte et les formes géométriques.
- ▶ Parements soignés ou parements ouvragés faisant l'objet d'exigences décoratives.

Le fascicule 65 précise pour ces trois classes de parements, les principales exigences à respecter relatives à la teinte, à la texture et aux tolérances de forme. Il précise aussi les prescriptions à respecter relatives aux coffrages (conception, étanchéité, etc.), aux constituants des bétons et à la démarche d'assurance qualité (procédures, contrôle des spécifications, traitement des non-conformités, etc.).



5.3 - Caractérisation des parements

Le fascicule de documentation P 18 503 caractérise l'aspect de surface d'un parement en béton par 3 critères :

- **Planéité : P**
- **Texture : E**
- **Teinte : T**

Chaque critère est associé à un chiffre qui correspond à un niveau croissant de qualité.

On distingue la planéité d'ensemble et la planéité locale.

La texture est définie par un bullage moyen, un bullage concentré ou des défauts localisés.

La teinte est appréciée sur une échelle de gris comprenant 7 niveaux.

5.3.1 - Aspect de surface et appréciation des parements

L'aspect perçu du parement résulte de l'action de la lumière sur le béton, du type de lumière et de la perception de l'œil de l'observateur.

L'architecte doit donc définir la texture et la teinte du parement en prenant en compte les conditions d'éclairage du parement et les effets qu'il souhaite créer.

L'appréciation d'un parement est délicate. Elle relève à la fois de données subjectives issues du domaine de la perception et de données mesurables et objectives liées à des caractéristiques physiques.

L'aspect de surface est défini selon deux paramètres :

- la texture de la peau du béton, elle est caractérisée par l'état de surface du béton ;
- la teinte, qui dépend de la couleur des différents constituants du béton (granulats, ciments, pigments de coloration, etc.) : elle est caractérisée par une couleur et par les variations de nuance autour de cette couleur.

Le fascicule de documentation P 18-503 permet de qualifier un parement en béton (coulé en place ou préfabriqué) selon sa teinte et son homogénéité en classant les écarts entre différents aspects des surfaces de béton. Il permet de fixer les critères d'acceptation d'un parement selon des niveaux croissants de qualité par rapport à un parement de référence, et donc de contractualiser la teinte moyenne ainsi que la plage de variation acceptable. Les écarts admissibles peuvent être définis entre le maître d'œuvre et l'entreprise à l'occasion de la réalisation d'échantillons de référence.

Les conditions d'observation et les critères de contrôle des parements doivent donc être préalablement définis, en particulier :

- l'âge du béton : le phénomène de maturation du béton entraîne une évolution de sa teinte (généralement le béton s'éclaircit au cours du temps) ;
- les conditions climatiques : la température, la pluie, l'hygrométrie ambiante, la présence du soleil influent sur l'appréciation de l'aspect du parement et sur l'homogénéité de la teinte ;
- la distance d'observation : l'aspect perçu du parement peut varier considérablement en fonction de la distance et de la position d'observation par rapport à l'ouvrage ;
- les conditions d'éclaircissement (type de lumière).

5.3.2 - Teinte des parements



La teinte est apportée par les composants du béton. Chaque constituant, ciment, sables, fines, pigments, granulats de couleurs complémentaires ou opposées, a une influence sur l'aspect final. Gris ou blanc, le ciment, mélangé aux éléments les plus fins du sable, donne au béton brut sa teinte de fond. Celle-ci peut être modifiée par l'ajout de pigments. Dans le cas des bétons traités (bétons désactivés, par exemple), la couleur des plus gros éléments (les granulats) influence aussi la teinte du béton. Les granulats sont mis en valeur par le traitement, qui suivant son intensité, les rend plus ou moins visibles.

Le fascicule de documentation P 18-503 propose une échelle des gris utilisable pour contrôler ou évaluer la régularité de teinte des bétons, en particulier les écarts par rapport à la teinte moyenne. Elle comprend sept niveaux de gris que l'utilisateur peut comparer à la teinte du parement. Chaque niveau de qualité

de la teinte “T” est défini par deux valeurs qui caractérisent les écarts admis sur l'échelle des gris par rapport à la teinte moyenne respectivement entre deux zones adjacentes de teintes différentes et entre deux zones éloignées de teintes extrêmes. Par exemple, le niveau de qualité T (3) correspond à un écart admissible entre deux zones adjacentes d'un degré par rapport à la teinte moyenne et un écart admissible entre deux zones éloignées de deux degrés par rapport à la teinte moyenne.

5.3.3 - Texture des parements

La texture des parements représente l'état physique de la surface, en particulier la rugosité. Elle peut aussi être extrêmement variée.

Le fascicule P 18-503 propose aussi une échelle de degré de bullage qui permet de caractériser la texture d'un parement selon trois critères :

- l'aspect général caractérisé par un bullage moyen réparti sur l'ensemble de la surface considérée ;
- les zones de bullage concentré ;
- les défauts localisés.



Le niveau de qualité de la texture d'épiderme “E” est défini par un chiffre qui caractérise le bullage admissible respectivement sur l'ensemble de la surface examinée (bullage moyen) et en zones concentrées. Le bullage moyen est estimé par une échelle de référence définissant sept niveaux de bullage.

5.4 - Facteurs influençant la teinte des parements

La qualité de la teinte d'un parement ne résulte pas de l'application de recettes simples. Elle repose sur la maîtrise d'un ensemble de paramètres liés à la formulation du béton (régularité des matières premières utilisées, précision des dosages), à sa fabrication et sa mise en œuvre (bétonnage, vibration), aux caractéristiques du coffrage ou du moule et du produit démoulant et aux conditions climatiques et météorologiques (température, humidité) lors de la réalisation de l'ouvrage et les jours suivants.

5.4.1 - Constituants des bétons

La teinte des bétons est apportée par celle de ses constituants, elle peut varier du gris aux couleurs les plus soutenues ou les plus pastel et à l'inverse aller jusqu'au blanc le plus lumineux. En sélectionnant les constituants en conformité avec les normes en vigueur (les sables, les granulats, les ciments gris ou les ciments blancs et les pigments), on obtient une palette quasi illimitée de couleurs : jaune, ocre, rouge, brun, marron, noir, vert, bleu... et de combinaisons de teintes.

La teinte des bétons bruts de démoulage est essentiellement influencée par les constituants les plus fins du béton (ciments, fines du sable, fines correctrices, particules ultrafines, pigments).



Le choix de la teinte du ciment est guidé par le type de parement à réaliser et la teinte finale recherchée.

Le ciment blanc est utilisé pour réaliser les bétons blancs et en général les bétons colorés (en utilisant des pigments de coloration) ou les bétons clairs voire très clairs (en utilisant des granulats de teinte claire, sables naturels de couleur beige, ocre, rose, etc.). Il met en valeur les sables et les granulats utilisés.

Ce sont donc des éléments les plus fins (fines et sables d'un diamètre inférieur à 0,3 mm) qui vont déterminer avec le ciment la teinte de fond des bétons.

La coloration et la teinte générale des bétons peuvent être obtenues en utilisant des pigments naturels ou de synthèse.

Les granulats contribuent aussi à la teinte des parements. Ils sont mis en valeur en fonction du traitement de surface appliqué. La teinte des bétons ayant subi un traitement de surface (béton lavé, béton désactivé, béton bouchardé, béton poli) est liée à la couleur des gravillons et des gros grains de sable.

5.4.2 - Formulation des bétons

La formulation des bétons influe directement sur ses performances mécaniques, mais aussi sur la qualité et la teinte des parements.

La teinte des bétons peut varier en fonction de nombreux paramètres de formulation, en particulier :

- la teneur en eau du béton : plus le rapport E/C est élevé, plus le béton s'éclaircit ;
- le rapport G/S ;
- la teneur en éléments fins (éléments inférieurs à 80 μm), les éléments fins ont une influence importante sur la structure de la peau du béton et donc sur sa teinte ;
- le dosage et la finesse du ciment.

5.4.3 - Fabrication et mise en œuvre des bétons

La teinte des bétons peut varier aussi en fonction de la régularité des constituants, de la fabrication, et de la mise en œuvre ainsi que des conditions climatiques (température, hygrométrie) lors des premières heures suivant le décoffrage.

La vibration du béton a aussi une influence sur sa teinte.

5.4.4 - Conditions de maturation

De nombreux paramètres interviennent sur les conditions de maturation du béton et donc sur sa teinte finale :

- la température du béton ;
- la température extérieure ;
- l'hygrométrie ambiante ;
- la ventilation ;
- l'échéance de décoffrage.

Le décoffrage doit être effectué dans des conditions de maturité constante. Après décoffrage, la surface doit être protégée contre la dessiccation (déshydratation du béton en surface) par un traitement de cure.

5.5 - Facteurs influençant la texture des parements

La texture de la surface des bétons résulte à la fois des reliefs, des moules, des techniques de démoulage, des traitements appliqués sur le béton frais ou sur le béton durci (sablages, grésage, etc.). Elle dépend aussi en grande partie de la composition granulaire du béton (dimensions, proportions, nature et forme des granulats).

5.5.1 - Composition du béton

Plusieurs paramètres liés à la composition du béton peuvent avoir un impact sur sa texture finale :

- la consistance lors de la mise en œuvre ;
- le type d'adjuvants utilisés (plastifiants-réducteur d'eau, superplastifiants, entraîneur d'eau, etc.);
- la sensibilité de la formulation aux variations de dosage des constituants (ces variations ayant une incidence sur la ségrégation et la porosité).

5.5.2 - Coffrages et moules

Une propriété essentielle du béton est son aptitude à épouser la forme dans laquelle on le coule lorsqu'il est à l'état frais. Le béton va ensuite conserver la mémoire du coffrage ou du moule qui l'a généré. Le coffrage va donc déterminer la forme et l'aspect du parement et contribuer à la qualité du béton durci.

Il existe une grande variété de matériaux pour réaliser les coffrages ou les moules : acier, bois massif, bois sablé, raboté, bakelisé, contreplaqué, matière plastique, polystyrène, etc.

Le matériau utilisé, sa texture et la dimension des éléments de coffrage jouent un rôle déterminant sur la qualité et l'aspect des parements.

Les coffrages et les moules doivent être étanches et propres. Ils nécessitent une préparation soignée pour leur positionnement, leur mise à niveau, l'assemblage des divers éléments et leur stabilité. Après nettoyage, le produit démoulant doit être appliquée uniformément sur toute la surface.



La peau du coffrage ou du moule est en contact direct avec le béton, c'est le "négatif" du parement à réaliser, c'est elle qui va lui donner son aspect définitif en lui laissant son empreinte. Le choix de la peau coffrante est donc fonction de l'état de surface que l'on veut obtenir.

5.5.3 - Produits démoulants

La qualité finale du parement dépend aussi des produits démoulants utilisés pour la lubrification des coffrages et des moules, car l'aspect du parement est lié à l'interface béton / coffrage. Le choix d'un produit adapté et la qualité de son application conditionnent, en particulier l'homogénéité de la texture du parement et l'absence de bullage.

Les produits démoulants doivent être choisis en fonction de la nature du coffrage ou du moule utilisé et de leur comptabilité avec les peaux coffrantes. Ils doivent être appliqués de manière homogène sur l'ensemble du coffrage, sur une surface propre, en couche très mince d'épaisseur uniforme avant la mise en place des armatures. Ils sont appliqués à la brosse ou par pulvérisation en film mince.

5.5.4 - Mise en œuvre et vibration des bétons sur chantier

La vitesse de remplissage du coffrage doit être suffisante et constante pour assurer l'homogénéisation entre les couches successives. La hauteur de chute ne doit pas excéder 80 cm à 1 m, afin d'éviter la ségrégation du béton au travers des armatures, et un entraînement d'air occlus en trop forte quantité. Le béton ne doit pas être déversé contre les parois du coffrage.

La vibration du béton a pour but de mettre en mouvement les granulats et la pâte de ciment afin qu'ils trouvent un état d'équilibre en s'imbriquant les uns dans les autres. Elle permet de rendre le béton plus compact et donc de lui conférer ses propriétés physiques et mécaniques. Elle doit être la plus régulière et uniforme possible afin d'éviter tout phénomène de ségrégation. Un changement dans les conditions de vibration peut avoir des répercussions sur la texture. Le type, le nombre d'aiguilles à utiliser, leur diamètre, la fréquence et la durée de vibration doivent être préalablement déterminés en fonction de l'épaisseur de l'élément à réaliser.

5.5.5 - Réalisation des parements préfabriqués en usine

Les progrès de l'industrie de la préfabrication, les outils modernes et les évolutions sur les performances des bétons permettent, depuis plusieurs années, de produire en usine de préfabrication toutes sortes de parements de natures, de formes, de teintes, de textures et de traitements de surface très différents.

Les éléments préfabriqués font l'objet d'une certification Qualif-IB "Éléments architecturaux". Celle-ci s'appuie sur un cahier des charges complet qui constitue le référentiel technique et qui s'applique aux éléments architecturaux en béton destinés au bâtiment et au génie civil. Ce cahier des charges définit une terminologie d'état de surface et fixe des prescriptions communes, les moyens de mesures et d'essais pour les vérifier ainsi que le marquage pour les identifier.

Il propose également une méthodologie pour l'acceptation des parements ainsi qu'une grille pour la définition des exigences applicables aux éléments architecturaux.

5.6 - Animations de surface

5.6.1 - Principaux traitements de surface

L'architecte et le concepteur possèdent une grande liberté de création et d'expression grâce à l'offre des choix, pour animer les parements : formes, teintes et aspects variés, obtenus parmi la grande palette des traitements de surface.

Les traitements de surface ont pour objet d'animer la surface du béton, soit en rendant les granulats apparents, soit en modifiant la texture, soit en créant des reliefs (stries, cannelures, rugosité, etc.).

Les techniques de traitements de surface combinées à la variété des compositions de béton permettent une multitude d'aspects de surface. Celle-ci peut être lisse ou rugueuse, comporter des creux et des reliefs ou reproduire des motifs décoratifs.

On distingue trois principales familles de traitements de surface exécutés sur béton frais ou sur béton durci qui mettent en valeur ses différents composants :

- les traitements de lavage ;
- les traitements mécaniques ;
- l’empreinte du moule ou du coffrage.

Nota

Tous les traitements supposent qu’une épaisseur suffisante de béton soit prévue pour que l’enrobage des armatures soit respecté après traitement.

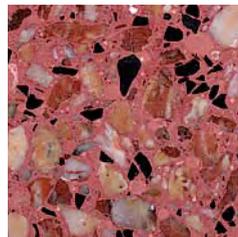
Principaux traitements de surface à l’état frais :

- le lavage ;
- l’impression ;
- le striage ;
- le talochage ;
- le brossage ;
- le photogravage.



Principaux traitements de surface à l’état durci :

- le sablage ;
- le grésage ;
- le polissage ;
- le ponçage ;
- la désactivation ;
- le grenailage ;
- le bouchardage ;
- la métallisation.



5.6.2 - Moules et matrices

Le béton, grâce à son aptitude au moulage et au durcissement à froid, permet de reproduire une multitude de formes, de textures et d'aspects que lui confèrent les moules ou les coffrages et d'animer ainsi les parements de motifs divers.

En effet, la très grande variété de matériaux utilisables pour mouler le béton permet, soit par façonnage de matériaux traditionnels tels que le bois, l'acier... soit par moulage de matériaux élastomères, d'obtenir une multitude d'aspects différents.

Les diverses techniques font appel en particulier pour la réalisation des parements à :

- des **moules à reliefs traditionnels** (bois, acier, polyester, etc.) ;
- des **moules revêtus par des films** (souples et étanches, absorbants, etc.) ;
- des **moules revêtus par des matrices structurées**.

5.6.3 - Calepinages

Les calepinages des parements sont définis en fonction du type de coffrage ou de matrice et de leurs caractéristiques dimensionnelles. La prise en compte de toutes les contraintes de coffrage permet de définir un calepinage des joints qui peut donner du rythme à la surface du parement.

Si le coulage du parement ne peut pas être réalisé en une seule fois, il convient de créer des "accidents" volontaires du parement qui permettent de dissimuler, en des endroits préalablement choisis les reprises de bétonnage ou de concevoir le parement en tenant compte des marques visibles que laisseront les joints.

Pour les parements de grandes dimensions coulés en place, les tiges qui maintiennent l'écartement des deux parois et évitent les risques de déformation, sous la pression du béton lors du coulage, doivent être calepinées afin que les "trous de banches" et les embouts coniques qui subsistent après décoffrage s'intègrent en harmonie avec l'aspect du parement

5.6.4 - Matérialisation des joints

La répartition des joints de reprise de coulage est fonction de la logique constructive de l'ouvrage et des techniques utilisées par l'entreprise.

Les joints sont inévitables et réaliser un parement sans aucune trace de joint est quasiment impossible. Il est donc préférable de concevoir le parement en tenant compte des marques visibles que laisseront les joints et de créer ainsi une surface de qualité homogène avec des marques nettes. Les joints peuvent être dissimulés en les prévoyant dans les zones d'ombre ou, au contraire, accentués par un profilage en retrait.

5.6.5 - Différenciation des traitements de surface

Plusieurs techniques de traitement de surface, offrant des bétons de teintes et de textures différentes peuvent être associées et combinées entre elles sur une même surface ou sur des surfaces adjacentes et créer ainsi une animation de l'ensemble des parements de l'ouvrage.

5.6.6 - Jeux de lumière

La peau du béton révèle les jeux de la lumière sur le parement. La lumière permet de mettre en valeur le rapport des volumes d'un ouvrage par effets de transparence ou d'ombres portées.

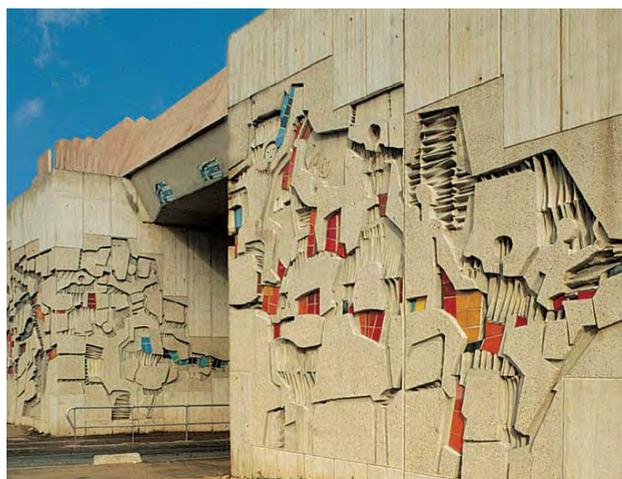
Pour la réalisation de grandes surfaces, l'utilisation de coffrages plus ou moins structurés permet de faire jouer la lumière sur le parement et créer ainsi une animation.



5.6.7 - Incrustations et motifs sculptés

Le béton se prête bien aux incrustations de formes et de tailles diverses.

Pour animer les surfaces des parements, il est possible de créer des reliefs obtenus par incrustation ou incorporation d'éléments décoratifs ou sculptés dans le béton. Ces reliefs créent des jeux d'ombre et de lumière, des dessins, des formes géométriques ou des ponctuations.



Matériaux

- 6.1 - Les ciments**
- 6.2 - Les granulats**
- 6.3 - Les adjuvants**
- 6.4 - Les additions**
- 6.5 - Les produits de cure**
- 6.6 - Les armatures passives**
- 6.7 - Les fibres**
- 6.8 - Les bétons**
- 6.9 - Les Bétons à Hautes Performances**
- 6.10 - Les Bétons Autoplaçants**
- 6.11 - Les Bétons Fibrés
à Ultra Hautes Performances**

Le béton est un mélange de matériaux naturels, du ciment, de granulats, et d'eau, avec ajout éventuel d'adjuvants et de pigments.

En faisant varier la nature et les proportions de ces constituants, ainsi que le type de traitement de surface, il offre la possibilité de s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances, ses caractéristiques et son aspect.

Le mariage du béton avec l'acier, que se soit sous forme d'armatures passives pour le béton armé ou de fils, torons ou câbles dans le domaine de la pré ou de la post-contrainte, permet de réaliser une large gamme d'ouvrages et de relever tous les défis.

6.1- Les Ciments

6.1.1 - Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

6.1.2 - Un peu d'histoire

Les Chinois et les Mayas élevaient des constructions avec des mortiers à base d'une chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau et d'un broyage.

Les Egyptiens utilisaient, en 2600 avant JC, un mélange de chaux, d'argile, de sable et d'eau pour sceller les pierres.

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles.

C'est de là qu'est venu le terme bien connu de "pouzzolanique", qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux. En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexplicée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore en 1817 la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches.

Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née.

Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspdin donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et qui égalait la solidité de la pierre de cette région.

En France, en 1833, Pavin de Lafarge installe des fours à chaux au Teil et la première usine de ciment est créée par Dupont et Demarle à Boulogne sur Mer en 1848.

6.1.3 - La fabrication des ciments courants

Le constituant principal des ciments est le clinker (K), qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne 80 % / 20 %.

Le clinker, finement broyé avec du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland (CEM I). Les autres types de ciment sont obtenus en ajoutant par cobroyage au mélange d'autres constituants tels que les laitiers granulés de haut fourneau (S), les matériaux pouzzolaniques (Z ou Q), les cendres volantes (V ou W), les schistes calcinés (T), le calcaire (L ou LL), les fumées de silice(D).

6.1.4 - Le marquage CE et la norme NF EN 197-1 (ciments courants)

Depuis le 1^{er} avril 2002, tous les ciments commercialisés dans l'union européenne doivent être titulaires du marquage obligatoire CE, exprimant leur conformité à la norme EN 197-1.

En France, la norme de référence est la norme NF EN 197-1 "Ciment - partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants".

Les ciments courants sont subdivisés en 5 types selon la nature et la proportion de leurs constituants :

- CEM I : Ciment Portland
- CEM II : Ciment Portland composé
- CEM III : Ciment de Haut Fourneau
- CEM IV : Ciment pouzzolanique
- CEM V : Ciment composé

La norme NF EN 197-1 concerne les ciments les plus courants.

D'autres normes existent concernant soit des propriétés particulières (prise mer : PM, résistance aux eaux sulfatées : ES, ...) soit des ciments ayant des normes entièrement spécifiques : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel.

En France, les ciments courants bénéficient d'un marquage CE et d'une marque NF qui atteste :

- pour le marquage CE, que les produits respectent les exigences essentielles européennes en matière de santé, sécurité et respect de l'environnement,
- pour la marque NF associée au marquage CE, que les produits bénéficient de garanties complémentaires sur leur composition, leurs performances et leurs contrôles.

6.1.5 - Les différents types de ciments

▶▶ Le ciment Portland : CEM I

Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

▶▶ Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitiers de haut fourneau, fumées de silice (limitées à 10 %), pouzzolanes naturelles, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

Les ciments Portland et Portland composé englobent aussi bien les ciments gris que les ciments blancs.

▶▶ Le ciment de haut fourneau : CEM III/A ou B...

Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker.

... et CEM III/C (ex. ciment de laitier au clinker)

Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.

▶▶ Le ciment au laitier et aux cendres : CEM V/A ou B

Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier.

Tous ces ciments peuvent comporter au plus 5 % de constituants secondaires.

▶▶ Le Ciment pouzzolanique : CEM IV

Peu utilisé en France métropolitaine.

6.1.6 - Les classes de résistance

▶▶ Définition des classes de résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur de la résistance normale du ciment à 28 jours (cf. tableau n°6).

Pour chaque classe de résistance, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm² (1 N/mm² = 1 MPa = 10 daN/cm² = 10 bars).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours est fixée.

Les valeurs indiquées dans le tableau n°6 sont les résistances caractéristiques fixées pour les ciments titulaires du marquage CE complétées par les spécifications supplémentaires de la marque NF.

Tableau n°6 : Résistances caractéristiques des ciments CE+NF				
Désignation de la classe	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 N	-	> 16	> 32,5	< 52,5
32,5 R	> 13,5	-		
42,5 N	> 12,5	-	> 42,5	< 62,5
42,5 R	> 20	-		
52,5 N	> 20	-	> 52,5	-
52,5 R	> 30	-		

6.1.7 - Les autres ciments

D'autres ciments définis par la norme NF EN 197-1, font l'objet de normes spécifiques :

▶ **Ciment Prompt Naturel (CNP) NF P 15-314**

Le ciment prompt naturel, à prise et durcissement rapides, résulte de la cuisson à température modérée, d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivie d'un broyage très fin.

▶ **Ciment Alumineux fondu (CA) NF P 15-315**

Le ciment alumineux fondu est un liant hydraulique qui résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à la fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme au moins 30 % de sa masse d'alumine.

6.1.8 - Les ciments à caractéristiques complémentaires normalisées

Pour certaines classes d'expositions ou certains ouvrages particuliers, des exigences relatives aux caractéristiques des ciments peuvent être requises; Les ciments possédant ces caractéristiques font l'objet de normes spécifiques :

▶▶ Ciments pour travaux à la mer (PM) NF P 15-317

Les ciments n'ont pas tous la même résistance face aux attaques chimiques liées à l'environnement marin ; l'emploi de ciments présentant de bonnes caractéristiques de résistance à ces agressions est donc nécessaire.

Ces ciments comportent la mention PM dans le cartouche de marquage.

▶▶ Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) XP P 15-319

Les eaux séléniteuses constituent un milieu particulièrement agressif, qui nécessite l'emploi de ciments spécifiques.

Ces ciments comportent la mention ES dans le cartouche de marquage.

▶▶ Ciments à faible chaleur d'hydratation initiale et à teneur en sulfures limitée (CP) NF P 15-318

Ces ciments trouvent leurs principales applications dans les ouvrages en grande masse et certains ouvrages en béton précontraint.

Ils comportent la mention CP dans le cartouche de marquage.

6.1.9 - La désignation d'un ciment

Exemple de désignation d'un ciment courant : **CEM II / A - LL 32.5 R CE CP2 NF**

CEM : notation ciment courant

A : classe de composition

LL : nature des constituants

32,5 R : classe de résistance

CE : conformité au marquage CE

CP2 : caractéristiques complémentaires

NF : conformité à la marque NF

6.1.10 - Les ciments conformes à la norme NF EN 197-4

Cette norme définit les spécifications de 3 ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme.

En effet, dans la plupart des utilisations, le critère important de classification du ciment est sa résistance à 28 jours. Pour une classe donnée, la résistance à court terme (2 jours ou 7 jours) peut varier, et certains type de ciments peuvent ne pas atteindre les seuils spécifiés par la norme NF EN 197-1.

Ces ciments appartiennent à un seul type principal de ciments :

CEM III - Ciments de haut fourneau.

Un ciment de haut fourneau à faible résistance à court terme est un liant hydraulique.

Ses réactions et processus d'hydratation sont identiques à ceux des ciments courants (NF EN 197-1), mais le processus d'hydratation est ralenti à court terme du fait de la composition, de la finesse ou de la réactivité des constituants.

Les 3 produits de la famille des ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme sont :

- CEM III / A : avec 35 à 64 % de clinker et 36 à 65 % de laitier de haut fourneau
- CEM III / B : avec 20 à 34 % de clinker et 66 à 80 % de laitier de haut fourneau
- CEM III / C : avec 5 à 19 % de clinker et 81 à 95 % de laitier de haut fourneau

Tous ces ciments contiennent moins de 5 % de constituants secondaires.

Une seule classe de résistance à court terme, indiquée par L, est prévue pour chaque classe de résistance courante.

Tableau n°7 : Résistance caractéristique des ciments à faible résistance à court terme

Désignation de la classe	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 L	-	> 12	> 32,5	< 52,5
42,5 L	-	> 16	> 42,5	< 62,5
52,5 L	> 10	-	> 52,5	-

La norme définit également les ciments à faible résistance à court terme et à faible chaleur d'hydratation : ce sont les liants ci-dessus dont la chaleur d'hydratation mesurée selon la norme EN 196-8 à 7 jours ou selon la norme EN 196-9 à 41 heures est inférieure à 270 J/g. Ils sont désignés par les lettres LH.

6.2 - Les Granulats



6.2.1 - Définitions

Les granulats sont des grains minéraux appelés fillers, sables, graves ou gravillons suivant leurs dimensions.

Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origines alluvionnaires terrestres ou marines, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par recyclage de produits tels que les matériaux de démolition.

Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origines alluvionnaires (granulats roulés ou semi concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

Le granulat est désigné par sa classe granulaire d/D ou O/D avec :

- d : dimension inférieure du granulat
- D : dimension supérieure du granulat

Tableau n°8 : Dimensions et caractéristiques des familles de granulats

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	O/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sables	O/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
Graves	O/D	D ≥ 6,3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
Ballasts	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à 2 t/m³, et légers si elle est inférieure à cette valeur.

6.2.2 - Le rôle des granulats pour bétons

Les granulats constituent le squelette du béton.

Les granulats, qui sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance de la matrice.

La nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulat/pâte de ciment, conditionne les résistances mécaniques du béton.

Le choix d'un granulat est donc un facteur important de la composition du béton.

6.2.3 - Les normes de référence

6.2.3.1 - La norme NF EN 12620 (août 2003) : granulats pour béton

Cette norme définit les termes relatifs aux granulats pour béton relevant de la Directive des Produits de Construction (DPC 89/106/CE). Elle définit des catégories pour chaque caractéristique des granulats et des fillers utilisés dans la fabrication des bétons. Elle concerne en particulier les bétons conformes à la norme NF EN 206-1, les granulats entrant dans la composition des produits préfabriqués en béton et les bétons routiers. Elle spécifie les caractéristiques physiques et chimiques relatives à l'évaluation de la conformité des granulats et au système de maîtrise de la production.

6.2.3.2 - La norme XP P 18-545 (février 2004) : granulats, éléments de définition, conformité et codification

Cette norme définit les règles générales permettant d'effectuer les contrôles des granulats. Elle regroupe en codes les catégories définies dans la norme NF EN 12620 pour les divers usages possibles (granulats pour chaussées, pour béton de ciment, pour mortiers, etc.). Elle définit des critères de régularité et de conformité et les fiches techniques produit.

6.2.4 - Les caractéristiques des granulats

6.2.4.1 - Caractéristiques géométriques

▶ Granularité

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans les granulats.

Les granulats sont désignés en terme de classe granulaire O/D ou d/D.

Les classes granulaires sont spécifiées en utilisant des séries de dimensions de tamis (en mm).

Série de base : 1 / 2 / 4 / 8 / 16 / 31.5 / 63

Série de base + série 1 : 1 / 2 / 4 / 5.6 / 8 / 11.2 / 16 / 22.4 / 31.5 / 45 / 63

Série de base + série 2 : 1 / 2 / 4 / 6.3 / 8 / 10 / 12.5 / 14 / 16 / 20 / 31.5 / 40 / 63

▶ Forme des gravillons

- Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat.
- Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur.

6.2.4.2 - Autres caractéristiques principales

▶ Propreté des granulats

Dans le cas des gravillons, la propreté est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0.5 mm

Dans le cas des sables, la propreté est fournie, soit par l'essai d'équivalent de sable, soit par la valeur au bleu de méthylène.

▶ Résistance à l'usure

Elle est déterminée par l'essai Micro Deval en présence d'eau (MDE)

▶ Résistance à la fragmentation

Elle est déterminée par le coefficient Los Angeles (LA)

▶ Résistance au polissage

Surtout utilisé pour les agrégats employés en couche de chaussée, elle est déterminée par le Coefficient de Polissage Accéléré (CPA).

▶▶ **Réactivité aux alcalis**

Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR) ou potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP).

▶▶ **Résistance au gel / dégel**

▶▶ **Teneur en soufre et sulfates**

▶▶ **Teneur en ions chlorures**

6.2.5 - Le marquage CE des granulats

Le marquage CE des granulats est obligatoire pour leur mise sur le marché.

Par le marquage CE, le producteur de granulats déclare avoir mis en place un système de maîtrise de la production, lui permettant de respecter la norme NF EN 12620.

Le système d'attestation de conformité recommandé par l'UNPG (Union Nationale des Producteurs de Granulats) est de niveau 2+. La déclaration du producteur s'appuie sur un audit réalisé par un organisme notifié.

6.3 - Les Adjuvants

6.3.1 - Définition

Un adjuvant, selon la norme NF EN 934-2, est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de telle ou telle de leurs propriétés, à l'état frais ou durci.

Nota

Sont donc exclus du domaine des adjuvants au sens de la norme, les produits ajoutés au moment du broyage du clinker ou les produits dont le dosage dépasserait 5 % du ciment (poudres pouzzolaniques par exemple).

6.3.2 - Un peu d'histoire

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland, commencent les recherches sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer certaines de ses propriétés.

On cherche à agir sur les temps de prise, les caractéristiques mécaniques et de mise en œuvre, l'étanchéité.

Dès 1881, Candlot étudie l'action des accélérateurs et des retardateurs de prise. Le sucre est déjà connu comme retardateur de prise et souvent employé à partir de 1909.

Entre 1910 et 1920 débute la commercialisation d'hydrofuges et d'accélérateurs à base de chlorure de calcium.

A partir de 1930, les entraîneurs d'air sont fréquemment utilisés.

6.3.3 - La classification

La norme NF EN 934-2 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale.

On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

- ▶▶ ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton : plastifiants-réducteurs d'eau, superplastifiants (anciennement fluidifiants) ;
- ▶▶ ceux qui modifient la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise ;
- ▶▶ ceux qui modifient certaines propriétés particulières : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse.

Nota

Il faut y ajouter les produits de cure, qui ne sont pas à proprement parler des adjuvants et dont la fonction est de protéger le béton de la dessiccation durant son durcissement.

6.3.3.1 - Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité.

La frontière entre les différents types d'adjuvants de cette famille n'est pas toujours très nette, les effets recherchés sont très proches et les différences obtenues sont souvent une question de nuances liées aux dosages préconisés.

▶ Les plastifiants réducteurs d'eau (NF EN 934-2)

Ces adjuvants ont pour fonction principale, à même ouvrabilité, de conduire à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau d'un béton, d'un mortier ou d'un coulis.

Ils sont à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélamine sulfonate, de naphthalène sulfonate et dérivés de mélamine ou naphthalène.

Ces adjuvants peuvent également avoir une caractéristique complémentaire de retardateur.

▶ Les superplastifiants (NF EN 934-2)

Introduits dans un béton, un mortier ou un coulis, en général peu avant sa mise en œuvre, ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange.

Ce sont en général des produits de synthèse organique. Les plus utilisés sont les dérivés de mélamines ou de naphthalène. Ils peuvent être aussi fabriqués à partir de sous-produits de l'industrie du bois purifiés et traités (lignosulfonates).

Ces adjuvants peuvent également avoir une caractéristique complémentaire de retardateur.

6.3.3.2 - Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement

Ces adjuvants modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution.

Physiquement, cette action se traduit par l'évolution du seuil de cisaillement dans le temps, en fonction de l'adjuvant utilisé.

▶▶ **Les accélérateurs de prise et de durcissement (NF EN 934-2)**

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, les mortiers ou les coulis. L'accélérateur du durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, les mortiers ou les coulis. Ces adjuvants ne contiennent pas de chlore ; les constituants sont généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque. Les accélérateurs chlorés ne sont pas soumis à la marque NF adjuvants.

▶▶ **Les retardateurs de prise (NF EN 934-2)**

Introduits dans l'eau de gâchage, ils ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise et le temps de fin de prise du ciment dans le béton, le mortier ou le coulis. Ils sont à la base de lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb.

6.3.3.3 - Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

▶▶ **Les entraîneurs d'air (NF EN 934-2)**

Ils ont pour fonction d'entraîner la formation dans le béton, le mortier ou le coulis, de microbulles d'air uniformément réparties dans la masse.

Les entraîneurs d'air sont des corps tensio-actifs : lignosulfonates, abiétates de résines, sels d'éthanolamine, que l'on mélange en fonction des propriétés à obtenir.

L'entraîneur d'air permet d'augmenter la résistance au gel du béton durci, en effet, les microbulles qui coupent les réseaux des capillaires limitent le développement des contraintes dues au gel de l'eau interstitielle.

▶▶ **Les hydrofuges de masse (NF EN 934-2)**

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer l'absorption capillaire des bétons, mortiers ou coulis durcis.

Les hydrofuges sont généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés (stéarates). Ils peuvent également comporter des matières fines (type bentonite) ainsi que des agents fluidifiants.

6.4 - Les Additions

6.4.1 - Les pigments

Norme NF EN 12878

La coloration du béton dans la masse est obtenue avec des pigments, de préférence minéraux, plus stables que les pigments de synthèse. La combinaison des teintes avec les granulats et les ciments nécessite des essais préalables permettant de choisir le colorant approprié et son dosage (généralement compris entre 1 et 3 % du poids de ciment).

6.4.2 - Les fillers

Les fillers sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles. Ils peuvent être d'origine siliceuses (norme NF P 18-501) ou calcaire (norme NF P 18-508).

6.4.3 - Les fumées de silice

Norme NF P 18-502 / PR EN 13263-1

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ $1 \mu\text{m}$) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium.

6.4.4 - Les cendres volantes

Norme NF EN 450 / NF P 18-050

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé.

6.5 - Les produits de cure

Les produits de cure (norme NF P 18-370) ont pour effet de protéger le béton frais pendant un certain temps après sa mise en œuvre, en évitant sa dessiccation par évaporation trop rapide de l'eau. Celle-ci entraînerait en particulier une baisse des résistances mécaniques et la formation de fissures de retrait avant prise.

Ces produits sont à base de résines, cires ou paraffines en émulsion aqueuse, de résines naturelles ou synthétiques, de cires ou de paraffines dissoutes dans un solvant pétrolier, de caoutchouc chloré.

Les produits de cure sont des produits que l'on peut pulvériser sur le béton frais. Il se forme après application un film continu imperméable qu'il faudra par la suite éliminer par brossage si un revêtement doit être appliqué sur le béton.

6.6 - Les armatures passives

6.6.1 - Les différents types d'armatures

Les armatures sont obtenues à partir d'acier suite à des opérations de dressage (pour les couronnes uniquement), de coupe, de façonnage et d'assemblage.

On distingue deux principaux types d'acier selon sa composition chimique :

- l'acier au carbone,
- l'acier inox.

Les aciers se présentent sous formes de barres de grande longueur (souvent 12 m) ou de fils en couronnes :

- barres droites lisses : diamètre 5 à 50 mm,
- barres droites à haute adhérence : diamètre 6 à 50 mm,
- fils lisses en couronne : diamètre 3 à 16 mm,
- fils à haute adhérence en couronne : diamètre 4 à 16 mm.

Les armatures sont utilisées sur les chantiers et mises en place dans les coffrages :

- soit sous forme de barres (droites ou coupées - façonnées en fonction des formes prévues sur les plans d'exécution),

- soit sous forme de treillis soudés (réseaux plans à maille, en générale rectangulaire, constitués de fils ou de barres assemblées par soudage) fabriqués en usine et livrés en panneaux sur les chantiers,
- soit sous forme d'armatures pré-assemblées en cages en usine (et livrées prêtes à mettre en place dans le coffrage).

Les armatures sont soit d'un modèle standard pour les applications courantes (semelles de fondations, poteaux, linteaux...), soit façonnées à la demande (en conformité avec les plans d'exécution définis par les bureaux d'études).

On distingue donc les armatures "coupées-façonnées" qui sont obtenues par coupe et façonnage des aciers, et les "armatures assemblées" constituées par assemblage des armatures coupées-façonnées sous forme de "cages" ou "de panneaux".

6.6.2 - Les références normatives

La norme de référence des aciers pour l'armature du béton est la norme NF EN 10080 (Aciers pour l'armature du béton. Acier soudable pour béton armé. Généralités).

Cette norme est le support pour le marquage CE des aciers pour béton armé qu'ils soient lisses, à empreintes ou à verrous. Elle concerne les aciers soudables pour béton armé sous forme de barres, couronnes, produits déroulés, treillis soudés et treillis raidisseurs. Elle ne contient pas de niveau de performance des produits et doit être utilisée en liaison avec une "spécification de produit". Cette spécification peut être d'origine européenne (TS 10081, Annexe C de l'Eurocode 2, NF EN 1992-1-1 ou Annexe N de la norme NF EN 13369), ou d'origine nationale (NF A 35-015, NF A 35-016, NF A 35-019 ou NF A 35-024), ou encore être propre à un producteur ou un utilisateur.

La norme de référence pour les armatures du béton est la norme NF A 35-027 (Produits en acier pour le béton armé. Armatures).

Les prescriptions de cette norme concernent l'ensemble des caractéristiques des armatures. Elles ne s'appliquent qu'en l'absence de spécifications différentes mentionnées sur les plans ou dans les pièces écrites visant les armatures.

6.6.3 - La désignation des armatures

Les armatures sont définies par leurs caractéristiques de formes, géométriques, mécaniques et technologiques.

Les spécifications concernant les armatures sont détaillées dans les normes NF A 35-015 (barres lisses), NF A 35-016 (barres à haute adhérence), NF A 35-022 (treillis soudés) et NF A 35-014 (armatures inox).

Les aciers sont désignés par leur limite d'élasticité garantie f_e en MPa, leur nuance et leur forme (lisse, haute adhérence).

Par exemple, un acier HA FeE500 désigne un acier à haute adhérence (HA) présentant une limite élastique de 500 MPa.

Actuellement en France, on utilise généralement des aciers de 500 MPa de limite d'élasticité. L'Eurocode 2 Partie 1-1 prévoit, au paragraphe 3.2.2.3, une plage de limite d'élasticité comprise entre 400 et 600 MPa.

6.6.4 - Les caractéristiques certifiées des aciers

Les prescriptions relatives aux aciers se traduisent dans les normes par les caractéristiques spécifiées suivantes :

- soudabilité et composition chimique,
- caractéristiques mécaniques en traction,
- diamètres, sections, masse linéique,
- adhérence et géométrie de la surface (verrous ou empreintes),
- non fragilité (aptitude au pliage),
- dimensions et résistances au cisaillement des assemblages soudés des treillis,
- résistance à la fatigue,
- aptitude au redressage après pliage.

6.6.5 - Les caractéristiques de forme

Il existe 2 types d'armatures en fonction de leur forme et de leur surface :

- **Les armatures lisses** : barres lisses ou fils tréfiles lisses.

Elles sont de section circulaire sans aucune gravure.

- **Les armatures à haute adhérence** dont la surface présente des saillies ou des creux.

La surface de ces armatures présente des aspérités en saillies inclinées par rapport à l'axe de la barre appelée verrous ou des aspérités en creux appelées empreintes qui sont destinées à favoriser l'adhérence des armatures au sein du béton.

- **Les armatures à verrous**

La figure n°33 représente les armatures à verrous.

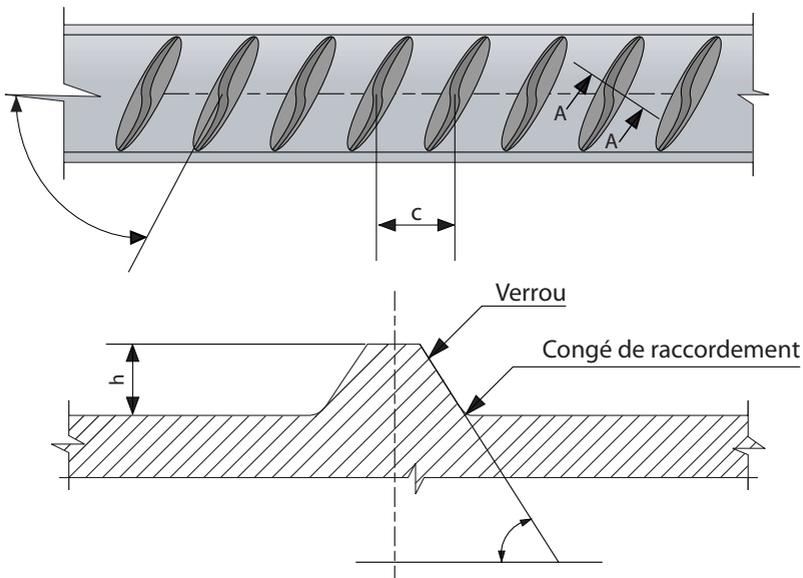


Figure n°33 : Schémas des armatures à verrous

- **Les armatures à empreintes**

La figure n°34 représente les armatures à empreintes.

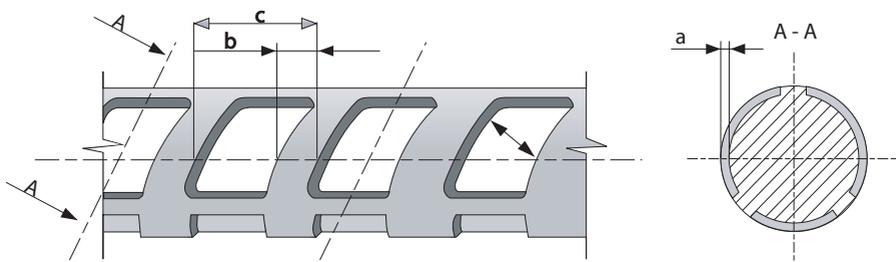


Figure n°34 : Schéma des armatures à empreintes

6.6.6 - Les caractéristiques géométriques

Le diamètre nominal d'une barre ou d'un fil correspond au diamètre d'un cylindre de révolution de même métal ayant la même masse linéique. C'est le diamètre nominal qui est pris en compte pour le dimensionnement.

les diamètres prévus par la norme EN 10080 sont donnés dans le tableau ci-dessous.

En France, on se limite en pratique aux diamètres 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14 et 16 pour les couronnes et 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 32 et 40 pour les barres.

Tableau n°9 : Diamètres des armatures selon la norme EN 10080

Diamètre nominal en mm	Barres	Couronnes et produits déroulés	Treillis soudés	Section nominale en mm ²	Masse linéique nominale en kg/m
4	-	x	-	12,6	0,999
4,5	-	x	-	15,9	0,125
5	-	x	x	19,6	0,154
5,5	-	x	x	23,8	0,187
6	x	x	x	28,3	0,222
6,5	-	x	x	33,2	0,260
7	-	x	x	38,5	0,302
7,5	-	x	x	44,2	0,347
8	x	x	x	50,3	0,395
8,5	-	x	x	56,7	0,445
9	-	x	x	63,6	0,499
9,5	-	x	x	70,9	0,556
10	x	x	x	78,5	0,617
11	-	x	x	95	0,746
12	x	x	x	113	0,888
14	x	x	x	154	1,21
16	x	x	x	201	1,58
20	x	-	-	314	2,47
25	x	-	-	491	3,85
28	x	-	-	616	4,83
32	x	-	-	804	6,31
40	x	-	-	1257	9,86
50	x	-	-	1963	15,40

6.7 - Les fibres

6.7.1 - La classification des fibres

Les fibres utilisées dans la fabrication des bétons peuvent être classées en trois grandes familles:

- Fibres minérales : verre, carbone.
- Fibres métalliques : acier, inox, fonte.
- Fibres organiques : polyamides, polypropylène, acryliques, kevlar, aramide.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur...), formes (fils lisses, crantés, ondulés...), résistance à la traction ce qui engendre des comportements mécaniques différents.

6.7.2 - Le rôle des fibres

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures.

Selon les caractéristiques présentées par les fibres, la rupture du béton évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile.

Selon les fibres utilisées (forme et nature), leur dosage et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- la cohésion du béton frais,
- la déformabilité avant rupture,
- la ductilité et la résistance post fissuration,
- la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, à l'abrasion,
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges,
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des fissures et des microfissures,
- la tenue au feu,
- la résistance à la traction par flexion.

6.8 - Les Bétons

6.8.1 - L'ouvrabilité du béton

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés.

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages ou les moules et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : nature et dosage en ciment, forme et dimensions des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau puisse être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité.

Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances et par un phénomène de ressuage, qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation.

Les autres conséquences sont :

- une porosité accrue,
- un risque de ségrégation des constituants du béton,
- un retrait augmenté,
- un état de surface défectueux avec présence de bullage.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité, d'hydratation du ciment et de respect des spécifications liées à la classe d'exposition à laquelle est soumis l'ouvrage.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur le chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou "slump test", qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique (norme d'essai NF EN 12350-2).

L'ouvrabilité d'un béton est sa capacité à maintenir, durant un temps déterminé, une fluidité compatible avec les caractéristiques du coffrage ou du moule et les moyens de mise en place prévus. L'emploi d'adjuvant, dit de nouvelle génération permet d'apporter un meilleur maintien de l'ouvrabilité des bétons en général et plus particulièrement pour les bétons autoplaçants.

L'essai d'affaissement est couramment pratiqué en France.

Nota

Cet essai consiste à mouler des troncs de cône en béton (base de diamètre 20 cm, partie haute de diamètre 10 cm). On remplit le cône en 3 couches piquées chacune de 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre. Le moule est ensuite soulevé avec délicatesse et l'on mesure aussitôt après l'affaissement (ou Slump).

La norme NF EN 206-1 définit les classes de consistance en fonction de l'affaissement obtenu avec l'essai au cône d'Abrams :

Tableau n°10 : Classe de consistance	
Classe de consistance	Affaissement en mm
S1	10 à 40
S2	50 à 90
S3	100 à 150
S4	160 à 210
S5	≥ 220

6.8.2 - Le retrait

Au cours de son évolution, le béton est l'objet de modifications physico-chimiques qui entraînent des variations dimensionnelles.

Le retrait hydraulique avant et après durcissement

Il est dû à un départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage, soit par évaporation, soit par absorption. Une surface de béton frais peut évaporer plus d'un litre d'eau par m³ et par heure.

Le retrait thermique

Il est dû à des baisses rapides de température provenant :

- soit de l'hydratation du ciment aux premiers âges, qui provoque une élévation de température, suivie d'un refroidissement du béton,
- soit des variations climatiques du milieu.

Ces deux causes additionnent parfois leurs effets. Les effets de la première peuvent être limités en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation.

Le retrait hydraulique à long terme

Il est dû à un départ lent de l'eau en atmosphère sèche. Il varie suivant les ciments (nature, finesse) et est proportionnel au dosage en volume absolu de la pâte pure.

L'ordre de grandeur du retrait total est de 200 à 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour un béton usuel (soit de 2 à 4 mm pour 10 m).

Le retrait peut être limité par une bonne compacité du béton ou par un traitement de cure adapté.

6.8.3 - Les déformations sous charge instantanée

Comme tous les autres matériaux, le béton se déforme, avec un comportement élastique linéaire pour des charges modérées de courte durée. Ses déformations sont réversibles et proportionnelles aux charges appliquées.

Le module d'élasticité instantané E_i d'un béton est compris entre 30 000 et 35 000 MPa.

6.8.4 - Les déformations sous charge de longue durée : le fluage

Le fluage est une déformation lente que subit un matériau soumis à une charge constante et permanente. Au-delà d'une certaine charge (approximativement la moitié de la résistance ultime à la compression), le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente.

On admet que cette déformation due au fluage, qui se poursuit durant de nombreux mois (voire années), est de l'ordre de trois fois la déformation instantanée. Le fluage doit être pris en compte dans le dimensionnement.

6.8.5 - La résistance mécanique

La résistance mécanique du béton est caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours.

Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier du type et du dosage en ciment, de la porosité du béton et du rapport E/C (rapport du dosage en eau au dosage en ciment).

Parmi les formules qui permettent de prévoir

les résistances, celle de Féret est la plus connue : $R = k \left(\frac{C}{C + E + V} \right)^2$

R = résistance,

k = coefficient dépendant de la classe de ciment,
du type de granulats et du mode de mise en œuvre,

C = dosage en ciment,

E = dosage en eau,

V = volume d'air subsistant.

Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et de l'air, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance.

Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs.

6.9 - Les Bétons à Hautes Performances

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre,
- un rapport Eau efficace / liant équivalent inférieur à 0,4.

Ces bétons possèdent de multiples performances :

- des propriétés exceptionnelles à l'état frais,
- des performances aux jeunes âges,
- des résistances mécaniques importantes à long terme.

Mais les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité.

Ils sont également plus résistants aux agents agressifs, aux phénomènes de gel-dégel et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Les BHP permettent l'optimisation des structures, la réduction des frais d'entretien et de maintenance, la pérennité architecturale des ouvrages et l'augmentation de leur durabilité.

Ils offrent aussi des résistances précoces élevées au béton, ce qui permet d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier.

6.9.1 - La formulation et les constituants

6.9.1.1 - La formulation

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. On cherchera donc à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

- une très faible teneur en eau,
- une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

1^{ère} voie : Défloculation des grains de ciments

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment). Les rapports E/C utilisés sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme.

2^e voie : Optimisation du squelette granulaire

Les performances des BHP peuvent encore être optimisées par l'extension du spectre du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultra fines. Les ultrafines les plus utilisées dans ce cas sont les fumées de silice. Les fumées

de silice ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les microvides intergranulaires, mais présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique.

Chaque classe granulaire est également adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats).

La première voie peut être utilisée seule et permet déjà des gains de propriété importants (en terme de résistance mécanique, on peut ainsi atteindre des bétons de type C60/75). La seconde voie implique obligatoirement le recours simultané à l'emploi de superplastifiants. Elle permet d'obtenir de nouveaux gains de performances.

6.9.1.2 - Les spécifications sur les constituants

- ciments : types CEM I ou CEM II ou CEM III, classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 selon la norme NF EN 197-1
- granulats : conformes à la norme NF EN 12620 : granulats pour bétons
- additions : cendres volantes silico-alumineuses, laitiers de haut fourneau, additions calcaires, additions siliceuses, éventuellement ultrafines (fumées de silice : dosage 8 à 10 % du poids du ciment)
- adjuvants : plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

6.9.2 - Les propriétés des BHP

Le béton frais présente une grande ouvrabilité liée aux superplastifiants entrant dans sa composition. Cette caractéristique améliore l'aptitude au pompage et le maintien de la plasticité du béton frais.

Les BHP sont des bétons fluides avec un E/C très bas (0,30 à 0,35). Les valeurs d'affaissement au cône sont supérieures à 150 mm dans la plupart des cas.

Pour le béton durci, la propriété fondamentale dont découle la plupart des autres, est sa faible porosité. Un béton courant présente une porosité de 12 à 16 % ; pour un BHP, elle est inférieure à 10 % voire 5 %.

La durabilité est améliorée du fait de l'abaissement de la porosité et de la perméabilité. On constate, en particulier, une amélioration de la résistance aux agressions chimiques, qui se traduit par un comportement favorable en milieu marin ou en présence d'eaux agressives. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures. Les BHP présentent généralement une résistance au cycle de gel/dégel améliorée. L'ensemble des résistances mécaniques (compression, traction) est augmenté, alors que les déformations sous charges instantanées et surtout sous charges permanentes sont diminuées.

Nota

L'ouvrage de synthèse du Projet National BHP 2000 fournit de nombreuses données détaillées sur les caractéristiques et les propriétés des BHP.

6.10 - Les Bétons Autoplaçants



Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, homogènes et dont la consistance mesurée par l'essai d'étalement au cône d'Abrams est compris généralement entre 600 et 750 mm, ce qui permet de les mettre en œuvre sans vibration.

Ils présentent des résistances et des durabilités analogues voire supérieures à celles des bétons traditionnels. Les diverses études menées ces dernières années ont confirmé leur compacité et leur faible perméabilité. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Toutes la gamme de résistance des bétons traditionnels aux bétons à hautes performances peut être obtenue avec des BAP.

6.10.1 - La formulation des BAP

L'objectif de la formulation du BAP est d'obtenir un produit qui :

- est très fluide et pompable,
- ne ségrège pas,
- est cohésif,
- maintient la rhéologie durant une heure et demie,
- contribue à l'obtention de parements de qualité.

Le principe de formulation des BAP consiste à s'affranchir des risques de ségrégation en optimisant la structure granulaire (sable et gravillon) du béton. Pour se faire, on favorise les courbes granulométriques continues et on diminuera le diamètre maximal des granulats.

La thixotropie du matériau permet de combattre la ségrégation

6.10.2 - Le contrôle des BAP

Plusieurs essais ont été développés pour contrôler les bétons autoplaçants :

- essai d'étalement au cône d'Abrams,
- essai de stabilité au tamis de 5 mm,
- essai de mobilité en milieu confiné (boîte en L).

6.10.3 - Le dimensionnement des ouvrages

Les bétons autoplaçants sont dimensionnés conformément aux règles de calcul classiques (BAEL et EUROCODE 2).

6.10.4 - La mise en œuvre des bétons autoplaçants sur chantier

La mise en œuvre des bétons autoplaçants nécessite d'adapter le matériel de transport et la mise en œuvre:

- "chaussette" de Ø 80 à 100 mm sous les bennes au lieu de Ø 150 à 200 mm,
- poussage du béton par le bas des coffrages,
- fabrication : nécessité de malaxer les BAP plus longtemps que les bétons traditionnels,
- transport : limiter la charge de béton dans les camion-toupies,
- forme de pente : limiter la pente à 2 %.

L'étanchéité du coffrage et des réservations est fondamentale, notamment en pied de banche. Il conviendra d'être particulièrement attentif sur la fixation des mannequins et autres réservations et surtout sur la poussée exercée par le béton sur les coffrages. Un soin particulier devra être apporté sur le dimensionnement et le lestage de ceux-ci.

Une expérience grandeur nature a été réalisée en 1999 sur des coffrages de grande hauteur ($H = 12$ m) pour mesurer la poussée réelle du BAP.

6.11 - Les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances

Les bétons fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP) sont des matériaux à matrice cimentaire renforcés par des fibres présentant des performances exceptionnelles.

Leurs formulations font appel à des adjuvants superplastifiants spécifiques, des granulats spécifiques, des particules ultra fines et des fibres (fibres métalliques ou fibres organiques).

La présence de fibres et les performances en traction permettent dans de nombreuses applications de ne pas avoir besoin d'armatures passives.

Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :

- très grande ouvrabilité,
- résistances mécaniques en compression très élevées : 150 à 200 MPa,
- très grande durabilité ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs,
- ductilité importante qui autorise une grande déformation avant rupture.

6.11.1 - Les principes de formulation des BFUP

L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs est obtenue par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur deux paramètres.

- Une teneur en eau extrêmement faible (rapport Eau/Ciment < 0,25) grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui déflocculent les particules fines et permettent un meilleur empilement granulaire. D'une part, la quantité d'eau nécessaire au remplissage des vides s'en trouve réduite, et d'autre part, la surface spécifique des grains, donc, à terme, leur hydratation, est accrue.
- Une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulométriques.

Les ultra fines utilisées dans les BFUP sont généralement des fumées de silice qui se présentent sous forme de billes submicrométriques qui remplissent les espaces intergranulaires, et qui réagissent avec la chaux issue de l'hydratation du ciment. Elles participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz.

La taille et la quantité des plus gros grains des BFUP sont considérablement réduites. Le squelette granulaire y gagne en souplesse, ce qui réduit considérablement les effets de microfissuration liés au retrait.

Les fibres, composant clé des BFUP confèrent au matériau sa ductilité. Ces fibres, en acier à très haute résistance (> 2 000 MPa), ou organiques, ont une longueur adaptée à la taille du plus gros grain et une section la plus faible possible pour garantir un bon ancrage.

6.11.2 - La fabrication des BFUP

La préfabrication en usine est particulièrement adaptée à l'utilisation de ces matériaux.

6.11.3 - Les caractéristiques mécaniques

Le tableau ci-dessous résume les résistances comparées obtenues sur BFUP avec et sans traitement thermique.

Tableau n°11 : Caractéristiques mécaniques des BFUP		
Caractéristiques (MPa)	A 28 jours sans traitement thermique	A 3 jours après traitement thermique
Résistance à la compression	180	220
Résistance à la flexion 3 points	36	40
Résistance à la traction directe	8	10
Module d'élasticité	60 000	55 000

6.11.4 - La durabilité des BFUP

Du fait de leur microstructure extrêmement dense, les BFUP présentent des propriétés de durabilité exceptionnelles, notamment dans les domaines suivants : résistance au gel-dégel, résistance aux sels de déverglaçage, résistance à la carbonatation, résistance à la pénétration d'ions agressifs (chlorures, sulfates, acides faibles), résistance à l'abrasion.

6.11.5 - Les domaines d'applications potentiels des BFUP

Les nombreuses qualités des BFUP permettent d'envisager leur utilisation dans des applications jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux.

- **Valorisation de la résistance des BFUP**

Le comportement mécanique du matériau permet de concevoir des ouvrages d'art particulièrement élancés et légers, notamment avec des concepts innovants tels que des structures en treillis.

- **Valorisation de la durabilité des BFUP**

Les BFUP peuvent être utilisés dans des environnements particulièrement agressifs, alliant de fortes variations de température et d'humidité aux divers agents agressifs tels que des ions chlorures ou acides faibles.

- **Valorisation des qualités esthétiques des BFUP**

La gamme des BFUP fluides permet d'obtenir des parements lisses, homogènes et très réguliers. L'utilisation de fibres organiques et de pigments minéraux permet en outre d'utiliser une large plage de teintes pour la réalisation de parements esthétiques.

- **Valorisation de la liberté de forme des BFUP**

L'absence d'armatures passives et les résistances élevées du matériau permettent de créer une grande variété de formes fines et complexes pour la construction de structures, de coques et même de sculptures.

Recommandations pour la durabilité des bétons

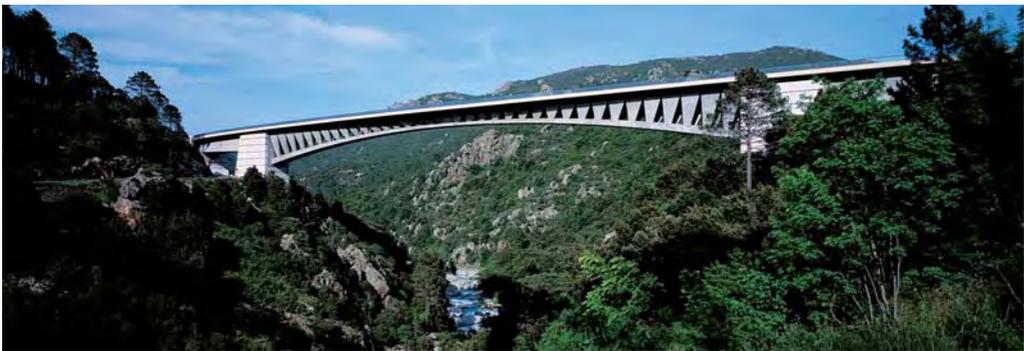
- 7.1 - Notion de durabilité des bétons et de durée de service des ouvrages**
- 7.2 - Contexte normatif**
- 7.3 - Durabilité des bétons vis-à-vis des eaux agressives**
- 7.4 - Durabilité des bétons soumis au gel et aux sels de déverglaçage**
- 7.5 - Prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction**
- 7.6 - Prévention contre les phénomènes de gonflement interne sulfatique**
- 7.7 - Durabilité des bétons en site maritime**

7.1 - Notion de durabilité des bétons et de durée de service des ouvrages

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (mise en service d'une maintenance préventive).

Un ouvrage doit résister aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire les besoins des utilisateurs au cours du temps.

La durabilité du maintien de ses fonctions doit être assortie d'une durée, temps minimal pour lequel l'ouvrage est conçu qui est appelé la DURÉE DE SERVICE DE L'OUVRAGE.



Prescrire un béton durable nécessite d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales et les agressions potentielles qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage (à chaque classe d'exposition correspondant des performances mécaniques minimales pour le béton) et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée de service souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

La norme NF EN 206-1 et les normes relatives aux produits préfabriqués en béton intègrent une nouvelle approche dite "performancielle". Cette logique de progrès vise l'optimisation des performances et la durabilité des bétons, en mettant à disposition du prescripteur une définition d'un ensemble de classes d'exposition pour prendre en compte l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage ainsi que les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service.

7.2 - Contexte normatif

La résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée de service prévue de la structure est conditionnée notamment par le respect de spécifications sur le béton.

Ces spécifications sont définies dans les principales normes de référence suivantes :

- la norme NF EN 206-1 et son annexe nationale qui s'appliquent aux bétons de bâtiments et de structure de génie civil, qu'ils soient réalisés par un producteur de béton prêt à l'emploi ou un utilisateur de béton sur chantier ;
- les normes pour les produits préfabriqués en béton.

7.2.1 - Norme NF EN 206-1

La norme NF EN 206-1 (béton partie 1 : spécifications, performances, production et conformité) et son annexe nationale* définit en plus des spécifications relatives au béton, les responsabilités du prescripteur (responsable de la spécification du béton) et du producteur (responsable de la conformité et du contrôle de la production).

* L'Annexe Nationale (NA) spécifie les dispositions complémentaires à la norme NF EN 206-1 à respecter en France.

7.2.1.1 - Classe d'exposition des bétons

La prise en compte de l'environnement dans lequel va être situé l'ouvrage et les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service, va permettre d'optimiser les performances du béton et sa durabilité. Pour ce faire, on définit des classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons sont soumis.

Les conditions d'environnement sont regroupées dans la norme NF EN 206-1 en 6 classes d'exposition, décomposées en sous-classes. Ces dernières prennent notamment en compte l'humidité relative du milieu et les éventuels cycles d'humidification / séchage. A chacune des classes correspondent des spécifications sur la composition des bétons.

- Classe XO : aucun risque de corrosion ou d'attaque ;
- Classe XC : corrosion induite par carbonatation ;
- Classe XD : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine ;
- Classe XS : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer ;
- Classe XF : attaque gel / dégel avec ou sans agent de déverglaçage ;
- Classe XA : attaques chimiques.

7.2.1.2 - Exigences spécifiées par la norme NF EN 206-1

La norme NF EN 206-1 spécifie les exigences applicables :

- aux constituants du béton ;
- aux propriétés du béton frais et durci et à leur vérification ;
- aux limitations imposées à la composition du béton ;
- à la spécification du béton ;
- à la livraison du béton frais ;
- aux procédures de contrôle de production ;
- aux critères de conformité et à l'évaluation de la conformité.

7.2.1.3 - Exigences liées aux classes d'exposition

Les exigences propres à chaque classe d'exposition doivent être spécifiées en termes de :

- type et classe de constituants permis ;
- rapport maximal Eau / Ciment ;
- dosage minimal en ciment (ou absorption d'eau maximale, utilisable pour les produits structuraux préfabriqués) ;
- résistance minimale à la compression du béton.

Et, dans certains cas :

- teneur minimale en air du béton ou résistance à des essais de gel-dégel.

7.2.1.4 - Trois types de béton

La norme NF EN 206-1 décline trois types de béton prêt à l'emploi ou réalisé sur chantier.

» Béton à Propriétés Spécifiées (BPS)

Béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées par le prescripteur au producteur qui est responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences.

» Béton à Composition Prescrite (BCP)

Béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur qui est responsable de fournir un béton respectant cette composition.

» Béton à Composition Prescrite dans une norme

Béton dont la composition est définie dans une norme applicable là où le béton est utilisé.

7.2.1.5 - Classification des bétons

» Classe de consistance du béton frais

La norme NF EN 206-1 définit pour les bétons à teneur en eau courante, 5 classes de consistance des bétons.

Tableau n°12 : classes de consistance des bétons					
Classe	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (en mm)	10 à 40	50 à 90	100 à 150	160 à 210	≥ 220

La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams.

La consistance peut aussi être spécifiée par :

- le temps VEBE (en s) ;
- l'indice de serrage ;
- le diamètre d'étalement (en mm).

» Classes de résistance à la compression des bétons durcis

La résistance des bétons durcis à 28 jours peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques, elle peut donc être définie par deux valeurs :

- **fck-cyl** : résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques :

Ø = 150 mm - H = 300 mm,

Ø = 160 mm - H = 320 mm,

Ø = 110 mm - H = 220 mm.

- **fck-cube** : résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cubiques (côté : 100 ou 150 mm).

La norme NF EN 206-1 propose deux familles de classes de résistance en fonction de la masse volumique du béton :

- la classe de résistance à la compression des bétons de masse volumique normale et des bétons lourds est désignée par la lettre C suivie des valeurs fck-cyl et fck-cube.

- la classe de résistance des bétons légers est désignée par les lettres LC suivies des valeurs fck-cyl et fck-cube.

Elle définit respectivement seize classes de résistance pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds de C 8/10 à C 100/115 et quatorze classes pour les bétons légers de LC 8/9 à LC 80/88.

» Classes de masse volumique

La norme NF EN 206-1 couvre les bétons de masse volumique normale (2 000 à 2 600 kg/m³), les bétons lourds (masse volumique supérieure à 2 600 kg/m³) et les bétons légers (masse volumique comprise entre 800 et 2 000 kg/m³).

» Classes de teneurs en chlorures

La norme NF EN 206-1 définit les teneurs maximales en ions chlorures du béton à respecter en fonction de son type d'utilisation. Elle définit quatre classes de teneur : Cl 1,0 / Cl 0,4 / Cl 0,2 / Cl 0,1. Une cinquième classe a été introduite dans l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1 : la classe Cl 0,65.

7.2.1.6 - Valeurs limites spécifiées pour les bétons

Les normes NF EN 206-1 définit des valeurs limites spécifiées relatives à la composition et aux propriétés du béton dans deux tableaux (NA.F.1 et NA.F.2).

Les tableaux NA.F.1 et NA.F.2 précisent en fonction de chaque classe d'exposition :

- le rapport $Eau_{efficace} / Liant$ équivalent maximal ;
- la classe de résistance minimale du béton ;
- la teneur minimale en air.

Ils comportent d'autres exigences, en particulier sur les additions et la nature des ciments à utiliser.

Le tableau NA.F.1 précise aussi la teneur minimale en liant équivalent.

Le tableau NA.F.2, applicable aux produits préfabriqués en béton en usine, précise l'absorption d'eau maximale.



7.2.2 - Normes pour les produits préfabriqués en béton

7.2.2.1 - Nouvelles normes de produits européennes

Les normes européennes harmonisées constituent le principal support pour le marquage CE.

La famille des normes de produits préfabriqués en béton comprend :

- pour de nombreux produits, des normes européennes harmonisées “auto-portantes”, contenant en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires ;
- pour les produits préfabriqués structuraux en béton, des normes européennes harmonisées qui s'appuient sur la norme NF EN 13369. Cette norme précise et complète, pour les aspects concernant les produits préfabriqués structuraux, la norme NF EN 206-1.

7.2.2.2 - Norme NF EN 13369

La norme NF EN 13369 : “Règles Communes pour les produits préfabriqués en béton” est la norme de base pour toutes les normes de produits structuraux. Elle précise les exigences relatives aux constituants et au béton, ainsi que les conditions générales d'application des EUROCODES pour le dimensionnement des produits préfabriqués en béton. Les Règles Communes servent également de texte de référence pour les produits non couverts par des normes ou des Agréments Techniques Européens (ATE).

Elle reprend et applique, pour les aspects concernés, la norme NF EN 206-1. Pour les produits structuraux préfabriqués, les normes de produits, les normes NF EN 13369 et NF EN 206-1, ainsi que les EUROCODES, constituent donc un ensemble cohérent. Leur respect à chaque étape de la réalisation des produits préfabriqués permet de réaliser des éléments performants, fiables et durables.

Comme les normes spécifient complètement les exigences relatives au produit fini prêt à être mis en œuvre, la seule référence à la norme du produit suffit pour la passation des marchés. Si le marché fait référence à la norme NF EN 206-1, la conformité des produits en béton aux normes européennes correspondantes (norme de produits ou en l'absence norme NF EN 13369) vaut donc satisfaction à la norme NF EN 206-1.

Lorsque les produits en béton préfabriqués sont couverts par une norme de produit fixant des exigences de durabilité spécifiques alors seules celles-ci s'appliquent. Dans les autres cas, il est possible d'utiliser les spécifications

relatives à la composition et aux performances du béton définies dans la norme NF EN 13369.

Celles-ci concernent notamment :

- le type et les classes de constituants ;
- le rapport maximal Eau efficace / Liant équivalent ;
- le dosage minimal en liant équivalent ou l'absorption d'eau maximale ;
- et la résistance minimale à la compression du béton.

Ces spécifications sont définies dans deux tableaux (NA.F.1 et NA.F.2) communs aux normes NF EN 206-1 et NF EN 13369. L'industriel a la possibilité d'utiliser au choix les exigences de l'un ou l'autre des deux tableaux.

Les spécifications du tableau NA.F.2 reposent sur une approche performantielle de la durabilité qui permet de prendre en compte l'ensemble des facteurs liés aux formules de béton et aux procédés de fabrication.

La norme NF EN 13369 fixe, pour la mise en tension et en précontrainte, les contraintes de tension initiale, la précision, la rentrée des fils de précontrainte et la résistance minimale du béton. Ces exigences visent à garantir les niveaux de précontrainte définis et à éviter les fissures incontrôlées, l'éclatement du béton ou les déformations excessives des produits.

7.3 - Durabilité des bétons vis-à-vis des eaux agressives

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eau de mer, pluie, etc.). Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage adéquat, faible E/C, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa



réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs.

Le fascicule de documentation P 18-011 (bétons : classification des environnements agressifs - juin 1992) fournit des recommandations complémentaires aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour les bétons soumis à des environnements chimiques agressifs. Il recommande en particulier des mesures préventives pour la formulation des bétons (type de ciment, dosage minimal en ciment, valeur maximale du rapport E/C) afin d'assurer leur durabilité.

Il définit des mesures de protection pour les ouvrages en fonction des conditions environnementales agressives auxquelles ils sont soumis.

7.4 - Durabilité des bétons soumis au gel et aux sels de déverglaçage

Les ouvrages en béton peuvent être soumis à une alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres potentiels et d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec les rejaillissements de saumure.

Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

- une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne ;
- un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage.

Les dégradations de gel interne ne se produisent pas lorsqu'il existe dans le béton un réseau de petites bulles d'air, dense et homogène, permettant le déplacement de l'eau ou lorsque la quantité d'eau gelable est suffisamment faible (c'est le cas de certains BHP qui ont une compacité très élevée).

Les recommandations de niveau national relatives à la prévention contre les mécanismes développés par le gel font l'objet d'un guide technique édité par le LCPC en décembre 2003 intitulé "**Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel**". Ce document fixe les recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons traditionnels, des bétons à hautes performances et des bétons à technologie spécifique : béton à démoulage immédiat (bétons fabriqués en usine de préfabrication avec ou sans entraîneur d'air), bétons moulés sur site avec une machine à coffrage glissant, bétons projetés.

Les recommandations concernent les bétons réalisés sur chantier, en usines de préfabrication et en centrales de béton prêt à l'emploi pour les ouvrages relevant du domaine du GÉNIE CIVIL et soumis au GEL PUR ou au GEL PUR en présence de SELS de DÉVERGLAÇAGE. Elles s'adressent à des ouvrages pour lesquels les durées de service sont élevées (100 ans) et sont mentionnées en référence dans le fascicule 65.

Nota

Les produits préfabriqués disposant d'une certification intégrant les risques liés au gel-dégel ne sont pas concernés par ces recommandations.



Elles s'appuient pour les granulats sur les normes NF EN 12620 et XP P 18-545 ainsi que sur la norme NF EN 1367-1 pour la sensibilité au gel.

Elles tiennent compte de l'évolution des constituants des bétons (ciments, adjuvants, etc.) et définissent les essais à mettre en œuvre ainsi que les caractéristiques à exiger sur le béton durci pour satisfaire la durabilité aux cycles gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage.

Les principes de prévention concernent tous les paramètres de formulation, les conditions environnementales et les conditions de fabrication et de mise en œuvre du béton (temps de transport, vibration, talochage, cure, etc.).

» Niveaux de gel

La sévérité potentielle des dégradations dépend du nombre de cycles de gel-dégel et de la température minimale atteinte, de la vitesse de chute de la température et de la durée du gel (maintien prolongé du béton à de basses températures). Pour prendre en compte simplement ces paramètres, trois niveaux de gel sont définis dans le fascicule 65 et la norme NF EN 206-1 qui donne la carte des zones de gel en France :

- gel faible : moins de 3 jours par an avec une température $< - 5\text{ °C}$;
- gel sévère : plus de 10 jours par an avec une température $< - 10\text{ °C}$;
- gel modéré : dans les autres cas.

» Niveaux de salage

Les niveaux de salage sont définis par référence à la carte des zones de rigueur hivernale H_i (SETRA de novembre 1994 "Aide à l'élaboration du dossier d'organisation de la viabilité hivernale").

n = nombre de jours de salage
salage peu fréquent $n < 10$ ———→ H_1
salage fréquent $10 < n < 30$ ———→ H_2
salage très fréquent $n \geq 30$ ———→ H_3

Nota

Le marché doit préciser toutes les données caractérisant l'environnement dans lequel sont situées les parties de l'ouvrage ainsi que les classes d'exposition.



» Classes d'exposition concernées

Quatre “sous-classes” d'exposition définies dans la Norme NF EN 206-1 concernent les bétons soumis à l'action du gel et/ou aux sels de déverglaçage.

XF1 : saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage

XF2 : saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage

XF3 : forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage

XF4 : forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage

Tableau n°13 : corrélation entre niveaux de gel et classes d'exposition		
	Sans agents de déverglaçage	Avec agent de déverglaçage
Gel faible ou modéré	XF1	XF2
Gel sévère	XF3	XF4

» Degrés de saturation en eau du béton

La norme NF EN 206-1 distingue deux degrés de saturation en eau du béton :

- forte saturation en eau :
 - surfaces horizontales exposées à la pluie et au gel avec ou sans sel de déverglaçage ;
 - surfaces verticales exposées au gel et directement soumises aux projections des sels de déverglaçage.
- Saturation en eau modérée :
 - surfaces verticales de béton exposées à la pluie, au gel ainsi qu'au gel et à l'air véhiculant des sels de déverglaçage ou des brouillards salins.

» Types d'ouvrages concernés

Les principes de prévention s'appliquent à tous les ouvrages non protégés des intempéries ou au contact avec l'eau ou les rejaillissements de saumure et soumis à deux types d'exposition spécifiques : le gel pur ou le gel pur en présence de sels de déverglaçage.

Pour les ouvrages d'art, ils concernent plus particulièrement les appuis (piles, chevêtres, piédroits et culées) soumis à des projections d'eau chargées de sels de déverglaçage et tous les éléments de superstructures (longrines de scellement des joints de chaussées et des dispositifs de sécurité, corniches, contrecorniches, bordures de trottoirs, caniveaux, etc.).

Selon le niveau de gel auquel est soumis l'ouvrage, le degré de saturation du béton et le niveau de salage, on distingue quatre types de bétons.

Tableau n°14 : choix du type de bétons		
Type de salage	Type de gel	
	Modéré	Sévère
Peu fréquent	Béton adapté*	Béton G
Fréquent	Béton adapté* avec : teneur en air minimale = 4 % ou essais de performance	Béton G + S
Très fréquent	Béton G + S	Béton G + S

* Béton adapté : béton conforme à la norme NF EN 206-1 et possédant une bonne compacité.

Seuls les bétons G et G + S font l'objet de prescriptions particulières.

Le guide technique du LCPC donne toutes les informations utiles pour obtenir des bétons résistants au gel, que ce soient des bétons traditionnels ou des bétons à hautes performances. Elles concernent la formulation, les spécifications sur les constituants, les spécifications exigées sur le béton durci ainsi que la fabrication, la mise en œuvre et les dispositions constructives.

Il convient de s'y référer pour toute précision.

Les recommandations précisent des possibilités de dérogation aux spécifications sur les granulats et au seuil du facteur d'espacement.

Le guide technique consacre aussi un chapitre spécifique aux modalités de réalisations des épreuves d'étude et de convenance, et donne des bases pour la mise en place d'un plan de contrôle de la qualité des bétons.



7.5 - Prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction

Le phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau. Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher entre certaines phases minérales contenues dans les granulats et la solution interstitielle fortement basique du béton, lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément : présence d'une forme de silice des granulats dite "potentiellement réactive", des alcalins du béton et de l'eau en quantité suffisante.

Trois conditions sont donc nécessaires pour amorcer et entretenir les réactions de ce phénomène exceptionnel : il faut que simultanément, l'environnement soit fortement humide, la teneur en alcalins solubles dans la solution interstitielle soit élevée et dépasse un seuil critique, et qu'il existe dans le béton de la silice réactive en quantité suffisante (rapportée pas des granulats potentiellement réactifs).

7.5.1 - Document de référence

Les recommandations relatives à la prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction font l'objet d'un fascicule édité par le LCPC en juin 1994 intitulé : **Recommandations pour les préventions des désordres dûs à l'alcali-réaction.**

7.5.2. Principe de prévention

Le principe de la démarche préventive consiste à ne pas se retrouver dans une situation dans laquelle sont présentes simultanément les trois conditions nécessaires à l'amorçage de la réaction. Il convient donc d'éviter la conjonction des trois facteurs : EAU (condition d'humidité relative supérieure à 80-85 %) / ALCALINS (concentration en alcalins solubles élevée dans la solution interstitielle) / SILICE REACTIVE (présence de granulats réactifs).

La méthode de prévention se décline en deux étapes. Elle consiste en fonction de l'environnement et du type d'ouvrage à déterminer le niveau de prévention à atteindre, puis à vérifier que la formulation prévue pour le béton est satisfaisante en appliquant les recommandations adaptées.

TYPES D'OUVRAGES

Tableau n°15 : types d'ouvrages		
Types d'ouvrages	Niveau de risque	Exemples d'ouvrages
I	Risques d'apparition des désordres faibles ou acceptables	Éléments non porteurs
II	Risques d'apparition de désordres peu tolérables	La plupart des ouvrages de génie civil
III	Risques d'apparition de désordres inacceptables	Ponts ou viaducs exceptionnels

CLASSES D'EXPOSITION

Tableau n°16 : classes d'exposition	
Classe	Environnement
1	Sec ou peu humide (hygrométrie inférieure à 80 %)
2	Hygrométrie supérieure à 80 % ou en contact avec l'eau
3	Hygrométrie supérieure à 80 % et avec gel et fondants
4	Marin

NIVEAUX DE PRÉVENTION :

Tableau n°17 : niveaux de prévention				
Types d'ouvrages	Classe d'exposition			
	1	2	3	4
I	A	A	A	A
II	A	B	B	B
III	C	C	C	C

Le niveau de prévention à envisager est le niveau B pour la majorité des ouvrages d'art et C pour les ouvrages d'art exceptionnels.

RECOMMANDATIONS

Niveau A : pas de spécifications particulières.

Niveau B : six possibilités d'acceptation de la formule béton*.

Niveau C : granulats non réactifs (granulats PRP sous conditions**).

La mise en place d'un ensemble cohérent de recommandations de prévention a enrayé, depuis plus de 10 ans, toute manifestation du phénomène.

Le phénomène d'alcali-réaction est, depuis plusieurs années, parfaitement maîtrisé. Il est maintenant possible de prévenir tout risque d'alcali-réaction dans les bétons et éviter ainsi tout désordre.

* Il convient de répondre au moins une fois positivement à l'une des 6 questions :

- l'étude du dossier granulats montre-t-elle que les granulats sont non-réactifs ?
- la formulation satisfait-elle à un critère analytique (bilan des alcalins satisfaisant) ?
- la formulation satisfait-elle à un critère de performance ?
- la formulation présente-t-elle des références d'emplois suffisamment convaincantes ?
- le béton contient-il des additions minérales inhibitrices en proportions suffisantes ?
- les conditions particulières aux granulats PRP sont-elles satisfaisantes ?

** Utilisation recommandée de granulats non réactifs (NR), granulats potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP) éventuellement autorisés sous réserve que les conditions particulières à leur emploi soient satisfaites, sur la base d'un essai de performance.

7.6 - Prévention contre les phénomènes de gonflement interne sulfatique

L'ettringite est un hydrate contenant des sulfates dont les propriétés de gonflement sont connues depuis plus d'un siècle. Des précautions particulières sont donc prises lorsqu'un béton est exposé à un environnement riche en sulfate, notamment vis-à-vis des caractéristiques du ciment.

Mais dans certains cas rares, la formation différée d'ettringite peut avoir lieu sans apport d'ions sulfate externes. Ces réactions sont susceptibles de provoquer une expansion du béton durci. Les dégradations qui peuvent en résulter se manifestent par des fissures en surface qui apparaissent après plusieurs années d'exposition à des conditions sévères caractérisées par une forte humidité. Ce phénomène rare peut se rencontrer, seulement dans des environnements humides, dans des pièces massives de ponts en béton coulés en place et également sur des pièces de béton ayant subi un traitement thermique inadapté. Il n'y a pas de symptômes spécifiques à la formation différée d'ettringite expansive car d'autres pathologies peuvent présenter les mêmes symptômes en particulier les phénomènes d'alcali-réaction. Les cas de structures concernées par cette pathologie sont peu nombreux. L'origine du gonflement et la nature des paramètres impliqués ont fait l'objet de nombreuses études. La principale difficulté réside dans la complexité du mécanisme de gonflement et du nombre important de paramètres impliqués.

Il n'y a pas, à ce jour, de document synthétisant les recommandations à mettre en œuvre pour éviter les phénomènes de gonflement interne sulfatique (ou de formation différée d'ettringite).

De nombreuses recherches sont en cours, aussi bien au sein du réseau des laboratoires de l'équipement, que dans les centres de recherches de l'Industrie Cimentière. Ces études visent à mettre au point et valider des principes de prévention à mettre en œuvre. Un groupe de travail piloté par des experts du LCPC s'est constitué pour rédiger un guide de recommandations pour se prémunir contre le développement de réactions sulfatiques internes.

Les experts du LCPC en partenariat avec ceux de l'ATILH et du CERIB ont mis au point un test de performance accéléré sur béton permettant d'évaluer la durabilité des couples "formule de béton et cycle thermique" vis-à-vis de la formation d'ettringite différée, qui soit représentatif des phénomènes observés dans des cas réels et adaptés aux conditions d'exécution.

Cet essai permet de valider une formulation de béton et de déterminer sa réactivité potentielle à la formation de gonflement interne sulfatique et les combinaisons de paramètres admissibles pour éviter le phénomène.

7.7 - Durabilité des bétons en site maritime

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions :

- agressions mécaniques dues à l'action des vagues et des marées, abrasion due aux chocs des matériaux flottants et érosion due aux effets des vagues ;
- agressions chimiques dues à l'action des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates ;
- agressions climatiques dues aux variations de température et éventuellement à des phénomènes de gel-dégel.

Les structures situées en site maritime sont exposées à trois types de configurations. Selon les variations du niveau de la mer, elles peuvent être :

- continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes ;
- continuellement émergées et soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures, les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions ;
- alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse) ou soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues, les bétons situés dans cette zone sont les plus agressés.



Le fascicule de documentation P 18-011 (juin 1992) fournit des recommandations complémentaires aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour les bétons soumis à l'action de l'eau de mer et précise le mode d'action de l'eau sur le béton.

Il recommande des mesures préventives pour la formulation des bétons en milieux marins (dosage minimal en ciment, type de ciment, valeur maximale du rapport E/C).

Les principes de prévention à mettre en œuvre visent à réaliser un béton compact et peu perméable (rapport E/C relativement faible et optimisation du squelette granulaire), à formuler le béton avec un ciment adapté (ciment à caractéristiques complémentaires Prise Mer (PM) ou à base de laitier), à respecter les valeurs d'enrobage des armatures et à soigner la mise en œuvre du béton et sa cure.

Les équipements des ponts

- 8.1 - Étanchéité**
- 8.2 - Couches de roulement**
- 8.3 - Joints de chaussées**
- 8.4 - Dispositifs de retenue**
- 8.5 - Corniches**
- 8.6 - Appareils d'appui**
- 8.7 - Dispositifs d'évacuation des eaux**
- 8.8 - Dispositifs de dilatation de la voie ferroviaire**
- 8.9 - Dispositifs d'abouts de tablier ferroviaire**
- 8.10 - Dispositifs de visite**
- 8.11 - Dalles de transition**
- 8.12 - Écrans acoustiques**
- 8.13 - Grilles centrales**
- 8.14 - Canalisations de services publics**
- 8.15 - Équipements électriques pour ouvrages ferroviaires**
- 8.16 - Écrans-garde ballast**

Les “Équipements des Ponts” désignent un ensemble de dispositifs très divers qui complètent la structure et qui permettent d’assurer en particulier :

- le fonctionnement de la structure : appareils d’appui et joints de chaussées ;
- la pérennité de la structure : étanchéité de l’ouvrage, corniches, perrés et évacuation des eaux ;
- la sécurité des usagers (piétons et véhicules) : dispositifs de retenue (garde-corps, glissières, barrières) et bordures de trottoirs ;
- le confort des usagers et/ou des riverains : joints de chaussées, dalles de transition, écrans acoustiques ;
- l’entretien et l’accessibilité des ouvrages : escaliers sur les perrés, échelles, portes et passerelles, etc., qui permettent de visiter, d’inspecter ou d’assurer l’entretien des ouvrages.

Ils complètent la structure elle-même afin que l’ouvrage puisse être utilisable par l’usager. En outre, certains d’entre eux ont une forte influence sur l’esthétique du pont car ils sont placés en rive (corniches, barrières, garde-corps, etc.).

Les équipements sont en général fortement sollicités (usure accidentelle, environnement agressif, trafics, conditions climatiques...). Ils nécessitent une inspection, un entretien ou un remplacement régulier au cours de la durée de service de l’ouvrage. Ils doivent donc être conçus pour être entretenus ou changés facilement. Ils sont constitués de matériaux de natures très diverses (béton, acier, bitume...) et sont en général mis en œuvre par des entreprises spécialisées.

Si leur coût à la construction de l’ouvrage reste limité à 10 à 15 % du coût total, ils représentent plus du tiers des crédits consacrés à l’entretien des ouvrages d’art.

Nota

La majorité des équipements fait l’objet de guides techniques ou de documents type (avis technique...) qui complètent les textes réglementaires (fascicules du CCTG ou circulaires...) et précisent l’ensemble des paramètres nécessaires à leur dimensionnement et les dispositions constructives à mettre en œuvre pour leur installation.

8.1 - Étanchéité

Le système d'étanchéité des tabliers a pour objectif de protéger la structure béton des diverses agressions générées par les eaux pluviales (contenant des produits agressifs : sels de déverglaçage) circulant sur l'ouvrage et des cycles éventuels de gel-dégel. Il permet d'éviter la pénétration d'agents chimiques agressifs et la corrosion des armatures du béton du tablier et donc de garantir la durée du service de l'ouvrage.

Il est mis en place sur la totalité de la surface horizontale du tablier (chaussée, trottoirs). Il est raccordé aux points singuliers (pénétrations, avaloirs, joints de chaussées, etc.).

Sa mise en œuvre nécessite une préparation initiale soignée du support.

Il existe plusieurs systèmes d'étanchéité qui font l'objet d'avis techniques délivrés par le SETRA (pour les ponts routiers) ou d'agrément délivrés par la SNCF (pour les ponts ferroviaires) :

▶▶ l'asphalte bicouche

Le complexe comprend :

- une couche d'accrochage à base d'enduit d'imprégnation à froid ;
- une couche de semi-indépendance (papier kraft ou résille de verre) ;
- une couche de mastic d'asphalte (composé de poudre d'asphalte et de bitume) d'épaisseur 8 mm ;
- une couche de protection en asphalte gravillonné de l'ordre de 25 mm d'épaisseur.

Ce système n'est pas adhérent au support béton.

Il existe aussi des procédés brevetés à base d'asphalte monocouche modifié par des polymères sur primaire bouche pore.

▶▶ les films minces adhérents au support

Le système est composé d'un film mince (2 à 3 mm d'épaisseur) obtenu par réaction chimique entre une base et un durcisseur, et constitué en général de polyuréthanes ou d'époxy-polyuréthanes.

▶▶ **les feuilles préfabriquées**

Les feuilles d'étanchéité manufacturées en usine, livrées en rouleaux sont à base, en général, de bitume modifié (bitume élastomère) associé à une armature (non tissé). Elles sont soudées en pleine adhérence sur le support, sur lequel est préalablement répandu un enduit d'imprégnation à froid à base de bitume polymère ou de bitume polyuréthane, par fusion partielle du bitume de la feuille.

▶▶ **les feuilles préfabriquées recevant une couche complémentaire en asphalte**

Ces feuilles ont une formulation adaptée pour recevoir 25 mm environ d'asphalte gravillonné.

▶▶ **les procédés par Moyens à Haute Cadence (MHC)**

Il s'agit de procédés à base de bitume fortement modifié par des polymères et mis en œuvre par des moyens routiers à grandes cadences.



Sur les ouvrages d'art courants, les procédés les plus utilisés sont les procédés asphalte, les feuilles préfabriquées monocouches ou recouvertes d'asphalte. Les films minces adhérents au support sont surtout réservés à des zones contournées comme les trottoirs, les caniveaux de corniches, caniveaux etc. Les procédés par moyen à haute cadence sont adaptés aux grands ouvrages.

Les procédés d'étanchéité pour les ponts routiers font l'objet d'une procédure d'avis technique.

AVIS TECHNIQUE

Un Avis Technique est un document d'information destiné à fournir aux divers intervenants (Maîtres d'Ouvrage, Maîtres d'Œuvre et entreprises) une opinion autorisée sur le comportement prévisible des produits, procédés et matériels concernés, ce qui leur permet de prendre leur décision en pleine connaissance de cause.

Un Avis Technique donne :

- **une description du produit avec sa constitution ;**
- **une évaluation de l'aptitude du produit à son usage faite par rapport à un référentiel commun comprenant des essais de caractérisation et d'aptitude à l'usage ;**
- **une garantie sur la composition du produit et sa qualité de fabrication.**

L'Avis est établi au sein d'une Commission regroupant des experts (Administration, Maîtres d'Ouvrage et professionnels) et est formulé sur la base des critères de performances et d'exigences définis dans le référentiel technique qui est basé sur le fascicule 67, titre I.

Nota

Les complexes d'étanchéité destinés aux ouvrages ferroviaires sont définis dans le livret 2.43 de la SNCF.

8.2 - Couches de roulement

Les couches de roulement mises en œuvre sur les tabliers d'ouvrages d'art routiers ou autoroutiers sont similaires, surtout dans le cas des ouvrages d'art courants, à celles utilisées sur chaussées courantes. Elles doivent offrir un bon uni, des caractéristiques antidérapantes adaptées et présenter une adhérence pérenne avec le système d'étanchéité. Leur épaisseur est de l'ordre de 7 à 12 cm, en fonction des formulations et du trafic.

8.3 - Joints de chaussées

Les joints de chaussées permettent d'assurer la transition entre le tablier et les chaussées adjacentes à l'ouvrage ou entre deux ouvrages discontinus, en remplissant les conditions suivantes :

- assurer la liberté de mouvement du pont ;
- donner une continuité de la surface de roulement ;
- ne pas être une source de bruit et de vibration ;
- avoir une bonne étanchéité ou une bonne évacuation des eaux.

Il existe quatre principales familles de joints de chaussées utilisées en France* :

- les joints non apparents sous revêtement normal ou amélioré ;
- les joints à pont souple appuyé ou en bande ;
- les joints à pont en porte à faux, à peigne ;
- les joints à lèvres, avec remplissage du vide par un matériau assurant l'étanchéité.



* La description des familles et leur nombre ont été révisés par un groupe de travail européen en vue d'établir des Agréments Techniques Européens.

Les paramètres déterminant pour le choix d'un modèle de joint sont : le "souffle" et le trafic.

On appelle "souffle" d'un joint le déplacement relatif maximal prévisible des deux éléments en regard, mesuré entre leurs deux positions extrêmes (et non par rapport à la position moyenne ou de réglage).

Le modèle de joint devra satisfaire aux trois degrés de liberté correspondant aux trois directions du déplacement relatif des deux éléments par rapport à l'axe de la voie.

La composante longitudinale est, en général, la plus importante. Elle représente les mouvements de contraction et d'extension réversibles ou non de la structure (température, retrait, etc.).

La composante transversale apparaît dans le cas d'ouvrages courbes ou biais et elle est la conséquence d'une déformation particulière du tablier (sous l'action de la température surtout) et de l'effet du trafic (force centrifuge et freinage).

La composante verticale bien que souvent de valeur faible, n'est pas négligeable. Elle résulte de mouvements de rotation d'about.

Le joint de chaussées est dimensionné pour supporter les essieux des véhicules amenés à circuler sur l'ouvrage selon les règles définies par les Eurocodes.

Le choix du joint de chaussée adapté à l'ouvrage doit tenir compte en particulier de ses performances techniques (capacité de souffle, possibilité de biais, résistance à la fatigue, comportement sous trafic), de ses performances en terme d'étanchéité et de confort pour l'utilisateur (vibration, bruit), et de sa facilité d'entretien, de maintenance ou de remplacement éventuel.

Les joints de chaussée font l'objet d'avis techniques qui donnent une appréciation sur la durabilité et la satisfaction aux critères d'appréciation. Ces avis sont préparés par une commission, selon le même principe que pour les systèmes d'étanchéité.

8.4 - Dispositifs de retenue

Les ponts sont équipés de dispositifs de retenue qui permettent d'assurer la sécurité des piétons, des usagers et des véhicules circulant sur l'ouvrage.

Ces dispositifs peuvent être :

- des **garde-corps** pour les piétons,
- des **barrières de niveau N** (parfois dénommés glissières) pour les véhicules légers,
- des **barrières de niveau H** pour les cars et les poids lourds,

Ces dispositifs sont définis dans le guide technique G.C. du SETRA.

Les dispositifs de retenue pour les véhicules doivent être homologués pour pouvoir être utilisés.

L'homologation est délivrée à partir d'essais de choc en vraie grandeur exécutés au laboratoire du LIER (Laboratoire INRETS* Equipements Routiers) selon la norme NF EN 1317 1-2. Cette procédure d'homologation devrait être, très prochainement, remplacée par la certification sur la base d'un marquage CE.



* Institut National de Recherche et d'Etudes des Transports et de la Sécurité

8.5 - Corniches

Les corniches ont pour rôle :

- ▶▶ d'améliorer l'aspect de l'ouvrage en :
 - éloignant l'eau et les souillures ;
 - rattrapant les irrégularités éventuelles de la structure porteuse provenant de sa conception et de son mode d'exécution ;
 - jouant sur la forme, les couleurs et les proportions de la corniche. De ce fait, c'est un équipement très sensible car il participe à l'aspect architectural de l'ouvrage et constitue un facteur essentiel de sa perception visuelle ; de la bonne conception et réalisation de la corniche découleront bien souvent la réussite esthétique ou non du pont.

- ▶▶ d'assurer des fonctions secondaires telles que : support au relevé d'étanchéité, butée de trottoir, scellement du garde-corps, etc. Ces fonctions pourraient parfaitement être assurées par des éléments de la structure et c'est souvent le cas dans certaines conceptions actuelles de corniche.



Les corniches peuvent être :

- ▶▶ coulées en place en même temps que le tablier ou après sa réalisation ;

- ▶▶ en éléments préfabriqués (en béton armé, en alliage d'aluminium, en polyester armé de fibres de verre, en acier inoxydable...).

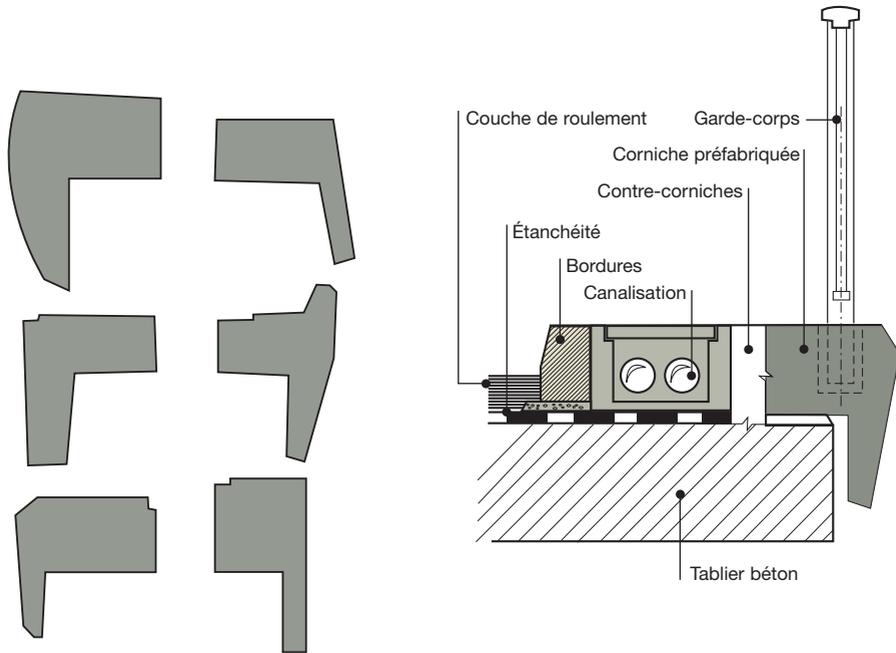
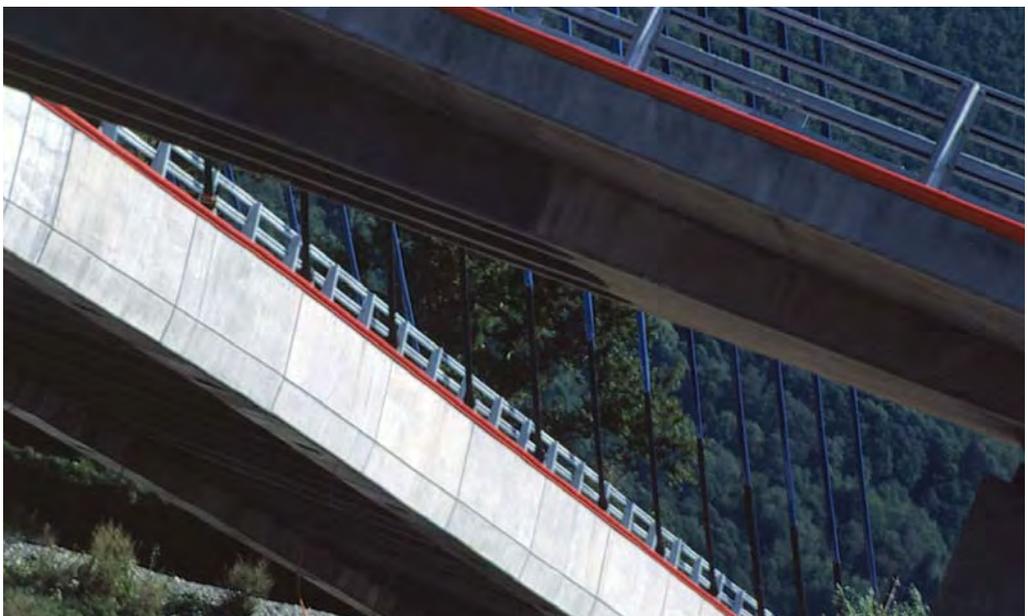


Figure n°35 : Exemples de profils types de corniches



8.6 - Appareils d'appui

Les appareils d'appui sont des éléments de structure qui assurent la liaison entre le tablier et les appuis (piles et culées) et ils ont pour fonction de transmettre les efforts entre un élément et son support tout en autorisant certains degrés de liberté.

On distingue trois types d'appareils d'appui :

- **fixes**

Ils permettent les rotations sur appui autour d'au moins un axe, mais ne permettent pas les déplacements ;

- **mobiles unidirectionnels**

Ils permettent les rotations sur appui et les déplacements dans une seule direction déterminée ;

- **mobiles multidirectionnels**

Ils permettent les rotations sur appui et les déplacements dans toutes les directions dans un plan.

Les appareils d'appui les plus utilisés sur les ponts courants sont les appareils en élastomère fretté. Ils sont constitués d'un empilage de feuillets d'élastomère (néoprène d'épaisseur de 8 à 16 mm) associés par vulcanisation à des frettes en acier doux. Ce système de frettage leur permet de résister à des taux de compression très élevés.

Ils sont dimensionnés en limitant les contraintes de cisaillement apparaissant dans l'élastomère au niveau des plans de frettage.

Il est indispensable, lors de la conception des appuis et du tablier, de prévoir les dispositions nécessaires pour remplacer, régulièrement, les appareils d'appui au cours de la durée de service de l'ouvrage (en particulier l'emplacement pour positionner les vérins permettant le relevage du tablier).

8.7 - Dispositifs d'évacuation des eaux

Ces dispositifs sont destinés à assurer l'écoulement et l'évacuation des eaux pluviales sur le tablier. Ils permettent une protection du tablier contre les infiltrations dans la couche de roulement et une évacuation rapide de l'eau sur le tablier, afin d'éviter tout risque d'inondation de la chaussée.

En outre, la stagnation d'eau doit être évitée pour des raisons de sécurité à l'usager (risque d'aquaplaning ou de verglas en hiver). Ils doivent pouvoir être visités et entretenus facilement. Ils doivent être adaptés en fonction de la surface et des pentes longitudinales et transversales de l'extrados du tablier.

Des caniveaux en béton préfabriqués, associés à des bordures de trottoir sont généralement disposés de part et d'autre de la couche de roulement.

Des descentes d'eau constituées d'éléments en béton préfabriqués équipent les talus des remblais des passages supérieurs.



8.8 - Dispositifs de dilatation de la voie ferroviaire

Des appareils de dilatation de la voie ferroviaire peuvent être nécessaires aux abords immédiats des tabliers, en fonction de la nature de la voie et de la longueur dilatable des tabliers.

Dans le cas de voie sur ballast et d'utilisation de longs rails soudés (LRS), si la longueur dilatable du tablier en béton est inférieure à 90 m, l'appareil de dilatation n'est pas nécessaire (l'appareil de dilatation est nécessaire si la longueur dilatable est comprise entre 90 et 400 m). La longueur dilatable ne peut être supérieure à 400 m.

8.9 - Dispositifs d'abouts de tablier ferroviaire

Les zones d'abouts des tabliers ferroviaires doivent être conçues pour assurer, en particulier, les libres mouvements de l'ouvrage et une parfaite transition entre la voie sur plate-forme et la voie sur ouvrage. La conception des dispositifs d'abouts doit intégrer les interactions entre les rails et le tablier.

Les dispositions à mettre en œuvre sont fonction de la longueur dilatable du tablier.

Par exemple, l'about du tablier sera équipé d'un simple couvre joint métallique, si la longueur dilatable est comprise entre 60 et 90 mètres, ou d'un joint de dilatation garde ballast si la longueur dilatable est supérieure à 90 mètres.

8.10 - Dispositifs de visite

Les ouvrages doivent être équipés afin de permettre leur surveillance et leur entretien, des divers dispositifs de visite suivants :

- passerelles de visite ;
- trappes d'accès ;
- portes ;
- trous d'hommes.

Cependant, dans le cas des ouvrages courants, les dispositifs de visites peuvent se limiter à des marches sur le perré et à un aménagement du haut de ce perré afin de faciliter l'accès et la visite des zones d'appui.



Photo SETRA CTOA

8.11 - Dalles de transition

Les dalles de transition sont des dalles en béton armé reposant d'un côté sur l'extrémité de l'ouvrage, qui est susceptible de peu tasser, et de l'autre sur le remblai, d'accès à quelques mètres. Elles ont pour fonction d'éviter, en cas de tassement des remblais au ras de l'ouvrage, une dénivellation brutale entre la chaussée courante et le tablier.

8.12 - Écrans acoustiques

Des écrans acoustiques en béton préfabriqué peuvent être mis en place sur les ouvrages. Ces écrans permettent de limiter l'impact sonore pour les riverains au réseau routier, autoroutier ou ferroviaire.



8.13 - Grilles centrales

Les grilles de couvertures du vide central sont mises en place entre deux tabliers jumeaux portant des chaussées unidirectionnelles.

Le rôle du vide central est d'éviter des tabliers trop larges et d'économiser de la surface de structure. Par contre, pour assurer la sécurité de la circulation des piétons (automobilistes en panne, personnel de service...), tout en laissant passer la lumière pour améliorer les conditions de circulation sur la voie franchie, ces trous sont couverts par une grille. Cette couverture peut être opaque en cas de franchissement de zones habitées ou de voies ferrées.

8.14 - Canalisations de services publics

Les ouvrages d'art doivent souvent assurer le franchissement de diverses canalisations de services publics ainsi que des câbles téléphoniques et des câbles d'alimentation électrique. Ces canalisations appartiennent aux concessionnaires de voirie qui ont reçu une autorisation de la part du maître d'ouvrage. Elles ne doivent pas empêcher le bon fonctionnement de la structure, ni porter atteinte à sa durabilité.

Ces canalisations sont généralement disposées dans des caniveaux constitués d'éléments préfabriqués.

8.15 - Équipements électriques pour ouvrages ferroviaires



Les équipements électriques des ouvrages ferroviaires comprennent en particulier :

- les installations de traction électrique (poteaux caténaires, systèmes de fixation sur les ouvrages, etc.) ;
- les câbles et installations de télécommunication ;
- les dispositifs de mise à la terre (ou au rail) des éléments métalliques des ouvrages ;
- les installations de signalisation électrique (poteaux, supports de signaux, ...).

8.16 - Écrans-garde ballast

Les écrans-garde ballast (de 1,50 m de hauteur) sont destinés à éviter toute projection de matériaux dans les zones sensibles (par exemple, au niveau du franchissement de voie routière).



Annexes

Annexe 1

Annexe 2

Annexe 3

Annexe 1

Glossaire

About

Extrémité d'une poutre ou d'une dalle.

Accélérateur de durcissement

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, raccourcit la durée de la phase de durcissement du béton.

Accélérateur de prise

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, diminue les temps de début et de fin de prise du ciment dans le béton, en favorisant l'hydratation du liant.

Addition

Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

On distingue :

- les additions quasiment inertes (de type I) ;
- les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent (de type II).

Adjuvant

Produit ajouté au béton durant le processus de mélange, en petites quantités par rapport à la masse de ciment (moins de 5 %), pour modifier les propriétés du béton frais ou durci.

Affaissement au cône d'Abrams

Valeur, exprimée en millimètres, obtenue par un essai normalisé, dit "essai d'affaissement" ou "essai au cône d'Abrams" (du nom de son inventeur), ou encore "slump test", effectué sur un moule tronconique rempli de béton frais. On apprécie ainsi la consistance, donc l'ouvrabilité du béton.

Air entraîné

Bulles d'air microscopiques intentionnellement incorporées au béton lors du malaxage, habituellement par l'utilisation d'agents tensioactifs ; les bulles sont pratiquement sphériques et leur diamètre est généralement compris entre 10 et 300 μm .

Air occlus

Vides d'air dans le béton qui ne sont pas intentionnellement créés.

Ame

Partie relativement mince, verticale ou légèrement inclinée d'une poutre ou d'un caisson.

Ancrage

Dispositif de blocage, dans une structure ou dans le sol, d'une armature soumise à un effort de traction.

Ancrage d'un pieu

Partie d'un pieu fiché en pointe dans le sol résistant.

Ancrage de câble de précontrainte

Extrémité d'un dispositif de précontrainte, appliquant la force de précontrainte au béton.

Appareil d'appui

Dispositif, transmettant aux appuis les actions dues au tablier, placé entre une structure et un appui, et conçu pour permettre des déplacements relatifs, de translation ou de rotation.

Appui

Partie d'ouvrage transmettant à la fondation les actions provenant du tablier (pile, culée, pile-culée, etc.).

Arase

Pour un pieu de fondation : niveau de tête du pieu avant recépage.

Arc au-dessus

Arc avec tablier inférieur. Pont pour lequel le tablier est au-dessous de l'arc.

Arc en-dessous

Arc avec tablier supérieur. Pont pour lequel le tablier est au-dessus de l'arc.

Armature

Barre (ou câble) introduite dans un ouvrage en béton pour améliorer la résistance à la traction et éventuellement à la compression ou au cisaillement.

L'ensemble des armatures d'un élément de construction en béton armé constitue le ferrailage. On distingue les armatures passives pour béton armé, et les armatures actives pour béton précontraint.

Armature active

Armature de précontrainte (fil, toron ou barre) soumise à une précontrainte par pré-tension ou par post-tension.

Armature passive

Armature (barre, fil, treillis soudé) non soumise à une précontrainte, ni par pré-tension ni par post-tension.

Armaturier

Professionnel dont le métier consiste à fabriquer des armatures et parfois à les poser en coffrage.

Articulation

Dispositif de liaison entre parties d'ouvrage, transmettant les forces et permettant une rotation.

Attente

Armature débordant d'un élément en béton, et destinée à assurer la liaison avec un autre élément en béton coulé ultérieurement.

Avaloir

Orifice couvert d'une grille, servant à l'évacuation des eaux de pluie vers un réseau d'assainissement.

Avant-bec

Dispositif provisoire composé d'une ou de plusieurs poutres légères, installées à l'avant d'un tablier de pont construit par poussage ou lançage.

Ballast

Couche d'un matériau calibré, sur laquelle s'appuient les traverses, sur lesquelles sont fixées les rails.

Banche

Élément monobloc de grandes dimensions, utilisé comme coffrage pour l'exécution de voiles ou de murs en béton armé.

Barbacane

Orifice pratiqué dans un mur de soutènement, une dalle ou une voûte, destiné à l'écoulement des eaux.

Barrette

Élément de paroi en béton ou en béton armé, moulé dans le sol.

Barrière de sécurité

Dispositif de sécurité destiné à maintenir les véhicules sur la plate-forme.

Batardeau

Ouvrage de protection, provisoire ou définitif, permettant de travailler à l'air libre plus bas que le niveau de l'eau pour la réalisation en particulier de fondations d'ouvrage.

Bêche

Élément servant d'ancrage ou de parafouille pour certaines fondations.

Béquille

Appui oblique encastré dans le tablier et transmettant les charges aux fondations.

Béton

Matériau formé par mélange d'un liant hydraulique (ciment), de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants dont les propriétés se développent par hydratation du ciment.

Béton à Composition Prescrite

Béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur qui est responsable de fournir un béton respectant cette composition prescrite.

Béton à Composition Prescrite dans une Norme

Béton à composition prescrite dont la composition est définie dans une norme applicable là où le béton est utilisé.

Béton à Hautes Performances

Béton appartenant à une classe de résistance à la compression supérieure à C 50/60, pour le béton de masse volumique normale ou le béton lourd, et supérieure à LC 50/55, pour le béton léger.

Béton à Propriétés Spécifiées

Béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur qui est responsable de fournir un béton qui satisfait à ces propriétés requises et à ces caractéristiques supplémentaires.

Béton armé

Matériau composite obtenu en noyant des armatures (barre, treillis soudés, etc.) dans la masse du béton.

Ces armatures judicieusement disposées reprennent les efforts de traction.

Béton Autoplaçant

Béton mis en œuvre dans les coffrages sous le seul effet de la gravité sans nécessiter de vibration du fait de sa grande ouvrabilité.

Béton banché

Béton coffré à l'aide de banches.

Béton blanc

Béton de teinte claire dont le liant est du ciment blanc et qui comporte également des sables blancs, auxquels sont éventuellement ajoutés des fines blanches ou de l'oxyde de titane.

Béton bouchardé

Aspect de surface obtenu sur béton durci par un traitement mécanique à l'aide d'une boucharde faisant éclater la surface du béton pour offrir un aspect rugueux plus ou moins prononcé. Ce traitement fait ressortir la structure interne des gros granulats.

Béton brossé

Aspect de surface obtenu sur béton frais par passage d'une brosse à poils durs faisant apparaître partiellement les granulats et formant sur la surface de fines cannelures.

Béton brut

Béton dont la peau n'a reçu aucun traitement de surface après le décoffrage.

Béton clair

Béton dont le ciment et les autres constituants - éléments fins, sables, granulats - sont tous de teinte claire.

Béton coloré

Béton dont la teinte dépend de celles du ciment et des granulats qui le composent, auxquels peuvent être ajoutés des pigments.

Béton de masse volumique normale

Béton dont la masse volumique $> 2\ 000\ \text{kg/m}^3$ mais \leq à $2\ 600\ \text{kg/m}^3$.

Béton de propreté

Béton maigre, étalé sur le sol naturel ou en fond de fouilles pour réaliser une aire de travail plane.

Béton désactivé

Aspect de surface obtenu par pulvérisation d'un désactivant juste après la mise en œuvre du béton. La surface est ensuite décapée au jet d'eau ou brossée pour faire apparaître les granulats.

Béton fibré

Matériau composite formé de béton mélangé avec des fibres métalliques, de verre ou de synthèse, dont la section est de l'ordre du millimètre et la longueur de quelques centimètres.

Béton frais

Béton dans la phase qui suit le malaxage et précède la prise, c'est-à-dire dans un état plastique qui permet son transport et sa mise en place. On apprécie l'ouvrabilité d'un béton durant cette phase, en soumettant un échantillon à un essai d'affaissement au cône d'abrams.

Béton grenailé

Béton dont la peau a subi, après durcissement, une projection de grenaille (petites billes d'acier de dimension inférieure à 1 mm).

Béton grésé

Aspect de surface obtenu sur béton durci par abrasion à l'aide d'une meule pour faire ressortir la texture du béton.

Béton imprimé

Béton frais sur la peau duquel on a appliqué un colorant puis une matrice pour reproduire en négatif le motif qu'elle porte en positif.

Béton lavé

Aspect de surface obtenu sur béton frais par lavage au jet d'eau pour faire apparaître partiellement les granulats.

Béton léger

Béton dont la masse volumique est supérieure ou égale à 800 kg/m³ mais inférieure ou égale à 2 000 kg/m³. Il est produit entièrement ou partiellement à partir de granulats légers.

Béton lourd

Béton dont la masse volumique est supérieure à 2 600 kg/m³.

Béton poli

Béton dont la peau a subi, après durcissement, des meulages successifs de plus en plus fins, généralement suivis d'un bouchonnage et de l'application d'un produit de protection. Si l'on dépasse quatre passes, on parle de "poli marbrier", qui permet l'obtention d'une surface parfaitement lisse et brillante.

Béton poncé

Parement, obtenu par abrasion superficielle de la surface à l'aide d'une meule, dégageant partiellement les sables.

Béton précontraint

Béton mis en compression de façon permanente avant toute application de charges, pour compenser les contraintes auxquelles il doit être soumis.

Béton Prêt à l'Emploi (BPE)

Béton frais préparé dans une centrale à béton, généralement extérieure au site de construction. Il est livré sur le chantier, dans des camions toupies, malaxé et prêt à être coulé.

Béton projeté

Béton propulsé, après malaxage par voie mouillée, ou par voie sèche, sur un support sous forme de jet, en couches successives. Il permet de réaliser les formes les plus complexes (dômes, coques, etc.).

Béton sablé

Aspect de surface obtenu sur béton durci par décapage à l'aide d'un jet de sable faisant apparaître plus ou moins les granulats.

Béton taloché

Aspect de surface obtenu sur béton frais par passage d'une taloche.

Blindage

Ouvrage provisoire de protection permettant la tenue des terres d'une paroi verticale de fouille.

Blochets

Epaississement de l'âme de certaines poutres précontraintes à leurs extrémités.

Bordure de trottoir

Élément préfabriqué en béton, faisant saillie par rapport à la chaussée et la séparant du trottoir.

Bossage

Saillie aménagée à la surface d'une pièce en béton, permettant d'assurer l'ancrage de câbles de précontrainte.

Bow-string

Structure en "arc au-dessus" dont les réactions horizontales sont reprises par le tablier.

Bracon

Etai incliné soutenant la partie en encorbellement d'un caisson.

Buse

Ouvrage hydraulique ou routier en béton armé préfabriqué ou en acier, de forme cylindrique ou ovale.

Buton

Etai, en général horizontal, empêchant le rapprochement de deux parois.

Buttée

Pièce limitant le déplacement d'une structure. Exemple : buttée anti-sismique.

Câble

Assemblage de fils d'acier élémentaires ou de torons, répartis en une ou plusieurs couches éventuellement autour d'un fil ou d'un toron central.

Cachetage

Mortier placé au droit d'un ancrage de précontrainte pour le protéger de la corrosion.

Cadre

Armature de forme rectangulaire pour béton armé.

Cadre fermé

Ouvrage en béton armé à section rectangulaire.

Cage d'armatures

Ensemble d'armatures, préparé généralement en atelier, constituant une partie ou la totalité du ferrailage d'un élément en béton armé ou précontraint.

Caisson

Structure en forme de tube rectangulaire ou trapézoïdale, monocellulaire ou multicellulaire composé d'âmes et de membrures (hourdis) supérieures et inférieures.

Cantilever

Poutre rendue isostatique au moyen d'articulations. Un pont cantilever est constitué de consoles prolongeant une travée ou encastrées sur pile et de travées indépendantes s'appuyant sur ces consoles.

Centrale à béton

Équipement fixe de production industrielle de Béton Prêt à l'Emploi (BPE).

Cerce

Armature circulaire ou hélicoïdale, utilisée notamment pour le ferrailage des pieux.

Chainage

Ensemble d'armatures destiné à répartir les efforts dus à une ou plusieurs charges concentrées.

Chemise

Dispositif de protection d'un pieu, en forme de tube à base circulaire, généralement en acier et laissé en place après exécution.

Chevêtre

Élément horizontal situé en partie supérieure d'une pile et servant à l'appui du tablier d'un pont.

Ciment

Liant hydraulique en poudre. Mélangée avec de l'eau, la poudre fait prise et, en durcissant, solidarise les granulats pour constituer les bétons ou mortiers.

Cintre

Ouvrage provisoire permettant de supporter des structures en phase de construction.

Clavage

Partie d'ouvrage où est réalisée l'opération de clavage (voussoir de clavage).

Clavette

Petite pièce creuse en acier servant à coincer un fil ou un câble de précontrainte après sa mise en tension.

Clé

Partie centrale d'un arc ou d'une voûte, ou section médiane d'une poutre ou d'un tablier à inertie variable.

Coffrage

Moule utilisé dans la réalisation d'ouvrages en béton qui est retiré après la prise et le durcissement du béton.

Coffrage glissant

Coffrage mobile permettant de couler en continu un ouvrage en béton par glissement le long de la paroi déjà réalisée.

Colonne

Fût cylindrique vertical.

Cône d'ancrage

Pièce métallique pour l'ancrage d'une armature de précontrainte.

Connecteur

Pièce métallique assurant la solidarisation d'un élément de béton et d'une pièce métallique dans un ouvrage mixte acier-béton.

Console

Élément d'une structure en porte-à-faux.

Contre-béquille

Appui oblique d'un ouvrage de type PSBQ.

Contre-bordure

Partie en béton coulé en place ou préfabriqué et liée à la structure, destinée à buter la bordure de trottoir et à soutenir les dalles de couvertures.

Contre-corniche

Partie en béton coulée en place et liée à la structure destinée à ancrer la corniche lorsqu'elle est préfabriquée et à soutenir les dalles de trottoir.

Contre-flèche

Courbure donnée à une poutre lors de la construction pour compenser la déformation qu'elle va prendre sous l'effet des charges appliquées.

Contrefort

Nervure renforçant un mur de soutènement.

Corbeau

Saillie sur une paroi, destinée à soutenir une dalle ou une poutre.

Corniche

Élément de superstructure destiné à couronner le bord d'un ouvrage.

Coulis de ciment

Mélange fluide de ciment, d'adjuvants et d'eau pour le remplissage des joints et des fissures, ou l'injection des gaines de précontrainte.

Couronnement

Partie supérieure, parfois en saillie, d'un mur.

Crochet

Extrémité recourbée d'une armature de béton armé.

Culée

Ouvrage servant d'appui à l'extrémité d'un tablier assurant la double fonction de transmission des charges provenant du tablier et de soutien des terres.

Cure

Opération de protection du béton consistant à le maintenir dans l'état d'humidité nécessaire à son durcissement pour éviter sa dessiccation.

Dalle de transition

Dalle en béton armé reposant d'une part sur le remblai, d'autre part sur les corbeaux intégrés dans la partie arrière de la culée, recouverte par la chaussée et assurant la transition entre le tablier et le remblai d'accès.

Dalette de continuité

Partie d'un hourdis assurant une liaison entre deux travées indépendantes contiguës.

Dalot

Petit ouvrage hydraulique recouvert par une dalle.

Décoffrage

Opération d'enlèvement des coffrages dans lesquels a été coulé le béton, après durcissement de celui-ci.

Dispositif de retenue

Dispositif destiné à éviter la chute d'un usager depuis un ouvrage : garde-corps, destinés à retenir des piétons, barrières destinées à retenir des véhicules.

Durcissement

Étape dans l'évolution des mortiers et des bétons : après la prise, le matériau passe de l'état plastique à l'état solide et acquiert sa résistance.

Elancement

Rapport de l'épaisseur d'une structure à sa longueur. Pour un pont, l'élancement est le rapport de l'épaisseur du tablier et de la portée.

Elégissement

Evidemment pratiqué dans une structure (dalle, poutre...) pour l'alléger.

Embase

Partie basse intermédiaire située entre le fût et la semelle d'une pile.

Encastrement

Liaison entre deux éléments ne permettant ni déplacement, ni rotation de l'un par rapport à l'autre.

Encorbellement

Partie d'une structure en porte à faux.

Enrobage

Epaisseur du béton entre la surface du parement et l'armature la plus proche.

Entraîneur d'air

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, provoque dans le béton ou le mortier la formation de microbulles d'air. Réparties uniformément dans le mélange, elles améliorent la résistance au gel du béton durci.

Entretoise

Élément transversal permettant de rigidifier une structure à poutres et limiter les déformations de flexion et de torsion.

Epingle

Armature de béton armé ouverte, terminée par deux parties en crochet.

Etat-limite

Etat d'une structure au-delà duquel, la stabilité (état-limite ultime ou ELU) ou les conditions d'usage normal (état-limite de service ou ELS) ne sont plus assurées.

Etrier

Armature de béton armé fermée, à deux brins parallèles.

Event

Tube raccordé à une gaine de câble de précontrainte, destiné à permettre l'écoulement de l'eau, de l'air et du coulis lors de l'injection.

Extrados

Surface supérieure d'un tablier de pont.

Famille de bétons

Groupe de compositions de béton pour lesquelles une relation fiable entre les propriétés pertinentes a été démontrée ; cette démonstration étant consignée par écrit et conservée.

Ferraillage

Ensemble des armatures d'une pièce ou d'un élément de construction en béton armé.

Fil d'eau

Forme en creux destinée à collecter sur le bord de la chaussée les eaux pluviales jusqu'à un exutoire.

Fines

Eléments fins - quel que soit le constituant dont ils font partie (ciment, filler, sable, addition) - dont la dimension est inférieure à 0,063 mm.

Flambement

Instabilité de forme dans des pièces élancées soumises à un effort normal de compression.

Fléau

Partie d'ouvrage (construit par encorbellements successifs) constituée par deux consoles équilibrées, construites de part et d'autre d'un appui intermédiaire.

Flèche

Déformation d'une poutre sous l'action des charges.

Fluage

Déformation lente et irréversible d'un corps sous l'effet d'une force extérieure ou de son propre poids. Pour le béton, le risque de fluage - qui peut se manifester au jeune âge - diminue très rapidement dans le temps, avec l'accroissement des résistances. Les règles de calcul du béton armé prennent en compte forfaitairement les effets du fluage.

Fondation

Partie de l'ouvrage assurant la liaison entre l'appui et le sol. On définit deux types de fondations : superficielles ou profondes.

Formulation

Opération consistant à définir le dosage des divers constituants d'un béton, afin de satisfaire aux exigences, de résistances, de durabilité et d'aspect souhaitées.

Frette

Armature destinée à empêcher l'éclatement du béton sous l'effet des forces de compression.

Fruit

Inclinaison du parement d'un mur ou d'un appui de pont par rapport à la verticale.

Fumées de silice

Constituant éventuel des ciments et/ou addition éventuelles des bétons, composé de particules très fines (de l'ordre de 0,001 mm) présentant une très forte teneur en silice amorphe.

Fût

Partie cylindrique ou partie centrale d'une pile.

Gâchée

Quantité de béton frais obtenue en une seule opération de malaxage.

Gaine

Tube cylindrique entourant un câble de précontrainte.

Garde-corps

Dispositif de protection d'un passage pour piétons, on distingue les garde-corps pour piétons et les garde-corps de service.

Garde-grève

Mur faisant partie de la culée et destiné :

- à protéger les abouts des tabliers du contact des terres, en les retenant ; à tenir le joint de chaussée ;
- à supporter la dalle de transition le cas échéant.

Gargouille

Dispositif d'évacuation des eaux pluviales, traversant le tablier de telle sorte qu'elles ne coulent pas le long des parois de l'ouvrage.

Gousset

Renforcement triangulaire de l'angle de deux pièces perpendiculaires.

Granularité

Distribution dimensionnelle des grains d'un mélange granulaire. Elle est obtenue par l'analyse granulométrique.

Granulat

Matériau minéral granulaire apte à être utilisé dans du béton. Les granulats peuvent être naturels, artificiels ou recyclés à partir de matériaux précédemment utilisés en construction.

Granulat courant

Granulat ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique $> 2\ 000\ \text{kg/m}^3$ et $< 3\ 000\ \text{kg/m}^3$.

Granulométrie

Mesure de la granularité d'un granulat, c'est-à-dire de l'échelonnement des dimensions des grains qu'il contient, par passage de celui-ci à travers une série de tamis dont les dimensions sont normalisées.

Hauban

Câble généralement métallique, rectiligne, oblique supportant un tablier d'ouvrage.

Hourdis

Dalle en béton armé appuyée sur la totalité ou la quasi-totalité de son pourtour. On distingue le hourdis supérieur et le hourdis inférieur.

Hydratation des ciments

Phénomène chimique par lequel un ciment fixe l'eau de gâchage et enclenche les processus de prise puis de durcissement. Cette réaction s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon le type de ciment.

Hydrofuge de masse

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, réduit, après le durcissement du béton, l'absorption de l'eau par capillarité, et donc améliore l'étanchéité.

Hydrofuge de surface

Adjuvant qui, appliqué à la brosse ou pulvérisé sur la peau du béton après durcissement, imperméabilise superficiellement.

Injection

Action d'injecter du coulis dans une gaine ou des vides.

Insert

Élément fixé à l'intérieur du coffrage ou du moule avant le coulage du béton, destiné à assurer une fonction ultérieure dans la pièce produite : douille de fixation, rail d'ancrage, pièce de manutention, plaque de soudage, élément de levage, etc.

Intrados

Surface inférieure d'un tablier pont.

Joint

Dispositif ou matériau reliant deux parties initialement séparées : joint de chaussée, joint de dilatation.

Joint de chaussée

Dispositif placé entre la culée et le tablier, ou entre deux tronçons du tablier, pour permettre les déplacements relatifs, dus principalement aux variations de température, en assurant la continuité de la surface de la chaussée.

Joint de dilatation

Joint de structure, qui divise un ouvrage en plusieurs parties indépendantes de dimensions limitées, afin de reprendre les divers mouvements de la construction.

Joue

Partie latérale d'une poutre.

Laitier de haut fourneau

Sous-produit de la fusion en haut fourneau du minerai de fer. Selon que l'on opère ensuite un refroidissement lent ou rapide à l'eau, on obtient du laitier cristallisé - que l'on utilise en granulats - ou du laitier granulé - que l'on peut utiliser, après broyage, comme constituant du ciment ou addition du béton.

Liant hydraulique

Liant qui en présence d'eau fait prise et durcit.

Ligature

Liaison entre armatures.

Longrine

Poutre horizontale allongée reliant entre elles d'autres pièces ou servant de fondation.

Malaxage

Phase de la fabrication des bétons, au cours de laquelle sont mélangés les divers constituants dans une bétonnière ou un malaxeur.

Matrice

Panneau de matière plastique souple doté de motifs décoratifs en creux ou en relief, servant en peau de coffrage ou fond de moule pour couler des parements.

Mortier

Mélange de ciment, de sable et d'eau, éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Il se distingue du béton par son absence de gravillons.

Moule

Modèle en creux dans lequel on coule le béton frais qui, après durcissement et retrait du coffrage, aura pris sa forme. Les moules sont métalliques, en bois ou en diverses matières de synthèse.

Mur de soutènement

Ouvrage destiné à soutenir les terres.

Mur de tête

Mur composant une culée et servant à supporter les remblais.

Mur en aile

Prolongement, le long de la voie franchie, du mur sur lequel repose l'extrémité du tablier.

Mur en retour

Mur de tête sensiblement parallèle à l'axe de la voie portée.

Nervure

Renforcement faisant saillie allongée.

Ossature

Partie résistante d'un ouvrage.

Ouvrabilité

Qualité rendant compte de l'aptitude d'un béton à être mis en œuvre.

Pour les bétons courants, on l'apprécie par une valeur de consistance, qui est déterminée par l'affaissement au cône d'Abrams.

Ouvrage d'art

Ouvrage de génie civil destiné à l'exploitation d'une voie de circulation terrestre (voie routière ou ferroviaire), fluviale ou maritime.

Palée

Groupe de fûts généralement réunis par un chevêtre ou une traverse.

Parement

Face d'un élément de construction conçue pour rester apparente, qui peut faire l'objet de nombreux traitements mécaniques ou chimiques.

Paroi moulée

Paroi en béton armé coulée dans le sol ou constituée de panneaux préfabriqués mise en place dans une excavation du sol (fouille étroite et profonde) dont les parois sont maintenues provisoirement par une boue bentonitique.

Passage inférieur (PI)

Ouvrage qui porte l'infrastructure routière considérée.

Passage supérieur (PS)

Ouvrage qui passe au dessus de l'infrastructure routière considérée.

Passerelle

Ouvrage réservé aux piétons.

Patin

Partie d'une semelle de fondation.

Peau de coffrage

Surface interne du moule dans lequel est coulé le mélange. Sa qualité et son aspect déterminent ceux de la peau du béton.

Peau du béton

Surface externe d'un élément de construction, qui peut faire l'objet de nombreux traitements afin de modifier l'apparence du béton.

Perré

Revêtement des talus des culées remblayées.

Pervibrateur

Outil, couramment appelé “aiguille vibrante”, permettant la vibration interne, sur le chantier, d’un béton frais venant d’être coulé. Il s’agit d’un tube métallique (contenant un moteur et un élément vibrant), d’un diamètre de 25 à 100 mm, que l’on plonge manuellement dans le béton.

Pièce de pont

Poutre transversale réunissant les poutres principales d’un tablier et destinée à reporter sur celles-ci les efforts du hourdis.

Piédroit

Mur vertical ou légèrement incliné supportant la traverse supérieure d’un pont-cadre, d’une voûte ou d’un portique.

Pieu

Élément destiné à transmettre les efforts au sol de fondation en profondeur.

Pigment

Produit colorant broyé en poudre, introduit dans le mélange des constituants des mortiers et bétons pour les teinter dans la masse. Il s’agit essentiellement d’oxydes minéraux ou métalliques, ou de poudres organiques de synthèse.

Pile

Appui intermédiaire d’un pont.

Pile-culée

Pile enterrée sur toute sa hauteur, ou sur une grande partie de sa hauteur, servant d’appui d’extrémité.

Plaque d'about

Plaque en béton préfabriqué, placée aux extrémités des poutres pour assurer la diffusion de la précontrainte

Plastifiant

Adjuvant qui, introduit dans l’eau de gâchage, améliore l’ouvrabilité d’un béton en diminuant les frottements entre les grains du mélange

Ponceau

Petit pont voûté de franchissement de fossé.

Pont

Ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation. Suivant la nature de la voie portée, on distingue les ponts-routiers, autoroutiers et ferroviaires.

Pont-cadre

Pont courant en béton armé, généralement de petites dimensions, constitué, de manière solidaire, d’une traverse en partie supérieure (formant tablier), de deux murs d’appui (les piédroits), et d’une traverse inférieure (le radier).

Porosité

Volume des vides d’une matière poreuse en pourcentage (volume de pores remplis d’eau ou d’air par unité de volume du matériau).

Portée

Distance entre deux appareils d'appui successifs.

Portique

Structure porteuse composée de deux montants verticaux et d'une dalle (ou traverse) supérieure.

Post-tension

Technique de précontrainte consistant à mettre en tension les armatures de précontrainte - qui sont constituées de câbles d'acier à haute limite d'élasticité couissant à l'intérieur de conduits ou de gaines - après le durcissement du béton, par actionnement progressif de vérins.

Poteau

Élément porteur vertical de section cylindrique, carrée ou rectangulaire.

Poutre

Pièce allongée (de section rectangulaire trapézoïdale ou en forme de double T) porteuse formant, avec d'autres, l'ossature de l'ouvrage.

Poutre à treillis

Poutre dont l'âme est triangulée.

Poutre-caisson

Poutre en forme de caisson simple (mono-caisson) ou multiple (caisson multicellulaire).

Poutrelle

Petite poutre ou poutre préfabriquée en béton.

Précontrainte

Procédé qui consiste à appliquer des forces de compression à une structure en béton par mise en tension d'armatures.

Prédalle

Dallette préfabriquée en béton armé, servant de coffrage.

Pré-tension

Technique de précontrainte d'éléments préfabriqués, nommée également "par fils adhérents", consistant à mettre en tension les armatures de précontrainte avant le coulage du béton. Après durcissement de celui-ci, on libère la tension de l'armature, qui se transmet au béton par adhérence des fils ou torons en engendrant, par réaction, sa mise en compression.

Prise

Étape de l'hydratation des pâtes de ciment, mortiers et bétons, d'une durée comprise entre quelques minutes et quelques heures, durant laquelle le mélange des constituants se raidit et commence à acquérir sa résistance.

Produit démoulant

Produit anti-adhérent - huile minérale, résine, cire ou autre agent chimique - appliqué à la brosse ou pulvérisé avant le coulage sur les banches, les moules ou les peaux de coffrage, afin de faciliter le décoffrage et la réutilisation des coffrages.

Produit préfabriqué béton

Produit en béton conforme à une norme produit dont le coulage et la cure sont effectués dans un lieu différent de celui où il est utilisé.

Puits

Élément de fondation profonde, de grosses dimensions, exécuté en place.

Pylône

Élément, généralement vertical, supportant des câbles.

Radier

Dalle en béton posée sur le sol reliant les piédroits d'un cadre et assurant la fondation superficielle de l'ouvrage.

Rapport Eau/Ciment

Rapport en masse de la teneur en eau efficace à la teneur en ciment dans le béton frais.

Recouvrement

Zone du ferrailage où deux armatures se chevauchent et se transmettent les efforts.

Réducteur d'eau

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, réduit, à ouvrabilité constante, la teneur en eau, et par conséquent augmente les résistances mécaniques des bétons mortiers et coulis.

Réservation

Coffrage positionné dans la masse d'un ouvrage avant coulage du béton réservant des espaces localisés pour la mise en place ultérieure d'équipements complémentaires.

Résistance caractéristique

Valeur de résistance du béton en dessous de laquelle peuvent se situer 5 % de la population de tous les résultats des mesures de résistance possibles effectués pour le volume de béton considéré.

Retardateur de prise

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, augmente les temps de début et de fin de prise du ciment dans un béton, un mortier ou un coulis.

Retrait

Contraction du béton due à des phénomènes hydrauliques - évaporation ou absorption de l'eau de gâchage avant et au cours de la prise - et/ou thermiques - du fait du refroidissement postérieur à l'élévation de température qui accompagne l'hydratation du ciment, ou de variations climatiques.

Rotule

Liaison entre deux pièces, transmettant les forces et permettant les rotations dans toutes les directions, et ne permettant ni déplacement ni transmission de moment.

Selle

Pièce supportant des câbles ou des haubans, et permettant leur déviation.

Semelle

Dalle de béton reportant au sol de fondation ou aux pieux les efforts transmis par les piles.

Serrage

Étape de la fabrication des bétons, qui consiste, essentiellement par vibration, à chasser l'air et à optimiser l'arrangement des grains du mélange pour en améliorer la compacité.

Sommier

Pièce horizontale couronnant une culée ou une pile destinée à recevoir des charges concentrées et à les répartir.

Structures préfabriquées

Les structures préfabriquées sont caractérisées par l'utilisation d'éléments structuraux fabriqués ailleurs que dans leur position finale dans l'ouvrage. Dans l'ouvrage, ces éléments sont assemblés de manière à assurer l'intégrité structurale requise.

Superplastifiant

Adjuvant qui, introduit dans un béton, mortier ou coulis, améliore très nettement l'ouvrabilité du mélange, à rapport E/C constant.

Suspente

Pièce verticale reportant les efforts du tablier aux câbles d'un pont suspendu ou à l'arc d'un pont à arc.

Table de compression

Partie horizontale, supérieure ou inférieure, comprimée, d'une ossature.

Tablier

Partie d'un pont reposant sur les appuis (piles ou culées) et servant au franchissement.

Talon de mur

Partie arrière, côté terre, de la semelle d'un mur de soutènement en T renversé.

Talon de poutre

Partie inférieure d'une poutre en béton armé ou en béton précontraint.

Teneur en eau efficace

Différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats.

Teneur en eau totale

L'eau d'apport, plus l'eau contenue dans et à la surface des granulats, plus l'eau des adjuvants et des additions utilisée sous la forme de suspension, et toute eau résultant de l'ajout de glace ou de chauffage à la vapeur.

Tirant

Barre, ou câble, destiné à transmettre des efforts de traction.

Toron

Assemblage de fils élémentaires enroulés ensemble en hélice et répartis en une seule couche, éventuellement autour d'un fil central.

Un câble de précontrainte est constitué d'un (monotoron) ou de plusieurs torons.

Travée

Partie d'un ouvrage comprise entre deux appuis successifs.

Treillis

Nappe d'armatures à maille carrée ou rectangulaire.

Trottoir

Partie de l'ouvrage destinée à la circulation des piétons.

Vérin

Appareil hydraulique permettant d'exercer des efforts importants de poussée ou de traction.

Viaduc

Pont de grande longueur ou de grande hauteur.

Vibration

Opération de serrage du béton frais après sa mise en place, afin d'en améliorer la compacité. La vibration peut être interne ou externe au béton.

Viscosité

Caractéristique d'un matériau fluide tendant à s'opposer à son écoulement par gravité. Plus la viscosité d'un béton est faible, plus son ouvrabilité est bonne.

Vousoir

Élément d'un ouvrage en béton précontraint construit par encorbellements successifs.

Annexe 2

Ponts courants routiers en béton Éléments de prédimensionnement

Nota

Cette annexe s'inspire du document "Le Guide du projeteur d'ouvrage d'art" publié par le SETRA auquel il convient de se reporter pour toutes précisions.

Ponts routes à tablier sur appuis simples							
Type d'ouvrage	Gamme de portée			Élancement*		Observations	α^{**}
	Min	Courant	Max	sur pile	à la clé		
Ponts dalles en béton armé PSIDA							
Dalle rectangulaire	7 m	8 à 15 m	15 m	1/20		Travée isostatique	-
	7 m	8 à 15 m	15 m	1/26		2 travées continues	> 0,6
	6 m	8 à 18 m	20 m	1/28		≥ 3 travées continues	0,6 à 0,85
Ponts dalles précontraintes PSIDP							
Dalle rectangulaire	14 m	14 à 20 m	25 m	1/22 à 1/25		Travée isostatique	-
				1/28		2 travées continues	> 0,6
				1/33		≥ 3 travées continues	0,6 à 0,85
Dalle à larges encorbellements	15 m	18 à 25 m	30 m	1/22 à 1/25		Travée isostatique	-
				1/25		2 travées continues	> 0,6
				1/28		≥ 3 travées continues	0,6 à 0,85
Dalle poussée	15 m	10 à 20 m	25 m	1/23		-	0,65 à 0,70
Ponts dalle nervurée précontrainte de hauteur constante (≥2 nervures)							
Nervures larges	-	25 à 30 m	35 m	1/25		2 travées continues	0,6 à 0,85
				1/30		≥ 3 travées continues	-
Nervures étroites	-	25 à 30 m	40 m	1/15 à 1/20		2 travées continues	0,6 à 0,85
				1/17 à 1/22		≥ 3 travées continues	-
Ponts dalle nervurée précontrainte de hauteur variable (≥2 nervures)							
Nervures larges	-	35 à 45 m	40 m	1/20	1/30	2 travées continues	0,6 à 0,85
				1/24	1/42	≥ 3 travées continues	-
Nervures étroites	-	35 à 45 m	50 m	1/18	1/35	-	0,6 à 0,85

*Élancement : rapport entre la hauteur du tablier et la portée principale. $\alpha^{**} = \frac{\text{longueur travée de rive}}{\text{longueur travée adjacente}}$
Si le tablier est de hauteur variable, on distingue les élancements à la clé et sur pile.

Ponts routes à tablier sur appuis simples

Type d'ouvrage	Gamme de portée			Elancement*		Observations	α^{**}
	Min	Courant	Max	sur pile	à la clé		
Ponts à poutres							
PRAD Pré-tension	10 m	15 à 25 m	30 m	1/18 à 1/20 1/23 à 1/25		Travées isostatiques Travées continues	0,7 à 1 -
VIPP Post-tension	30 m	35 à 45 m	50 m	1/16 à 1/18-1/20		portées égales, si possible	- -
Poutrelles en acier, enrobées de béton armé							
Poutrelles enrobées	-	8 à 25 m		1/33 (S275) 1/40 (S355)		Travées isostatiques Travées isostatiques	- -
	-	10 à 30 m		1/38 (S275) 1/45 (S355)		Travées continues Travées continues	0,7 à 0,8 0,7 à 0,8

Ponts cadres et portiques routiers en béton armé

Type d'ouvrage	Gamme de portée			Elancement épaisseur	Observations
	Min	Courant	Max	-	-
Cadre PICF	-	2 à 10 m	12 m	1/32 + 0,125	-
Portiques PIPO-POD	8 m	10 à 20 m	22 m	1/40 + 0,100	Travées peu dissymétriques pour POD

Autres ponts routiers courants

Type d'ouvrage	Gamme de portée			Elancement épaisseur		Observations	α^{**}
	Min	Courant	Max	sur pile	à la clé		
Pont à béquilles PSBQ	-	20 à 40 m	50 m	1/23 à 1/28	1/33 à 1/38	3 travées portées en tête de béquilles	0,55 à 0,7 <0,6 avec contre béquilles
Structure voûtée en BA	2 m	2 à 8 m	13 m	ép. voûte 0,2 à 0,35 m		BA coulé en place ou préfabriqué	-

Annexe 3

Les différents types de ponts courants

Domaines d'utilisation

Spécificités de mise en œuvre

Atouts et particularités

3.1 - Ponts routiers et autoroutiers

■ Type de pont	PICF
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none">• Portées inférieures à 12 m• Biais supérieur à 65 grades
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none">• Epaisseur de la dalle supérieure 1/25 de l'ouverture biaisée
Atouts	<ul style="list-style-type: none">• Structure très résistante• Exécution facile• Utilisation possible sur sol médiocre
Particularités	<ul style="list-style-type: none">• Supporte un remblai d'épaisseur modérée (2 à 3 m)

■ Type de pont	PIPO
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none">• Portées comprises entre 10 et 20 m• Biais supérieur à 65 grades
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none">• Epaisseur de la dalle supérieure 1/25 de l'ouverture biaisée
Particularités	<ul style="list-style-type: none">• Structure sensible aux tassements différentiels entre piédroits• Supporte un remblai de l'ordre de 1 m

■ Type de pont	POD
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none">• Portées comprises entre 2 x 10 m et 2 x 20 m

■ Type de pont	PSBQ
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées de 20 à 40 mètres entre béquilles
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Permet le franchissement de brèches relativement larges • Particulièrement adapté lorsque la voie franchie est en fort déblai • Forme de qualité architecturale
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> • Emploi possible uniquement dans des bons terrains • Complexité du coffrage

■ Type de pont	PSIDA
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées comprises entre 10 et 20 m
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de réalisation
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité de la forme

■ Type de pont	PSIDP
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées comprises entre 15 et 30 m
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de réalisation
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité de la forme

■ Type de pont	DALLES NERVURÉES
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées comprises entre : <ul style="list-style-type: none"> - 25 et 30 m pour tablier de hauteur constante - 30 et 45 m pour tablier de hauteur variable • Biais entre 70 et 100 grades
Spécificités de mise en œuvre	Construction sur cintre

■ Type de pont	DALLES ÉLÉGIES
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées comprises entre 25 et 35 m

■ Type de pont	PONTS À POUTRES EN BÉTON ARMÉ
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées entre 20 et 25 mètres

■ Type de pont	PASSAGES INFÉRIEURS VOÛTES
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Ouverture de 2 à 13 mètres • Biais entre 70 et 100 grades
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrage coulé en place, partiellement ou entièrement préfabriqué • Importance de la qualité de réalisation des remblais latéraux
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrage adapté à des hauteurs de remblais importantes
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> • Structure sensible aux tassements différentiels entre l'ouvrage et le remblai • Ouvrage souple transversalement et rigide longitudinalement

■ Type de pont	PRAD
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées comprises entre 15 et 30 mètres
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Les poutres sont préfabriquées en usine et mises en place par des moyens de levage léger • Les entretoises et le hourdis sont coulés en place en une seule phase
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Structure s'affranchissant pendant la construction des contraintes de la brèche • Diminution des travaux sur site • Rapidité d'exécution (préfabrication des poutres en temps masqué) • Solution adaptée au franchissement réalisé sous circulation (brèves coupures de circulation pour mise en place des poutres)
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> • Solution adaptée à des travées de longueur sensiblement égale

■ Type de pont	VIPP
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées comprises entre 30 et 50 mètres
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Les poutres sont préfabriquées en général sur site et lancées à l'aide d'une poutre de lancement ou par des moyens de levage • Les entretoises et hourdis sont coulés en place
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrage adapté au franchissement de brèches importantes en sites difficiles d'accès • Mode de construction ne nécessitant pas de coffrage, prenant appui sur le sol
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> • Solution adaptée principalement à des franchissements rectilignes (adaptation au biais ou à la courbure du tracé possible)

Type de pont	BIPOUTRES MIXTES
Domaines d'utilisation	• Portées comprises entre 30 et 80 mètres

Type de pont	POUTRELLES ENROBÉES
Domaines d'utilisation	• Portée comprise entre 10 à 30 mètres
Spécificités de mise en œuvre	• 2 méthodes de construction : - mise en place des poutrelles en position définitive et bétonnage de la dalle béton - assemblage des poutrelles sur une aire de préfabrication mise en place par ripage ou poussage puis bétonnage de la dalle béton
Atouts	• Faible perturbation du trafic lors du franchissement de voies maintenues en circulation

3.2 - Ponts ferroviaires

Type de pont	CADRE EN BÉTON ARMÉ
Domaines d'utilisation	• Portée de 10 à 15 m
Spécificités de mise en œuvre	• Ouvrage coulé en place en trois phases : radier, piédroits, traverse supérieure
Atouts	• Ouvrage économique adapté à des sols de portance médiocre
Particularités	• Couverture de remblais importante pour de faibles ouvertures • Possibilité de mise en place par ripage ou par fonçage

Type de pont	PORTIQUE EN BÉTON ARMÉ
Domaines d'utilisation	• Portée de 8 à 18 m
Spécificités de mise en œuvre	• Ouvrage coulé en place en 4 phases : fondations, semelles, piédroits, traverse supérieure
Atouts	• Ouvrage économique
Particularités	• Ouvrage sensible aux tassements différentiels ou déplacements des fondations

Type de pont	DALLE EN BÉTON ARMÉ
Domaines d'utilisation	• Portée jusqu'à 15 m
Spécificités de mise en œuvre	• Les ouvrages isostatiques peuvent être préfabriqués • Les ouvrages continus sont réalisés en place sur étaieement général ou sur cintre
Atouts	• Coffrage simple • Tablier relativement mince • Solution économique

■ Type de pont	DALLE EN BÉTON PRÉCONTRAIT
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portée courante de 15 à 20 m
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Les ouvrages isostatiques peuvent être préfabriqués • Les ouvrages continus sont réalisés en place sur étaieement général ou sur cintre
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Coffrage simple • Tablier relativement mince • Solution économique

■ Type de pont	TABLIER À POUTRELLES ENROBÉES
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portée courante 20 à 30 m pour les ouvrages isostatiques, 25 à 35 m pour les ouvrages continus
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Béton coulé en place sur coffrage perdu reposant sur les ailes inférieures des poutrelles préalablement mises en place • Le tablier peut être : <ul style="list-style-type: none"> - coulé en place - mis en œuvre par ripage ou à l'aide d'engins de levage
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrage robuste supportant de lourdes charges • Facilité de réalisation au dessus de voies en circulation ou en exploitation
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> • Faible épaisseur du tablier • Réalisation de ponts biais possible • Ouvrage nécessitant une maintenance régulière (peinture anticorrosion des semelles inférieures des poutrelles)

■ Type de pont	TABLIER À POUTRES EN BA
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Travées comprises entre 20 et 25 m pour les ouvrages isostatiques et entre 25 et 30 m pour les ouvrages hyperstatiques
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrage réalisé sur place, sur étaieement général ou sur une aire de préfabrication et mis en œuvre par poussage
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Coût faible
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> • Tablier relativement épais

■ Type de pont	TABLIER À POUTRES EN BP PAR POST TENSION
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Travées comprises entre 20 et 35 m • Biais inférieur à 70 grades
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Les poutres sont coulées en place ou préfabriquées et mises en place par des engins de levage • Le hourdis est coulé en place sur des prédalles
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Cette solution permet des portées supérieures et des épaisseurs du tablier plus faible que la solution poutres en béton armé

Type de pont	TABLIER À POUTRES PRAD
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées comprises entre 15 et 30 m
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Les poutres sont préfabriquées en usine et mises en place par des moyens de levage léger • Les entretoises et le hourdis sont coulés en place en une seule phase
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • Structure s'affranchissant pendant la construction des contraintes de la brèche • Diminution des travaux sur site • Rapidité d'exécution • Solution adaptée au franchissement réalisé sous circulation
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> • Solution adaptée à des travées de longueur sensiblement égale • Les tabliers à plusieurs travées doivent être continus au droit des piles intermédiaires

Type de pont	TABLIER MIXTE ACIER BÉTON
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portées comprises entre 30 et 80 m
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Les poutres métalliques sont mises en place définitive, avec des moyens de levage ou par lançage à partir d'une culée • La dalle en béton est en général coulée en place par plots
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrages relativement légers • Nécessité d'un entretien régulier (peinture anticorrosion des poutres métalliques)

Type de pont	TABLIER À POUTRES LATÉRALES EN BP
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Portée de 25 à 40 pour les ouvrages isostatiques, 30 à 50 m pour les ouvrages continus
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrage pouvant être construit en place ou mis en place par poussage
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> • La distance entre le niveau des rails et la face inférieure du tablier est faible

Crédits photographiques et illustrations :

D. Lozach - E. Vallecillo - CIMBETON

Tous droits réservés

Mise en page et édition :

DBG Studios - S2974

Edition septembre 2005