

BÉTONS ET OUVRAGES D'ART

Tome 2

Les ponts courants en béton

**CERIB**Centre d'Études et de Recherches
de l'Industrie du BétonSyndicat National
du Béton Prêt à l'Emploi**FIB**

Fédération de l'Industrie du Béton

Syndicat National
du Pompage du Béton**CIM** *béton*CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

BÉTONS ET OUVRAGES D'ART

Tome 2

Les ponts courants en béton

Ce guide technique présente les principales solutions constructives pour la réalisation des ponts courants, à base de produits préfabriqués en béton ou en béton coulé en place. Il synthétise les principales recommandations relatives au pompage des bétons, à l'injection des câbles de précontrainte et aux conditions particulières de mise en œuvre des bétons.

Il précise les informations essentielles pour le contrôle et l'assurance de la qualité ainsi que la gestion des ouvrages.

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

Marc CHIGNON
Claude DERACHE
Patrick GUIRAUD
Philippe LASSEUR
Michel PIGEAT

Pour la FIB et le CERIB

Marc LAINE
Lionel MONFRONT
Pierre PASSEMAN
Patrick ROUGEAU

Pour le SNBPE et le SNPB

Daniel MARTINEZ
Jean-Marc POTIER
Benoît THOMAS

Nous remercions pour leur collaboration

Christophe AUBAGNAC - **LRPC D'AUTUN**
Jean Claude FERTE - **QUILLE**
Robert LEROY - **LAMI-ENPC**
Christian TRIDON - **STRRES**
Frédéric ZIRK - **Architecte**

Sommaire

● 1 - Différentes méthodes de construction des ponts courants en béton	9
1.1 - Différentes méthodes de construction	10
1.1.1 - Construction sur étalements	11
1.1.2 - Poutres préfabriquées	11
1.1.3 - Construction par poussage	12
1.1.4 - Construction par rotation	13
1.2 - Étalements	14
1.2.1 - Éléments coffrants verticaux pour voiles (piles, culées, murs de soutènement)	14
1.2.2 - Étalements verticaux	16
1.2.3 - Étalements horizontaux	17
1.3 - Contrôles des ouvrages provisoires	18
1.4 - Quelques procédés particuliers de construction	20
1.4.1 - Procédé d'autoripage	20
1.4.2 - Procédé de translation	22
1.4.3 - Procédé de construction par poussage (1-2-1)	22
1.4.4 - Passage supérieur en BHP	24
1.4.5 - Ouvrages mixtes	26

● 2 - Offre de l'industrie de la préfabrication	29
Éléments de structures et de superstructures	29
2.1 - Atouts de l'offre de produits préfabriqués en béton	30
2.2 - Offre structures	32
2.2.1 - Poutres Précontraintes par Adhérence	32
2.2.2 - Pièces de pont	37
2.2.3 - Dalles de pont	38
2.2.4 - Cadres	38
2.2.5 - Constituants de portiques	41
2.2.6 - Voûtes	42
2.3 - Offre parements et murs de soutènement	43
2.3.1 - Parements des piles et des pylônes	44
2.3.2 - Parements des culées	45
2.3.3 - Ouvrages de soutènement	47
2.4 - Offre superstructures	47
2.4.1 - Corniches de ponts	47
2.4.2 - Bordures et parapets	48
2.4.3 - Dispositifs d'évacuation des eaux	49
2.4.4 - Écrans acoustiques	49
2.5 - Perspectives et tendances d'évolution	50
2.5.1 - Atouts des BHP et des BAP	50
2.5.1 - Atouts des BFUP	51

● 3 - Coulis d'injection pour conduits de précontrainte	53
3.1 - Objectifs de l'injection des conduits	54
3.2 - Composition des coulis et spécifications sur les constituants	57
3.2.1 - Composition des coulis	57
3.2.2 - Spécifications sur les ciments, les additions minérales et les adjuvants	57
3.3 - Spécifications sur les coulis	58
3.3.1 - Spécifications générales	58
3.3.2 - Spécifications relatives à la rhéologie et la stabilité du coulis	59
3.4 - Essai sur tube incliné	60
3.5 - Environnement normatif et réglementaire	63
3.5.1 - Fascicule 65	63
3.5.2 - Procédure d'avis technique	63
3.5.3 - Principales normes	64
3.6 - Recommandations pour l'injection	66

● 4 - Contrôle et assurance de la qualité	67
4.1 - Notions générales sur la démarche qualité	68
4.2 - Rôles des différents acteurs en matière de qualité	70
4.3 - Référentiel qualité	72
4.4 - Contrôle extérieur	73
4.4.1 - Organisation	73
4.4.2 - Intégration du contrôle extérieur au déroulement des travaux	74
4.4.3 - Établissement du programme de contrôle extérieur et décomposition en lots de contrôle	74
4.4.4 - Contenu du contrôle extérieur	78
4.5 - Étapes majeures de la construction : points critiques, points d'arrêts	80
4.6 - Affectation des actions du contrôle extérieur	82
Approche par secteurs techniques	82
4.6.1 - Fondations des ouvrages	83
4.6.2 - Armatures passives	83
4.6.3 - Précontrainte par post-tension et injections des conduits de précontrainte	84
4.6.4 - Bétons coulés en place	84
4.6.5 - Produits préfabriqués en béton	87
4.6.6 - Équipements des ouvrages	91
4.6.7 - Épreuves réglementaires et inspection détaillée initiale	92

● 5 - Bétonnage par pompage des bétons	93
5.1 - Technique de pompage du béton	94
5.1.1 - Procédé de pompage	94
5.1.2 - Matériel de pompage	94

5.2 - Atouts du bétonnage par pompage des bétons	96
5.2.1 - Aspect qualité	96
5.2.2 - Rapidité de mise en œuvre	96
5.2.3 - Accessibilité	97
5.3 - Utilisation des pompes à béton	98
5.3.1 - Choix du matériel	98
5.3.2 - Configuration du chantier	99
5.3.3 - Essais de convenance	99
5.4 - Positionnement de la pompe, respect des consignes de sécurité	100
5.4.1 - Risques électriques	100
5.4.2 - Stabilisation, préparation du sol	101
5.4.3 - Sécurité au sol dans l'environnement immédiat de la pompe	101
5.4.4 - Équipements de Protection Individuels	101
5.4.5 - Sécurité du personnel évoluant sur l'ouvrage	102
5.5 - Respect de l'environnement en fin de coulage	102
<hr/>	
● 6 - Optimisation de l'enrobage des armatures	103
6.1 - Incidence de la qualité de l'enrobage	104
6.2 - Enrobage minimal et enrobage nominal	105
6.3 - Philosophie de l'enrobage suivant l'Eurocode 2	106
6.4 - Enrobage minimal suivant l'Eurocode 2	107
6.5 - Processus de détermination de l'enrobage suivant l'Eurocode 2	108
<hr/>	
● 7 - Recommandations pour la détermination des classes d'exposition	115
7.1 - Notions de classe d'exposition	116
7.2 - Détermination des classes d'exposition pour chaque partie d'ouvrage	119
7.2.1 - Prise en compte des conditions climatiques - Classe XF	119
7.2.2 - Prise en compte de la localisation géographique de l'ouvrage Classe XS	123
7.2.3 - Prise en compte de l'exposition du béton à l'air et à l'humidité Classe XC	124
7.2.4 - Prise en compte de l'action des chlorures d'origine autre que marine - Classe XD	125
7.2.5 - Prise en compte du contact avec le sol et des eaux de surface ou souterraines - Classe XA	126
<hr/>	
● 8 - Mise en place des éléments de structures préfabriqués en béton	127
8.1 - Manutention et stockage	128
8.2 - Transport	131
8.3 - Réception des éléments sur chantier	131
<hr/>	

8.4 - Mise en place des éléments préfabriqués	132
8.4.1 - Dispositifs de sécurité et de stabilisation	133
8.4.2 - Clavage et bétonnage de deuxième phase	135
<hr/>	
● 9 - Conditions particulières de mise en œuvre du béton	137
9.1 - Vibration du béton	138
9.1.1 - Rôle de la vibration	138
9.1.2 - Matériels de vibration	138
9.1.3 - Règles de la vibration	139
9.2 - Bétonnage par temps chaud	139
9.2.1 - Incidence de la température	140
9.2.2 - Précautions à prendre pour le bétonnage par temps chaud	141
9.3 - Bétonnage par temps froid	144
9.3.1 - Incidence de la température	144
9.3.2 - Effet du gel sur le béton frais	145
9.3.3 - Précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid	145
9.4 - Recommandations pour l'exécution des reprises de bétonnage	148
9.4.1 - Définition	148
9.4.2 - Précautions à prendre pour l'exécution des reprises de bétonnage	149
9.5 - Cure du béton	151
9.6 - Bétonnage de formes complexes et d'ouvrages à forte densité de ferrailage	152
9.6.1 - Bétons classiques	152
9.6.2 - Bétons Autoplaçants	153
9.7 - Bétonnage d'ouvrages massifs	153
9.8 - Maturométrie	154
9.8.1 - Historique	154
9.8.2 - Principe de la maturométrie	155
9.8.3 - Domaines d'application de la maturométrie	156
9.9 - Bétons Autoplaçants	157
9.9.1 - Recommandations pour la formulation, la fabrication et le transport	157
9.9.2 - Recommandations pour la mise en œuvre	158
9.10 - Conditions de décoffrage	160
<hr/>	
● 10 - Gestion des ouvrages d'art	161
10.1 - Généralités	162
10.2 - Le patrimoine des ouvrages d'art	162
10.2.1 - Qui sont-ils ?	162
10.2.2 - Combien sont-ils ?	163
10.2.3 - À qui appartiennent-ils ?	163
10.2.4 - De quels matériaux sont-ils constitués ?	163

10.2.5 - Quel âge ont-ils ?	164
10.2.6 - Où sont-ils ?	164
10.2.7 - Qui les entretient ?	165
10.3 - Modèles de gestion	165
10.3.1 - Différents gestionnaires des ouvrages	165
10.3.2 - Moyens d'investigations	168
10.3.3 - Inspection détaillée	168
10.3.4 - Moyens d'investigations complémentaires	169
10.3.5 - Diagnostic	169
10.3.6 - Étude de réparation	170
10.4 - Grands principes de réparation	171
10.4.1 - Pathologies sur ouvrages béton	171
10.4.2 - Principes de réparation	172
10.5 - Conclusion	173

● 11 - Annexes	175
Annexe 1 : Normes et documents de référence	176
Annexe 2 : Éléments pour la mise au point du CCTP	184
Annexe 3 : Contenu des actions du contrôle extérieur	199
Annexe 4 : Exemple de bon de livraison	204

Chapitre

1

Différentes méthodes de construction des ponts courants en béton

- 1.1 - Différentes méthodes de construction**
- 1.2 - Étaisements**
- 1.3 - Contrôles des ouvrages provisoires**
- 1.4 - Quelques procédés particuliers de construction**

De nombreux procédés ont été mis au point au cours de ces dernières décennies, en optimisant les évolutions sur les performances des matériaux, les innovations des techniques de chantier et en exploitant les progrès constants des méthodes et moyens de fabrication.

Les ouvrages sont en général construits à leur emplacement définitif. Mais certaines contraintes spécifiques du site (difficultés d'accès, zones urbanisées, voies routières ou ferroviaires à franchir, rivière...) ne permettent pas de réaliser l'ouvrage dans sa position finale. Plusieurs techniques ont donc été développées pour le mettre à son emplacement définitif après son bétonnage, en le déplaçant par poussage, rotation, ripage... techniques innovantes s'adaptant aux franchissements les plus divers. Elles permettent une réalisation rapide des ouvrages avec une perturbation minimale du trafic de l'axe franchi.

La conception d'un ouvrage dépend beaucoup de son procédé de construction. Le procédé aura une incidence sur les dispositions constructives à respecter sur le chantier tels que les phasages de mise en précontrainte, les reprises de bétonnage.

Les méthodes d'exécution des ouvrages sont souvent sensiblement différentes lorsqu'il s'agit de réaliser un ouvrage sans contrainte extérieure ou s'il doit être réalisé avec maintien du trafic routier ou de l'exploitation de l'infrastructure ferroviaire.

1.1 - Différentes méthodes de construction

En général les ponts courants en béton sont construits à leur emplacement définitif, soit sur étaielements, soit sur cintres, selon qu'il faille ou non maintenir une circulation (avec passe charretière) pendant les travaux. Dans quelques cas, afin de réduire au minimum les aléas et servitudes dus au maintien de la circulation, des techniques permettent de réaliser l'ouvrage à proximité de son emplacement définitif, donc sans coupure ou gêne pour la circulation, puis en profitant d'une coupure programmée dans une période favorable (week-end prolongé, saison non touristique...), de le déplacer à sa position finale.

1.1.1 - Construction sur étaielements

Les ouvrages réalisés en béton coulé en place sont en général construits avec le phasage suivant :

- ▶▶ **réalisation des appuis** avec des systèmes de coffrages verticaux classiques de type banche (ces éléments coffrants doivent être stabilisés pour reprendre les efforts de poussée dus au vent en cours de travaux et au bétonnage) ;
- ▶▶ **mise en place :**
 - de l'étaielement vertical qui doit soutenir le poids de la structure du tablier en cours de réalisation et le poids des coffrages horizontaux ;
 - de l'étaielement horizontal à base de profilés s'appuyant en tête de l'étaielement vertical ;
 - des plateaux coffrants prenant appui sur les profilés :
- ▶▶ **ferrailage du tablier et éventuellement, mise en place des gaines de précontrainte ;**
- ▶▶ **bétonnage du tablier ;**
- ▶▶ **mise en précontrainte éventuelle du tablier ;**
- ▶▶ **décintrement des coffrages et enlèvement de l'étaielement général.**

Cette méthode de construction est celle qui est la plus couramment utilisée pour les ponts courants en béton. Elle est particulièrement adaptée pour la réalisation de ponts dalles, de cadres, de portiques coulés en place ou quand le tablier est situé à faible hauteur au-dessus d'un sol de bonne portance et qu'il n'y a pas de contrainte d'occupation de la brèche à franchir.

Les étaielements constituent un ouvrage provisoire, dont il convient d'assurer la stabilité (de la structure et de ses appuis et fondations) pendant toutes les phases de travaux. Il faut aussi prendre en compte sa déformabilité et compenser par des contre-flèches de construction, les déformations générées lors du bétonnage.

1.1.2 - Poutres préfabriquées

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

Deux types d'ouvrages sont principalement réalisés avec cette méthode :

- ▶ **Les ouvrages autoroutiers** (passages supérieurs et inférieurs) de faible portée constitués, soit de poutres en béton armé, soit de poutres précontraintes par prétension (poutres PRAD).
- ▶ **Les ouvrages de portées moyennes** dont les poutres sont en béton précontraint par post-tension.

Les avantages de ce type d'ouvrage résident essentiellement dans leur rapidité d'exécution et leur caractère économique dans le cas d'ouvrages répétitifs permettant une industrialisation de la fabrication.

1.1.3 - Construction par poussage

La technique du poussage consiste à construire le tablier par éléments successifs (tronçons), sur une ou deux aires de préfabrication situées à l'arrière d'une ou des deux culées, dans le prolongement de l'ouvrage définitif. Au fur et à mesure de la réalisation des tronçons, le tablier est successivement déplacé par poussage en glissant sur ses appuis, jusqu'à sa position définitive.

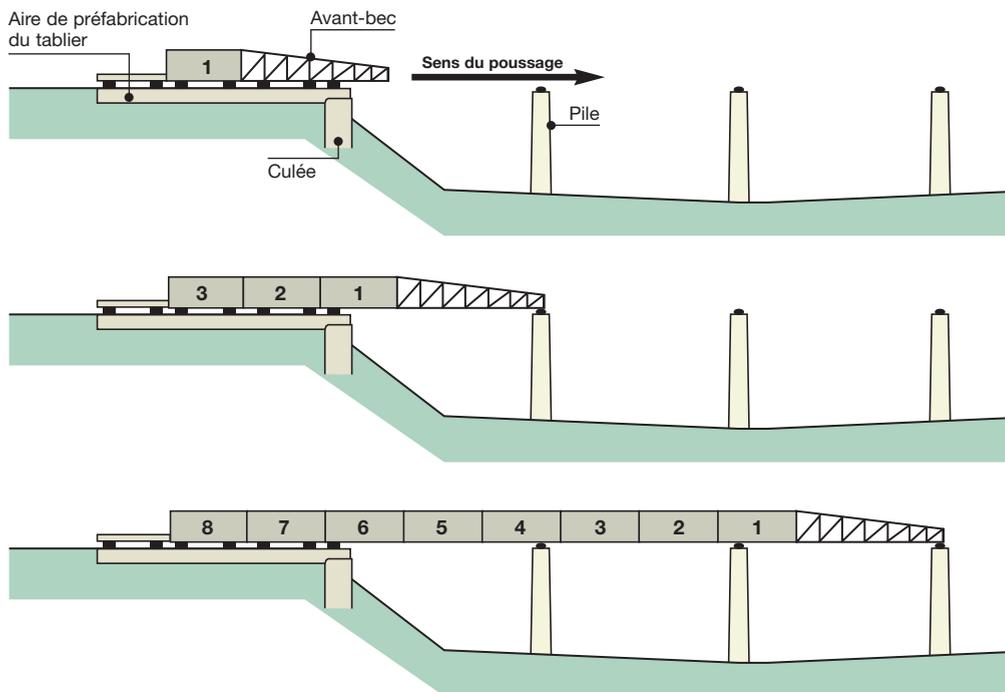


Figure n°1 : Construction par poussage

Afin de limiter les efforts de porte-à-faux lors des opérations de poussage et faciliter le franchissement des appuis, l'extrémité du tablier est équipée, généralement, d'un avant-bec métallique.

La portée courante des ouvrages à travées multiples poussés d'un seul côté, est généralement comprise entre 40 et 50 m. La grande portée des ouvrages poussés à partir des deux rives atteint couramment 70 à 80 m.

Les avantages de ce type de construction sont liés à sa rapidité d'exécution, à la construction du tablier sur une aire facilement accessible, à une simplification, d'où un faible coût du coffrage et à l'absence d'échafaudage dans la brèche. Cette solution se justifie particulièrement lorsque la brèche est d'accès difficile ou impossible (piles de grande hauteur par exemple). Elle permet de réduire la gêne aux usagers dans le cas d'ouvrage construit sous circulation. Elle est adaptée aux tabliers rectilignes ou courbes en plan ou en long.

1.1.4 - Construction par rotation

Quand un ouvrage franchit une brèche, au-dessus de laquelle il est impossible ou coûteux de construire directement (ouvrage sous circulation, franchissement de rivière), celui-ci peut être réalisé par moitié sur chacune des deux rives (ou entièrement sur une rive), parallèlement à l'axe de la brèche et amené ensuite à son emplacement définitif par rotation autour de ses appuis.

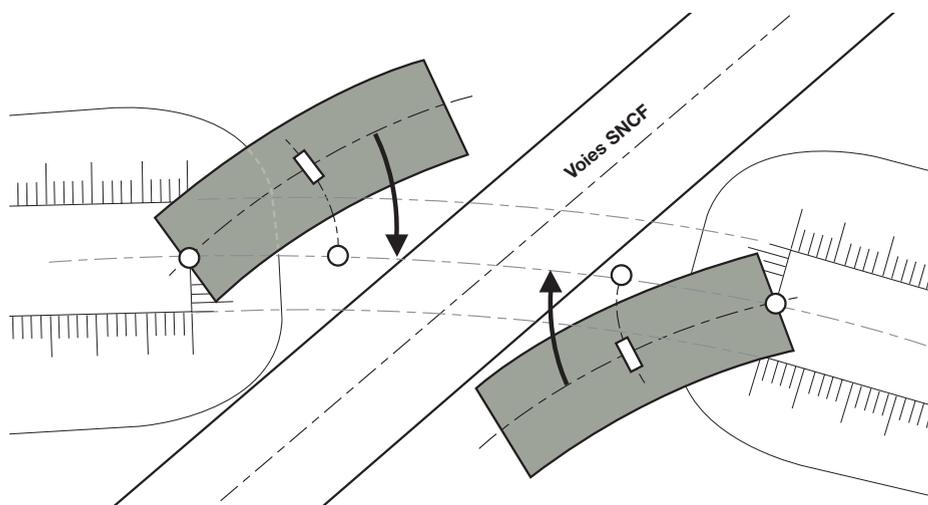


Figure n°2 : Construction par rotation

1.2 - Étaisements

Les étaisements sont des structures provisoires destinées à supporter l'ouvrage (poids propre du béton et des coffrages) pendant la phase de construction, avant que le béton ait acquis une résistance suffisante.

1.2.1 - Éléments coffrants verticaux pour voiles (piles, culées, murs de soutènement)

Les éléments coffrants verticaux sont toujours constitués par :

- ▶ **une peau coffrante en bois ou métallique** qui donne l'aspect final du parement ;
- ▶ **une ossature qui porte la peau coffrante** et définit la surface à réaliser : c'est l'élément résistant au poids propre, à la poussée du béton et aux charges de service (personnel, vent, manutention...) ;
- ▶ **des tiges d'entretoises, des béquilles de stabilité, des étaisements...** ;
- ▶ **des éléments de sécurité, intégrés ou indépendants**, permettant au personnel de travailler en toute sécurité (échelles d'accès, passerelles de travail ou plateformes de bétonnage, garde-corps, etc.).

L'ossature est constituée d'entretoises horizontales et de raidisseurs verticaux. La rigidité de l'ossature limite les déformations sous les poussées du béton frais.

L'ensemble peau coffrante / ossature / passerelles et leurs accès est dénommé banche (il est dit équipé lorsque la banche est munie de ses équipements de stabilité, de manutention et de sécurité complémentaire).

Nota

Les équipements de stabilité (étais / tirant-poussant et lest d'ancrage) sont déterminés pour des valeurs préconisées de vents de 110 km/h avec un coefficient de sécurité de 1,5 pour les étais et leurs fixations.

La norme NF P 93.350 définit en particulier les actions à prendre en compte et les sollicitations pour le dimensionnement à la stabilité des banches sous les effets du vent. La manutention des banches est stoppée dès que le vent dépasse 60 km/h.

Le phasage de réalisation comporte les étapes suivantes :

- ▶▶ **implantation du voile à réaliser ;**
- ▶▶ **mise en place d'une banche munie de son dispositif de stabilité ;**
- ▶▶ **mise en place du ferrailage et des inserts éventuels ;**
- ▶▶ **fermeture du coffrage ;**
- ▶▶ **serrage par les tiges de liaison traversantes ;**
- ▶▶ **coulage du béton ;**
- ▶▶ **décoffrage par :**
 - enlèvement des tiges traversantes,
 - déplacement des coffrages à la grue.

Des ensembles polyvalents compatibles permettent de réaliser différentes formes de coffrage et de constituer des ensembles monolithiques de grandes dimensions, intégrant systématiquement les dispositifs de sécurité.

La mise en œuvre du béton se fait de manière adaptée :

- ▶▶ **goulotte ou benne à manchette ou à la pompe ;**
- ▶▶ **coulage par couches horizontales** (épaisseur comprise entre 30 et 60 cm) ;
- ▶▶ **vibration de chaque couche en la liaisonnant à la couche précédente.**

Nota

Dans ce cas d'utilisation de béton autoplaçant, il y a lieu de prendre en compte une poussée hydrostatique pour le dimensionnement des coffrages, de l'ossature et des tiges traversantes.

La plupart du temps, la peau coffrante est constituée par des panneaux de contreplaqué. Pour obtenir un parement de meilleur aspect et permettre un nombre plus élevé de réemplois, on utilise des contreplaqués filmés (30 réemplois). Pour des chantiers plus importants, avec un nombre de réemplois élevé des coffrages (jusqu'à 300), on utilise des peaux coffrantes métalliques.

1.2.2 - Étaisements verticaux

Les étaisements verticaux, parfois appelés palées, tours, sapines, supportent la structure en cours de réalisation. Ils sont constitués d'un assemblage de pièces simples, modulables et réglables en longueur et en hauteur :

- ▶ **soit d'éléments à base de tubes et raccords par boulons et clavettes.** Cette solution d'une grande souplesse permet de réaliser des structures très diverses et complexes mais nécessite une forte consommation de main-d'œuvre qualifiée ;
- ▶ **soit d'éléments préfabriqués par modules** s'assemblant entre eux pour former des tours, soit isolées, soit groupées. Leur utilisation est fréquente du fait de leur conception simple, de leur facilité de montage et de démontage et de leur conformité aux exigences de sécurité. Cette solution nécessite moins de main-d'œuvre.

Les tours d'étaisement font l'objet de la norme NF P 93-550, elles sont équipées :

- ▶ **en tête, de vérins à vis** permettant de régler les niveaux des têtes des tours de manière fine, avec des profilés posés sur des sabots en tête des tours ;
- ▶ **en pied, de vérins à vis** venant compléter le réglage de niveau des tours. Les vérins de pied reposent sur des éléments de répartition des charges au sol tels que patins en bois, dalles préfabriquées, etc., dont le dimensionnement est déterminé en fonction de la capacité portante du sol. Ces vérins facilitent ensuite le décentrement général pour l'enlèvement des coffrages et des étaisements.

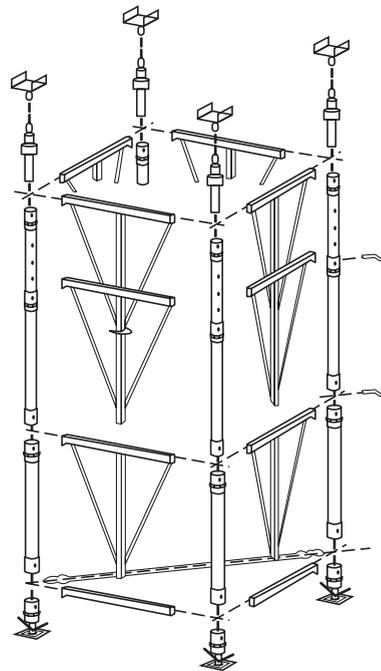


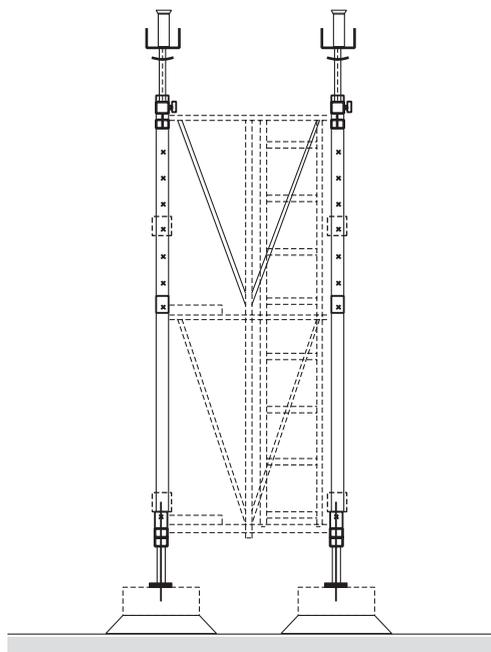
Figure n° 3 : Tour type

Les étaitements verticaux sont utilisés dans les zones où le terrain est sensiblement plan. Dans les zones de talus, la solution consiste à appuyer d'un côté les profilés sur des tours et de l'autre côté sur des consoles métalliques ancrées dans les chevêtres des culées.

Dans le cas de passes-charretière, les tours sont espacées et supportent des cintres, le plus souvent constitués de profilés de type HEB ou HEM, de façon à dégager l'emprise au sol et libérer un gabarit de circulation.

Dans le cas de sols de faible portance, les tours reposent directement sur les fondations définitives.

Figure n° 4 : Tour type



Le choix de la solution d'étalement se fera donc en fonction des charges à porter, des portées de l'ouvrage, des exigences de gabarit, de la portance du sol, de la géométrie du site et de la technique de réalisation retenue.

1.2.3 - Étaitements horizontaux

Les étaitements horizontaux, constitués en général de plateaux coffrants, s'appuient sur des profilés ou des cintres triangulés prenant appui sur les étaitements verticaux.

Afin d'améliorer la sécurité du personnel, les entreprises mettent en œuvre des solutions permettant de limiter les postes de travail en hauteur, tels que des plateaux coffrants réalisés au sol et posés à la grue sur une ossature à base de profilés. Cette solution améliore la sécurité lors des phases de décoffrage des plateaux puis d'enlèvement des étaitements qui sont des opérations à risques.

Pour le décoffrage les entreprises utilisent régulièrement des solutions globales à base :

- ▶ **de palonniers** permettant l'enlèvement de l'ensemble tours / plateaux coffrants par soulèvement et ripage ;
- ▶ **de roulettes** disposées sous les tours pour assurer le ripage au sol de l'ensemble "tours / plateaux coffrants" ;
- ▶ **de suspentes** permettant, à partir du tablier réalisé, une dépose verticale des éléments coffrants avec des moyens mécaniques ou hydrauliques.

1.3 - Contrôles des ouvrages provisoires

Les systèmes "étaie vertical - étaie horizontal - coffrages" sont des ouvrages complexes même s'ils ne sont que provisoires. Ils nécessitent donc une étude complète par un bureau d'études spécialisé pour éviter tout défaut, soit de conception, soit de réalisation. En effet, il existe un risque d'effondrement lors du bétonnage avec :

- ▶ **une grande masse en tête des tours** pouvant atteindre 4 tonnes par m² ;
- ▶ **une grande hauteur des tours**, habituellement de 5 à 6 mètres mais pouvant atteindre 10 mètres ;
- ▶ **une capacité portante** du sol très variable selon le site, ce qui nécessite de vérifier :
 - la pression admissible sous chaque appui conduisant à prévoir des semelles de répartition (platines d'appui, longrines par pièces en bois ou dalles en béton...)
 - le tassement admissible, ce qui peut remettre en cause le principe de fondation des tours ;
- ▶ **l'environnement du chantier** (passes charretières...)
- ▶ **parfois des risques d'affouillement** (pluie, nappe) pouvant nécessiter des protections particulières (polyane, béton projeté).

La mise en œuvre ne doit donc en aucun cas faire l'objet de la plus petite improvisation, que ce soit dans la phase de construction par le chantier ou dans la phase de conception par le bureau d'études méthodes (celui-ci doit réaliser notes de calcul et plans méthodes détaillés).

Les notes de calcul prennent en compte les données d'entrée, telles que les charges de service, les charges dynamiques, les surcharges accidentelles (déchargement localisé d'une benne à béton par exemple), les charges climatiques (le vent par exemple), les caractéristiques mécaniques du sol d'appui, le type de partie coffrante qui va influencer sur la transmission des efforts et des charges.

Les plans méthodes prennent en compte, par des contre-flèches calculées, les déformations, lors des opérations de bétonnage, des profilés et coffrages. Celles-ci sont limitées à 2 cm ou à 1/300 (si supérieures à 2 cm) en ce qui concerne les profilés. Lors de l'utilisation de cintres triangulés plus déformables, il est pris en compte la déformabilité du cintre pour la détermination des contre-flèches.

Les contrôles de l'étaielement se font à trois niveaux sur le chantier :

- ▶▶ **contrôle interne par les responsables du chantier** (conducteur de travaux et chef de chantier) ;
- ▶▶ **contrôle externe formalisé et réalisé par le COP** (Chargé des Ouvrages Provisoires) désigné sous la responsabilité du Chef d'Entreprise ;
- ▶▶ **contrôle extérieur par la Maîtrise d'œuvre.**

Ces contrôles portent sur :

- ▶▶ **le respect des plans d'étaielement émis par le bureau d'études méthodes ;**
- ▶▶ **les défauts éventuels de liaisonnement ou de contreventement ;**
- ▶▶ **la stabilité ;**
- ▶▶ **l'état du matériel de coffrages et d'étaielements** (déformations permanentes, vétusté...) ;
- ▶▶ **le respect des règles de l'art** (sécurités collectives et individuelles, propreté, désordres).

1.4 - Quelques procédés particuliers de construction

Des procédés particuliers de construction consistent à construire l'ouvrage à proximité de son emplacement définitif, avant de le mettre en place à sa position finale.

Ces techniques particulières sont en général mises en œuvre, soit pour réaliser, soit pour remplacer un ouvrage dans des délais très courts en limitant au minimum la gêne aux usagers et les perturbations du trafic.

1.4.1 - Procédé d'autoripage

Cette technique, mise au point par l'entreprise JMB, est adaptée pour la réalisation d'ouvrage devant assurer le franchissement de voies routières ou ferroviaires en service.

L'ouvrage en béton, en général un cadre ou un portique, est dans ce cas, construit sur étaielements (par ouvrage complet ou sous forme de demi-ouvrages jumeaux) sur une aire de préfabrication proche de son emplacement définitif.



Pendant une coupure du trafic, la zone à franchir est terrassée. L'ouvrage est alors mis à son emplacement définitif par ripage, par fonçage ou à l'aide de puissants moyens de manutention.



Le phasage des travaux comprend :

- ▶▶ **la réalisation d'un radier de guidage provisoire** destiné à guider l'ouvrage pendant son ripage et à reprendre la totalité des efforts de poussage,
- ▶▶ **la construction de l'ouvrage à proximité** et au plus près de son emplacement définitif,
- ▶▶ **le terrassement général au jour J** après coupure des circulations,
- ▶▶ **le ripage de l'ouvrage** à l'aide d'une précontrainte ancrée à l'arrière sur les queues nervurées des semelles de l'ouvrage et à l'avant sur les nervures du radier de guidage. Un coulis de bentonite permet de réduire les efforts de frottement entre le radier de l'ouvrage et soit le radier de guidage, soit le terrain.
- ▶▶ **la remise en service de la circulation** au jour J + 2 ou 3.

On procède ensuite, selon le cas, à la reconstruction de la chaussée ou à la pose du ballast et des voies ferroviaires.

Cette solution ne nécessite qu'un temps réduit de mise en place de l'ouvrage, elle permet de réduire le plus possible l'interruption de la circulation (généralement effectuée de nuit ou lors d'un week-end) et donc la perturbation du trafic.

Elle est principalement utilisée pour la réalisation de ponts-rail sous voies SNCF ou le remplacement d'ouvrage en service. Le surcoût de réalisation est très largement compensé par le gain sur les ralentissements des convois et les travaux d'aménagement par rapport à une solution classique.

1.4.2 - Procédé de translation

Cette technique consiste à réaliser l'ouvrage dans sa totalité, à proximité des voies routières ou ferroviaires, avec le phasage suivant :

- ▶ **réalisation de l'ouvrage ;**
- ▶ **mise en place des poutres porteuses** (en béton ou constituées de profilés métalliques) destinées à supporter l'ouvrage pendant sa translation ;
- ▶ **mise en place des chariots moteurs** sous les poutres porteuses ;
- ▶ **terrassements généraux des voies à franchir au jour J**, après coupure de la circulation ;
- ▶ **levage de l'ouvrage** à l'aide des chariots et déplacement par roulage au sol de l'ensemble jusqu'à l'emplacement définitif ;
- ▶ **mise en place de l'ouvrage** à sa position définitive au centimètre près et finitions ;
- ▶ **remise en circulation** au jour J + 1 à 3 ;
- ▶ **dépose des poutres porteuses.**

La distance de transport de l'ouvrage n'est pas limitée (de quelques mètres à quelques centaines de mètres), l'ouvrage peut être construit dans une position quelconque par rapport à son emplacement définitif.

1.4.3 - Procédé de construction par poussage (1-2-1)

Les ouvrages franchissant une autoroute sont en général à trois travées continues, avec des travées de rive ayant une longueur comprise entre 0,5 et 0,55 fois la longueur de la travée centrale.

Cette méthode consiste à réaliser chaque demi-tablier sur les remblais de part

et d'autre de l'autoroute, par "morceaux" ou voussoirs (avec en général un voussoir sur pile et un voussoir sur culée particuliers et des voussoirs courants). Les piles et les culées sont réalisées de manière traditionnelle.

La coupe transversale du tablier est constituée, en général, de plusieurs caissons (de 1 à 5) en fonction de la largeur de la voie.

Le cycle de construction est le suivant :

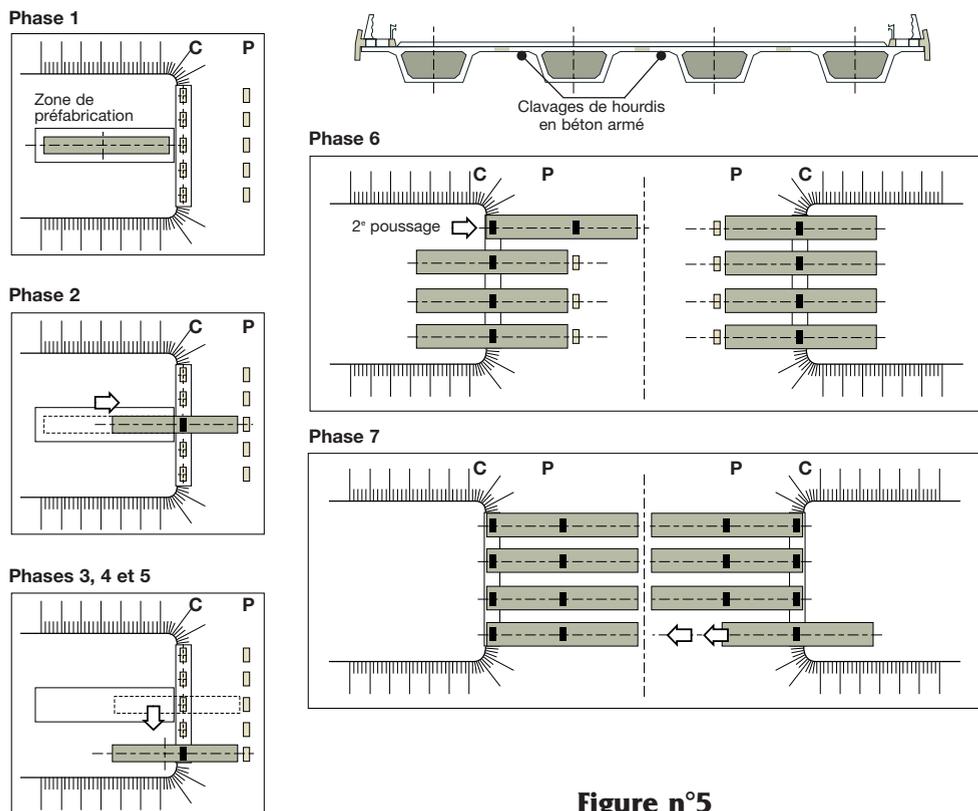


Figure n°5

Phase 1 :

- coulage d'un caisson du demi-tablier, voussoir par voussoir, sur le banc de préfabrication situé derrière chaque culée.
- mise en tension de la précontrainte "isostatique".

Phase 2 :

- premier ripage par poussage amenant le demi-tablier à cheval sur la culée.

Phase 3 :

- ripage latéral éventuel vers sa position de poussage au-dessus de l'autoroute.

Phase 4 :

- réalisation, de manière identique, des autres caissons formant le demi-tablier,

Phase 5 :

- idem pour le second demi-tablier, de l'autre côté de l'autoroute.

Phase 6 :

- poussage, au-dessus de l'autoroute, de chaque demi-caisson pour l'amener à une distance d'environ 50 cm de son homologue en vis-à-vis.

Phase 7 :

- clavage à la clé des différents caissons en vis-à-vis,
- mise en tension des câbles de précontrainte de continuité,
- clavage transversal en béton armé entre les caissons,
- équipement final de l'ouvrage (étanchéité, couches de roulement, corniches, dispositifs de sécurité,...).

1.4.4 - Passage supérieur en BHP

L'utilisation des Bétons à Hautes Performances (BHP) permet d'optimiser et d'alléger les structures, grâce à leurs résistances élevées, et d'offrir une grande durabilité.

Nota

Une solution BHP a été, par exemple, mise en œuvre dans le cadre d'un concours de conception de ponts types autoroutiers pour trois ouvrages de la rocade de BOURGES.

Le tablier est composé d'une ou plusieurs nervures selon sa largeur. Les nervures sont à inertie variable avec une section fortement réduite, en hauteur et en largeur, en section courante.

Les hourdis d'encorbellement (ou de liaison entre 2 nervures) sont préfabriqués et forment un caisson se présentant comme une boîte sans fond, constituée par :

- 2 nervures longitudinales de hauteur variable encastrées dans la (les) nervure(s),

- un tympan transversal formant coffrage pour le béton de la (les) nervure(s),
- une nervure disposée sous les dispositifs de sécurité,
- un hourdis de faible épaisseur reposant sur ses 4 côtés sur les nervures et les tympans.

La largeur des caissons de 2,50 m est déterminée par les contraintes de transport routier et par le calepinage des équipements de sécurité. Un clavage entre nervures longitudinales assure la continuité entre les caissons.

La précontrainte longitudinale des nervures est classique. Des entretoises en BHP sont coulées aux extrémités pour assurer la diffusion des efforts de précontrainte en about de tablier.

L'utilisation des caissons d'encorbellement préfabriqués permet une exécution simple et sécurisante (les ouvriers circulant sur les caissons) et simplifie les coffrages des nervures coulées en place par suppression des coffrages latéraux, avec uniquement un fond de moule pour la (les) nervure(s) posé sur un étaieement général. Les éléments de caisson reposent sur le fond de moule de la nervure d'un côté et sur une file d'étais de l'autre.

Le phasage de réalisation est le suivant :

- ▶▶ **étaieement,**
- ▶▶ **pose du fond de moule de la nervure,**
- ▶▶ **pose des caissons préfabriqués en béton,**
- ▶▶ **ferraillage et mise en place de la précontrainte,**
- ▶▶ **coulage de la nervure et des entretoises d'about,**
- ▶▶ **mise en précontrainte,**
- ▶▶ **finitions et mise en place des équipements.**

La solution peut s'adapter à toutes les longueurs de tablier avec une ou plusieurs travées et à toutes les largeurs de tablier avec une à trois nervures au plus.

Les avantages apportés par l'utilisation d'un Béton à Hautes Performances pour cette solution sont une réduction :

- du volume de béton d'environ 40 %,
- de la quantité de précontrainte d'environ 30 %,
- du poids du tablier d'environ 40 % (d'où une réduction des fondations),
- du délai d'exécution d'environ 20 %.

1.4.5 - Ouvrages mixtes

1.4.5.1 - Structures mixtes

Les tabliers des ponts routiers, autoroutiers ou ferroviaires mixtes acier-béton sont constitués de poutrelles métalliques longitudinales supportant une dalle en béton.

En coupe transversale, le tablier est constitué d'au moins 2 poutres longitudinales (pour des grandes largeurs de tablier, à partir de 12 mètres, on utilise en général au moins 3 poutres).

La dalle en béton assure la répartition transversale des charges. Elle peut être coulée en place sur des coffrages réutilisables fixes ou non (éventuellement sur des prédalles) ou constituée d'éléments de dalles préfabriquées en béton. Dans ce cas, pour les tabliers bi-poutres, la dalle préfabriquée couvre toute la largeur de l'ouvrage, des ouvertures au droit des poutres permettant la connexion avec celles-ci. Après pose, les ouvertures et les joints de clavage entre dalles sont bétonnés pour assurer la continuité de la dalle et la connexion aux poutres.

Le principe d'exécution est le suivant :

- ▶ **pose des poutres principales** sur leurs appuis définitifs avec leurs dispositifs antidéversement,
- ▶ **clavage des poutres** sur les appuis intermédiaires,
- ▶ **réalisation des hourdis** en béton coulé en place ou pose des dalles préfabriquées en béton,
- ▶ **finitions et mise en place** des équipements du tablier.

Dans certains cas, les poutres principales, assemblées par deux, peuvent être lancées, éventuellement avec un avant-bec, au-dessus des voies à franchir, de façon à ne pas gêner la circulation.

1.4.5.2 - Tabliers de pont à poutrelles enrobées

Le tablier d'un pont à poutrelles enrobées est constitué d'une dalle pleine en béton renforcée longitudinalement par des poutrelles laminées faiblement espacées (60 à 75 cm) et transversalement par des armatures à haute adhérence. L'ensemble "poutrelles + béton" forme une section mixte.

Le phasage de réalisation de ce type d'ouvrage est le suivant :

- ▶▶ **pose des profilés cintrés** en fonction des profils en long et des contre-flèches calculées sous charges permanentes ;
- ▶▶ **mise en place des coffrages perdus** en plaques de fibrociment sur les ailes inférieures des poutrelles ;
- ▶▶ **mise en place des barres d'écartement des profilés** pour assurer la stabilité au bétonnage ;
- ▶▶ **mise en place des armatures transversales** en partie basse par enfilage dans des trous percés dans les âmes et en partie supérieure ;
- ▶▶ **mise en place des coffrages latéraux** ;
- ▶▶ **bétonnage** ;
- ▶▶ **finition et mise en place des équipements du tablier.**

Ce type de construction, essentiellement utilisé pour des ouvrages ferroviaires, est robuste et durable avec une réserve de résistance importante. La mise en œuvre est simple et ne nécessite pas d'étaie et perturbe donc très peu la circulation des voies franchies.





Chapitre

2

Offre de l'industrie de la préfabrication Éléments de structures et de superstructures

- 2.1 - Atouts de l'offre de produits préfabriqués en béton**
- 2.2 - Offre structures**
- 2.3 - Offre parements et murs de soutènement**
- 2.4 - Offre superstructures**
- 2.5 - Perspectives et tendances d'évolution**

2.1 - Atouts de l'offre de produits préfabriqués en béton

La technique de la préfabrication consiste à préfabriquer dans des usines (installations fixes utilisant des process de fabrication industrielle) des éléments en béton armé ou en béton précontraint, de les transporter sur les chantiers et de les assembler entre eux ou à des parties d'ouvrages coulés en place afin de constituer un ouvrage ou une structure.

Les éléments préfabriqués en béton, qu'il s'agisse de produits de structures ou de superstructures, sont de plus en plus utilisés pour la conception des ouvrages de génie civil, grâce à la mise sur le marché d'une large gamme de produits répondant aux contraintes esthétiques, techniques et économiques. Ils offrent des solutions constructives simples, économiques, durables et adaptées aux exigences essentielles des divers acteurs :

- ▶ optimisation du coût global de l'ouvrage (coûts d'investissement, d'entretien, de maintenance...),
- ▶ réduction des délais de conception et de réalisation,
- ▶ organisation de chantier simplifiée,
- ▶ respect des coûts et des délais de réalisation,
- ▶ mise en œuvre simple,
- ▶ réduction de la gêne aux usagers,
- ▶ optimisation de la pérennité de la structure et de la qualité globale de l'ouvrage,
- ▶ maîtrise de la qualité esthétique et de l'homogénéité des parements,
- ▶ choix d'une large palette de couleurs et de textures,
- ▶ respect de l'environnement.

La technique de construction utilisant des produits préfabriqués en béton offre déjà de nombreux avantages et progresse encore en autorisant une utilisation optimale des sections de béton par utilisation de la précontrainte ou de Béton à Hautes Performances. La flexibilité actuelle des outils industriels rend possible l'adaptation des moules aux exigences croissantes des projets.

De nombreuses innovations, tant au niveau des formulations des bétons que des traitements de surface de plus en plus sophistiqués, permettent d'offrir aux concepteurs une très large gamme de formes, de couleurs et de textures. Les process de fabrication permettent de garantir en termes d'aspect et de caractéristiques géométriques, la qualité attendue.

La grande majorité des ouvrages peut être construite tout ou partie par assemblage d'éléments préfabriqués.

La préfabrication s'accommode de toutes les méthodes de construction et propose des solutions associées à des parties de structures coulées en place.

La richesse des techniques, des procédés et la multiplicité des solutions et des applications font des composants en béton une technologie parfaitement maîtrisée et adaptée aux contraintes de la construction moderne.

La construction à partir d'éléments préfabriqués en béton, déjà bien connue et reconnue, offre des solutions toujours plus pertinentes pour la construction des ponts.

Son succès s'explique par ses atouts majeurs :

- ▶▶ fiabilité de la préfabrication et qualité des produits ;
- ▶▶ maîtrise de la mise en œuvre, respect des délais et sécurité ;
- ▶▶ esthétique des produits et des ouvrages ;
- ▶▶ contribution au développement durable ;
- ▶▶ optimisation technique et économique des produits et innovation.

2.2 - Offre structures

2.2.1 - Poutres Précontraintes par Adhérence

Nota

Documents de référence :

- Guide CIMBETON T80 :
"Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence PRAD"
- Guide CIMBETON T41 :
"Les ponts courants en béton" - Tome 1, paragraphes 2.2.8 et 2.3.8

Les poutres PRAD (Poutres Précontraintes par Adhérence), appelées aussi poutres précontraintes par fils adhérents ou par prétension, sont utilisées pour la réalisation :

- de ponts-routes (routiers et autoroutiers) appelés aussi ponts PRAD,
- de ponts et d'estacades ferroviaires appelés aussi ponts-rails Ra-PPAD,
- de couvertures de tranchées couvertes.

Les ponts-routes PRAD et les ponts-rails Ra-PPAD sont constitués de poutres PRAD solidarisées par un hourdis en béton coulé en place sur chantier (sur des coffrages perdus non participants). Les poutres sont reliées entre elles par des entretoises uniquement au niveau des appuis. Les poutres PRAD préfabriquées en usine sont de hauteur constante et leur espacement est de l'ordre de 80 cm à 1 m. Le hourdis a une épaisseur comprise entre 18 et 22 cm pour les ponts-routes, et de 25 cm pour les ponts-rails.

La solution poutres PRAD s'avère une solution économique en terme d'investissement, compte tenu, en particulier, de l'industrialisation de sa fabrication et de la rapidité de sa réalisation. L'optimisation de sa conception (armatures de précontrainte parfaitement protégées...) et la qualité des matériaux utilisés (poutres préfabriquées en usine) sont un gage de pérennité et autorisent un entretien minimum.



Les ponts PRAD sont devenus, depuis de nombreuses années, une solution classique pour la réalisation de ponts routiers ou autoroutiers dans la gamme des portées de 10 à 35 m (passages inférieurs, passages supérieurs, ouvrages à plusieurs travées isostatiques ou hyperstatiques).

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES PONTS PRAD

Le SETRA a publié en 1996 un guide de conception des ponts à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence PRAD. Ce guide remplace celui de 1973. Il traite en particulier des nouvelles dispositions à retenir pour les ponts à plusieurs travées mises en continuité sur piles intermédiaires.

En janvier 2001, le SETRA a publié le guide de calcul du programme PRAD-EL permettant de vérifier les tabliers des ouvrages de type PRAD de 1 à 6 travées continues. Ce programme permet la vérification des tabliers de ponts-routes et de ponts-rails.

La précontrainte étant introduite en donnée, les calculs justificatifs portent sur :

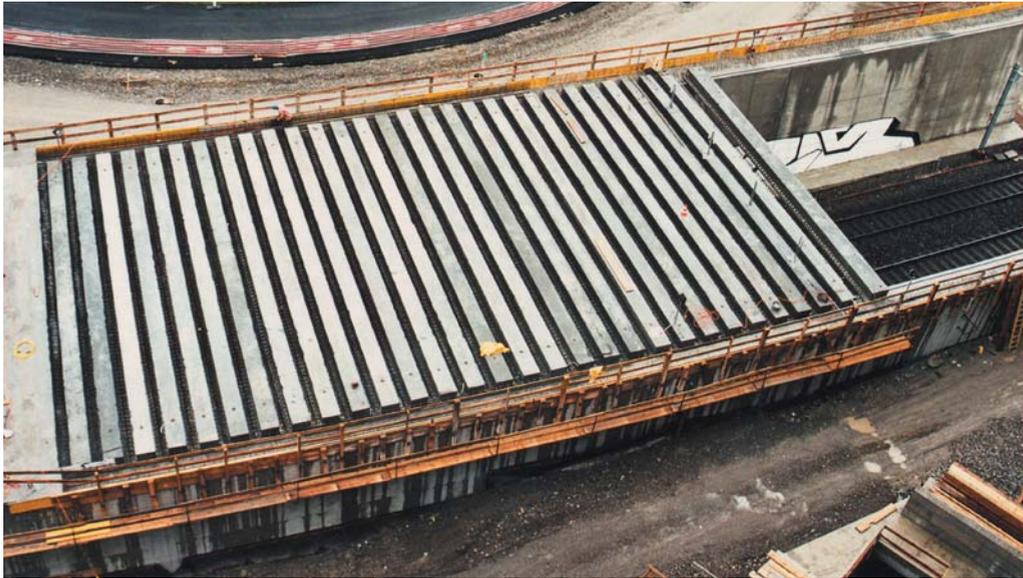
- le calcul des sollicitations globales et par file de poutres : flexion longitudinale, effort tranchant, réaction d'appui ;
- la détermination des contraintes normales et tangentes dans les poutres et le hourdis associé ;
- l'optimisation des aciers passifs de flexion longitudinale des poutres ;
- les armatures de cisaillement des poutres : cadres et étriers, connecteurs ;
- le ferrailage de flexion transversale et longitudinale du hourdis, y compris le hourdis en console ;
- les déformations : flèches et rotations.



Stockage provisoire en usine

Les poutres PRAD sont désormais utilisées pour la réalisation d'ouvrages ferroviaires (à une travée isostatique ou plusieurs travées hyperstatiques uniquement). Les premiers ponts-rails à poutres PRAD ont été réalisés sur la LGV Est en 2003 et 2004.

Les poutres PRAD peuvent aussi être utilisées pour la réalisation de la dalle supérieure de tranchées couvertes ou de couvertures phoniques. Elles permettent aussi la confection d'ouvrages cadres ou de portiques (PICF ou PIPO).



Deux types de section de poutres sont le plus couramment utilisés :

- les poutres de section rectangulaire (de largeur comprise entre 25 et 50 cm et de hauteur 30 à 80 cm) pour des ouvrages de portées allant jusqu'à 15 m, voire 20 m avec des Bétons à Hautes Performances (BHP) ;
- les poutres de section en I avec ou sans blochet (section rectangulaire au voisinage des extrémités) pour des portées allant jusqu'à 35 m (largeur des âmes comprise entre 15 et 20 cm et hauteur des poutres les plus utilisées comprise entre 80 et 120 cm).

Les poutres précontraintes par fils adhérents peuvent présenter d'autres types de section transversale tels que par exemple des profils en U ou en Π .

Les poutres PRAD sont réalisées en usine sur des bancs de préfabrication. Les armatures passives sont disposées dans des coffrages métalliques. Les armatures de précontrainte sont positionnées à l'aide de gabarits, fixées aux extrémités du banc puis mises en tension avant bétonnage : ancrage fixe à une extrémité, mise en tension de l'autre côté.

Les bétons confectionnés en usine présentent des performances mécaniques élevées (résistance à 28 jours supérieure à 40 MPa, souvent 50, voire 80 MPa).



La mise en précontrainte des poutres est obtenue par relâchement des câbles : la tension dans les câbles se transmet par adhérence au béton et engendre, par réaction, sa mise en compression. Elle est possible dès que le béton atteint une résistance en compression de 30 MPa. Cette résistance est obtenue généralement dans un délai de l'ordre de 16 heures grâce à un système d'étuvage ou un traitement thermique adapté.

La précontrainte permet d'optimiser les qualités de résistance et de durabilité des éléments en béton préfabriqués en usine.

La préfabrication des poutres en usine garantit le respect des délais d'exécution, la diminution de la durée des chantiers (fabrication des poutres en temps masqué) et une meilleure qualité (existence de plans d'Assurance-Qualité dans toutes les usines), d'où une meilleure pérennité des ouvrages.

La mise en place définitive des poutres se fait à l'aide de grues ou d'engins de levage légers (à des cadences de pose de l'ordre de 15 à 30 mn par poutre). Des dispositifs de sécurité permettent d'assurer la stabilité des poutres en phase de construction.



Après la pose des poutres, on procède à la mise en place des coffrages des hourdis centraux entre les poutres (en général coffrage perdu) et à celle, éventuellement, des encorbellements puis des coffrages des entretoises d'about.

Après mise en place des ferrailages transversaux et longitudinaux, on procède au bétonnage (en général en une seule phase) des entretoises et du hourdis. Pour les ouvrages hyperstatiques, on procède, après durcissement du béton, au transfert du tablier sur ses appuis définitifs.

Le tablier est ensuite équipé par des corniches, en général préfabriquées en béton (bénéficiant d'un traitement de surface architectonique), qui supportent les dispositifs de retenue.

Un nouveau type de tablier se développe depuis quelques années en France. Il est réalisé à l'aide de poutres précontraintes par fils adhérents en forme de T inversé. Les poutres sont posées côte à côte puis solidarisées entre elles par un béton de deuxième phase coulé en place entre les poutres et sur les poutres. Ces poutres peuvent être simplement appuyées (ouvrages isostatiques), mises en continuité sur piles intermédiaires (ouvrages à plusieurs travées continues) ou encastrées sur des piédroits (cadres ou portiques). On

constitue ainsi une dalle pleine monolithique précontrainte par fils adhérents. Ce procédé utilisant des poutres autocoffrantes (les parties inférieures servant de fond de coffrage à la partie coulée en place) permet de faciliter la réalisation des ouvrages, de réduire les délais de réalisation sur chantier et d'améliorer la sécurité des ouvriers. Ce type d'ouvrage (tablier à poutres jointives) est réalisé sans étaieement et ne nécessite qu'un faible apport de béton sur le chantier. Ce procédé est particulièrement adapté pour le franchissement de voies de circulation en service, de voies ferrées ou de cours d'eau pour des portées de l'ordre de 25 m.

Les poutres précontraintes par fils adhérents offrent de nombreux avantages : simplicité - rapidité de mise en œuvre - absence de coffrage et d'étaieement - faculté de construire en période hivernale - maîtrise des coûts - limitation du risque de dérapage des délais - entretien réduit - adaptabilité aux exigences esthétiques - sécurité.

Sur le chantier, l'utilisation de poutres préfabriquées permet de s'affranchir des problèmes de brèches par la suppression des étaieements et des échafaudages ainsi que des cintres. La pose des poutres préfabriquées se fait dans la majorité des cas avec des grues courantes, dans des délais très courts, ce qui ne nécessite que de brèves interruptions de la circulation lorsque le pont franchit une voie en service.

2.2.2 - Pièces de pont

L'utilisation de pièces de pont préfabriquées en Béton à Hautes Performances (résistance à 28 jours supérieure à 60 MPa minimum) permet, en particulier, un gain de temps, une simplification des phases de réalisation des ouvrages et une diminution de l'épaisseur moyenne du tablier entraînant son allégement



2.2.3 - Dalles de pont

Des dalles préfabriquées en béton armé peuvent être utilisées pour réaliser le hourdis supérieur de tabliers de structures mixtes, de ponts type VIPP (Viaduc Indépendant à Poutres Précontraintes) ou de ponts à dalles nervurées en béton. Elles sont réalisées en béton courant ou en Béton à Hautes Performances. Elles sont solidarisiées entre elles par des bétons de clavage coulés en place ou des joints conjugués (la forme des faces en regard des dalles présente des “clés” qui permettent le transfert des efforts de cisaillement - le profil de la dalle présente un creux du côté de la dalle contre-moule et une bosse du côté de la dalle coulée).



Elles sont ensuite connectées aux poutres ou aux nervures du pont afin de constituer une structure monolithique.

La préfabrication du hourdis à l'aide de dalles permet de supprimer l'utilisation d'un équipage mobile et surtout, pour des ouvrages réalisés sur circulation, d'assurer la sécurité au-dessus des voies de circulation sans nécessiter la réalisation d'un gabarit de protection lourde.

2.2.4 - Cadres

Les cadres préfabriqués en béton constituent des produits particulièrement bien adaptés pour la réalisation d'ouvrages de franchissement compte tenu de leur stabilité structurelle, de leur rigidité, de leur capacité à s'accommoder d'un sol de fondation de performances médiocres et de leur rapidité de mise en œuvre sur chantier.

Ils peuvent être mis en place sous des hauteurs de remblai modérées (de l'ordre de 2 à 3 m). Ils s'adaptent facilement à des ouvrages de biais modérés ($65 \text{ gr} \leq \varphi \leq 100 \text{ gr}$) et peuvent être utilisés pour des biais plus accentués moyennant des précautions de conception et de calcul.

L'offre de produits préfabriqués en béton est importante. L'Industrie du Béton propose plusieurs types de section aux dimensions adaptées.

Les cadres monolithiques préfabriqués en béton offrent des ouvertures de 1 à 6 m pour des hauteurs comprises entre 1 et 3 m et des longueurs de l'ordre de 2 à 4 m. Les cadres monolithiques conviennent pour de nombreuses utilisations : ouvrages hydrauliques et d'assainissement, passages inférieurs à gabarit réduit, galeries techniques...



Cadre monolithique préfabriqué en béton

Les cadres à assembler sur chantier permettent de réaliser des ouvrages de plus grandes dimensions (ouverture de 10 m et plus).

Les ouvrages cadres peuvent être réalisés dans des délais très réduits. Les divers éléments sont mis en œuvre sur un béton de propreté ou sur une couche de sable permettant d'assurer la répartition des charges. Le radier peut être constitué d'éléments préfabriqués ou coulé en place. La pose des éléments ne nécessite en général aucun étaielement.

Compte tenu de la grande variété de dimensions disponibles, les cadres peuvent être utilisés pour réaliser des passages inférieurs routiers et autoroutiers, des passages inférieurs ferroviaires, des passages à gabarit réduit, des ouvrages de dénivellation de carrefour, des passages piétons, des passages pour animaux, des ouvrages hydrauliques ou d'assainissement. Leur forme permet de dégager un gabarit optimal.



Ouvrage cadre à plusieurs travées



Ouvrage cadre à travée unique

Les épaisseurs des pénédroits et des traverses en béton sont de l'ordre de 15 à 30 cm.

Les nombreuses techniques de traitement de surface des bétons permettent d'offrir une grande variété de parements des cadres.

La cinétique de pose de cadres constitués de plusieurs composants préfabriqués est généralement la suivante :

- préparation du fond de forme (coulage d'un béton de propreté d'une épaisseur de l'ordre de 10 cm) ;
- pose des pénédroits (en vérifiant la parfaite position en alignement et en verticalité) ;
- réalisation du mortier d'appui des dalles ;
- pose des dalles de couverture ;
- réglage des dalles et scellement des liaisons dalles/pénédroits ;
- pose des éléments d'abouts ;
- réalisation des joints transversaux et longitudinaux ;
- pose des dalles de radier ;
- remblaiement.



Toutes les précautions doivent être prises, pour assurer la stabilité de l'ouvrage lors du compactage des remblais autour de l'ouvrage et pour drainer les eaux d'infiltrations.

2.2.5 - Constituants de portiques

Nota

Document de référence : Guide CIMBETON T41 :
"Les ponts courants en béton" - Tome 1 - Paragraphes 2.2.1 et 2.2.2

- ▶ **Les ouvrages type PICF** (Passage Inférieur en Cadre Fermé) peuvent être réalisés en associant des ouvrages cadres préfabriqués en béton entièrement ou partiellement (piédroits, traverse supérieure) et des murs en retour ou des murs en ailes également préfabriqués en béton, destinés à retenir les matériaux de remblais de la plateforme.
- ▶ **Les ouvrages type PIPO** (Passage Inférieur en Portique Ouvert) peuvent être réalisés en associant des piédroits et des poutres préfabriqués (assurant la dalle de couverture du portique) et des murs en retour et des murs en ailes préfabriqués en béton.

Ces deux types de portiques sont utilisés pour la réalisation d'ouvrages routiers, ferroviaires, ou hydrauliques.



2.2.6 - Voûtes

Les ouvrages voûtes préfabriqués peuvent être utilisés pour les mêmes applications que les cadres, y compris sous fortes hauteurs de remblai.

Ces ouvrages sont composés d'éléments préfabriqués en béton, associés ou non à un radier et articulés ou encastrés sur des piédroits verticaux ou quasi-verticaux, qui peuvent être en éléments préfabriqués en béton ou coulés en place. Selon le type d'ouvrage, ils sont constitués de 2 à 4 éléments.

On distingue deux principaux types d'ouvrages voûtes :

- les ouvrages voûtes mono-arche,
- les ouvrages voûtes multi-arches.

Nota

Document de référence : Guide CIMBETON T41 :
“Les ponts courants en béton” - Tome 1 - Paragraphe 2.2.13

Les piédroits sont autostables. La pose des divers éléments ne nécessite aucun étaielement.

La cinétique de montage la plus courante est la suivante :

- pose de piédroits ;
- ferrailage de la partie du radier coulée en place ;
- coulage du radier ;
- pose des éléments de voûte sur les piédroits ;
- exécution ou mise en place des divers joints transversaux et longitudinaux ;
- mise en œuvre de l'étanchéité de l'ouvrage ;
- remblaiement de l'ouvrage (mise en œuvre du remblai de manière symétrique par couches de 20 à 30 cm d'épaisseur (de compacité au moins égale à 95 % de l'OPM).

Ils permettent d'offrir des gabarits pour passage inférieur routier de plus de 10 m de largeur et 5 m de hauteur.

Ces ouvrages sont sensibles à une déformation du sol de fondation. Ils peuvent être utilisés sur des sols de fondation de qualité moyenne (semelles) ou très moyenne (radier).

Les parements intérieurs des piédroits et des éléments de voûtes peuvent faire l'objet de nombreuses techniques de traitements de surface.

Les structures peuvent être rigidifiées par clavage des joints longitudinaux et transversaux.

ASSEMBLAGES DES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS

La réalisation d'ouvrages à partir d'éléments préfabriqués nécessite la réalisation d'assemblages. Ces assemblages sont employés pour réaliser la connexion mécanique des éléments entre eux et/ou avec la structure. Le choix des assemblages doit faire l'objet d'une étude spécifique prenant en compte les différentes phases de réalisation et d'utilisation de l'ouvrage.

La structure définitive obtenue par l'assemblage offre le même comportement et la même durabilité qu'une structure monolithe coulée en place.

Deux principaux procédés d'assemblage sont couramment utilisés dans les structures en béton : les assemblages en béton armé avec aciers en attente et les assemblages par précontrainte. Les assemblages peuvent être aussi réalisés par boulonnage. Ils peuvent être complétés par des systèmes de joints assurant l'étanchéité à l'eau et à l'air.

2.3 - Offre parements et murs de soutènement

L'offre de produits préfabriqués en béton permet une grande variété de traitements de surface des bétons, qui offre aux concepteurs et aux architectes une palette infinie d'aspects, de textures, de couleurs et de formes permettant d'intégrer les ouvrages en parfaite harmonie dans leur site d'accueil tout en préservant les caractéristiques naturelles des paysages.

2.3.1 - Parements des piles et des pylônes

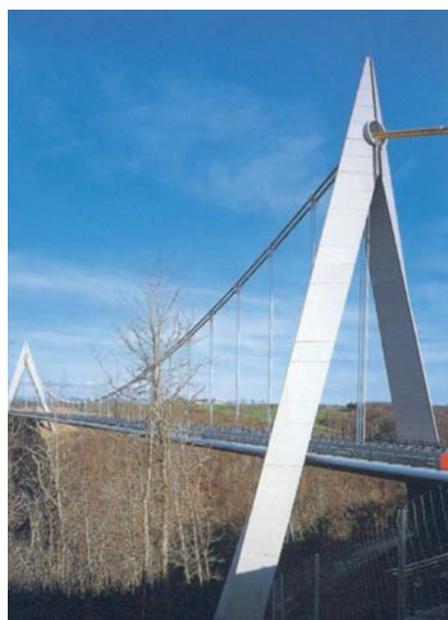
Les parements préfabriqués en béton sont utilisés sous forme de coffrage (coque non participante utilisée en coffrage perdu) pour la réalisation de piles de pont ou de pylônes de ponts suspendus ou à haubans. Le noyau central est ensuite rempli sur site avec du béton coulé en place. La liaison des coques avec le béton coulé en place est assurée par des aciers passifs en attente. Les coques sont dimensionnées pour résister aux efforts générés par la poussée du béton coulé en place.

Ces parements peuvent présenter une multitude d'aspects de surface (béton poli, béton désactivé...). Ils permettent la réalisation de piles de formes très complexes (exemple : hélice à pas variable des pylônes du Viaduc de Chavanon).

La maîtrise de la préfabrication en usine permet d'obtenir une grande précision des joints d'assemblage et donc une parfaite continuité du parement et le respect des tolérances dimensionnelles. Cette solution permet de répondre à la créativité des architectes.

Nota

Les piles de pont peuvent être constituées d'éléments préfabriqués en béton assemblés par précontrainte.



2.3.2 - Parements des culées

Les parements des culées peuvent être réalisés comme ceux des piles à partir de plaques préfabriquées (écailles) ou d'éléments préfabriqués de mur de soutènement.

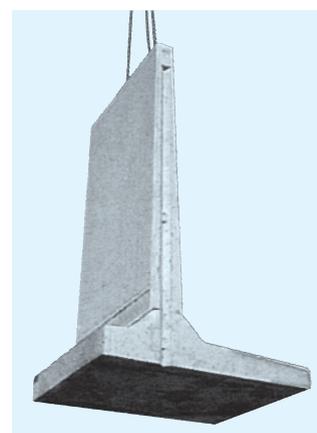
Dans le cas de massifs en géotextile renforcé ou en terre armée, les descentes de charges du tablier peuvent être transmises aux remblais et réparties uniformément par l'intermédiaire d'un chevêtre fondé superficiellement en haut du remblai. Cette solution permet, dans le cas de sols de caractéristiques médiocres, de s'affranchir de fondations profondes et de réaliser simultanément et rapidement les remblais d'accès à l'ouvrage et la culée.



2.3.3 - Ouvrages de soutènement

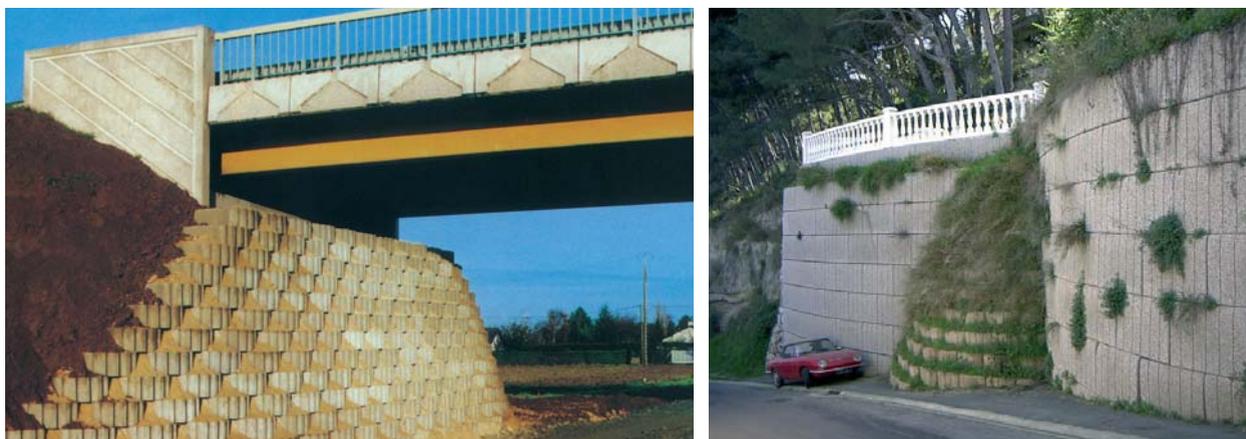
En soutènement, quatre types de produits préfabriqués en béton sont généralement utilisés :

- ▶ **Les murs en béton armé ou murs cantilever.** Les éléments préfabriqués peuvent constituer le parement du voile, le voile lui-même ou l'ensemble du mur, semelle comprise. Dans ce dernier cas, ils sont en forme de L ou de T inversé et leur hauteur n'excède pas 10 m.



La paroi verticale ou "voile" peut présenter ou non un fruit, être inclinée par rapport à la semelle ou être renforcée par des contreforts. L'ouvrage est constitué d'éléments juxtaposés.

- ▶ **Les éléments empilables** en béton armé ou non, posés généralement sur une semelle ou sur des plots isolés, permettent de réaliser des murs de soutènement de type "poids". Ce type d'éléments est adapté pour être végétalisé et permet de constituer des ouvrages de soutènement d'une hauteur de l'ordre de 6 m. Il est utilisé pour réaliser des culées de ponts.



L'association de produits monolithiques, d'écailles de parement verticales et de longerons horizontaux en béton permet de conjuguer le fonctionnement en mur poids et l'ancrage par frottement des longerons dans le sol.

- ▶ **Les parois préfabriquées**, constituées de panneaux en béton armé scellés directement dans le sol par un coulis ciment-bentonite sur une longueur d'ouvrage permettant d'équilibrer les efforts de poussée. Elles sont généralement associées à des tirants d'ancrage précontraints scellés dans le terrain résistant ou à des butons situés en tête de paroi.
- ▶ **Les écailles préfabriquées en béton**, liées à des armatures (métalliques ou synthétiques) noyées dans un remblai compacté par couches successives, permettent de réaliser des massifs en remblai renforcé (technique dénommée "Terre Armée"). Les efforts de poussées des terres sont repris par frottement sol-armatures. Ces écailles font l'objet d'une multitude de traitements de surface. Elles peuvent être utilisées pour constituer des culées de ponts, des piles culées ou des culées mixtes.

Pour ces quatre types de produits préfabriqués en béton, il existe une grande variété de solutions architectoniques permettant aux concepteurs et aux architectes d'intégrer les ouvrages dans leur environnement.

L'utilisation de murs et de parois de soutènement préfabriqués en béton permet de réduire les délais d'exécution sur chantier.

Les parements des produits de soutènement préfabriqués en béton peuvent bénéficier de toutes les techniques de traitement de surface, du brut de décoffrage au poli en passant par le sablé, le désactivé, le bouchardé.

L'offre se décline en une large gamme d'éléments préfabriqués en béton permettant de s'adapter aux configurations de tous types de soutènement (remblais ou déblais routiers et autoroutiers, murs en retour ou en aile de culées...) et aux géométries particulières et complexes des sites (emprises exigües, accès difficiles...). La diversité des parements proposés permet de satisfaire aux exigences architecturales.

La conception générale des ouvrages de soutènement fait l'objet d'un guide du SETRA.

2.4 - Offre superstructures

Pour les superstructures d'ouvrages de génie civil, l'offre de produits préfabriqués en béton comprend des pièces de forme, de couleur et de parement très spécifiques, qu'il serait très difficile, voire impossible, de réaliser sur place. Les produits de superstructures préfabriquées en béton s'adaptent tant aux ouvrages en béton qu'aux ouvrages mixtes ou à structure métallique.

2.4.1 - Corniches de ponts

Nota

Document de référence : Guide CIMBETON T41 :
"Les ponts courants en béton" - Tome 1 - Paragraphe 8.5

La corniche assure la protection de la "tranche" du tablier. Elle apporte la touche finale à l'ouvrage en le mettant en valeur. On y fixe les garde-corps et divers équipements.

L'offre d'éléments préfabriqués en béton propose une gamme étendue de corniches pour ouvrages d'art (profils standards ou profils spécifiques) présentant une large palette de traitements de surface.

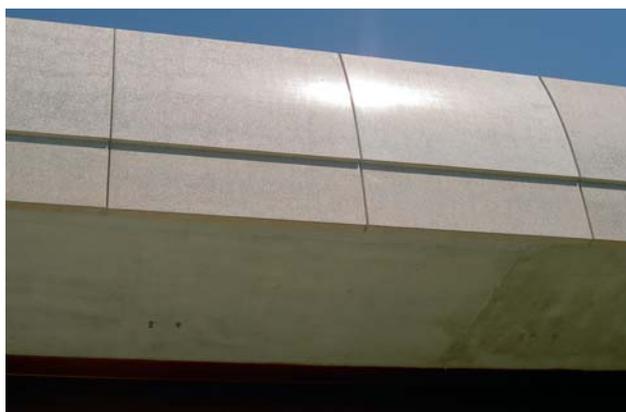
La diversité des traitements de surface, les modénatures des corniches et leur inclinaison permettent de singulariser chaque ouvrage et de l'intégrer harmonieusement dans son site.

La pose des corniches fait l'objet d'un guide technique du SETRA qui précise les normes de conception, les critères esthétiques et les pratiques de mise en œuvre.



2.4.2 - Bordures et parapets

Il existe une large gamme de profils de parapets préfabriqués en béton (produits standards ou produits développés pour un projet particulier) destinés à équiper les ouvrages d'art routiers ou ferroviaires. Ils sont en général connectés au tablier par un béton coulé en place.



2.4.3 - Dispositifs d'évacuation des eaux

Les dispositifs d'évacuation des eaux assurent 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 de stagnation des eaux sur la chaussée.

Ils respectent les pentes longitudinales et transversales de l'extrados du tablier.

Des caniveaux préfabriqués en béton, associés à des bordures de trottoir, sont généralement disposés sur le tablier de part et d'autre de la couche de roulement.

Des descentes d'eau préfabriquées en béton équipent les talus des remblais des passages supérieurs.



2.4.4 - Écrans acoustiques

Pour protéger les populations des nuisances sonores provenant des infrastructures routières, autoroutières et ferroviaires, la solution privilégiée consiste à mettre en place des écrans acoustiques. Leur rôle est à la fois d'atténuer le bruit transmis à l'environnement et de limiter le bruit réfléchi vers la source.

On distingue deux types d'écrans préfabriqués en béton : les écrans réfléchissants et les écrans absorbants. Ils ont une efficacité optimale vis-à-vis des trois paramètres de base de l'acoustique : la transmission, l'absorption et la diffraction.

Les écrans sont généralement réalisés en parement absorbant constitué de béton de bois.

Les écrans en béton sont reconnus comme la solution idéale en termes de coût global, de simplicité et d'adaptabilité de mise en œuvre, de durabilité, de résistance aux agressions, d'entretien et de maintenance. Les solutions en béton sont reconnues efficaces et polyvalentes.



L'offre de produits préfabriqués en béton pour écrans acoustiques comprend, en particulier, des solutions adaptées à une utilisation sur les ouvrages d'art.

2.5 - Perspectives et tendances d'évolution

2.5.1 - Atouts des BHP et des BAP

Les évolutions de ces dernières années constituent, pour les composants préfabriqués en usine, des atouts particulièrement intéressants, tant sur le plan des performances que sur celui de la durabilité. L'emploi de matériaux plus performants et optimisés par l'Industrie du Béton devrait être source d'économie pour les ouvrages.

Les BAP (Bétons Autoplaçants utilisés depuis quelques années dans les usines de préfabrication) facilitent la mise en œuvre des bétons en usine, améliorent l'aspect des parements et permettent de réduire l'impact sonore sur le personnel.

Le recours aux BHP (Bétons à Hautes Performances utilisés depuis de nombreuses années par les industriels) optimise, par exemple, le processus de fabrication des poutres précontraintes (mise en tension plus rapide) et permet, en diminuant le nombre de poutres ou leur hauteur, d'élargir la gamme des portées, d'optimiser le dimensionnement (diminution des déformations par fluage) et d'augmenter la durabilité des ouvrages. Les BHP permettent un allègement des poutres, ce qui est particulièrement intéressant pour la réduction des impacts en matière de transport et pour les opérations de manutention.

L'utilisation des BHP permet l'obtention de performances élevées, ce qui conduit à réduire les sections des ouvrages et donc le volume des produits, et permet de privilégier les composants de forme élancée présentant un profil mécaniquement optimal.

2.5.2 - Atouts des BFUP

Les BFUP (Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances) commencent à être utilisés dans les ouvrages d'art et, en particulier, dans les ponts à poutres préfabriquées. Les ponts bénéficieront de tous les atouts de ce type de béton en gagnant en transparence esthétique.

Les BFUP permettent une plus grande liberté de conception architecturale et une élévation maximale du niveau d'exigence en qualité du béton et en durabilité des ouvrages.

Coulis d'injection pour conduits de précontrainte

- 3.1 - Objectifs de l'injection des conduits**
- 3.2 - Composition des coulis et spécifications sur les constituants**
- 3.3 - Spécifications sur les coulis**
- 3.4 - Essai sur tube incliné**
- 3.5 - Environnement normatif et réglementaire**
- 3.6 - Recommandations pour l'injection**

3.1 - Objectifs de l'injection des conduits

L'injection avec des coulis de ciment des câbles de précontrainte a pour objectif de protéger les aciers de précontrainte contre les agents corrosifs extérieurs. En évitant tout contact entre les armatures et l'eau ou l'air humide, le coulis de ciment constitue une barrière permanente contre la corrosion, du fait de la passivation des armatures. Il garantit la pérennité de la précontrainte et donc de l'ouvrage. De plus, dans le cas de précontrainte intérieure, le coulis de ciment assure l'adhérence du câble avec la structure en béton.

Cependant, l'injection est une opération délicate à réaliser en raison des tracés fortement ondulés des câbles et de leur grande longueur.

Le coulis, pour assurer convenablement la satisfaction des exigences, doit être injecté de telle manière que la gaine soit entièrement remplie. Il ne doit pas présenter de phénomène de ségrégation pendant l'injection et pendant la période avant la prise.

Nota

La qualité d'un produit d'injection conforme aux exigences réglementaires ne suffit pas à garantir un remplissage correct des conduits.

L'injection au coulis de ciment est irréversible. Elle doit être réalisée par une entreprise et du personnel qualifié et expérimenté.

La méthode traditionnelle consiste à réaliser l'injection par pompage à une extrémité avec mise à l'air de l'évent à l'extrémité opposée et ouverture, au passage du coulis, des événements intermédiaires situés aux points hauts du conduit.

Après l'injection de la totalité de la gaine et mise en pression du conduit à 0,5 MPa, on procède à la purge des capots d'ancrage et des événements, puis au cachetage des têtes d'ancrages afin d'éviter toute infiltration d'eau jusqu'aux ancres.

LES ARMATURES DE PRÉCONTRAINTE

- ▶ Les **TORONS** sont un assemblage de plusieurs fils (le fil est produit par déformation à froid (tréfilage) d'un fil machine).
- **Torons 3 FILS** : 3 fils enroulés sur un axe théorique commun (utilisation en précontrainte par pré-tension uniquement).
- **Torons 7 FILS** : 6 fils disposés en hélice autour d'un fil central.

Les torons sont caractérisés par leur nombre de fils (et la section du fil) et leur diamètre.

Les classes de résistance des torons sont : 1670, 1770, 1860 et 1960 MPa.

Les caractéristiques des torons les plus courants sont les suivantes :

Tableau n°1 : Caractéristiques des torons			
Désignation	Classe MPa	Diamètre (mm)	Section (mm ²)
T 13	1860	12.5	93
T 13 S	1860	12.9	100
T 15	1860	15.2	139
T 15 S	1860	15.7	150

Ils sont définis par leur force garantie de rupture (FRG) qui varie selon la classe de l'acier.

- ▶ Les **CÂBLES** sont constitués de plusieurs torons en acier à haute résistance pour béton précontraint.

La gamme des câbles s'étend des câbles monotorons aux câbles de très grande puissance comportant jusqu'à 55 torons.

Les unités les plus courantes, pour la précontrainte longitudinale, sont les unités 12 ou 13 T15 S (composées de 12 ou 13 torons T15 S) pour la précontrainte intérieure et 19 T15 S pour la précontrainte extérieure.

Un câble est défini par le type et le nombre de torons et la classe de résistance.

Tête d'ancrage



Les CONDUITS DE PRÉCONTRAÎTE

Il existe plusieurs types de conduits dans lesquels sont disposés les câbles :

- gaine (métallique) nervurée en feuillard : épaisseur du feuillard : 0,3 à 0,6 mm - diamètre 25 à 130 mm,
- tube rigide en acier - épaisseur 1,5 à 2 mm,
- gaine nervurée en PEHD,
- tube en PEHD.

La gaine en feuillard est la plus couramment employée en ouvrage d'art.

Les conduits, nécessaires uniquement en post-tension, ont pour rôle de :

- ménager un passage continu du câble de précontrainte selon le tracé et la position prévue lors du dimensionnement de l'ouvrage ;
- résister aux sollicitations lors de l'installation, la mise en tension (pression localisée, abrasion) et l'injection (étanchéité, pression d'injection) ;
- transmettre les efforts par adhérence (dans le cas de la précontrainte intérieure) ;
- assurer une protection de l'armature (mécanique) et une enveloppe du coulis d'injection (étanchéité) ;

La section du conduit est égale de 2 à 2,5 fois la section de l'armature afin de permettre son remplissage.

► **Les essais et contrôles à effectuer** sur les coulis de ciment portent sur :

- la composition chimique des constituants qui ne doit pas révéler la présence d'éléments agressifs ;
- la fluidité du coulis qui doit être maintenue durant une période en accord avec les conditions de mise en œuvre ;
- la stabilité du coulis avant prise ;
- l'absorption capillaire déterminée sur coulis durci à diverses échéances ;
- la résistance mécanique en flexion et en compression ;
- le temps de début et de fin de prise (sur la plage de température d'utilisation).

3.2 - Composition des coulis et spécifications sur les constituants

Les formulations des coulis sont régies par le règlement d'avis technique.

3.2.1 - Composition des coulis

Les coulis d'injection pour conduits de précontrainte sont constitués d'un mélange en suspension de :

- Ciment : CEM I ou CEM II/A-L ou CEM II A-D conforme à la norme NF EN 197-1 et admis à la marque NF - Liants hydrauliques.
- Adjuvants : superplastifiants et agents stabilisants.
- Eau.
- Additions éventuelles: filler, fumées de silice...

Ils sont adjuvantés, ce qui optimise leurs caractéristiques rhéologiques et leur confère une fluidité adaptée aux méthodes d'injection et une durée d'injectabilité maîtrisée.

Leur fabrication se fait par malaxage dans des malaxeurs à haute turbulence ou des turbomalaxeurs.

3.2.2 - Spécifications sur les ciments, les additions minérales et les adjuvants

Les ciments, les adjuvants et le mélange des composants font l'objet des spécifications suivantes :

- ▶ Ciments : CEM I (CEM II A-L ou CEM II A-D)
 - $Cl^- < 0,05 \%$
 - $S^{2-} < 0,01 \%$
 - Constituants secondaires $< 3 \%$

- Additifs < 0,1 %.
 - Ne doit contenir aucun élément pouvant entraîner la corrosion des aciers.
 - Pas de fausse prise mesurée par l'essai Tusschenbroeck.
- ▶ Adjuvants
- Cl⁻ < 0,10 % (de la masse des adjuvants en poudre).
 - Absence de Thiocyanates, nitrates, nitrites, formiates et sulfures.
- ▶ Additions minérales
- Fumée de silice limitée à 8%.
- ▶ Mélange
- Cl⁻ < 0,1 % de la masse de ciment.
 - S²⁻ < 0,01 % de la masse de ciment.
 - SO₃ < 4,5 % de la masse de ciment.

Essai de fluidité



3.3 - Spécifications sur les coulis

3.3.1 - Spécifications générales

Les coulis font l'objet des spécifications suivantes :

Tableau n°2 : Spécifications sur les coulis				
	Norme d'essai	Objectif	Méthode	Spécifications
Variation de volume	NE EN 445 P 18 141	Caractérisation du volume de remplissage Mesure de la variation de volume positive ou négative à l'échéance 24 h		> - 1 % < 5 %
Temps de prise	NF P 18-362 NF EN 196-3	Mesure du début et de fin de prise		Début de prise > 3 h Fin de prise < 24 h
Absorption capillaire	P 18-364	-	-	A 28 jours < 1 g / cm ²

3.3.2 - Spécifications relatives à la rhéologie et la stabilité du coulis

Les spécifications sur les coulis visent à leur conférer un maintien de la fluidité et de l'homogénéité pendant plusieurs heures, pour une maîtrise de la durée d'injectabilité et pour une reproductibilité des caractéristiques pendant toute la durée du chantier.



Les essais d'aptitude du coulis sont présentés dans le tableau[°].

Nota

La fluidité au moment de l'injection est, en général, de l'ordre de 15 secondes. Elle ne devra pas être inférieure à 15 secondes, ni dépasser 25 secondes.

L'essai de fluidité permet de déterminer aussi la Durée Pratique d'Utilisation (DPU - temps durant lequel le coulis est injectable).

Elle est variable en fonction du volume à injecter (fonction du diamètre et de la longueur des conduits) et des temps nécessaires à l'acheminement du coulis.

Elle est comprise entre 1 heure et 4 heures. En général, la DPU est de l'ordre de 3 heures pour des températures de l'ordre de 20°C.



Tableau n°3 : Essais d'aptitude du coulis				
	Norme d'essai	Objectif	Méthode	Spécifications
Fausse prise	NF P 18363	-	Essai de Tusschenbroeck	Le coulis ne doit pas présenter de fausse prise
Fluidité	NF P 18358 EN 445	Caractérisation de l'écoulement du coulis	Méthode du cône : mesure du temps nécessaire pour qu'une quantité de coulis (1 litre) s'écoule à travers l'orifice d'un cône (ajutage 10 mm)	< 25 secondes dans la plage de température spécifiée et > 15 secondes
Maintien de la fluidité	NF P 18358 EN 445	Validation du maintien de la fluidité	-	< 25 secondes à T0 + 30 mn
Exsudation	Méthode d'essais des LPC	Caractérisation de la stabilité du coulis	Mesure de la quantité d'eau qui resse à la surface d'un coulis que l'on a laissé reposer à l'abri de toute évaporation	Volume d'eau < à 0,3% Volume d'air < à 1%
Résistances mécaniques	NF EN 196-1 P 18-360	Caractérisation des performances mécaniques du coulis	Mesure des résistances - en flexion à 28 jours - en compression à 28 jours	> 4 MPa > 30 MPa

3.4 - Essai sur tube incliné

Cet essai permet de mesurer la stabilité in situ du coulis. Il est effectué à l'occasion de la demande d'avis technique et lors des premiers chantiers couvrant la première année de l'avis provisoire favorable.

Il consiste à injecter le coulis dans un tube incliné transparent, de 5 mètres de longueur, incliné à 30° par rapport à l'horizontale, et à mesurer après 24 heures les volumes de liquide et d'air qui se sont accumulés en partie haute du tube. La grande dimension de l'essai, proche de l'échelle en vraie grandeur, procure aux résultats une grande fiabilité et une très bonne reproductibilité.

Cet essai permet de caractériser en vraie grandeur l'exsudation et la stabilité du coulis en tenant compte de l'effet de filtre dû à la présence des torons et de l'inclinaison des câbles. Il permet de vérifier la validité des méthodes de formulation, de fabrication et d'injection et de s'assurer du remplissage complet des conduits de précontrainte. C'est un test reconnu pertinent pour contrôler la stabilité et la fluidité du coulis.

L'appareillage d'essai est constitué de :

- deux conduits : tubes PVC translucides (Longueur 5 m - Inclinaison 30° - Diamètre intérieur = 81 mm ± 2 mm).
- douze torons de précontrainte T15 enfilés dans chacun des tubes,
- matériel de malaxage et dispositif d'injection.

Le coulis est injecté à la partie basse du tube. Après le remplissage qui s'arrête après une purge en partie haute d'une dizaine de litres environ, la pression d'injection est maintenue pendant la durée prévue par la méthode d'injection. Le coulis est ensuite laissé au repos à l'abri de toute évaporation.



On mesure, à l'échéance de 24 heures après la fin de l'injection, la quantité d'eau ressuée et la quantité d'air accumulées à la surface du coulis, en partie haute du tube.

L'essai est considéré satisfaisant si les volumes d'air et de liquide (exsudation et filtration) sont inférieurs à 0,3 % du volume du coulis dans le tube.

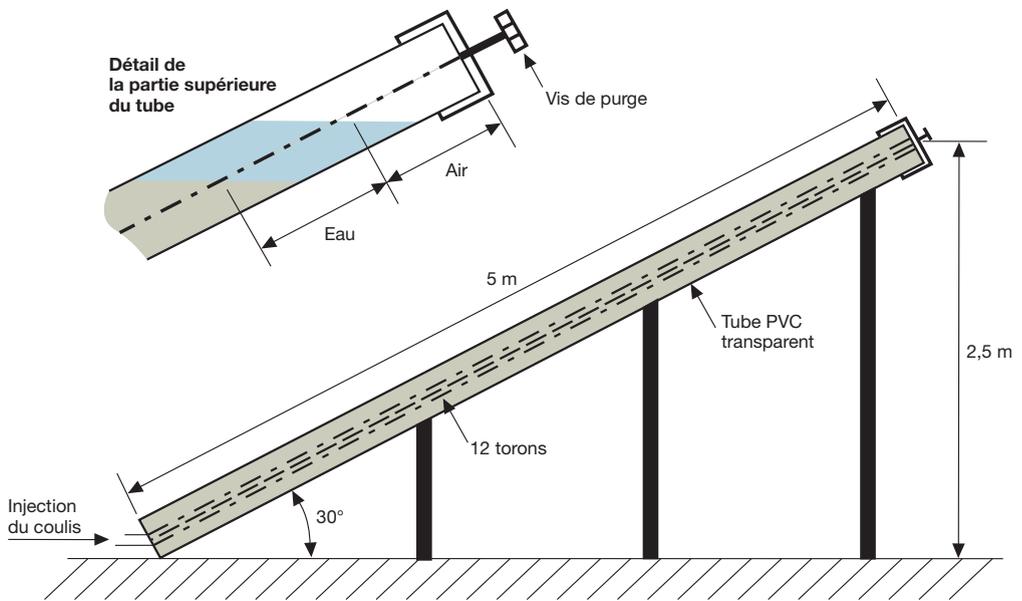


Figure n°6 : Dispositif d'essai de stabilité sur tube incliné



3.5 - Environnement normatif et réglementaire

Les coulis d'injection pour conduits de précontrainte font l'objet de deux documents de référence :

3.5.1 - Fascicule 65

La composition, la fabrication et la mise en œuvre des coulis sont réglementées par le fascicule 65 A "Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint par post-tension".

- Chapitre 9 : Protection des armatures de précontrainte par coulis de ciment "Les coulis d'injection doivent bénéficier d'un Avis Provisoire Favorable (APF) valable un an ou d'un Avis Technique Favorable (ATF) valable 3 ans".

Nota

Le fascicule 65 précise, chapitre 13, les clauses techniques relatives à la précontrainte par POST-TENSION.

3.5.2 - Procédure d'avis technique

La procédure d'avis technique relative aux coulis d'injection pour conduits de précontrainte est définie dans la circulaire n° 99-54 du 20 août 1999.

Les avis techniques concernent à la fois le coulis et son mode d'injection (matériel de fabrication et d'injection). Ils sont basés sur des spécifications sévères sur les constituants et le coulis et des contrôles périodiques.

Ils sont délivrés à partir des analyses de résultats :

- des essais en laboratoire sur coulis,
- de l'essai sur tube incliné avec le matériel de mise en œuvre de l'Entreprise Distributrice de Précontrainte (EDS).

L'avis technique est attribué par un groupe spécialisé "coulis" de la Commission Interministérielle de la Précontrainte (CIP), d'abord à titre provisoire pendant un an (Avis Provisoire Favorable : APF), puis pour 2 ans (Avis Technique Favorable : ATF).

Pour les produits bénéficiant d'un ATF, l'essai de stabilité sur tube incliné perd son caractère systématique au niveau des épreuves de convenance.

A l'issue de cette période, l'avis peut être renouvelé.

Nota

La norme XP ENV 13670-1 Exécution des ouvrages en béton précise que le coulis de ciment doit être conforme à la norme EN 447 et qu'en France, la norme EN 447 sera obligatoirement complétée par le règlement de l'ASQPE - Association pour la Qualification de la Précontrainte et des Équipements de Génie Civil - et le coulis devra faire l'objet d'un avis technique de l'ASQPE.

3.5.3 - Principales normes

▶ Circulaire n°99.54 du 20 août 1999 instituant un avis technique des coulis d'injection pour conduits de précontrainte, délivré par la Commission Interministérielle de Précontrainte, Bulletin Officiel, septembre 99.

- ▶ NF EN 445 (P 18 141)
Coulis pour câbles de précontrainte - Méthodes d'essais
- ▶ NF P 18-358 Coulis courants d'injections pour précontrainte
Mesure de la fluidité et de la réduction d'eau

- ▶▶ NF P 18-359 Coulis courant d'injections pour précontrainte
Mesure de l'exsudation (stabilité)
- ▶▶ NF P 18-360 Coulis courant d'injections pour précontrainte
Essais mécaniques flexion-compression
- ▶▶ NF P 18-361 Coulis courant d'injections pour précontrainte
Mesure du retrait
- ▶▶ NF P 18-362 Coulis courant d'injections pour précontrainte
Détermination des temps de début et de fin de prise
- ▶▶ NF P 18-363 Coulis courant d'injections pour précontrainte
Détermination de la fausse prise (essai de Tusschenbroek)
- ▶▶ NF P 18-364 Coulis courant d'injections pour précontrainte
Essai d'absorption capillaire
- ▶▶ NF EN 446 Procédures d'injection des coulis
Matériel d'injection - Mode opératoire - Contrôle qualité
- ▶▶ NF EN 447 Prescriptions pour les coulis courants
Critère d'acceptation des coulis (laboratoire et chantier)

Les coulis de ciment à base de constituants de qualité, dont les formulations sont optimisées, offrent des performances stables. La réglementation actuelle permet, grâce à la procédure d'avis technique basée sur une série d'essais pertinents, de contrôler parfaitement la chaîne de fabrication et d'injection du coulis et d'en garantir la qualité et la protection efficace des câbles de précontrainte.

3.6 - Recommandations pour l'injection

Les opérations d'injection des coulis à base de ciment doivent être exécutées avec le matériel et selon les modalités prévues dans l'avis technique.

La préparation du coulis et son injection doit tenir compte des conditions météorologiques.

L'injection ne peut être réalisée qu'à l'intérieur de la plage de température donnée dans le dossier d'avis technique. Celle-ci est en général comprise entre 5 et 35°C.

Par temps froid :

- l'injection débutera en début de journée pour profiter de l'augmentation des températures au cours de la journée,
- elle est interdite si les températures prévues sont en dessous de 0°C,
- si la température du béton ou l'intérieur des conduits est inférieure à 5°C, il est préférable de reporter l'injection.

Par temps chaud :

- l'injection doit être prévue le matin de très bonne heure,
- dans le cas de forte chaleur avoisinant les 35°C, les cuves de coulis doivent être protégées du rayonnement direct du soleil. Il est conseillé de prévoir une réfrigération de l'eau.

La fabrication du coulis doit être réalisée en suivant scrupuleusement l'ordre d'introduction des constituants et la durée de malaxage fournie dans le dossier d'avis technique.

Une modification dans l'ordre d'introduction des constituants ou une variation de la durée de malaxage peut entraîner des modifications de la rhéologie du coulis.

Après injection, les événements sont scellés et un cachetage est réalisé derrière les plaques d'ancrages.

Contrôle et assurance de la qualité

4.1 - Notions générales sur la démarche qualité

4.2 - Rôles des différents acteurs en matière de qualité

4.3 - Référentiel qualité

4.4 - Contrôle extérieur

4.5 - Étapes majeures de la construction

**4.6 - Affectation des actions du contrôle extérieur
Approche par secteurs techniques**

4.1 - Notions générales sur la démarche qualité

Si la démarche qualité a connu ses premiers développements dans le domaine de l'industrie en général, lors de la fabrication de grandes séries d'éléments, elle est applicable et particulièrement justifiée dans le domaine de la construction d'ouvrages d'art, même courants, qui sont pourtant toujours des prototypes.

En effet, même si les conditions de réalisation sont à chaque fois différentes du fait des contraintes spécifiques de sols, d'environnement, d'exploitation et de parti architectural, la construction d'un ouvrage ou d'une série d'ouvrages fait appel à des techniques répétitives, connues et normalement maîtrisées.

La démarche qualité est donc adaptée. Elle s'avère en outre justifiée par le coût de l'investissement initial et la gestion à long terme (prise en compte des gênes aux usagers, de l'impact sur l'économie locale, des atteintes à l'environnement...) pendant la durée de service de l'ouvrage.

Un ouvrage d'art a vocation à rendre un service, dans les conditions de sécurité pour les usagers, les tiers et les exploitants, les plus parfaites possibles durant toute son existence.

Rappelons que la durée de service théorique prise en compte est généralement d'au moins 100 ans dans des conditions d'entretien préventif.

Lorsque l'on examine les origines des pathologies affectant les ponts anciens, on constate que la part de celles liées à la conception, au calcul et à l'exécution est significative :

- inexactitude ou insuffisance des hypothèses de calcul,
- inadéquation des modèles de calcul et erreurs de dimensionnement,
- non prise en compte de certaines actions dues à l'environnement,
- insuffisance des documents d'exécution,
- déficience du contrôle de la qualité :
 - qualité insuffisante ou défectueuse des matériaux et produits,
 - non-respect des prescriptions technologiques et des dispositions constructives,
 - non-respect des règles de l'art,
 - improvisations sur chantier,
 - insuffisance du contrôle interne et défaut de surveillance du maître d'œuvre...

Les campagnes de visites IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) réalisées depuis quelques années sur les ouvrages d'art situés sur le réseau routier national, ont mis en évidence une proportion importante d'ouvrages, même récents, nécessitant des travaux d'entretien spécialisé.

La part de défauts concernant les équipements (joints de dilatation, appareils d'appui, chapes d'étanchéité...) est prépondérante.

Or certains défauts engendrés lors de la réalisation de l'ouvrage peuvent nécessiter au cours des années la mise en œuvre de moyens curatifs hors de proportion avec ceux qui auraient permis de les éviter, comme par exemple les appareils d'appui dont le remplacement implique un vérinage du tablier.

Leurs conséquences peuvent parfois être très graves et très coûteuses, voire conduire à remplacer un ouvrage de façon prématurée dans les cas extrêmes ; il est clair que le coût de la reconstruction d'un ouvrage est sans commune mesure avec celui de sa construction initiale, auquel il faut rajouter les coûts économiques générés (détournement du trafic...) et la gêne aux usagers.

La responsabilité de l'entrepreneur peut être recherchée (dans le cadre de la garantie de parfait achèvement, des garanties particulières définies au Cahier des Clauses Administratives Particulières, de la garantie décennale) ; c'est le cas en particulier si sont mis en évidence des vices de conception ou d'exécution non apparents lors de la réception définitive.

Il en est de même en ce qui concerne la responsabilité du maître d'œuvre.

La non-obtention des performances attendues (c'est-à-dire la "non-qualité") peut donc être fort coûteuse à court, moyen et long terme.

Pour l'éviter, l'adoption d'une véritable démarche qualité tant sur la prévention que sur le contrôle, élément clef de la qualité, s'impose.

Il est utile à ce stade de rappeler que les clés de la qualité sont les hommes, le temps (délais d'études et d'exécution raisonnables) et l'argent, et que l'obtention de la "qualité requise" est l'affaire de tous les participants à l'acte de construire (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre prescripteurs, entreprises, industriels, fournisseurs de matériaux...).

4.2 - Rôle des différents acteurs en matière de qualité

Les intervenants pour la réalisation d'un ouvrage d'art sont nombreux, de la définition initiale des besoins à la validation du projet global ou à la vérification de la satisfaction de ces besoins.

▶▶ **Le maître d'ouvrage :**

- il fixe les objectifs qualité et est responsable du programme de l'ouvrage d'art à réaliser.

▶▶ **Le maître d'œuvre**, se distinguant éventuellement en un "maître d'œuvre études" d'une part et un "maître d'œuvre travaux" d'autre part, et entouré de partenaires (bureaux d'études, architectes, géomètres, laboratoires).

- il traduit les objectifs qualité dans les pièces écrites du dossier de consultation des entreprises,
- il assure la coordination d'une équipe de maîtrise d'œuvre et organise le suivi du chantier en incluant le **contrôle extérieur**.

Nota

- **Le maître d'œuvre est responsable de la prescription.**

Il convient d'insister sur le caractère primordial de l'établissement d'un projet et d'un Dossier de Consultation des Entreprises "de qualité". Le Cahier des Clauses Techniques Particulières en particulier doit être complet et intégrer les nouveaux textes réglementaires, les nouvelles normes et recommandations.

- **Le maître d'œuvre est responsable du contrôle extérieur** (sous-entendu "à l'entreprise" - rappel du fascicule 65-A du Cahier des Clauses Techniques Générales).

►► **Les entrepreneurs et les sous-traitants :**

- ils exécutent les travaux avec l'obligation d'effectuer leur contrôle interne.

Nota

- **L'entreprise est responsable de son contrôle intérieur**, qui comprend le contrôle interne à la chaîne de production (ou auto contrôle) et, lorsqu'il est prescrit au marché, le contrôle externe (ou surveillance du contrôle interne, avec éventuellement proposition de reconnaissance de conformité - rappel du fascicule 65-A du CCTG).

- **Le contrôle interne est la vérification par le chantier de ses propres tâches** ; il s'applique principalement au choix et à la fourniture des matériaux, produits et composants, aux moyens et conditions de transport, de manutention et de stockage, aux matériels et conditions de fabrication, de mise en œuvre et de réception ; il est rythmé par les points critiques et points d'arrêt (voir paragraphe 4.5 ci-après) matérialisés sur les documents de suivi.

- **Le contrôle externe** lorsqu'il existe, sert également d'assistance et de conseil au chantier.

►► **Les fournisseurs et industriels** : ils produisent et livrent leurs matériaux, produits ou composants, avec obligation de respecter les prescriptions, spécifications et exigences des normes correspondantes.

Nota

S'y rajoutent les exigences spécifiées au marché, par exemple celles des règlements des systèmes de "certification de produit" lorsqu'ils existent.

Les rôles respectifs des différents intervenants et la gestion des interfaces doivent être parfaitement définis tant dans l'exécution du marché que dans le contrôle de la réalisation.

4.3 - Référentiel qualité

Le référentiel qualité est constitué des pièces du Marché et des Plans d'Assurance de la Qualité des entreprises, des sous-traitants et des fournisseurs, après acceptation par le maître d'œuvre.

Le fascicule 65-A du CCTG impose aux entreprises et aux maîtres d'œuvre, de gérer la qualité suivant des dispositions qui comprennent, en particulier, l'établissement et le suivi d'un Plan d'Assurance de la Qualité.

Le respect de ces principes exige une formalisation très précise de l'organisation du chantier et du système de contrôle mis en œuvre par l'entrepreneur (contrôle intérieur), ainsi que par le maître d'œuvre (contrôle extérieur).

Nota

Un PAQ est constitué :

- d'une note d'organisation générale du chantier,
- des procédures d'exécution, établies par nature de travaux ou par parties d'ouvrage,
- du cadre des documents de suivi d'exécution.

Il doit être adapté à l'importance et à la complexité de l'ouvrage, à la maturité des techniques employées et à l'incidence d'éventuelles non-conformités.

Un groupe de travail associant notamment des experts du SETRA, de la SNCF, de la FNTF et du SNBATI a élaboré un guide "Mise en œuvre des Plans d'Assurance de la Qualité - Exécution des ouvrages en béton armé et en béton précontraint - Guide pour les entrepreneurs et les maîtres d'œuvre" (SETRA - Décembre 1991), destiné à la fois aux entrepreneurs et aux maîtres d'œuvre, afin de préciser les relations entre les différents acteurs de la construction de l'ouvrage.

Il est utile de se reporter à ce document lors des différentes phases d'établissement d'un PAQ.

Il convient de rappeler l'importance d'une démarche anticipée pour l'établissement des PAQ, dès les phases de remise des offres (établissement du Schéma Organisationnel du PAQ ou SOPAQ), de mise au point du marché, ainsi que dès la période de préparation des travaux.

4.4 - Contrôle extérieur

(effectué par le maître d'œuvre)

La circulaire sur "la qualité de la route", en date du 22 décembre 1992 a rappelé que dans la phase d'exécution des travaux, "quel que soit le genre de Plan d'Assurance Qualité prescrit pour l'entreprise, le maître d'œuvre doit toujours exercer un contrôle extérieur en s'appuyant sur ses propres prestataires de service, des laboratoires et/ou des bureaux d'études associés".

4.4.1 - Organisation

La définition et l'organisation du contrôle extérieur sont de la responsabilité du maître d'œuvre.

La répartition des tâches est définie en fonction de celles qu'il souhaite et peut réaliser et des différents partenaires qu'il compte éventuellement associer (architectes, bureaux d'études, géomètres et laboratoires). Il est toutefois clair qu'il ne peut déléguer ses relations avec l'entreprise.

Il est conseillé qu'il constitue une équipe lui permettant d'effectuer toutes les prestations de contrôle extérieur.

Le maître d'œuvre doit regrouper les PAQ établis par ses différents partenaires, organiser les interfaces, les circuits de diffusion des documents et avis et les contrôles propres à chaque entité en intégrant les points sensibles (critiques ou d'arrêt) de ses propres tâches.

Ces modalités constituent, avec les éléments équivalents de l'entreprise, des sous-traitants et des fournisseurs, et complété par la description des relations entre les deux systèmes de contrôle (interface globale), le **Schéma Directeur de la Qualité** (SDQ) de l'opération.

Cette organisation doit être parfaitement définie et diffusée à tous les intervenants avant le démarrage du chantier (lors de la période de préparation des travaux).

4.4.2 - Intégration du contrôle extérieur au déroulement des travaux

Le contrôle extérieur ne peut être correctement exercé que s'il a été préparé aux différents stades de mise au point et d'exécution du projet :

- **avant la signature du marché** : rédaction des pièces écrites du DCE (Dossier de Consultation des Entreprises) :
 - type de PAQ ;
 - teneur minimale du contrôle intérieur, obligation éventuelle de contrôle externe ;
 - décomposition en lots de contrôle ;
 - liste des points d'arrêt ;
 - annonce des interventions du contrôle extérieur ;
- **dévolution du marché** :
 - établissement du programme de contrôle extérieur ;
 - ébauche du SDQ ;
- **préparation des travaux** :
 - finalisation du SDQ ;
- **exécution des travaux** :
 - actions de contrôle extérieur.

4.4.3 - Etablissement du programme de contrôle extérieur et décomposition en lots de contrôle

L'établissement du programme de contrôle extérieur doit nécessairement passer par les phases suivantes :

- **prise en compte du contenu du contrôle intérieur** (on se basera sur le CCTP si la teneur du contrôle intérieur proposé par les entreprises n'est pas encore connue) ;

- **définition des lots de contrôle** par parties d'ouvrages ou "secteurs techniques" (*) ;
- **recensement des opérations nécessaires** :
 - levées de points d'arrêt et critiques ;
 - établissement de la conformité ;
- **affectation des opérations spécifiques à chaque intervenant.**

Nota

Concernant la décomposition en lots de contrôle, par parties d'ouvrage ou par natures de travaux (secteurs techniques), qui doit être précisée au CCTP, on retiendra :

- que la somme des lots doit bien entendu constituer l'ouvrage entier ;
- que le lot de contrôle ne doit pas être trop global, ce qui limiterait certes les actions de contrôle, mais conduirait à accepter ou à refuser une grande quantité de travaux sur la base d'un faible nombre d'épreuves, portant donc sur une petite fraction des travaux ;
- qu'à contrario, si le lot correspond à des travaux élémentaires, le sens et l'intérêt même du lotissement disparaissent ;
- le principe de l'unité de temps, de lieu et d'action.

Par exemple, concernant le contrôle de la mise en précontrainte, on définira autant de lots que de familles de câbles.

(*) La construction d'un ouvrage fait appel à différents métiers. Plutôt que de raisonner par parties d'ouvrage (pieux, semelles, piles, culées, système d'appui, tabliers, équipements), il est commode de regrouper les travaux par natures ou "secteurs techniques" : implantation de l'ouvrage, fondations, ouvrages provisoires, armatures de béton armé, précontrainte, bétonnages, équipements, épreuves réglementaires...

Ainsi la réalisation de chaque partie d'ouvrage nécessite le recours à un ou plusieurs "secteurs techniques".



Tableau n°4 : Proposition de décomposition en lots de contrôles et actions de contrôle extérieur associées								
	Secteurs techniques							
	Fondations		Armatures de béton armé	Précontrainte		Bétonnage		
	Actions associées de contrôle extérieur							
	Conformité des fonds de fouille	Intégrité des fondations profondes	Vérification du ferrailage	Vérification des coefficients de transmission	Contrôle des injections	Contrôle de conformité	Contrôle des parements	Contrôle des indicateurs de durabilité
Pieux	-	Chaque pieu	Chaque pieu	-	-	Chaque pieu (ou ensemble de pieux) par jour	-	-
Semelles	Chaque semelle	-	Chaque semelle	-	-	Chaque semelle	-	-
Piles, culées	-	-	Chaque fût, chevêtre, sommier, ensemble des autres parties	-	-	Chaque fût, chevêtre, sommier, ensemble des autres parties	Ensemble des parements vus d'un point donné	Ensemble des élévations
Tabliers	-	-	Chaque tronçon (ou plot) de tablier ou chaque tablier	Chaque famille de câbles	Chaque phase d'injection	Chaque tronçon (ou plot) de tablier ou chaque tablier	Ensemble des parements vus d'un	Chaque tablier
Super structures coulées en place	-	-	Ensemble des super-structures par jour	-	-	Ensemble des super-structures par jour	-	-

Tableau n°5 : Proposition de décomposition en lots de contrôles et actions de contrôle extérieur associés		
Secteurs techniques		
	Équipements	Ouvrage terminé
Joints de chaussée	Ensemble des lignes de joints d'un tablier	
Actions associées de contrôle extérieur		
Dispositifs de sécurité	Ensemble des dispositifs d'un tablier	
Étanchéité	Chaque tablier	
Épreuve de chargement inspection détaillée initiale	-	Chaque tablier

Les prestations de contrôle extérieur doivent bien entendu être adaptées :

- à la nature de l'ouvrage et à son environnement,
- aux propositions de l'entreprise relatives aux méthodes et moyens d'exécution
- et au contrôle intérieur qu'elle doit exécuter et qu'elle propose de réaliser.

Le contrôle extérieur comporte un ensemble de tâches définies dès l'établissement des pièces écrites du marché.

Suivant les attributions du contrôle intérieur, pour un plan de contrôle donné (considéré nécessaire et suffisant), l'importance et la consistance même du contrôle extérieur doivent être adaptées.

Il s'agit en effet de ne tomber dans aucun des travers suivants :

- doubler le contrôle intérieur,
- l'entériner sans raison.

Même lorsque les épreuves d'étude et de convenance sont effectuées dans le cadre d'un contrôle intérieur, elles relèvent du maître d'œuvre en terme d'acceptation et sont donc de sa responsabilité.

Le maître d'œuvre doit donc organiser son contrôle extérieur pour pouvoir se prononcer valablement.

Quant au contrôle de conformité, il est clair qu'il n'est pas déléguable à l'entreprise, même si la réalisation des essais correspondants peut l'être dans certaines conditions.

Pour ce qui est des essais sur béton par exemple, la tendance est de transférer les essais de contrôle de conformité au contrôle intérieur. Cette tendance devrait d'ailleurs être officialisée avec les dispositions du nouveau fascicule 65-A du CCTG.

Le Maître d'œuvre, dans le cadre de son contrôle extérieur, devra alors procéder :

- à la validation des essais réalisés dans le cadre du contrôle intérieur (audits de laboratoire, essais et contrôles "croisés"),
- à l'interprétation des résultats vis-à-vis des critères de conformité,
- au suivi de l'évolution des résistances pour mettre en évidence d'éventuelles dérives au cours du chantier.

Lorsque la présence d'un représentant de la maîtrise d'œuvre sur le chantier n'est pas systématique, le suivi et la surveillance du contrôle intérieur, pour une tâche donnée de l'entreprise, peuvent être exécutés suivant les modalités suivantes :

- mode continu : présence permanente d'un technicien "chargé de contrôle" pendant l'opération considérée ;
- mode intermittent : intervention par sondages (par exemple, une fois par semaine), selon un programme préétabli ou de façon inopinée ;

- mode ponctuel : intervention à l'occasion des points d'arrêt et points critiques par exemple.

Ces modalités sont à adapter en fonction de l'organisation et du personnel (effectifs, qualification) de l'entreprise.

Le maître mot est ici la confiance, mais pas aveugle. Elle doit être étayée par le constat de l'application des procédures lors d'interventions inopinées ou d'audits.

En cas de défaillance du contrôle intérieur, le contrôle extérieur doit s'y substituer.

4.4.4 - Contenu du contrôle extérieur

Le contrôle extérieur est globalement décomposé en trois volets :

- acceptation du référentiel ;
- vérification de son application ;
- intervention aux étapes majeures, généralement associé à l'attestation de la conformité.

Concrètement, ces trois volets correspondent :

- **à l'analyse des PAQ :**
 - organisation de l'entreprise pour obtenir la qualité ;
 - procédures d'exécution des entreprises, des fournisseurs et des sous-traitants ;
- **à la vérification de l'application des PAQ :**
 - actions de suivi ;
 - surveillance du contrôle intérieur ;
- **à l'exécution d'épreuves spécifiques de contrôle** (mesures, essais, épreuves, constatations) :
 - sur les points sensibles (points d'arrêt et points critiques) ;
 - pour chaque lot de contrôle ;

Il s'agit du contrôle des étapes majeures de la construction (levée des points

d'arrêt par exemple) et de la conformité des travaux aux spécifications, déclinés par parties d'ouvrages ou par "secteurs techniques" ;

- **au suivi de la gestion des anomalies :**

- avis sur les propositions des entreprises (actions curatives et correctives) ;
- éventuels diagnostics complémentaires ;
- vérification du traitement ;
- suivi des mesures préventives ;

- **à la synthèse** (pour la constitution du "dossier d'ouvrage").

L'annexe n°3 détaille le contenu des actions du contrôle extérieur.



4.5 - Étapes majeures de la construction : points critiques, points d'arrêt

DÉFINITIONS

► **Un point critique** est un point de l'exécution qui nécessite une matérialisation du contrôle interne sur un document de suivi d'exécution, ainsi qu'une information préalable du Maître d'Œuvre pour qu'il puisse, s'il le juge utile, effectuer son contrôle.

L'intervention du contrôle extérieur n'est, dans ce cas, pas nécessaire à la poursuite de l'exécution.

La liste des points critiques, ainsi que les délais associés de préavis et de réponse du Maître d'Œuvre, est présentée par l'entrepreneur dans la Note d'Organisation Générale du PAQ, et soumise à l'acceptation du Maître d'Œuvre.

► **Un point d'arrêt** est un point critique particulier pour lequel un accord formel du Maître d'Œuvre ou d'un organisme mandaté par lui est nécessaire pour la poursuite de l'exécution.

La liste des points d'arrêt du projet est donnée dans le CCTP.

Les délais de préavis et de réponse du Maître d'Œuvre correspondants sont fixés dans le CCAP, qui doit préciser les dispositions à prendre par l'entreprise à l'issue du délai de réponse, en l'absence de réaction du Maître d'Œuvre.

Il est essentiel de définir un ensemble de points d'arrêt strictement nécessaires et suffisants : il ne s'agit en effet ni de décrédibiliser la démarche qualité des entreprises, ni de déresponsabiliser le maître d'œuvre.

Les points d'arrêt s'imposent en particulier lorsqu'il n'y a pas moyen de revenir en arrière après exécution de la phase de travaux suivante.

Tableau n°6 : Exemples de points d'arrêts (PA) et de points critiques (PC)
(liste non exhaustive)

Secteurs techniques	Phases d'exécution, actions de contrôle extérieur	PA	PC
Implantation de l'ouvrage	Implantation générale - Piquetage	X	
	Implantation des fouilles		X
Fondations superficielles	Conformité du fond de fouille d'une semelle de fondation	X	
	Contrôle du remblaiement d'une poche purgée	X	
	Autorisation de bétonnage d'une semelle de fondation	X	
Fondations sur pieux exécutés en place	Implantation des pieux		X
	Réception du forage (reconnaissance des sols et du niveau d'assise) et réception des armatures d'un pieu avant mise en place de celles-ci et bétonnage	X	
	Réception des pieux d'un appui après auscultation	X	
	Réception des fondations profondes d'un appui après recépage	X	
Ouvrages provisoires	Portance du terrain d'assise		X
	Réception des ouvrages provisoires de 1 ^{ère} catégorie et des matériaux spéciaux		X
Armatures de béton armé	Contrôle de la fabrication des cages et panneaux d'armatures		X
	Réception du ferrailage et de sa mise en place dans les coffrages		X
Bétonnages	Réception de la centrale de fabrication du béton	X	
	Autorisation de réaliser les épreuves de convenances des bétons	X	
	Épreuves de convenances des bétons		X
	Épreuves de convenances des bétons pour parements fins et ouvragés (avec réalisation d'éléments témoins)		X
	Essais de convenance du traitement de surface éventuel		X
	Contrôle de mise en place des coffrages		X
	Autorisation de bétonnage d'une partie d'ouvrage	X	
	Contrôle de la mise en œuvre du béton		X
	Épreuve d'information de résistance du béton		X
	Opération de décoffrage		X
Autorisation de décintrement d'un tronçon de tablier	X		
Précontrainte par post-tension	Réception des conduits et du système d'ancrage en place		X
	Autorisation de mise en tension des armatures de précontrainte	X	
	Contrôle de la mise en tension		X
	Réception de la mise en tension avant coupe des armatures (surlongeurs)	X	
	Épreuve de convenance du coulis d'injection		X
	Autorisation d'injection des gaines de précontrainte	X	
Contrôle de l'injection des gaines		X	
Produits structuraux préfabriqués en béton armé	Réception de l'usine de préfabrication	X	
	Autorisation de réaliser l'épreuve de convenance (réalisation de l'élément témoin ou du 1 ^{er} élément de série)	X	
	Acceptation de l'épreuve de convenance (autorisation de lancer la fabrication)	X	
	PC déjà évoqués relatifs aux armatures de béton armé et aux bétonnages		X
	Pré-réception en usine des éléments avant expédition	X	
	Réception des éléments sur site après transport	X	
Produits structuraux préfabriqués en béton précontraint par pré-tension	Réception de l'usine de préfabrication	X	
	Autorisation de réaliser l'épreuve de convenance (réalisation de l'élément témoin ou du 1 ^{er} élément de série)	X	
	Acceptation de l'épreuve de convenance (autorisation de lancer la fabrication)	X	
	PC déjà évoqués relatifs aux armatures de béton armé et aux bétonnages		X
	Contrôle de la mise en tension		X
	Contrôle de la mise en précontrainte des éléments (au relâchement des torons ou fils)		X
	Pré-réception en usine des éléments avant expédition	X	
Réception des éléments sur site à la livraison	X		
Équipements	Réception des bossages et de la pose des appareils d'appui	X	
	Réception du support de l'étanchéité	X	
	Réception de l'étanchéité et autorisation de mise en œuvre de la couche de roulement	X	
	Réception des dispositifs de retenue avant scellement	X	
	Réception des joints de chaussée avant fixation ou scellement	X	
Épreuves réglementaires	Autorisation de réaliser les épreuves de chargement	X	

4.6 - Affectation des actions du contrôle extérieur - Approche par secteurs techniques

Chaque “secteur technique” est régi par des règles particulières ou générales, exprimées ou implicites (“règles de l’art”), dont l’ensemble constitue le référentiel technique.

A chaque nature de travaux sont associées des exigences de performances, caractérisées par plusieurs paramètres, traduits en clauses et spécifications dans le marché, les fascicules du CCTG, les normes, les règles de l’art, ainsi que dans les documents “qualité” des entreprises.

Par exemple pour le “secteur Bétons”, les exigences de performances concernent :

▶ **la résistance mécanique, caractérisée par :**

- les propriétés du béton à l’état frais et durci (résistance minimale au décoffrage, résistance minimale à la mise en tension des câbles de précontrainte, résistance caractéristique à 28 jours, retrait, fluage, module d’élasticité...),
- l’état du béton en place dans l’ouvrage (compacité, résistance, ouverture des fissures...) ;

▶ **l’aspect des parements, caractérisé par leur forme, teinte et texture ;**

- ▶ **la durabilité**, caractérisée par l’enrobage des armatures, la composition du béton, son ouvrabilité (adaptation à une bonne mise en œuvre), sa teneur en air occlus, son mode de mise en œuvre, de serrage dans les coffrages (compacité) et de cure, sa perméabilité, sa stabilité chimique (résistance à la réaction alcali-silice par exemple)...

Les performances globales sont souvent traduites en obligations de moyens, que ce soit en terme de produits ou de mises en œuvre. Cela provient de la difficulté de caractériser en termes de résultats d’ensemble, certains aspects de résistance en place (exemple du béton) et de durabilité.

4.6.1 - Fondations des ouvrages

Tableau n°7 : Proposition d'affectation des actions du contrôle extérieur

Secteurs techniques FONDATIONS				
Opération	Analyse du PAQ	Vérification de l'application du PAQ		Épreuves de contrôle
		Suivi	Surveillance du contrôle intérieur	
Contrôle de l'assise des fondations	Analyse de la procédure d'exécution "fondations"	Contrôle de la mise en œuvre des pieux forés ou des pieux battus	-	Contrôle de conformité du fond de fouille
Contrôle de l'intégrité du béton des fondations profondes	-	-	-	Contrôle de l'intégrité du béton des fondations profondes

4.6.2 - Armatures passives

Tableau n°8 : Proposition d'affectation des actions du contrôle extérieur

Secteurs techniques ARMATURES				
Opération	Analyse du PAQ	Vérification de l'application du PAQ		Épreuves de contrôle
		Suivi	Surveillance du contrôle intérieur	
Contrôle du ferrailage passif	Analyse des procédures de "fabrication et pose du ferrailage" Avis sur les fournitures	Suivi de la fabrication du ferrailage	-	Vérification du ferrailage en place



Architectes : Frédéric ZIRK et Pierre DEZEULZE

4.6.3 - Précontrainte par post-tension et injections des conduits de précontrainte

Tableau n°9 : Proposition d'affectation des actions du contrôle extérieur				
Secteurs techniques PRÉCONTRAITE				
Opération	Analyse PAQ	Vérification de l'application du PAQ		Épreuves de contrôle
		Suivi	Surveillance du contrôle intérieur	
Contrôle de la précontrainte par post-tension	Analyse de la procédure "précontrainte" Avis sur les matériaux, sur les matériels Vérification des consignes (directives pression/allongements)	Vérification des matériels procédés et produits Vérification des conduits en place Suivi de mise en tension	-	Vérification des coefficients de transmission
Contrôle de l'injection des conduits de précontrainte	Analyse de la procédure "injection" Avis sur les matériaux, sur les matériels Vérification du dossier d'étude éventuel	Vérification de l'étanchéité des conduits Suivi des injections	-	Participation à l'épreuve de convenance Réalisation de l'épreuve de contrôle

4.6.4 - Bétons coulés en place

La norme NF EN 206-1 "Bétons - Spécification, performances, production et conformité", qui s'applique aux bétons fabriqués sur chantier ou prêts à l'emploi, destinés aux bâtiments et structures de génie civil, rend obligatoire l'établissement d'un système de contrôle de production documenté (manuel de contrôle de production, procédures et instructions), dont elle définit la teneur minimale (plan de contrôle).

Ce contrôle peut en outre être certifié (ce qui est un moyen donnant une garantie de régularité de la production).

Pour les marchés relevant du fascicule 65-A du CCTG, le recours à des centrales à béton bénéficiant du droit d'usage de la marque NF-BPE "ou équivalent" est obligatoire (la "procédure particulière" de la marque NF-BPE est également appropriée pour la fourniture des bétons de chantiers d'ouvrages d'art).

Avant toute production de béton, il est indispensable que le Maître d'œuvre procède ou fasse procéder à la réception des centrales à béton proposées (Point d'Arrêt).

Il s'agit d'une reconnaissance des installations avec vérification de la conformité aux exigences particulières du fascicule 65-A (précision du réglage des systèmes de dosage par exemple), aux exigences du marché (stockage primaire des granulats permettant leur essorage, dispositif enregistreur du processus de malaxage par exemple).

Le contrôle extérieur doit également comprendre l'examen et l'émission d'un avis sur :

- ▶▶ **le PAQ "particulier" du fournisseur de béton**, intégrant les exigences particulières du marché ;
- ▶▶ **les dossiers d'étude des bétons**, qui relèvent du contrôle intérieur de l'entreprise, ou les références des formules de béton proposées (il convient en particulier de vérifier la prise en compte des recommandations pour éviter les réactions de gonflement interne du béton : réaction alcali granulats et réaction sulfatique d'origine interne) ;
- ▶▶ **le PAQ de l'entreprise**, notamment la procédure de mise en œuvre du béton.

Les bétons prêts à l'emploi entrant dans la fabrication des ouvrages d'art sont généralement des Bétons à Propriétés Spécifiées (BPS).

La norme NF EN 206-1 précise bien que la "spécification" du béton relève de la responsabilité du prescripteur.

En pratique plusieurs entités spécifient des exigences à différents stades de la conception et de la réalisation (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entrepreneur, sous-traitant éventuel...) ; chacun est responsable de transmettre ses exigences spécifiées et complémentaires au maillon suivant de la chaîne, jusqu'au producteur du béton.

La "spécification" désigne donc la compilation finale, transmise au producteur de béton, qui doit être préalablement soumise par l'entreprise à la validation du Maître d'œuvre.

Le recours à un Béton à Composition Prescrite (BCP) impose que le prescripteur possède une bonne expérience dans le domaine de la formulation des bétons.

Les épreuves de convenance de fabrication du béton ont pour objet de vérifier, dans les conditions du chantier, l'aptitude à fabriquer puis à livrer un béton conforme à la spécification.

Elles relèvent du contrôle intérieur de l'entreprise, mais le contrôle extérieur doit systématiquement y être associé, pour permettre leur acceptation "pertinente" par le Maître d'œuvre.

Elles se déroulent sur le site des centrales de béton et permettent :

- ▶▶ la validation de la consistance du béton frais,
- ▶▶ le suivi de l'évolution des propriétés du béton frais (consistance, teneur en air occlus le cas échéant) dans le temps, après simulation du temps nécessaire

au transport et à la mise en œuvre du béton, en tenant compte des éventuelles attentes sur chantiers,

- ▶▶ la vérification du bon rendement volumique du béton (la somme des quantités de tous les constituants de la formule égale à un mètre cube),
- ▶▶ la vérification du caractère pompable du béton le cas échéant...

Ces épreuves de convenance sont parfois utilement complétées par des épreuves de convenance de mise en œuvre, qui doivent être prévues au CCTP, par exemple sous la forme de la réalisation d'éléments témoins (exigences particulières concernant les parements ouvragés, voire fins, pièces difficiles à bétonner, utilisation de bétons spéciaux...).

La mission de contrôle extérieur doit ensuite comprendre :

- ▶▶ le suivi ou la surveillance du contrôle intérieur, avec d'éventuelles vérifications,
- ▶▶ la réalisation des épreuves de contrôle, par lots préalablement définis.

Tableau n°10 : Proposition d'affectation des actions du contrôle extérieur

Secteurs techniques BÉTONNAGE				
Opération	Analyse PAQ	Vérification de l'application du PAQ		Épreuves de contrôle
		Suivi	Surveillance du contrôle intérieur	
Contrôle du béton par partie d'ouvrage	Vérification du dossier d'études Analyse des procédures de fabrication et mise en œuvre	Suivi de la fabrication Suivi de la mise en œuvre	-	Inspection de la centrale à béton Participation à l'épreuve de convenance Réalisation de l'épreuve de conformité
Contrôle des parements	Analyse de la procédure "parement"	-	-	Définition de l'élément témoin
Contrôle des indicateurs de durabilité	-	-	-	Essais de durabilité

Exemple de proposition de lotissement de contrôle d'un ouvrage et de nombre de prélèvements de béton :

Lot de contrôle	Nombre de prélèvements de béton
Fondations profondes (pieux)	3 par groupe de pieux fabriqués dans la journée
Appuis	3 par appuis et au moins un prélèvement par phase de bétonnage
Murs de soutènement	3 pour l'ensemble et au moins un prélèvement par phase de bétonnage
Structures en cadres ou portiques	3 (+1 par 100 m ³ supplémentaires au delà de 300 m ³ ou par phase de bétonnage)
Tablier	3 (+1 par 100 m ³ supplémentaires au delà de 300 m ³ ou par phase de bétonnage) et 1 au niveau du béton de reprise du joint de chaussée

Les épreuves d'information et l'utilisation éventuelle de la maturométrie, relèvent du contrôle intérieur de l'entreprise, ce qui ne dispense bien sûr pas de l'intervention du contrôle extérieur (avis sur la procédure particulière, avis sur l'étude spécifique de "maturométrie"...).

4.6.5 - Produits préfabriqués en béton

L'offre de produits préfabriqués en béton dans le domaine du génie civil comprend :

- les parties structurelles d'ouvrages (éléments de murs, cadres, portiques, Passages Inférieurs Voûtés, poutres "PRAD", hourdis de ponts mixtes...),
- les écrans acoustiques (poteaux, panneaux...),
- les parements, coffrages perdus,
- les équipements d'ouvrages (corniches...).

La préfabrication apporte en effet une réponse très intéressante aux problématiques des différents acteurs (Maître d'Ouvrage, Maître d'Œuvre et entreprises) vis-à-vis du respect des délais, des coûts, de la qualité de réalisation (qualité esthétique des parements par exemple).

Pour autant, il est nécessaire de prendre en compte certaines dispositions particulières rappelées par la suite.

L'emploi de produits préfabriqués en béton permet de concentrer les contrôles de chantier sur les points spécifiques liés à leur mise en œuvre (étalement, calage, stabilité en phase provisoire) et à leur assemblage (clavages).

► Le contexte réglementaire et normatif :

Les normes de référence pour les produits préfabriqués en usine sont les normes de produit, qui définissent complètement leurs caractéristiques et leurs constituants.

La plupart des normes de produit disposent d'une partie harmonisée qui ouvre au marquage CE. De nombreuses normes sont dites "autoportantes" car elles contiennent en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires.

En ce qui concerne les produits préfabriqués structuraux en béton, les normes européennes harmonisées lorsqu'elles existent, s'appuient sur la norme NF EN 13369 "Règles communes pour les produits préfabriqués en béton".

Lorsqu'il n'existe pas de norme spécifique de produit, la norme NF EN 13369 s'applique si elle est référencée par les pièces du marché.

Ces normes précisent et complètent, pour les aspects concernant les produits préfabriqués structuraux, la norme NF EN 206-1. Les normes des produits structuraux renvoient par ailleurs, directement ou via la norme NF EN 13369, à l'édition nationale de l'Eurocode 2.

Les exigences de durabilité de la norme NF EN 13369 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 ;
- la résistance minimale à la compression du béton ;
- la teneur maximale en chlorures ;

et le cas échéant :

- la teneur minimale en air occlus ;
- le type de ciment ;
- les seuils associés aux essais de performance.

Les valeurs limites spécifiées (en fonction de la classe d'exposition) applicables à la composition des bétons destinés aux produits préfabriqués en usine sont définies dans deux tableaux normatifs (NA.F.1 et NA.F.2), communs aux normes NF EN 206-1 et NF EN 13369.

Pour les produits préfabriqués courants, l'industriel a la possibilité d'utiliser au choix les exigences de l'un ou l'autre des deux tableaux. Pour chaque type d'élément préfabriqué, une procédure documentée doit alors mentionner le tableau auquel il est fait référence.

Normalement, les spécifications du tableau NA.F.2 qui reposent sur une approche performantielle de la durabilité permettant de prendre en compte l'ensemble des facteurs liés aux formules de béton et aux procédés de fabrication, sont les plus appropriées pour les produits préfabriqués.

Le cahier des charges peut cependant faire explicitement référence au tableau NA.F.1.

Pour les marchés publics de l'Etat, le fascicule 65-A du CCTG, les recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (LCPC juin 1994), ainsi que les recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel (LCPC décembre 2003) restent bien entendu applicables.

Les recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel ne concernent cependant pas les produits en béton préfabriqués en usine conformes à des normes prévoyant des spécifications relatives au comportement au gel avec ou sans sels de déverglaçage et dont la conformité est

attestée par une certification de produit accréditée COFRAC (QUALIF IB éléments architecturaux fabriqués en usine - additif au cahier des charges de septembre 2002, par exemple).

Pour maintenir et améliorer la qualité, la FIB (Fédération de l'Industrie du Béton), organisme certificateur, délivre la certification de qualification QUALIF IB pour des familles de produits (produits d'environnement, éléments architectoniques et escaliers en béton) aux industriels respectant les exigences d'un programme de maîtrise de la qualité fondé sur un cahier des charges.

Ce document constitue un texte normatif complet résultant d'une concertation entre les maîtres d'ouvrage, les architectes, les maîtres d'œuvre, les utilisateurs, les pouvoirs publics, les industriels, les experts et les organismes certificateurs. Il définit toutes les performances des produits (dimensions, caractéristiques mécaniques, thermiques,...) et leurs différentes classes. Les produits spécifiques à la réalisation des ouvrages d'art, à l'exception des parements, n'entrent cependant pas à ce jour dans le champ de cette certification.

►► **Le contrôle extérieur :**

La satisfaction des exigences contractuelles relatives aux performances mécaniques, à l'aspect, à l'esthétique des parements, à la durabilité (prise en compte des classes d'exposition de l'ouvrage) passe par :

- une formulation adéquate du béton,
- la maîtrise et la régularité de sa fabrication,
- le respect des règles de l'art (enrobages des armatures par exemple),
- et l'intégrité des éléments (absence de défauts initiaux).

Il est donc essentiel que le maître d'œuvre procède à une évaluation préalable du ou des sites de préfabrication proposés, en portant une attention particulière :

- aux installations (niveau d'équipement du matériel de fabrication du béton par exemple),
- à la maîtrise du processus de fabrication,
- au système qualité, contrôle interne, voire externe,
- à l'intégration des exigences particulières du cahier des charges.

Compte tenu de l'éloignement fréquent entre les sites de préfabrication, le chantier, ainsi que le siège de la Maîtrise d'œuvre, l'organisation du contrôle extérieur de la fabrication des produits préfabriqués peut revêtir une forme particulière.

En fonction des disponibilités de l'équipe de la maîtrise d'œuvre, il pourra en effet être fait appel à un laboratoire, avec transfert de délégation pour le contrôle du processus de réalisation et la levée des points d'arrêt.

Le plan de contrôle doit être établi en prenant en considération le rôle structurel ou non des éléments, les exigences particulières (classes d'exposition par exemple), les difficultés d'exécution...

Les points sensibles (PA points d'arrêt et PC points critiques) suivants paraissent appropriés (liste non exhaustive) :

- **PA** : Agrément du préfabricant et du ou des sites de préfabrication proposés, après réalisation d'une visite initiale du site, surtout dans le cas des produits structurels non courants, analyse et mise au point du PAQ ;
- **PA** : Autorisation de réaliser l'élément témoin ou le premier élément de la série, au titre de l'épreuve de convenance ;
- **PA** : Acceptation de l'épreuve de convenance ;
- **PC** : habituels en fonction de la nature des travaux (béton armé ou précontraint par exemple), que le contrôle extérieur pourra vérifier (application du PAQ), avec éventuelle exécution d'épreuves spécifiques de contrôle, suivant un mode ponctuel, intermittent voire continu ;
- **PA** : Préréception en usine des éléments avant expédition ;
- **PA** : Réception des éléments sur chantier après transport.

Les points suivants, à maîtriser dans le processus de fabrication des éléments, doivent faire l'objet d'une attention particulière :

- respect de la géométrie des éléments (nombreuses réutilisations des moules), des positionnements des attentes et réservations (clavages et connexions ultérieurs sur site...) ;
- respect des enrobages des armatures ;
- maîtrise du cycle d'étuvage, de la cure du béton ;
- maîtrise des opérations réalisées aux jeunes âges : démoulage, mise en précontrainte, manutentions... ;
- maîtrise des conditions de stockage et de transport.

En définitive, l'obtention de la qualité requise dans le cas du recours à la préfabrication nécessite, de la même manière que pour les travaux réalisés in situ :

- anticipation (il faut en particulier profiter de la Période de Préparation des Travaux),
- implication du Maître d'Œuvre et organisation particulière du contrôle extérieur,
- implication de l'Entreprise mandataire, pour la gestion des interfaces et la réalisation d'un éventuel contrôle externe,
- et bien évidemment implication du préfabricant (maîtrise du processus, contrôle interne, système Qualité).

4.6.6 - Équipements des ouvrages

Tableau n°11 : Proposition d'affectation des actions du contrôle extérieur pour les équipements des ouvrages

Secteurs techniques ÉQUIPEMENTS				
Opération	Analyse PAQ	Vérification de l'application du PAQ		Épreuves de contrôle
		Suivi	Surveillance du contrôle intérieur	
Contrôle des appareils d'appui	Avis sur les fournitures Analyse de la procédure de mise en œuvre des appareils d'appui	-	-	Contrôle des appareils d'appui en élastomère fretté ou des appareils d'appui mis en œuvre
Contrôle des joints de chaussée	Avis sur les fournitures Analyse de la procédure de mise en œuvre des joints de chaussée	-	-	Vérification de la qualité des ancrages (suivant le type joint)
Contrôle des dispositifs de sécurité (cas des Barrières Normales BN4)	Avis sur les fournitures Analyse des procédures de fabrication et de mise en œuvre des BN4	Contrôle de la fabrication des supports, lisses, ancrages Contrôle du montage	-	Contrôle de la galvanisation
Contrôle de l'étanchéité de chaque tablier	Avis sur les produits Analyse de la procédure de mise en œuvre de l'étanchéité	Suivi de la mise en œuvre	-	Examen du support béton Réception de l'étanchéité (avec éventuelle vérification) de l'adhérence



4.6.7 - Épreuves réglementaires et inspection détaillée initiale

Les épreuves réglementaires et l'Inspection Détaillée Initiale font partie de la réception définitive de l'ouvrage. De ce fait elles relèvent de la responsabilité du maître d'œuvre.

Nota

L'établissement du dossier de récolement de l'exécution de l'ouvrage a une importance capitale.

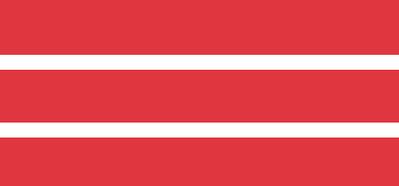
Ce dossier doit comprendre :

- le programme et le calendrier réels d'exécution,
- les plans et les notes de calculs mis à jour,
- les compte rendu d'incidents et les calculs éventuels les accompagnant,
- le PAQ accompagné de tous les résultats des contrôles, épreuves et essais divers,
- une notice de visite et d'entretien comprenant le suivi géométrique de l'ouvrage, les éléments nécessaires à la visite et à l'entretien des différentes parties de l'ouvrage, dans l'esprit de "l'Instruction Technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art" de la Direction des Routes et de ses fascicules annexes (cf fascicule sur les dossiers d'ouvrages).

Des inspections avant la fin des délais de garanties particulières définies au CCAP et avant la fin du délai de la garantie décennale doivent également être réalisées, à l'initiative du maître d'ouvrage.

De même, il y aura lieu de renouveler périodiquement des essais de durabilité suivant les recommandations du Guide AFGC relatif à l'approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité.

Cela permettra en particulier de programmer à bon escient les actions d'entretien spécialisé préventif.



Chapitre

5

Bétonnage par pompage des bétons

- 5.1 - Technique de pompage du béton**
- 5.2 - Atouts du bétonnage par pompage des bétons**
- 5.3 - Utilisation des pompes à béton**
- 5.4 - Positionnement de la pompe, respect des consignes de sécurité**
- 5.5 - Respect de l'environnement en fin de coulage**

5.1 - Technique de pompage du béton

La technique de pompage du béton consiste à refouler, par l'intermédiaire d'une pompe, le béton dans une tuyauterie.

5.1.1 - Procédé de pompage

Le béton est préalablement "agité" dans la trémie de réception de la pompe dès sa sortie du camion malaxeur.

Le cheminement du béton dans la tuyauterie, se fait grâce à un cycle aspiration/poussée, à l'aide de deux pistons reliés à deux vérins hydrauliques évoluant à l'intérieur de deux cylindres appelés "chemises" (le premier vérin remonte dans sa chemise : aspiration du béton, simultanément, le second vérin descend : poussée du béton).

Le nombre de cycles par minute "aspiration / poussée", permet de définir la cadence de pompage en mètres cubes par heure.

Nota

Le débit courant des pompes varie entre 20 et 150 m³ par heure.

5.1.2 - Matériel de pompage

Il existe deux types de pompes :

- les pompes automotrices à tuyaux ou à flèche de répartition ;
- les pompes stationnaires plus spécialement utilisées en poste fixe sur des chantiers de Génie Civil de longue durée. Dans ce cas, le béton est transporté dans de la tuyauterie posée au sol et alimente un mât de bétonnage ou simplement, assure le remplissage d'un coffrage.

Deux systèmes de pompage complètent la gamme de l'offre de matériel :

- la pompe à pistons qui permet d'obtenir des débits de pompage importants avec des bétons de consistance S 2 ;
- la pompe à rotor, qui est peu utilisée en chantier d'ouvrage d'art. Elle est plus adaptée aux pompages délicats tels que le pompage des bétons spéciaux (béton léger, béton autoplaçant etc....).

Les types de pompes utilisées sur les chantiers d'ouvrage d'art courants, sont généralement des pompes à pistons, automotrices à flèche de répartition.

Les flèches, composées d'éléments articulés dont le nombre de bras varie selon les modèles (de 3 à 5 bras) supportent la tuyauterie métallique dans laquelle va circuler le béton. Généralement le diamètre des tuyaux est de 125 mm.

La tuyauterie est prolongée, en bout de flèche, par un tuyau flexible en caoutchouc armé, qui facilite la mise en place du béton avec précision dans le coffrage ou la zone à bétonner.



5.2 - Atouts du bétonnage par pompage des bétons

Le bétonnage par pompage des bétons offre de nombreux atouts.

5.2.1 - Aspect qualité

Compte tenu du procédé de pompage, les caractéristiques initiales du matériau béton sont préservées lors de son transport dans la tuyauterie de la pompe à béton.

La mise en œuvre du béton à la pompe permet d'éviter les reprises de bétonnage et d'assurer l'homogénéité des parements.

La hauteur de chute du béton à partir de la sortie de la flèche jusqu'au point de bétonnage est freinée par un tuyau flexible. Le béton coule en continu jusqu'à son emplacement définitif et conserve ainsi toute son homogénéité.

Dans le cas de bétonnage dans un coffrage (semelle, pile, culée) le tuyau flexible est descendu au point bas du coffrage, il est remonté simultanément avec le béton au fur et à mesure du remplissage du coffrage, ce qui permet d'éviter toute chute au béton.

Le pompage permet de mettre en œuvre, dans les coffrages, des bétons de consistance et de caractéristiques à l'état frais plus homogènes.

5.2.2 - Rapidité de mise en œuvre

Le pompage permet d'accélérer la mise en œuvre du béton.

Lors du bétonnage dans un coffrage, le gain de temps de coulage est essentiellement dû à l'apport important et rapide de béton (le volume transporté par une toupie, varie de 6 à 8 m³ par rotation).

Le tuyau de flèche reste en place à l'intérieur du coffrage jusqu'à la fin du remplissage, contrairement au bétonnage à la grue qui nécessite des rotations de remplissage vidange de la benne à béton dont la capacité est limitée à la performance de la grue.



Le bétonnage à la pompe permet de libérer la grue de chantier qui peut ainsi être affectée à d'autres tâches.

Pour le bétonnage d'un tablier de pont, les performances des pompes permettent d'assurer des cadences moyennes de 60 m³/heure, voire supérieures.

5.2.3 - Accessibilité

L'accès aux différents points de coulage d'un ouvrage est facilité par l'éventail de longueurs de flèches proposées par les entreprises adhérentes au Syndicat National du Pompage de Béton (SNPB), de 20 mètres à près de 50 mètres de portée.

Dans le cas d'un tablier de pont, le pompage permet d'amener le béton avec précision au bon endroit. Il est possible d'installer une ou plusieurs pompes en fonction des caractéristiques géo-



métriques de l'ouvrage, du plan de bétonnage et de la cadence de pompage retenue par l'entreprise et imposée par le système d'étaie afin d'assurer une bonne répartition des charges sur l'ouvrage en cours de bétonnage.

Le pompage permet également de mettre en place du béton dans des zones ou des coffrages difficilement accessibles.

5.3 - Utilisation des pompes à béton

5.3.1 - Choix du matériel

Le choix du matériel de pompage à utiliser est fonction :

- de la partie d'ouvrage à bétonner (semelle, pile, culée, cheville...)
- des contraintes d'accessibilité du point de bétonnage (pour définir la longueur de flèche),
- et de la cadence de bétonnage souhaitée.

Dans le cas de coulage d'un tablier, et suivant le plan de bétonnage, une ou plusieurs pompes peuvent être mises en place.

La longueur de flèche doit être adaptée aux caractéristiques géométriques de l'ouvrage et à l'emplacement de la ou des pompes.

Le choix du débit de la pompe est fonction de la capacité de production de la centrale B.P.E. et du nombre de camions malaxeurs affectés à l'approvisionnement du chantier. Cette logistique doit être adaptée à la cadence théorique de bétonnage prévue par l'entreprise qui dépend du personnel et du matériel affectés à la mise en œuvre du béton sur l'ouvrage.

5.3.2 - Configuration du chantier



Dans le cas d'utilisation d'une seule pompe, le bétonnage débutera, en principe, à partir d'une culée, du point bas de l'ouvrage vers son point haut.

En cas d'utilisation de plusieurs pompes et selon le type d'ouvrage, les pompes peuvent être disposées au niveau et de chaque côté des culées. Le bétonnage se fait du centre de l'ouvrage vers les culées ou, plus rarement, des culées vers le centre. Elles peuvent

aussi être installées à un niveau inférieur à celui du tablier à couler.



Le personnel de l'entreprise, affecté à la pompe, doit veiller au bon remplissage de la trémie de réception de la pompe et avertir le conducteur lorsque la toupie est vide afin que ce dernier stoppe le pompage pour empêcher toute projection de béton.

5.3.3 - Essais de convenance

Dans la majorité des chantiers d'ouvrages d'art, un essai de convenance est nécessaire pour valider la pompabilité de la formule de béton dans le contexte du chantier.

Ces essais permettent d'optimiser à la fois la composition du béton (ouvrabilité, consistance), la capacité de débit de la pompe, la configuration des installations ainsi que le mode opératoire du pompage.



Nota

Pour éviter la formation d'un bouchon au démarrage de l'opération de pompage, il convient de pomper préalablement de la "barbotine" (mélange de ciment et d'eau ou produit équivalent) dont la quantité à utiliser est à adapter en fonction de la longueur de la flèche de la pompe.

Cette barbotine ne doit pas être déversée sur le tablier ou dans le coffrage.

5.4 - Positionnement de la pompe, respect des consignes de sécurité

Le positionnement de la pompe doit prendre en compte son environnement au sol, le gabarit aérien disponible ainsi que les contraintes de coulage.

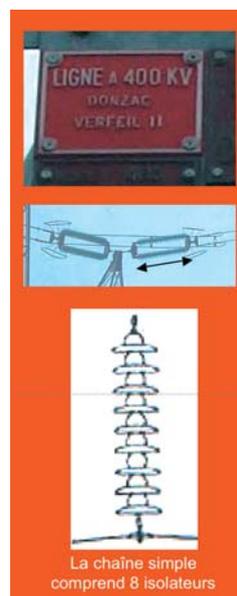
5.4.1 - Risques électriques

En cas de présence d'une ligne électrique au-dessus de la zone d'implantation de la pompe, il convient d'identifier la tension de la ligne et de contacter les responsables d'EDF pour demander la coupure ou l'isolation temporaire de l'alimentation de cette ligne. En cas d'impossibilité de coupure, l'opérateur de la pompe devra respecter les distances d'approche conseillées de la ligne :

- minimum 3 mètres de distance pour 20 000 volts ;
- minimum 5 mètres pour 400 000 volts.

Nota

En cas de pluie ou de brouillard, ces distances doivent être augmentées de 2 mètres au minimum.



Il est recommandé d'utiliser des pompes équipées de moyens de détection de champs électriques qui permettent d'alerter en permanence le conducteur de la pompe de la proximité d'une ligne électrique.

5.4.2 - Stabilisation, préparation du sol

La pompe doit être stabilisée conformément aux recommandations du constructeur et être mise en place sur un emplacement plan. L'emprise au sol doit être adaptée à la longueur de la flèche et à sa zone d'évolution.

Le sol doit être suffisamment compacté. Il doit résister à la pression exercée par les patins de stabilisateurs afin d'éviter leurs éventuels enfoncements (la pression au sol est donnée par le constructeur de la pompe). La surface de la plateforme doit permettre les manœuvres nécessaires aux positionnements des toupies à l'arrière de la pompe.

5.4.3 - Sécurité au sol dans l'environnement immédiat de la pompe

L'accès à l'aire de bétonnage (emplacement de la pompe et aire de manœuvre des toupies) doit être dégagé de tout obstacle pouvant :

- gêner l'approche des camions malaxeurs ;
- gêner les manœuvres de la flèche de la pompe ;
- provoquer un accident corporel au personnel évoluant dans cette zone, par exemple, le personnel de laboratoire chargé d'effectuer les prélèvements pour la confection des éprouvettes de contrôle du béton ou le personnel chargé de guider la toupie à se placer à l'arrière de la pompe.

Si la surface de l'aire de bétonnage le permet, il est intéressant de positionner deux toupies à l'arrière de la pompe pour améliorer la cadence de coulage en optimisant le temps de manœuvre des toupies.

5.4.4 - Équipements de Protection Individuels

Le port des Equipements de Protection Individuels (EPI) est obligatoire sur tous les chantiers. Les EPI comprennent :

- le casque ;
- les chaussures de sécurité ;
- les gants ;
- les lunettes ;
- le baudrier réfléchissant.

Le personnel, désigné par l'entreprise et affecté au guidage des camions malaxeurs, doit lui aussi impérativement porter les EPI.

Il doit être équipé d'un baudrier réflectorisé afin d'être visible de jour comme de nuit et se tenir sur le côté du camion de manière à être vu par le chauffeur lors de la manœuvre de recul.

Le conducteur de la pompe et les chauffeurs de toupies doivent également porter les EPI.

5.4.5 - Sécurité du personnel évoluant sur l'ouvrage

Le conducteur de la pompe se positionne généralement au plus près du point de bétonnage de manière à avoir une bonne visibilité pour effectuer ses manœuvres en toute sécurité.

Pour le bétonnage d'un tablier et suivant l'implantation de la pompe, il peut être au même niveau ou à un niveau situé bien au-dessus de celle-ci.

A l'aide de sa radiocommande, il peut manœuvrer la flèche en toute sécurité pour lui et pour le personnel évoluant sur le tablier.

5.5 - Respect de l'environnement en fin de coulage

Afin de préserver l'environnement, il est nécessaire que l'entreprise prévoit, sur le chantier, une aire de lavage permettant aux chauffeurs des toupies :

- de nettoyer leurs goulottes avant de reprendre la route,
- de laver la flèche et la trémie de la pompe à la fin du coulage.



Chapitre

6

Optimisation de l'enrobage des armatures

- 6.1 - Incidence de la qualité de l'enrobage**
- 6.2 - Enrobage minimal et enrobage nominal**
- 6.3 - Philosophie de l'enrobage
suivant l'Eurocode 2**
- 6.4 - Enrobage minimal suivant l'Eurocode 2**
- 6.5 - Processus de détermination
de l'enrobage nominal
suivant l'Eurocode 2**

Nota

Ce chapitre ne traite que de l'enrobage des armatures du béton armé et ne concerne donc pas l'enrobage des armatures de précontrainte prétendues et des câbles de précontrainte. Il ne traite que l'enrobage des structures coulées en place.

Pour les produits préfabriqués en béton, la norme NF EN 13369 précise les exigences à appliquer.

6.1 - Incidence de la qualité de l'enrobage

L'enrobage des armatures représente la distance entre la surface du béton et l'armature la plus proche (cadres, étriers, épingles, armatures de peau, etc.).

L'enrobage des armatures et les caractéristiques du béton d'enrobage sont les paramètres fondamentaux permettant de maîtriser la pérennité des ouvrages aux phénomènes de corrosion et donc leur durée de service. Ainsi, il est possible de placer les armatures hors d'atteinte des agents agressifs en les protégeant par une épaisseur suffisante d'un béton compact, ayant fait l'objet d'une cure appropriée.

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont naturellement protégées des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface du métal, d'une pellicule protectrice de ferrite $Fe_2 O_3 CaO$ (dite de passivation). Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer.

La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 13). Tant que les armatures se trouvent dans un milieu alcalin présentant un pH compris entre 9 et 13,5, elles sont protégées.

Nota

L'enrobage et la compacité ont un impact immédiat sur la période de propagation qui précède l'initiation et le développement de la corrosion des armatures. A titre d'exemple, il est couramment reconnu que l'augmentation de l'enrobage minimal d'une valeur de 10 mm permet d'augmenter la durée de service de l'ouvrage pour passer de 50 ans à 100 ans.

Nota

Des précisions complémentaires pour la détermination de l'enrobage pour les structures en béton conçues avec l'Eurocode 2 sont données dans le Guide Technique LCPC "**Note Technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France**".

Rappel des règles BAEL 91

Article 7.1 - Protection des armatures

L'enrobage de toute armature est au moins égal à :

- 5 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins, ainsi que pour les ouvrages exposés à des atmosphères très agressives,
- 3 cm pour les parois coffrées ou non et qui sont soumises (ou sont susceptibles de l'être) à des actions agressives, à des intempéries ou des condensations, ou encore, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide,
- 1 cm pour des parois qui seraient situées dans des locaux couverts et clos et qui ne seraient pas exposées à des condensations.

6.2 - Enrobage minimal et enrobage nominal

C'est l'enrobage nominal qui est précisé sur les plans d'exécution de l'ouvrage. L'enrobage nominal est égal à la somme de l'enrobage minimal et d'une marge pour tolérances d'exécution.

6.3 - Philosophie de l'enrobage suivant l'Eurocode 2

Les recommandations de l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1), en matière d'enrobage des bétons de structures, sont novatrices. Elles résultent d'un retour d'expérience sur la durabilité des ouvrages construits depuis plusieurs décennies et sur les recherches récentes en matière de protection des armatures vis-à-vis des risques de corrosion. Elles visent, en conformité avec la norme NF EN 206-1, à optimiser de manière pertinente la durabilité des ouvrages. En effet, la détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte de façon extrêmement détaillée :

- la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) qui traduit les conditions environnementales ;
- la durée de service attendue (ou durée d'utilisation du projet) ;
- la classe de résistance du béton ;
- le type de système de contrôle qualité mis en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton et la maîtrise du positionnement des armatures ;
- la régularité de la surface contre laquelle le béton est coulé ;
- le type d'armatures (précontraintes ou non) et leur nature (acier au carbone, acier inoxydable) et d'éventuelles protections complémentaires contre la corrosion.

La valeur de l'enrobage peut ainsi être optimisée, en particulier :

- si l'on choisit un béton présentant une classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence (définie pour chaque classe d'exposition) ;
- s'il existe un système de contrôle de la qualité ;
- si l'on utilise des armatures inox.

L'Eurocode 2 permet aussi de dimensionner l'ouvrage pour une durée de service supérieure, en augmentant la valeur de l'enrobage. L'optimisation des performances du béton et de l'enrobage des armatures constitue un facteur de progrès essentiel pour garantir la durabilité des ouvrages.

6.4 - Enrobage minimal suivant l'Eurocode 2

L'enrobage minimal est défini dans la norme NF EN 1992-1-1, section 4 "Durabilité et enrobage des armatures" (article 4.4.1). Il doit satisfaire en particulier aux exigences de transmission des forces d'adhérences et assurer une protection des aciers contre la corrosion.

Il est donné par la formule :

$$C_{\min} = \max [C_{\min,b} ; C_{\min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,st} - C_{dur,add} ; 10 \text{ mm}]$$

- Avec $C_{\min,b}$ enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence (béton/armature).
- $C_{\min,dur}$ enrobage minimal vis-à-vis des conditions environnementales. $C_{\min,dur}$ tient compte de la classe d'exposition et de la classe structurale (qui dépend de la durée d'utilisation du projet).
- Et :
 - $\Delta C_{dur,y}$ marge de sécurité (valeur recommandée 0) ;
 - $\Delta C_{dur,st}$ réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'utilisation, par exemple, d'acier inoxydable ;
 - $\Delta C_{dur,add}$ réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protections complémentaires.

Nota

La valeur de $C_{\min,b}$ est rarement dimensionnante pour la détermination de C_{\min} .

6.5 - Processus de détermination de l'enrobage nominal suivant l'Eurocode 2

Le processus de détermination de l'enrobage des armatures dans chaque partie d'ouvrage comporte les 8 étapes suivantes qui vont permettre de prendre successivement en compte :

- la classe d'exposition,
- la classe structurale et les modulations possibles en fonction de choix particuliers,
- le type d'armatures,
- des contraintes particulières,
- les tolérances d'exécution.

▶ Étape 1 : PRISE EN COMPTE DES CLASSES D'EXPOSITION

Un béton peut être soumis à plusieurs classes d'exposition concomitantes qui traduisent avec précision l'ensemble des actions environnementales. Les classes d'exposition de chaque partie d'ouvrage sont une donnée de base du projet. Elles sont imposées par les conditions d'environnement du projet. Elles sont définies dans le tableau 4.1 (F) de l'article 4.2 de l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1) en conformité avec la norme NF EN 206.1.

▶ Étape 2 : CHOIX DE LA CLASSE STRUCTURALE

L'Annexe Nationale de l'Eurocode 0 (NF EN 1990 - Base de calcul des structures) définit 5 catégories de durée d'utilisation de projet pour les ouvrages en France.

À chaque catégorie est associée une durée d'utilisation de projet (durée pendant laquelle une structure est censée pouvoir être utilisée en faisant l'objet de la maintenance escomptée, mais sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures).

Pour les ponts, par exemple, cette durée est de 100 ans.

Ces durées supposent la mise en œuvre de bétons conformes aux tableaux N.A.F. 1 ou N.A.F. 2 de la norme NF EN 206.1.

Les documents particuliers du marché peuvent spécifier des durées d'utilisation de projet différentes.

La valeur de $C_{\min, \text{dur}}$ dépend de la classe d'exposition et de la classe structurale. Cette classe structurale peut être modulée.

Les modulations possibles de la classe structurale, en fonction de choix particuliers pour le projet (durée d'utilisation de projet, classe de résistance du béton, nature du ciment, compacité du béton d'enrobage), engageant le maître d'œuvre, sont données dans le tableau 4.3 N (F) de l'article 4.4.1.2 (5) de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1.

Ces modulations de la classe structurale, pour déterminer l'enrobage minimal $C_{\min, \text{dur}}$, sont synthétisées dans le tableau n°12 ci-dessous (extraits du tableau 4.3 N (F)).

L'amélioration de la qualité du béton se traduit en particulier par une minoration de la classe structurale de 1 ou de 2.

Tableau n°12 : Modulation de la classe structurale recommandée							
Critère	Classe d'exposition						
	X0	XC1	XC2-XC3	XC4	XD1-XS1 XA1	XD2-XS2 XA2	XD3-XS3 XA3
Durée d'utilisation de projet	100 ans, majoration de 2						
	25 ans et moins minoration de 1						
Classe de résistance du béton	≥C 30/37	≥C 30/37	≥C 30/37	≥C 35/45	≥C 40/50	≥C 40/50	≥C 45/55
	Minoration de 1						
	≥C 50/60	≥C 50/60	≥C 55/67	≥C 60/75	≥C 60/75	≥C 60/75	≥C 70/85
	Minoration de 2						
Nature du liant	-	≥C 35/45	≥C 35/45	≥C 40/50	-	-	-
	-	Béton à base de CEM 1 sans cendre volantes			-	-	-
	Minoration de 1						
Enrobage compact	Minoration de 1						

» Étape 3 : DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL VIS-À-VIS DE LA DURABILITÉ $C_{\min, \text{dur}}$

Les valeurs de $C_{\min, \text{dur}}$ (en mm) requis vis-à-vis de la durabilité sont données en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale dans le tableau

4.4 N pour les armatures de béton armé et dans le tableau 4.5NF pour les armatures de précontrainte à l'article 4.4.1.2 (5) de la norme NF EN 1992-1-1

Tableau n°13 : Valeur de $C_{min,dur}$ en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale dans le cas des armatures de béton armé

Classe structurale	Classe d'exposition						
	X0	XC1	XC2-XC3	XC4	XD1-XS1	XD2-XS2	XD3-XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Tableau n°14 : Valeur de $C_{min,dur}$ en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale dans le cas des armatures de précontrainte

Classe structurale	Classe d'exposition						
	X0	XC1	XC2-XC3	XC4	XD1-XS1	XD2-XS2	XD3-XS3
S1	sans objet	10	15	25	30	35	40
S2		15	25	30	35	40	45
S3		20	30	35	40	45	50
S4		25	35	40	45	50	55
S5		30	40	45	50	55	60
S6		35	45	50	55	60	65

Nota

La classe structurale correspondant à une durée d'utilisation de projet de 50 ans est la classe S4.

Pour les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4, la valeur de $C_{min,dur}$ est déterminée en prenant en compte les classes d'exposition concomitantes XC1 à XC4 et XD1 à XD3.

L'Annexe Française de la norme NF EN 1992-1-1 précise comment tenir compte de cette concomitance de classe.

Tableau n°15 : Concomitance des classes d'exposition

Type de salage	Sous classe d'exposition XF			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Peu fréquent	XC4	SO	XD1 ou XC4*	SO
Fréquent	SO	XD1 ou XD3*	SO	XD2 ou XD3**
Très fréquent	SO	SO	SO	XD3

SO : sans objet

* XD1 : si le béton est formulé avec un entraîneur d'air.

XC4 : si le béton est formulé sans entraîneur d'air

**XD3 : pour les éléments très exposés (pour les ponts : corniches, longrines d'ancrage des dispositifs de retenue, solins des joints de dilatation).

Pour les classes d'exposition XA1 à XA3, la valeur de $C_{\min,dur}$ est aussi déterminée en prenant en compte les classes d'exposition concomitantes XC ou XD.

» Étape 4 : PRISE EN COMPTE DU TYPE D'ARMATURE

L'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1 dans l'article 4.4.1.2 (7) précise les cas dans lesquels l'enrobage $C_{\min,dur}$ peut être réduit, d'une valeur $\Delta C_{dur,st}$ ou $\Delta C_{dur,add}$. Ce choix engage le maître d'œuvre. La valeur est fixée par les documents particuliers du marché.

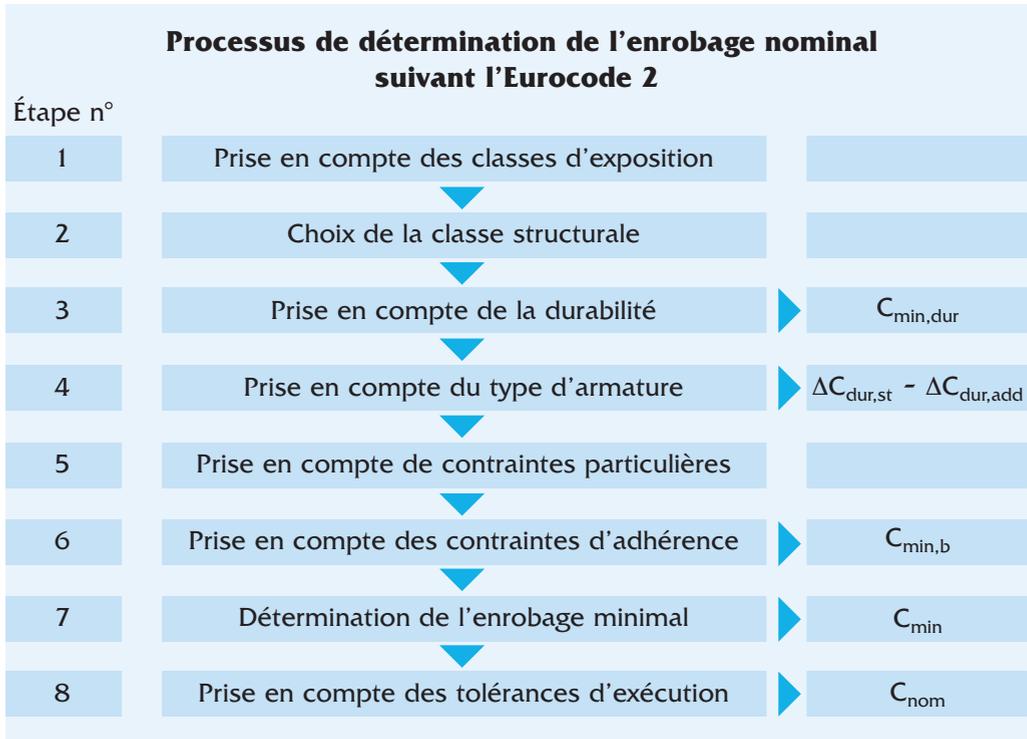
- Utilisation d'armatures en acier résistant à la corrosion : Armature INOX.
"Sur justification spéciale et à condition d'utiliser des aciers dont la résistance à la corrosion est éprouvée (certains aciers inox par exemple), pour la durée d'utilisation et dans les conditions d'exposition du projet, les documents particuliers du marché pourront fixer la valeur de $\Delta C_{dur,st}$. En outre, le choix des matériaux, des paramètres de mise en œuvre et de maintenance doivent faire l'objet d'une étude particulière. De même, l'utilisation de tels aciers ne peut s'effectuer que si les caractéristiques propres de ces aciers (notamment soudabilité, adhérence, dilatation thermique, compatibilité des aciers de nature différente) sont vérifiées et prises en compte de façon appropriée" (extrait de l'article 4.4.1.2 (7)).

- Mise en place d'une protection complémentaire : en cas de mise en place d'une protection complémentaire, l'enrobage minimal n'est pas diminué, sauf pour les revêtements adhérents justifiés vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs pendant la durée d'utilisation de projet.

» Étape 5 : PRISE EN COMPTE DE CONTRAINTES PARTICULIÈRES

L'Eurocode 2 et l'Annexe Nationale Française prescrivent d'augmenter l'enrobage minimal dans les cas suivants :

- **Parements irréguliers** : dans le cas de parements irréguliers (béton à granulats apparents par exemple), l'enrobage minimal doit être augmenté d'au moins 5 mm.
- **Abrasion du béton** : dans le cas de béton soumis à une abrasion, il convient d'augmenter l'enrobage de 5 mm, 10 mm et 15 mm respectivement pour les classes d'abrasion XM1, XM2 et XM3 (voir l'EN 1990 Eurocode 0 - Base de calcul des structures).



- **Béton coulé au contact de surfaces irrégulières** : dans le cas d'un béton coulé au contact de surfaces irrégulières, il convient généralement de majorer l'enrobage minimal en prenant une marge plus importante pour le calcul. Il convient de choisir une majoration en rapport avec la différence causée par l'irrégularité. L'enrobage minimal doit être au moins égal à k_1 mm pour un béton coulé au contact d'un sol ayant reçu une préparation (γ compris béton de propreté) et k_2 mm pour un béton coulé au contact direct du sol.

Les valeurs recommandées par l'Annexe Française sont :

$$k_1 = 30 \text{ mm et } k_2 = 65 \text{ mm.}$$

► **Étape 6 : DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL
VIS-À-VIS DE L'ADHÉRENCE $C_{\min,b}$**

L'enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence $C_{\min,b}$ est précisé dans le tableau 4.2 article, 4.4.1.2 (3) de la norme EN 1992-1-1.

Il convient que $C_{\min,b}$ ne soit pas inférieur :

- au diamètre de la barre dans le cas d'armature individuelle ;
- au diamètre équivalent dans le cas de paquet d'armatures.

$C_{\min,b}$ est majoré de 5 mm si le diamètre du plus gros granulats du béton est supérieur à 32 mm.

▶ Étape 7 : DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL C_{\min}

L'enrobage minimal est déterminé par la formule donnée au paragraphe 10.4. en intégrant les valeurs de $C_{\min,b}$, $C_{\min,dur}$, $\Delta C_{dur,y}$, $\Delta C_{dur,st}$ et $\Delta C_{dur,add}$.

▶ Étape 8 : PRISE EN COMPTE DES TOLÉRANCES D'EXÉCUTION

L'enrobage minimal doit être majoré pour tenir compte des tolérances pour écart d'exécution (ΔC_{dev}).

La valeur recommandée dans l'article 4.4.1.3 (3) est $\Delta C_{dev} = 10$ mm sauf justification particulière. En particulier, cette valeur peut être réduite sous réserve de conditions strictes de contrôle qualité, à la fois sur la conception et l'exécution des ouvrages.

L'enrobage nominal est donné par la formule :

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

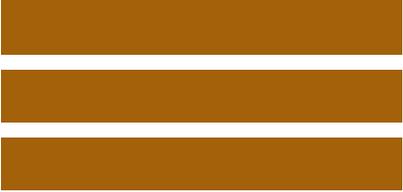
Si la réalisation ou la conception et l'exécution des éléments d'ouvrage sont soumis à un système d'Assurance Qualité (incluant en particulier des dispositions spécifiques relatives à la conception, au façonnage ou à la mise en place des armatures). Il est possible de réduire la valeur de ΔC_{dev} à une valeur comprise entre 5 et 10 mm.

Cette réduction possible de ΔC_{dev} permet d'inciter à un meilleur contrôle du positionnement réel des armatures et une meilleure qualité de réalisation.

Nota

L'Eurocode 2 attire l'attention sur les deux points suivants :

- les problèmes de fissuration auxquels risque de conduire un enrobage nominal supérieur à 50 mm,
- les difficultés de bétonnage auxquelles risque de conduire un enrobage nominal inférieur à la dimension nominale de plus gros granulats.



Chapitre

7

Recommandations pour la détermination des classes d'exposition

7.1 - Notions de classe d'exposition

**7.2 - Détermination des classes d'exposition
pour chaque partie d'ouvrage**

7.1 - Notions de classe d'exposition

Les nouveaux textes normatifs et réglementaires relatifs au béton prennent en compte la durabilité en s'appuyant, sur la notion de classe d'exposition. Ils imposent au prescripteur de définir les risques d'agressions et d'attaques auxquels le béton de l'ouvrage ou de chaque partie d'ouvrage va être exposé pendant la durée de service de la structure.

Ces actions dues à l'environnement sont regroupées en classe d'exposition.

La détermination de ces classes d'exposition permet ensuite de sélectionner avec précision les caractéristiques en termes de formulation et de performances des bétons, parfaitement adaptés aux environnements dans lesquels ils vont se trouver.

La norme NF EN 206-1 définit (article 4.1 : Classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement) 18 sous-classes d'exposition regroupées en 6 classes par risque de corrosion (XC, XD, XS) et d'attaques (XF, XA) dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton est soumis.

Tableau n°16 : Classes d'exposition

	Classe d'exposition	Environnement
Risque de corrosion	XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque
	XC	Corrosion induite par carbonatation
	XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine
	XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
Attaques	XF	Attaques gel/dégel avec ou sans argent de déverglaçage
	XA	Attaques chimiques

Les sous-classes d'exposition prennent notamment en compte l'humidité relative du milieu et les éventuels cycles d'humidification séchage.

Nota

En France, la désignation de la classe d'exposition doit être suivie du sigle (F) ainsi que prévu par l'article NA 6.2.2 de la norme NF EN 206-1 qui a adapté les classes d'exposition au contexte climatique et géographique français.

A chaque sous classe d'exposition correspondent des spécifications sur la composition des bétons.

Chaque béton d'une partie d'ouvrage peut être soumis simultanément à plusieurs actions environnementales.

Il convient donc, pour chaque partie d'ouvrage, de combiner les sous-classes d'exposition pour prendre en compte avec précision l'ensemble des conditions environnementales auxquelles est soumis le béton.

Le béton devra ainsi respecter toutes les exigences relatives à la combinaison des classes d'exposition.

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.

La détermination rigoureuse des classes d'exposition auxquelles est soumis le béton nécessite donc une analyse par étapes successives de l'ensemble des actions environnementales potentielles. Cette démarche peut être décomposée en cinq étapes :

- ▶▶ **Etape 1 : Prise en compte des conditions climatiques,**
- ▶▶ **Etape 2 : Prise en compte de la localisation géographique de l'ouvrage,**
- ▶▶ **Etape 3 : Prise en compte de l'exposition du béton à l'air et à l'humidité,**
- ▶▶ **Etape 4 : Prise en compte de l'action des chlorures d'origine autre que marine,**
- ▶▶ **Etape 5 : Prise en compte du contact avec le sol et des eaux de surface ou souterraines.**

L'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2 calcul des structures en béton - Règles générales et règles pour les bâtiments) précise section 4 : DURABILITE ET ENROBAGE DES ARMATURES, en conformité avec la norme NF EN 206-1, quelques données complémentaires sur les conditions d'environnement et la détermination de la classe d'exposition.

Note (3) : "Les parties aériennes des ouvrages d'art sont à classer en XC4, y compris les retours de ces parties concernées par les cheminements et/ou les rejaillissements de l'eau".

Note (4) : "Ne sont à classer en XD3 que les parties d'ouvrages soumises à des projections fréquentes et très fréquentes et contenant des chlorures et sous réserve d'absence de revêtement d'étanchéité assurant la protection du béton, par exemple les parties supérieures des dalles et les rampes des parcs de stationnement".

Note (5) : "Sont à classer en XS3 les éléments de structures en zone de marnage et/ou exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière".

"Sont à classer en XS1 les éléments de structures situés au-delà de la zone de classement XS3 et situés à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie particulière".

Note (6) : "En France, les classes d'exposition XF1 à XF4 sont indiquées dans la carte donnant les zones de gel, sauf spécification particulière notamment fondée sur l'état de saturation du béton".

Note (8) : "Les risques de lixiviation et d'attaque par condensation d'eau pure sont à traiter dans les classes d'exposition XA1, XA2 et XA3 suivant leur sévérité".

La norme NF EN 1992-2 : Ponts en béton, précise :

- que pour une surface en béton protégée par une étanchéité, la classe d'exposition recommandée est XC3,
- qu'en cas d'utilisation de sels de déverglaçage, il faut considérer que toutes les surfaces de béton situées à x mètre de la chaussée dans le sens horizontal et à y mètre dans le sens vertical sont exposées à l'action des sels.

Les valeurs recommandées pour x et y sont 6 mètres.

SYNOPTIQUE POUR LA DÉTERMINATION DES CLASSES D'EXPOSITION

Actions environnementales	Classes d'exposition
1 ►► Prise en compte des conditions climatiques	Attaques gel/dégel avec ou sans agents de déverglaçage XF1, XF2, XF3, XF4
2 ►► Prise en compte de la localisation géographique de l'ouvrage	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer XS1, XS2, XS3
3 ►► Prise en compte de l'exposition du béton à l'air et à l'humidité	Corrosion induite par carbonatation XC1, XC2, XC3, XC4
4 ►► Prise en compte de l'action des chlorures d'origine autre que marine	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine XD1, XD2, XD3
5 ►► Prise en compte du contact avec le sol et les eaux de surface ou souterraines	Attaques chimiques XA1, XA2, XA3

7.2 - Détermination des classes d'exposition pour chaque partie d'ouvrage

7.2.1 - Prise en compte des conditions climatiques - Classe XF

La norme NF EN 206-1 définit 4 sous-classes d'exposition (XF1, XF2, XF3 ou XF4) pour les bétons soumis à une attaque significative du gel/dégel avec ou sans agents de déverglaçage.

Deux méthodes permettent de déterminer la sous-classe d'exposition.

► **Détermination de la sous-classe d'exposition à partir des niveaux de gel et de salage :**

• **Niveaux de gel**

La norme NF EN 206-1 présente la carte des zones de gel en France (figure NA.2, carte des zones de gel en France), en distinguant trois catégories de gel : faible, sévère et modéré.

Cette carte est complétée par le fascicule de documentation FD P 18-326 "Bétons - Zones de gel en France" qui donne les niveaux de gel par canton (sans prendre en compte les conditions particulières d'environnement).

Nota

Des conditions particulières locales d'environnement peuvent imposer au prescripteur de choisir pour un ouvrage, par exemple, une exposition au gel modéré alors que le canton est classé en gel sévère, ou inversement.

• **Niveaux de salage**

Les niveaux de salage sont définis dans le Guide Technique du LCPC "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel" en référence à la carte des zones de rigueur hivernale H_i (cf. guide pratique SETRA de novembre 1994 "Aide à l'élaboration du Dossier d'Organisation de la Viabilité Hivernale") en prenant en compte l'objectif de qualité du service hivernal fixé pour l'itinéraire.

- Le salage peu fréquent ($n < 10$) correspond à la zone de rigueur hivernale H_1 : hiver clément.
- Le salage fréquent ($10 < n < 30$) correspond à la zone de rigueur hivernale H_2 : hiver peu rigoureux.
- Le salage très fréquent ($30 < n < 50$) correspond à la zone de rigueur hivernale H_3 : hiver assez rigoureux.
- Le salage très fréquent ($50 < n < 90$) correspond à la zone de rigueur hivernale H_4 : hiver rigoureux.

Avec n : nombre de jours de salage.

Le tableau n°17 permet de déterminer la sous-classe d'exposition XF en fonction des niveaux de gel et de salage.

Tableau n°17 : Classe d'exposition en fonction des niveaux de gel et de salage			
Niveau de salage	Niveau de gel		
	Faible	Modéré	Sévère
Peu fréquent	XF1	XF1	XF3
Fréquent	-	XF2	XF4
Très fréquent	-	XF4	XF4

» **Détermination de la sous-classe d'exposition à partir du niveau de saturation en eau du béton et de l'utilisation ou non d'agent de déverglaçage :**

La norme NF EN 206-1 distingue deux niveaux de saturation en eau du béton :

- forte saturation en eau,
- saturation en eau modérée,

et l'utilisation ou non d'agent de déverglaçage :

- sans agent de déverglaçage,
- avec agent de déverglaçage.

La prise en compte de ce niveau de saturation et de l'utilisation ou non d'agent de déverglaçage permet de déterminer la classe d'exposition.

Tableau n°18 : Classe d'exposition en fonction du niveau de saturation en eau du béton		
Saturation en eau du béton	Sans agent de déverglaçage	Avec agent de déverglaçage
Niveau modéré	XF1	XF2
Niveau fort	XF3	XF4

Exemples illustratifs :

Les parties d'ouvrages concernées sont celles qui sont non protégées des intempéries ou au contact avec l'eau et qui sont soumises à l'action du gel en présence ou non de sels de déverglaçage ou aux projections d'eau chargées de saumure.

XF1 : Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel.

XF2 : Surfaces verticales de béton exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage ou des brouillards salins.

XF3 : Surfaces horizontales de béton exposées à la pluie et au gel.

XF4 : Surfaces horizontales de béton (tabliers de pont) exposées aux agents de déverglaçage et surfaces de béton verticales directement exposées au gel et aux projections d'agent de déverglaçage et au gel.

Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.

Nota

Le guide technique LCPC "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel" précise que pour les ouvrages d'art, les parties d'ouvrage les plus exposées sont en particulier :

- les équipements : corniches, bordures, contre-corniches, contre-bordures, caniveaux, longrines d'ancrages des joints de chaussées ; plots de fixation des dispositifs de retenue,
- les appuis : piles, culées, chevêtres situées dans les zones de rejailissements,
- les tabliers.

La norme NF EN 206-1 précise article NA.4.1 que :

"Dans le cas d'attaque gel / dégel et sauf spécifications particulières notamment fondées sur l'état de saturation en eau du béton, on se référera aux classes XF1 à XF4 indiquées dans la figure NA.2".

SYNOPTIQUE DE PRISE EN COMPTE DES CONDITIONS CLIMATIQUES CLASSE XF						
Détermination du niveau de gel Cartes des zones de gel			Détermination du degré de saturation en eau du béton			
Détermination du niveau de salage Cartes des zones de rigueur hivernale			Type de salage			
Gel	Salage			Saturation en eau	Salage	
	Peu fréquent	Fréquent	Très fréquent		sans	avec
Faible	XF1	-	-	Modérée	XF1	XF2
Modéré	XF1	XF2	XF4		Forte	XF3
Sévère	XF3	XF4	XF4			

7.2.2 - Prise en compte de la localisation géographique de l'ouvrage - Classe XS

La classe XS est relative à la corrosion des armatures induite par les chlorures présents dans l'eau de mer. Elle concerne donc, selon la norme NF EN 206-1, les bétons soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.

Seuls les ouvrages situés à proximité des côtes ou les structures marines sont donc concernés par ce type d'actions environnementales.

Les ouvrages situés à plus de 5 km des côtes ne sont pas concernés par les classes d'exposition XS.

Les sous-classes d'exposition correspondent aux structures suivantes :

» Sous-classe XS1

Structures exposées à l'air véhiculant du sel marin sans être en contact direct avec l'eau de mer.

Structures à proximité d'une côte (500 m à 5 km sauf particularités climatiques ou géographiques locales).

» Sous-classe XS2

Structures et éléments de structures marines immergés en permanence.

» Sous-classe XS3

Structures et éléments de structures marines situés en zones de marnage ou dans des zones soumises à des projections ou à des embruns.

Structures situées à moins de 500 m de la côte.

SYNOPTIQUE DE PRISE EN COMPTE DE LA LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DE L'OUVRAGE - CLASSE XS				
Partie d'ouvrage en mer immergée en permanence	Partie d'ouvrage située entre 0 et 500 m de la mer			Partie d'ouvrage située entre 500 m et 5 km de la mer
	Zones de marnage	Partie soumise à des projections d'eau de mer	Partie soumise à des embruns	
XS2	XS3	XS3	XS3	XS1

7.2.3 - Prise en compte de l'exposition du béton à l'air et à l'humidité - Classe XC

La carbonatation du béton est prise en compte par la classe d'exposition XC CORROSION INDUITE PAR CARBONATATION. Les sous-classes XC1 à XC4 prennent en compte l'exposition du béton à l'air et à l'humidité en distinguant le degré d'humidité de l'environnement et l'alternance d'humidité et de séchage.

Tableau n°19 : Classe d'exposition XC		
Description de l'environnement	Exemples informatifs pour le choix de la sous-classe	Sous-classe d'exposition
Sec ou humide en permanence	<ul style="list-style-type: none"> Béton de structures couvertes, closes ou non, à l'abri de la pluie sans condensation Béton à l'intérieur des bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible Béton submergé en permanence dans de l'eau 	XC1
Humide, rarement sec	<ul style="list-style-type: none"> Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau <ul style="list-style-type: none"> Fondations 	XC2
Humidité modérée	<ul style="list-style-type: none"> Béton de structures couvertes, closes ou non, à l'abri de la pluie avec condensation Béton à l'intérieur des bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé <ul style="list-style-type: none"> Béton extérieur abrité de la pluie 	XC3
Alternance d'humidité et de séchage	<ul style="list-style-type: none"> Surfaces soumises au contact de l'eau Béton extérieur exposé à la pluie (y compris les retours de ces parties sur plusieurs dizaines de centimètres) <ul style="list-style-type: none"> Ponts 	XC4

Nota

Les exemples informatifs pour le choix de la classe intègrent les informations complémentaires de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1.

SYNOPTIQUE DE PRISE EN COMPTE DE L'EXPOSITION À L'AIR ET A L'HUMIDITÉ - CLASSE XC

Humide en permanence	Humide rarement sec	Alternance humidité séchage	Humidité modérée	Sec en permanence
▼	▼	▼	▼	▼
XC1	XC2	XC4	XC3	XC1

7.2.4 - Prise en compte de l'action des chlorures d'origine autre que marine - Classe XD

Lorsque le béton est soumis à l'action des chlorures (d'origine autre que marine) ou des sels de déverglaçage, il fait l'objet de la classe d'exposition XD, CORROSION INDUITE PAR LES CHLORURES AYANT UNE ORIGINE AUTRE QUE MARINE, et des 3 sous-classes XD1 à XD3, en fonction du type d'humidité.

Tableau n°20 : Classe d'exposition XD

Description de l'environnement	Exemples informatifs pour le choix de la sous-classe	Sous-classe d'exposition
Humidité modérée	<ul style="list-style-type: none"> • Surfaces de béton exposées à des chlorures transportés par voie aérienne 	XD1
Humide, rarement sec	<ul style="list-style-type: none"> • Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures <ul style="list-style-type: none"> • Piscines 	XD2
Alternance d'humidité et de séchage	<ul style="list-style-type: none"> • Éléments des ponts exposés à des projections contenant des chlorures 	XD3

SYNOPTIQUE DE PRISE EN COMPTE DE L'ACTION DES CHLORURES D'ORIGINE AUTRE QUE MARINE - CLASSE XD

Humide rarement sec	Alternance humidité séchage	Humidité modérée
▼	▼	▼
XD1	XD3	XD1

7.2.5 - Prise en compte du contact avec le sol et des eaux de surface ou souterraines - Classe XA

Lorsque le béton est au contact d'un sol naturel, des eaux de surface ou des eaux souterraines, il peut faire l'objet, selon le niveau d'agressivité du sol et des eaux, de la classe d'exposition XA, ATTAQUES CHIMIQUES, distinguant 3 sous-classes : XA1, XA2 et XA3 correspondant respectivement à des environnements à faible, modérée ou forte agressivité chimique.

Le tableau 2 de la norme NF EN 206-1 définit les valeurs limites correspondant aux attaques chimiques des sols naturels (SO_4^{2-} , acidité) et des eaux de surface ou souterraines (SO_4^{2-} , pH, CO_2 , NH_4^+ , Mg^{2+}). Ce tableau permet de déterminer la sous-classe d'exposition en fonction des caractéristiques chimiques correspondant à l'agressivité la plus élevée.





Chapitre

8

Mise en place des éléments de structures préfabriqués en béton

8.1 - Manutention et stockage

8.2 - Transport

8.3 - Réception des éléments sur chantier

8.4 - Mise en place des éléments préfabriqués

L'emploi d'éléments préfabriqués en béton simplifie la réalisation des ouvrages. La maîtrise des délais de mise en œuvre résulte du nombre réduit d'opérations à effectuer sur le chantier et de leur simplicité.

Les éléments préfabriqués nécessitent des moyens de manutention, de stockage, de transport et de mise en place intégrant des dispositifs de sécurité.

Toutes les tâches doivent être conduites de façon à :

- éviter tout effort imprévu et toute déformation excessive des éléments en béton ;
- éliminer tout risque de détérioration susceptible de nuire à l'aspect ou à la durabilité de la structure.

L'identification et la traçabilité des pièces préfabriquées conditionnent en général toutes ces opérations.

Afin de faciliter la mise en œuvre des éléments préfabriqués, des notices techniques précisent les règles à respecter et, le cas échéant, le matériel à employer.

8.1 - Manutention et stockage

La manutention des éléments préfabriqués est une opération particulière qui doit prendre en compte les aspects suivants :

- les caractéristiques des produits : masses et volumes importants, formes...
- les nombreuses obligations réglementaires relatives, d'une part, à la sécurité au travail et à la sécurité au transport et d'autre part, aux accessoires de levage et aux appareils de levage ;
- la multiplicité des acteurs concernés : industriels du béton et leurs fournisseurs, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises de pose, transporteurs, bureaux d'études, organismes de contrôle et de prévention.

L'entrepreneur ne peut utiliser que des dispositifs d'accrochage et de levage faisant l'objet d'une procédure officielle de certification de conformité ou à défaut, des dispositifs dont l'emploi est soumis à l'acceptation du maître d'œuvre ou encore des épingles de manutention, conformes aux dispositions du Fascicule 65-A du CCTG.

Les ancres et les douilles doivent obligatoirement être appairées à des dispositifs spécifiques, à savoir des anneaux et des élingues à vis.

Le ministère français chargé du travail assimile les couples “ancre et anneau de levage” et “douille de levage et élingue à vis” à des accessoires de levage et donc à des dispositifs devant satisfaire les obligations réglementaires européennes définies par la Directive Machines n° 98/37 et sa transposition dans le droit français.



Produits préfabriqués équipés de systèmes intégrés de levage

Pour la détermination des dispositifs d'accrochage, il faut prendre en compte :

- le nombre de points de levage ;
- l'angle d'élinguage ;
- les efforts supplémentaires liés à l'adhérence au démoulage, éventuellement aux masses d'accessoires ;
- les coefficients dynamiques qui permettent d'intégrer les sollicitations générées par les appareils de levage ;
- la résistance du béton et donc de l'ancrage lors des opérations de levage.

Toutes les phases de manutention doivent être conduites en assurant la sécurité des personnes et en évitant tout risque d'instabilité des éléments eux-mêmes ou des dispositifs et des engins de levage, tout en préservant l'intégrité et les performances des produits.

Manutention à l'aide d'une grue munie de 2 élingues

Les documents d'exécution ou les notices de manutention des éléments préfabriqués en béton précisent en particulier :

- la nature, la résistance et la répartition des suspensions ;
- la position suivant laquelle l'élément doit être levé puis maintenu pendant le transport et la manutention ;
- les efforts particuliers pris en compte ;
- les conditions d'appui et d'empilage en cours de stockage.

Le respect de ces consignes données par le fournisseur conditionne une manutention et un stockage en toute sécurité.

Les produits sont stockés en usine sur une aire située en général à proximité du hall de fabrication. Un soin particulier est apporté aux niveaux des zones d'appui pour assurer la stabilité des éléments durant la période de stockage et empêcher tout dommage et dégradation. Des cales en bois, en plastique ou en néoprène servent d'appuis provisoires. Dans le cas, par exemple, des poutres précontraintes par fils adhérents, les appuis provisoires sont disposés près des extrémités, à environ 30 cm de l'about des poutres, pour limiter les déformations par fluage (augmentation de la contre flèche vers le haut) et les risques de fissuration en fibre supérieure.

Les pièces architectoniques sont stockées sur des intercalaires non absorbants afin d'éviter des modifications de l'aspect de surface.

Stockage de poutres sur le parc de l'usine



8.2 - Transport

Le transport des produits préfabriqués entre l'usine et le chantier s'effectue généralement par camion. Le transport par voie ferrée jusqu'à la gare la plus proche du chantier est utilisé pour les longues distances (supérieures à 250 km environ) et les quantités importantes. Le transfert se fait ensuite par camion. Exceptionnellement, le transport peut s'effectuer par bateau.



Transport de poutres

8.3 - Réception des éléments sur chantier

Avant la pose, les éléments doivent être réceptionnés sur chantier de manière contradictoire par le maître d'œuvre et l'entrepreneur et déclarés conformes à la commande sur le bon de livraison. Ils ne devront avoir subi aucun dommage depuis la sortie d'usine jusqu'à la livraison sur chantier.

8.4 - Mise en place des éléments préfabriqués

La mise en place des éléments préfabriqués en béton s'effectue en général au moyen d'une seule grue munie d'élingues dont l'angle, par rapport à l'horizontale, est supérieur ou égal à 60° , ou d'un palonnier.

La cadence de pose des produits préfabriqués est fonction du type d'élément. Une vingtaine de minutes seulement sont nécessaires pour poser une poutre de plus de 20 m de longueur. Un ouvrage cadre peut être réalisé en quelques jours.

Dès leur pose, les produits sont maintenus en position de façon à :

- assurer leur stabilité vis-à-vis des efforts appliqués connus ou prévisibles, y compris les efforts du vent ;
- respecter la géométrie de l'ensemble, compte tenu des tolérances prescrites ;
- garantir le durcissement, sans désorganisation, des matériaux d'assemblage.

Les produits sont conçus pour permettre un positionnement aisé et des réglages géométriques simples.



Pose et réglage de dalles

Nota

Il convient de contrôler la stabilité des engins de levage et de manutention et de s'assurer qu'aucun obstacle ne risque de perturber leur déplacement et leur manœuvre ou de mettre en cause la sécurité des ouvriers ou des usagers (dans le cas de pose sous circulation par exemple).

8.4.1 - Dispositifs de sécurité et de stabilisation

Une attention particulière doit être portée aux systèmes d'appuis provisoires et aux systèmes de blocage et de contreventement assurant la stabilité des produits préfabriqués. Des réservations, ou des inserts spécifiques, prévus lors de la préfabrication des éléments, permettent de faciliter leur mise en place et d'assurer la stabilité des éléments ainsi que la sécurité des personnes.

Pour les éléments de structures horizontales, comme les poutres, des garde-corps provisoires sont positionnés sur les éléments de rive et des lignes de vie sont disposées le long des travées afin d'assurer la sécurité des personnes durant les phases de réalisation du ferrailage et du coulage du béton de deuxième phase des tabliers. Des filets de protection peuvent être disposés sous l'ensemble des poutres pour prévenir des chutes d'objets ou de personnes. La stabilité des éléments doit être assurée pendant toute la durée de réalisation du tablier jusqu'à sa mise en place sur ses appuis définitifs par un système d'entretoisement et de butonnage des poutres entre elles.



Dispositif de stabilisation de poutres PRAD

Pour les éléments de structures verticales comme les murs de soutènement, la stabilité est assurée le plus souvent à l'aide d'étais inclinés (tirant poussant). Certains éléments sont autostables.



Étalement provisoire de piédroits et de murs



Le choix des méthodes de pose, des étalements provisoires, des dispositifs de sécurité et de stabilité en phase de construction est effectué par l'entreprise générale. Le préfabricant indique les endroits où les éléments peuvent être appuyés provisoirement durant la construction.

Pour les éléments de superstructures comme les corniches, des inserts de type douilles sont intégrés lors de la fabrication pour permettre l'accrochage sur le tablier jusqu'à la phase de clavage.

Pose de piédroit de cadre équipé d'insert de manute



Pose de corniche de pont

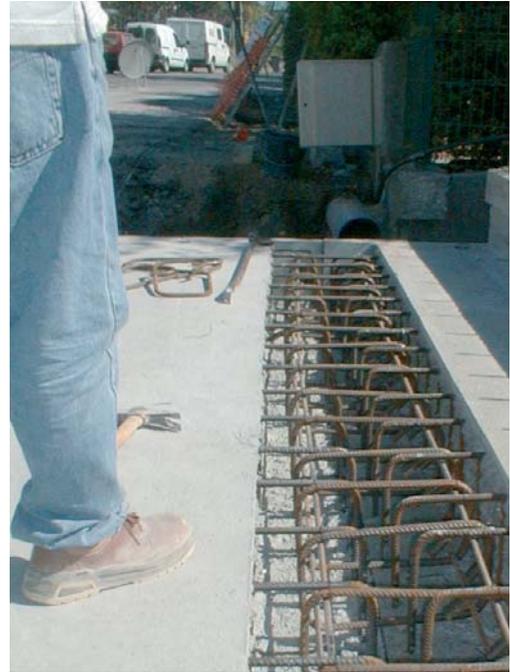
8.4.2 - Clavage et bétonnage de deuxième phase

Selon le type d'ouvrage, on procède au clavage des éléments ou à un bétonnage de deuxième phase lorsque les dispositifs de sécurité et de stabilité sont mis en place.

Les produits préfabriqués peuvent être conçus avec des armatures en attente et des réservations intégrées afin de permettre un clavage sans mise en œuvre d'armatures ou de coffrages complémentaires.



Mortier d'appui sous dalle de cadre



Clavage entre dalles préfabriquées

Pour réaliser le hourdis (dalles sur poutres) des ouvrages de type PRAD, des coffrages, en prédalles en béton, lorsque l'espacement entre nus des poutres dépasse environ 60 cm, et des armatures complémentaires sont mis en place.

Le coulage du béton de deuxième phase est ensuite effectué.



Dans le cas d'ouvrages de type ponts poutres PRAD hyperstatiques, le décintrement des appuis provisoires des poutres peut s'effectuer lorsque la résistance du béton de deuxième phase atteint environ 18 MPa.

Conditions particulières de mise en œuvre du béton

9.1 - Vibration du béton

9.2 - Bétonnage par temps chaud

9.3 - Bétonnage par temps froid

9.4 - Recommandations pour l'exécution des reprises de bétonnage

9.5 - Cure du béton

9.6 - Bétonnage de formes complexes et d'ouvrages à forte densité de ferrailage

9.7 - Bétonnage d'ouvrages massifs

9.8 - Maturométrie

9.9 - Bétons Autoplaçants

9.10 - Conditions de décoffrage

9.1 - Vibration du béton

La vibration est indispensable (sauf dans le cas des bétons autoplaçants) pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques et en particulier, une compacité maximale. Seul un béton très compact possède de bonnes caractéristiques de résistance mécanique.

9.1.1 - Rôle de la vibration

La vibration appliquée au béton frais a pour fonction de favoriser l'arrangement des grains qui sont les constituants du béton. La fréquence et la durée de vibration doivent être adaptées à la composition du béton et aux caractéristiques de l'ouvrage.

Sous l'effet de la vibration, le béton est comparable à une sorte de liquide visqueux, ce qui permet une meilleure mise en place dans les coffrages, un parfait enrobage des armatures et une optimisation de sa compacité.

Les effets de la vibration sur le béton frais se traduisent par des caractéristiques améliorées du béton durci : porosité réduite, meilleure homogénéité, retrait diminué, enrobage efficace des armatures.

La vibration doit être appliquée à la totalité du volume du béton (en évitant de s'approcher des armatures et des coffrages) et de manière homogène.

9.1.2 - Matériels de vibration

Les matériels de vibration se répartissent en deux catégories principales :

- ▶ **Les vibrateurs internes**, qui agissent directement sur le béton par pervibration, aussi appelés aiguilles vibrantes. Ils sont constitués par un tube métallique dans lequel la rotation d'une masse excentrée provoque la vibration. La vibration doit être réalisée avec des aiguilles vibrantes de fréquence et de rayon d'action adaptés. L'immersion des aiguilles se fait verticalement et la durée d'immersion doit être limitée afin d'éviter la ségrégation du béton.
- ▶ **Les vibrateurs externes**, qui agissent sur le béton par l'intermédiaire d'un coffrage ou d'une poutre.

9.1.3 - Règles de la vibration

Le temps de vibration est lié à la nature du béton (granulométrie, consistance), au volume à vibrer, à la densité du ferrailage et aux caractéristiques spécifiques de l'ouvrage. De manière empirique, on peut dire qu'il faut arrêter la vibration quand :

- le béton cesse de se tasser ;
- le dégagement de bulles d'air s'arrête ;
- la laitance apparaît en surface.

Le temps de vibration varie en général de 30 secondes à 2 minutes.

9.2 - Bétonnage par temps chaud

Le béton est sensible au jeune âge à la chaleur. L'élévation de la température accélère la prise et le durcissement, provoque l'évaporation de l'eau de gâchage et peut donc avoir une incidence défavorable sur les caractéristiques du béton durci.

Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées dès la formulation et la préparation du béton, puis pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité. Les ouvrages les plus concernés sont ceux présentant une grande surface libre non coffrée, tels que, par exemple, les tabliers de ponts.



9.2.1 - Incidence de la température

L'élévation de température agit sur :

- la rhéologie du béton et son évolution ;
- la vitesse de prise ;
- la cinétique d'hydratation et de durcissement ;
- l'évaporation de l'eau et la dessiccation du béton.

► Effet de la température sur l'hydratation du ciment

L'élévation de la température ambiante accélère les réactions chimiques et modifie la cristallisation des silicates de calcium du ciment.

En outre, l'hydratation du ciment est une réaction exothermique dont l'effet se cumule à celui des températures ambiantes élevées.

Ces phénomènes entraînent en particulier :

- une modification des propriétés physico-chimiques du béton ;
- un dégagement de chaleur plus rapide ;
- une réduction sensible du temps de prise ;
- un raidissement plus rapide du béton ;
- une accélération de la dessiccation du béton ;
- une diminution de la maniabilité du béton pouvant rendre plus délicate sa mise en œuvre ;
- une augmentation de la température du béton et le risque de création de gradients thermiques importants ;
- une augmentation des résistances à court terme (1 à 7 jours) et, généralement, une réduction des résistances à 28 jours du béton.

► Effet de la température sur la demande en eau

Lorsque la température du béton augmente, sa demande en eau s'accroît et sa maniabilité baisse.

La solution de rajouter de l'eau pour palier cette perte d'ouvrabilité est à proscrire, car elle entraîne une dégradation de la qualité du béton et une baisse sensible de la résistance mécanique à toutes les échéances.

► Effet de la température sur la consistance

L'élévation de température diminue sensiblement la maniabilité du béton. Pour une même formulation, si l'affaissement mesuré avec le cône d'Abrams est de l'ordre, par exemple, de 10 cm à 20°C, il sera de 5 cm à 35°C.

► Effet de la température sur l'évaporation

L'élévation de la température favorise l'évaporation. Or pour pouvoir durcir dans les meilleures conditions, le béton doit être préservé de l'évaporation de l'eau qu'il contient.

L'évaporation est d'autant plus importante que l'air ambiant est sec, que la température est élevée et que la vitesse du vent est importante.

L'évaporation trop rapide de l'eau du béton entraîne :

- une hydratation imparfaite du ciment ;
- une perte de maniabilité pendant le transport ;
- une augmentation du retrait plastique facteur de fissuration superficielle ;
- un défaut d'hydratation des surfaces non protégées et donc une dureté superficielle faible ;
- une augmentation de la perméabilité de la couche superficielle du béton.

Lorsque le retrait est empêché, il peut se produire un phénomène de fissuration si les contraintes engendrées deviennent supérieures à la résistance en traction du béton.

9.2.2 - Précautions à prendre pour le bétonnage par temps chaud

Par temps chaud, il convient de respecter quelques règles simples relatives à la formulation du béton, à sa fabrication, à son transport et à sa mise en œuvre.

En règle générale, dès que la température mesurée sur chantier(*) est durablement supérieure à 25°C, des dispositions particulières préalablement définies sont à prendre pour le bétonnage.

(*) La température doit être relevée sous abri à 1,50 m du sol.

Au-dessus de 35°C, il convient dans la mesure du possible de différer le bétonnage à une période plus favorable.

Les moyens à mettre en œuvre sont fonction de la valeur de la température, de la dimension et du type de structure.

L'entreprise doit prévoir dans sa procédure de bétonnage, les moyens de protection qu'elle appliquera pour limiter la température maximale du béton frais.

►► **Recommandations relatives à la formulation**

Des adaptations de la formulation du béton peuvent s'avérer nécessaires :

- Privilégier un ciment à faible chaleur d'hydratation et éviter un ciment de type R.
- Ne jamais accroître le rapport Eau/Ciment en ajoutant de l'eau au-delà de ce que prévoit la formule du béton et ne jamais rajouter d'eau dans le béton après malaxage.
- Introduire dans la formulation si nécessaire un plastifiant ou un superplastifiant réducteur d'eau (ou en augmenter le dosage), ce qui permet d'obtenir la consistance souhaitée sans modifier le rapport Eau/Ciment, de limiter la dessiccation et d'améliorer la rhéologie en atténuant les effets de la température.
- Introduire dans la formulation un retardateur de prise pour compenser l'effet accélérateur de la chaleur et prolonger le temps d'utilisation.

Les études de formulation doivent être réalisées dans des conditions climatiques proches de celles de chantier, afin de vérifier que la maniabilité reste satisfaisante pendant une durée compatible avec les conditions de transport et de mise en œuvre.

►► **Recommandations pour la fabrication et le transport**

Le ciment, l'eau et les granulats participent à l'élévation de la température du béton. Pour limiter leur échauffement, on s'efforcera de les protéger au maximum du soleil.

Cette précaution vaut particulièrement pour les granulats qui ont un rôle prépondérant dans l'augmentation de la température du béton (une augmentation de 10°C des granulats élève la température du béton de plus de 6°C).

Il est recommandé d'utiliser les granulats de préférence le matin après refroidissement nocturne ou de les refroidir au préalable par arrosage. Dans ce cas, l'apport d'eau sera pris en compte dans la formulation du béton.

Il est conseillé aussi d'utiliser de l'eau fraîche.

Lorsque le chantier est approvisionné par une centrale de Béton Prêt à l'Emploi, il faut s'efforcer de limiter la température du béton frais au départ de la centrale, réduire les temps de transport et d'attente et limiter le stationnement en plein soleil des camions malaxeurs.

►► **Recommandations pour le bétonnage**

Sur chantier, les horaires de bétonnage seront adaptés en fonction des températures (bétonnage aux heures les plus fraîches de la journée).

La mise en œuvre du béton dans les coffrages doit être réalisée le plus vite possible, en réduisant toute attente et dans des délais très courts après sa fabrication.

Il ne faut pas rajouter d'eau pour tenter d'améliorer la maniabilité du béton.

Les coffrages, en particulier métalliques, doivent être protégés de l'ensoleillement direct et éventuellement refroidis par humidification avant bétonnage.

Pour des bétons exécutés en grande masse, le recours à des systèmes de refroidissement du béton dans la masse peut être nécessaire.

►► **Protection des bétons**

Les bétons doivent être protégés de l'évaporation immédiatement après leur mise en œuvre, notamment les surfaces exposées au soleil et au vent, par un produit de cure, par une bâche (paillasons humides, films polyéthylène...) ou par un système de pulvérisation d'eau. Cette protection doit être maintenue en place durant les premières heures, voire quelques jours selon l'évolution des conditions climatiques.

Il convient de prévoir toutes les dispositions permettant l'évacuation des calories de manière à maintenir le béton à une température acceptable (protection de l'ensoleillement, arrosage fréquent des coffrages...).

9.3 - Bétonnage par temps froid

Le froid et le gel peuvent avoir des conséquences néfastes sur la qualité et les performances du béton. Il est possible de les maîtriser moyennant des précautions aussi bien sur la formulation, la fabrication et le transport du béton, que sur la mise en œuvre du béton frais.

9.3.1 - Incidence de la température

La prise et le durcissement du béton sont retardés par une baisse de la température. En conséquence, les résistances du béton soumis à des basses températures sont très faibles, même au bout de quelques jours. Il convient donc d'augmenter, en cas de faibles températures, les délais de décoffrage.

En dessous d'une température de 5°C, la prise peut être suffisamment affectée pour altérer l'évolution des réactions d'hydratation.

Pour des températures basses mais supérieures à 0°C, les réactions d'hydratation du ciment ralentissent. On constate :

- un retard du début de prise ;
- un allongement du temps de durcissement.

La cinétique d'hydratation du ciment s'arrête dès que la température du béton descend en dessous de 0°C.

Nota

Pour une température extérieure de 5°C :

- le temps de prise est de l'ordre de 10 h contre 2 h 30 à 20°C.
- les résistances en compression à 2 jours sont de l'ordre de 2 MPa contre 15 à 20 MPa à 20°C.

Sur chantier, il convient de relever régulièrement les températures, leurs valeurs conditionnant les dispositions à prendre. Le thermomètre du chantier sera placé à 1,50 m au-dessus du sol et à l'abri de la pluie et du soleil.

9.3.2 - Effet du gel sur le béton frais

Le froid peut affecter de façon irréversible les caractéristiques physiques et mécaniques du béton. Les effets sont proportionnels à l'abaissement de la température et concernent à la fois le béton frais (avant la prise) et le béton jeune (juste après la prise). Lorsqu'il gèle, les réactions d'hydratation du ciment cessent et le durcissement est complètement arrêté.

Les effets du gel sur le béton varient selon le degré d'avancement de sa prise :

- avant le début de prise, le béton est encore plastique et l'augmentation de volume dû à la solidification de l'eau de gâchage (environ 9 %) peut se faire sans dégradation. Le durcissement reprend dès que la température dépasse 5°C, sans que les performances du béton ne soient affectées.
- entre le début et la fin de prise, l'action du gel est néfaste. Les premières liaisons de cristallisation sont détruites. L'adhérence pâte granulat diminue. Le béton a ensuite une structure plus poreuse et donc des résistances amoindries. Lors du dégel, le processus physico-chimique de prise peut reprendre, mais les désordres provoqués par la glace sont irréversibles.

La résistance finale du béton est d'autant plus affectée, que le gel du béton est précoce dans la phase de prise.

L'action du gel, après la prise, dépend du niveau de résistance atteint par le béton. On considère souvent qu'un béton doit avoir atteint une résistance à la compression d'au moins 5 MPa, au moment où survient le gel pour que ses performances ne soient pas altérées.

Le délai après mise en œuvre nécessaire à la mise « hors gel » du béton est de l'ordre de 3 jours pour une température au moins égale à 5°C. Un béton soumis au gel en deçà de ce délai est pratiquement irrécupérable tandis qu'au-delà, le froid ne provoque plus qu'un ralentissement du durcissement.

9.3.3 - Précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid

Dès que la température de l'air descend au-dessous de 5°C pendant plusieurs jours consécutifs, il convient de mettre en œuvre des moyens de prévention efficaces et prendre des précautions minimales pour protéger le béton frais et limiter les effets des basses températures. S'il y a risque de gel et surtout si la température mesurée sur chantier est inférieure à - 5°C, il est préférable, dans la mesure du possible, de différer les opérations de bétonnage, sauf si des dispositions du marché prévoient le recours à des solutions appropriées.

Par temps froid, il est indispensable :

- d'adapter la composition du béton ;
- d'apporter et de maintenir une quantité de chaleur au béton frais ;
- de maintenir les dispositions de protection en place au-delà des délais habituels.

Le programme de bétonnage doit préciser les dispositions à prendre :

► **Recommandations relatives à la formulation**

Les adaptations de la formulation visent à accélérer le durcissement du béton.

Le choix d'un ciment de classe 42,5 ou 52,5 et de type R est recommandé. Les ciments à durcissement rapide, à chaleur d'hydratation élevée et à fortes résistances initiales doivent être privilégiés.

Le dosage en ciment peut être augmenté. La quantité d'eau doit être réduite en utilisant les adjuvants adaptés. L'emploi d'adjuvants tels que réducteurs d'eau, accélérateurs de prise et accélérateurs de durcissement est conseillé. Il est indispensable de réaliser des études préalables de compatibilité ciment/adjuvant et de les mener dans les conditions voisines de celles du chantier.

► **Recommandations pour apporter et maintenir une quantité de chaleur au béton frais**

Le béton peut être chauffé par l'eau lors de sa fabrication (utilisation d'eau de gâchage chauffée). Il peut être ensuite maintenu à température après sa mise en place, par chauffage du coffrage.

Les granulats doivent être stockés, le mieux possible, à l'abri du gel et en cas extrême, éventuellement chauffés avant introduction dans la centrale de malaxage.

Nota

L'augmentation de la température des constituants du béton peut élever sa température, par exemple :

- une augmentation de 10°C de l'eau élève de 2°C la température du béton (une augmentation de 50°C permet un accroissement de 10°C),
- une augmentation de 10°C des granulats élève de 7°C la température du béton,
- une augmentation de 10°C du ciment élève de 1°C la température du béton.

Les coffrages en bois isolent mieux le béton que les coffrages métalliques.

Si la température de l'eau atteint ou excède 60°C, il y a lieu de modifier l'introduction des composants dans le malaxeur de manière à ce que l'eau ne soit pas directement mise seule au contact du ciment.

Les temps de transport entre la centrale de fabrication du béton et le chantier doivent être réduits au strict minimum. La mise en place dans les coffrages doit être la plus rapide possible, en évitant toute période d'attente pendant laquelle le béton risque de se refroidir.

►► **Maintien des dispositions de protection**

Les coffrages pourront comporter une isolation (calorifugeage) qui limite les échanges thermiques avec l'extérieur.

L'étuvage du béton au cours de son durcissement, par traitement thermique, à l'aide de coffrages chauffants, accélérera l'hydratation du ciment.

La surface du béton en contact avec l'air devra être protégée du froid, par exemple, avec une bâche isolante ou des panneaux isolants. La protection thermique doit être d'autant plus efficace que la pièce est de faible épaisseur.

La mise en œuvre de ces dispositions doit permettre de maintenir le béton à une température minimale comprise entre 15 et 20°C (et surtout ne descendant jamais en dessous de 5°C) pendant sa prise et son durcissement initial.

►► **Recommandations pour le décoffrage**

Les protections de surface doivent être maintenues au moins pendant 72 h pour éviter le contact du béton avec l'air froid.

Le décoffrage ne doit être effectué que si le béton a atteint une résistance mécanique minimale suffisante de l'ordre de 5 MPa (ce qui lui permet de résister aux effets du gel). Une résistance supérieure de l'ordre de 10 MPa peut être nécessaire pour supporter les contraintes ultérieures lors des phases suivantes de bétonnage.

9.4 - Recommandations pour l'exécution des reprises de bétonnage

9.4.1 - Définition

Réaliser une “reprise de bétonnage” consiste à bétonner un béton frais au contact d'un béton durci, afin d'assurer une continuité esthétique ou mécanique entre les deux bétons.

Les zones de reprise de bétonnage sont prévues lors de la conception de l'ouvrage et précisées sur les plans d'exécution. Ces zones sont en général prévues, dans la mesure du possible, suivant des plans disposés normalement à la direction des contraintes.

Nota

Il est préférable de souligner les joints de reprise de bétonnage plutôt qu'essayer de les dissimuler, afin de préserver l'aspect esthétique du parement en béton. Le calepinage des joints peut être matérialisé par des baguettes ou des réglettes de quelques millimètres d'épaisseur fixées au coffrage puis enlevées après décoffrage.

Nota

Pour toute précision complémentaire, il est utile de consulter le guide “Recommandations sur l'exécution des reprises de bétonnage” - Juin 2000 FFB - SETRA - CEBTP.

9.4.2 - Précautions à prendre pour l'exécution des reprises de bétonnage

Les dispositions à mettre en œuvre pour la réalisation des reprises de bétonnage ont pour but d'améliorer l'adhérence entre le béton ancien et le nouveau béton. Elles doivent être définies dans le Plan d'Assurance qualité.

» Recommandations générales

Lors de la réalisation de reprises de bétonnage, trois recommandations minimales doivent être impérativement respectées :

- la surface de reprise doit être propre : les poussières, la laitance, les produits de cure et les agents de démoulage éventuels doivent être enlevés par soufflage à l'air comprimé et/ou associé à l'action d'eau sous pression,
- la surface de reprise ne doit pas être recouverte d'eau libre. Toute flaque ou film en surface doivent être éliminés par soufflage à l'air,
- les armatures doivent être décapées et positionnées correctement.

Nota

Le béton de deuxième phase doit être formulé avec un ciment chimiquement compatible avec celui du béton en place.

L'amélioration de la rugosité de la surface de reprise peut être réalisée par un repiquage mécanique et un sablage énergétique. Cette opération doit être suivie d'une attaque à l'eau sous pression, pour éliminer les parties altérées par le repiquage.

» Cure de la surface de reprise du béton

Il convient de mettre en œuvre un procédé de cure spécifique au niveau des reprises de bétonnage en fonction des conditions climatiques et météorologiques au moment de la réalisation.

Pour une surface horizontale, le procédé le plus simple consiste à recouvrir la surface d'un film d'eau de quelques millimètres d'épaisseur. Il convient donc de prévoir la surface de reprise à un niveau légèrement inférieur à celui du coffrage.

L'application d'un géotextile humide et régulièrement humidifié est aussi couramment utilisée aussi bien pour des surfaces horizontales que verticales.

L'emploi d'un produit de cure liquide pulvérisé sur le béton nécessite, juste avant le bétonnage du béton de deuxième phase, un nettoyage minutieux du béton et des armatures en attente, afin d'éviter toute perte d'adhérence des surfaces en contact.

▶ **Précaution par temps chaud**

La surface de reprise doit être protégée de l'ensoleillement et régulièrement humidifiée.

▶ **Reprise de bétonnage en couche mince**

Si le béton de reprise est mis en couche mince, il convient d'humidifier particulièrement le béton durci au niveau de la reprise de bétonnage et mettre en œuvre une cure renforcée après le nouveau bétonnage.

▶ **Reprise de bétonnage sur une surface verticale ou fortement inclinée**

Le support doit être nettoyé afin d'éliminer toute trace d'agent de démoulage.

La préparation du support se fait en général par attaque superficielle à l'eau sous pression ou par soufflage d'air plus eau.

La rugosité de la surface de reprise est donnée par celle du coffrage du béton de première phase.

Nota

Un grillage peut être positionné au niveau de la surface de reprise pour faciliter la liaison entre les deux bétons.

▶ **Reprise du bétonnage sur une surface horizontale**

La préparation du support de reprise peut se faire :

- par soufflage d'air plus eau sur béton frais juste après le début de prise ;
- par attaque superficielle à l'eau sous pression sur béton durci ;
- par sablage ou eau à très forte pression sur un béton ancien sain.

Il convient de soigner tout particulièrement la vibration du béton frais mis en œuvre à proximité de la surface de reprise.

9.5 - Cure du béton

Le béton doit être protégé au jeune âge par un procédé de cure qui assure la protection (de la zone superficielle) contre des risques de dessiccation, en empêchant l'évaporation de l'eau interne du béton.

Le procédé de cure doit être mis en œuvre le plus tôt possible après le bétonnage. Il consiste à appliquer, selon les caractéristiques de l'ouvrage, les méthodes suivantes : maintien du coffrage en place, application par pulvérisation d'un produit de cure, apport d'eau pour maintenir la surface du béton humide, mise en place de bâches étanches à la vapeur....

Le nombre minimal de jours de cure à respecter dépend de la cinétique de développement des propriétés mécaniques de la zone superficielle du béton. Il est aussi fonction des conditions ambiantes du chantier (température ambiante, humidité relative, vitesse du vent).

Nota

La norme ENV EN 13670-1 précise dans le tableau E1, les délais de cure minimaux à respecter pour les classes d'exposition autres que X0 et XC1 en fonction de la température de la surface du béton et de la cinétique de développement de la résistance du béton (matérialisée par le rapport des résistances à 2 jours et 28 jours).

Certains produits de cure peuvent s'avérer difficiles à éliminer de la surface du béton. S'ils doivent être éliminés, un nettoyage à l'eau sous haute pression ou éventuellement un sablage peuvent être nécessaires.

9.6 - Bétonnage de formes complexes et d'ouvrages à forte densité de ferrailage

Les ouvrages de formes complexes présentant, par exemple, des creux, des saillies ou des parties borgnes sont caractérisés par la difficulté qu'aura le béton à cheminer dans la totalité du coffrage.

On peut considérer qu'un ratio supérieur à 150 kg d'acier par m³ de béton constitue une forte densité de ferrailage.

Pour ce type d'ouvrages, deux catégories de béton peuvent être distinguées :

- ▶ les bétons classiques,
- ▶ les bétons autoplaçants.



9.6.1 - Bétons classiques

9.6.1.1 - Formulation des bétons

Ces bétons devant être vibrés, il convient d'éviter la ségrégation lors du passage à travers les armatures ou dans des espaces restreints.

Les précautions suivantes devront être appliquées :

- Faible granulométrie, diamètre maximum des granulats inférieur à 12,5 mm.
- Consistance du béton frais : classe S4 ou S5.
- Forte proportion de fines ($< 80 \mu$), au minimum 400 kg/m³.
- Adjuvant réducteur d'eau pour atteindre les cibles de consistance.

9.6.1.2 - Mise en œuvre

Il convient tout d'abord de limiter la hauteur de chute de ces bétons et de prévoir des gabarits de déversement adaptés à l'espacement des armatures. Dans la mesure du possible, on privilégiera la mise en œuvre par pompage.

Pour des formes très spéciales, il peut être nécessaire de recourir à des fenêtres dans le coffrage ainsi que des événements dans les parties hautes des volumes fermés, pour l'évacuation de l'air emprisonné.

Le matériel de vibration doit être compatible avec l'ouvrage (aiguilles vibrantes de diamètre adapté à l'espacement des armatures). Le temps de vibration doit être adapté à la consistance du béton.

Il est possible d'utiliser des coffrages vibrants conçus à cet effet, mais il faut éviter la mise en vibration des armatures ou du coffrage.

Un soin particulier doit être apporté à l'étanchéité des coffrages.

9.6.2 - Bétons Autoplaçants (BAP)

Cette solution est particulièrement bien adaptée à la réalisation de formes très complexes et aux très fortes densités d'armatures - Voir paragraphe 9.9.

9.7 - Bétonnage d'ouvrages massifs

Les ouvrages massifs sont des éléments de structure dont la plus faible des dimensions $L \times l \times h$ est de l'ordre du mètre.

Il convient pour ce type de structure de limiter la température maximale du béton pendant sa phase de durcissement ainsi que le gradient thermique entre la peau et le cœur du béton.

On admet généralement qu'il convient de limiter à 20°C ce gradient pour éviter tout risque de fissuration.

Pour ce faire, il est recommandé de privilégier des ciments à faible chaleur d'hydratation, d'abaisser en été la température initiale du béton en utilisant de la glace dans l'eau de gâchage et en arrosant les granulats.

Par ailleurs, on utilisera de préférence des granulats avec un D_{max} élevé afin de limiter le dosage en ciment.

Il convient également de protéger la peau du béton des chocs thermiques que pourrait provoquer l'environnement extérieur.

Pour limiter l'élévation de température du béton, il est possible de mettre en œuvre, préalablement aux opérations de bétonnage, un serpentin de tuyaux noyés dans la masse du béton et dans lequel circule de l'eau refroidie.

Dans les zones où, malgré ces précautions, le gradient thermique dépasse largement les 20°C , il convient de renforcer ponctuellement les armatures pour reprendre les contraintes dues à la fissuration thermique.

Une étude thermomécanique peut permettre de simuler l'évolution de la température au sein du béton en prenant en compte l'ensemble des conditions du chantier.



9.8 - Maturométrie

9.8.1 - Historique

La maturométrie a été développée à l'origine pour déterminer par une autre méthode que la rupture des éprouvettes, la résistance des bétons traités thermiquement.

Elle a permis ensuite d'optimiser les cycles de traitement thermique afin de réduire les coûts énergétiques et d'améliorer la productivité.

Le Projet National CALIBE auquel ont participé tous les acteurs de la construction en béton et la communauté scientifique, a traité en particulier la méthode d'essai "maturométrie".

Ces travaux ont abouti à l'élaboration d'un guide de recommandations dont l'objectif est de favoriser le développement de la maturométrie en la dotant d'une méthodologie rigoureuse et fiable.

La maturométrie est utilisée depuis une décennie sur de nombreux chantiers d'ouvrages d'art et dans les usines de préfabrication.

Nota

Pour toutes précisions et informations complémentaires et pour bénéficier de l'expertise et de l'état de l'art en matière de maturométrie, il convient de se reporter au Guide Technique LCPC "Résistance du béton dans l'ouvrage - La maturométrie" (CALIBE-IREX) . Ce guide définit les règles d'utilisation de la maturométrie comme outil de mesure de la résistance au jeune âge.

9.8.2 - Principe de la maturométrie

La maturométrie est une méthode d'essai non destructive qui, à partir du suivi thermique du béton en place, détermine le degré d'avancement des réactions d'hydratation traduisant le durcissement du béton.

Le principe de la maturométrie est basé sur le postulat d'une corrélation entre l'histoire thermique du béton et ses performances mécaniques à la compression (concept de maturité et d'âge équivalent). Deux bétons de même formulation et présentant la même maturité auront les mêmes résistances, quelles que soient les températures qu'ils ont subies pendant leur mûrissement.

L'histoire thermique du béton décrit l'état de "mûrissement", c'est-à-dire l'avancement des réactions d'hydratation, en fonction du temps et de la température du mélange à tout instant. Les réactions d'hydratation du ciment sont exothermiques. Elles entraînent un dégagement de chaleur (chaleur d'hydratation) qui provoque un échauffement du béton plus ou moins important.

Cette histoire thermique dépend d'un grand nombre de facteurs que sont le type de ciment, la température des constituants, la formulation du béton, les apports thermiques internes (chaleur d'hydratation) et externes (malaxeurs, moules, etc.). Plus la température est élevée, plus les réactions d'hydratation sont accélérées et le développement des résistances mécaniques rapide.

Pour un béton donné, après une phase d'étalonnage (mesure de l'énergie d'activation), un simple suivi thermique du béton permet donc de prédire les résistances mécaniques.

La maturométrie consiste à déterminer le degré d'avancement des réactions d'hydratation correspondant au durcissement du béton à partir du suivi de la température au sein de l'ouvrage et de mesures de la chaleur dégagée par le béton en cours de durcissement. Elle s'applique au béton au jeune âge. Elle est basée sur des calculs et nécessite un ensemble de matériels dénommés, le maturomètre, comprenant des appareils de mesure (câbles thermocouple, sondes résistives) et de stockage des données et un logiciel de traitement des données.

9.8.3 - Domaines d'application de la maturométrie

La maturométrie est appliquée aussi bien sur chantier qu'en usine de préfabrication :

- pour estimer et prédire les résistances aux jeunes âges du béton, en particulier en certains points critiques d'un ouvrage,
- pour simuler le comportement thermomécanique du béton et obtenir une mesure fiable de sa résistance dans l'ouvrage.

Elle permet, par la simulation du comportement thermomécanique du béton, de prédire à la fois les gradients thermiques dans différentes parties de l'ouvrage et les évolutions de résistances afin de maîtriser la fissuration et d'évaluer l'évolution des performances du béton avec une bonne représentativité.

Elle est utilisée pour gérer au mieux les opérations de décoffrage et de mise en tension des câbles de précontrainte et donc de sécuriser les phases de construction.

Elle devrait permettre aussi de contrôler les aspects de parement. Elle peut être un outil de décision pour le décoffrage en garantissant un âge équivalent sensiblement constant du béton.

9.9 - Bétons Autoplaçants

Ces bétons, caractérisés par leur hyperfluidité, ont pour seul moteur de mise en place la gravité sans recours à la vibration.

La fluidité et la cohésion élevée des BAP garantissent la réalisation de parements de qualité, une finition soignée, une teinte homogène, l'absence de bullage et de ségrégation ainsi qu'une parfaite netteté des arêtes et des chanfreins.

L'absence de vibration permet d'assurer de manière naturelle l'homogénéité du BAP dans la masse et donc l'uniformité des textures et des teintes.

La maîtrise des performances des BAP, la facilité et la fiabilité de leur mise en œuvre garantissent la reproductibilité de l'aspect ainsi que la continuité et l'uniformité des parements au cours du chantier.

L'offre étendue des BAP, des performances mécaniques courantes à très élevées, permet d'obtenir une multitude d'aspects de surfaces, de teintes et de textures.

9.9.1 - Recommandations pour la formulation, la fabrication et le transport

La formulation des BAP est plus complexe que celle des bétons traditionnels.

Leur fabrication nécessite la mise en œuvre de procédures et de contrôles adaptés.

La plupart des malaxeurs peuvent fabriquer des BAP. Le temps de malaxage est toutefois légèrement plus long que pour un béton traditionnel. Le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, doit être le plus homogène possible. Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés...).

L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange, par conséquent, il est important de contrôler celle des granulats.

La fabrication des BAP nécessite un contrôle renforcé des constituants afin de garantir la régularité des performances.

La fluidité du béton conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre.

9.9.2 - Recommandations pour la mise en œuvre

D'une manière générale, les contraintes de bétonnage des BAP sont nettement plus faibles que celles des bétons mis en œuvre par vibration, grâce à leur facilité de coulage sur de longues distances et de grandes hauteurs.

La fluidité des BAP et leurs caractéristiques aux jeunes âges nécessitent le respect de quelques précautions particulières lors de leur mise en œuvre :

- **préparation et organisation spécifique du chantier** : les BAP nécessitent un changement des habitudes et une évolution des méthodes traditionnelles de construction : matériels - personnels - utilisation de la grue - phasage de réalisation - calages rigoureux des armatures et des réservations ;
- **emploi de coffrages propres ,étanches et plus résistants** afin de compenser les poussées hydrostatiques sur les coffrages ;
- **utilisation de produits démoulants adaptés** afin d'éviter les phénomènes de micro-bullage ;
- **cure soignée** : ces bétons étant plus sensibles aux phénomènes de retrait par dessiccation.

La hauteur du coulage doit être compatible avec la résistance du coffrage. Il convient d'équilibrer les pressions de part et d'autres des ouvertures.

Il est important de limiter la hauteur de chute dans les coffrages afin d'éviter toute ségrégation.

Une cure efficace doit être mise en œuvre le plus tôt possible après la fin du bétonnage, particulièrement pour les surfaces horizontales afin d'éviter toute évaporation précoce d'eau.

Des essais grandeur nature ont été réalisés dans le cadre du Projet National BAP, pour analyser le comportement réel des outils coffrants face à la pression exercée par le béton autoplaçant, en fonction de la vitesse de bétonnage et de la hauteur des coffrages. Ils ont permis de définir des recommandations.

En usage courant (voile de 2,8 m de hauteur), la poussée lors du coulage ne dépasse pas les limites de résistance des coffrages.

Les BAP exercent, compte tenu de leur fluidité et leur long maintien de rhéologie, des pressions hydrostatiques plus importantes sur les coffrages lorsque les vitesses de bétonnage sont élevées (par exemple, en cas de mise en œuvre par pompage, avec des vitesses supérieures à 12 m/h). Il convient donc de soigner la fixation des réservations, des armatures, des fourreaux et des boîtiers et la stabilité des coffrages. Il est important de vérifier que la poussée lors du coulage du béton ne dépasse pas les limites de résistance des coffrages et de les dimensionner pour résister à la pression hydrostatique.

Dans certains cas (voile de très grande hauteur avec de très nombreuses ouvertures), le coffrage doit être spécifiquement étudié.

Les BAP ne nécessitent pas d'opération de surfacage pour les applications horizontales.

Leurs performances à l'état frais autorisent leur pompage sur de longues distances et une mise en œuvre plus rapide.

Les propriétés d'écoulement des BAP permettent l'utilisation de nouvelles procédures de remplissage des coffrages. Leurs caractéristiques autorisent des cheminements horizontaux importants.

Ils peuvent être mis en œuvre soit de façon traditionnelle à la benne à manchette, soit par pompage (en tête ou en pied).

▶▶ **Mise en œuvre à la benne à manchette traditionnelle**

Le béton est mis en œuvre par le haut du coffrage au moyen d'une goulotte. La manche est glissée dans le coffrage pour limiter la hauteur de chute. Il est nécessaire d'adapter les diamètres de la manche sous la benne par rapport au béton traditionnel (Ø 60 à 80 mm au lieu de Ø 150 à 200 mm) pour qu'elle puisse être introduite entre les armatures.

▶▶ **Mise en œuvre par pompage en pied de coffrage : pompage "source"**

Cette méthode est adaptée en particulier pour les éléments verticaux de grande hauteur. Elle supprime toute intervention en partie haute des coffrages.

▶▶ **Mise en œuvre par pompage en tête de coffrage avec tube plongeur**

Le tube plongeur doit être suffisamment introduit dans le coffrage pour limiter au maximum la hauteur de chute. Cette méthode est aussi adaptée au bétonnage d'éléments verticaux.

Comme pour tous les bétons, il convient lors des phases de bétonnage, de prendre en compte les conditions climatiques et de mettre en œuvre des dispositions particulières en dehors de la plage de température (+ 5°C à 35°C).

9.10 - Conditions de décoffrage

Sauf dans le cas de l'utilisation de coffrages glissants ou de traitement thermique, on ne procède au décoffrage que lorsque la résistance à la compression du béton atteint une valeur suffisante d'au moins 5 MPa. Dans des conditions climatiques moyennes (température ambiante de 10°C à 25°C, hygrométrie relative supérieure à 60 %), on peut estimer que cette résistance est atteinte 12 à 14 h après la fin du bétonnage. Cette valeur est fonction, en particulier, de la nature du ciment, de son dosage et de la géométrie de l'ouvrage.



Architectes : Frédéric ZIRK et Pierre DEZEUZE



Chapitre

10 Gestion des ouvrages d'art

10.1 - Généralités

10.2 - Le patrimoine des ouvrages d'art

10.3 - Les modèles de gestion

10.4 - Les grands principes de réparation

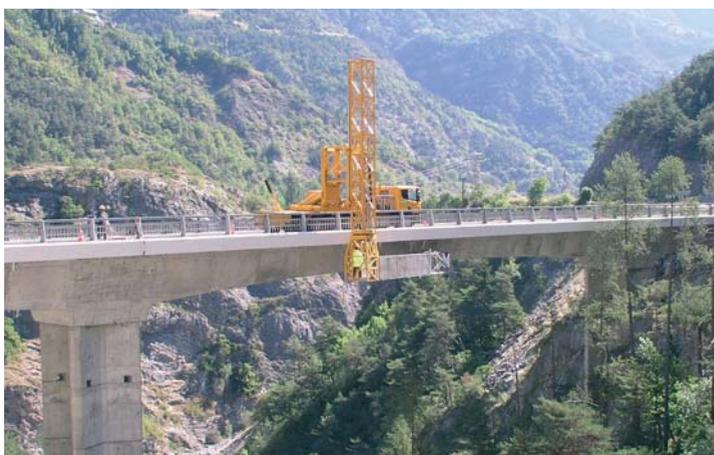
10.5 - Conclusion

10.1 - Généralités

Un ouvrage d'art, comme son nom l'indique, est un ouvrage dont la conception, la définition, la réalisation et souvent la maintenance font appel à l'ingéniosité dans tout ce qu'elle a de plus pur et sûrement de plus artistique.

La réalisation de certains ouvrages, de part leur audace et leur grâce, ne touche-t-elle pas à la même dimension artistique qu'une œuvre littéraire, picturale ou musicale ?

Les ouvrages d'art des réseaux routier, autoroutier et ferroviaire constituent un patrimoine important. Il convient d'en assurer la maintenance pour sauvegarder leur richesse.



10.2 - Le patrimoine des ouvrages d'art

10.2.1 - Qui sont-ils ?

Ce sont tous les ouvrages permettant le franchissement d'un obstacle que représente une vallée, un cours d'eau, une autre voie de communication, en fait tout ce qui peut représenter une gêne à la continuité du tracé acceptable pour une route, un canal ou une voie ferrée.

On les trouve au dessus ou au-dessous de l'obstacle à franchir. Nous distinguons donc les "passages supérieurs" et les "passages inférieurs".

10.2.2 - Combien sont-ils ?

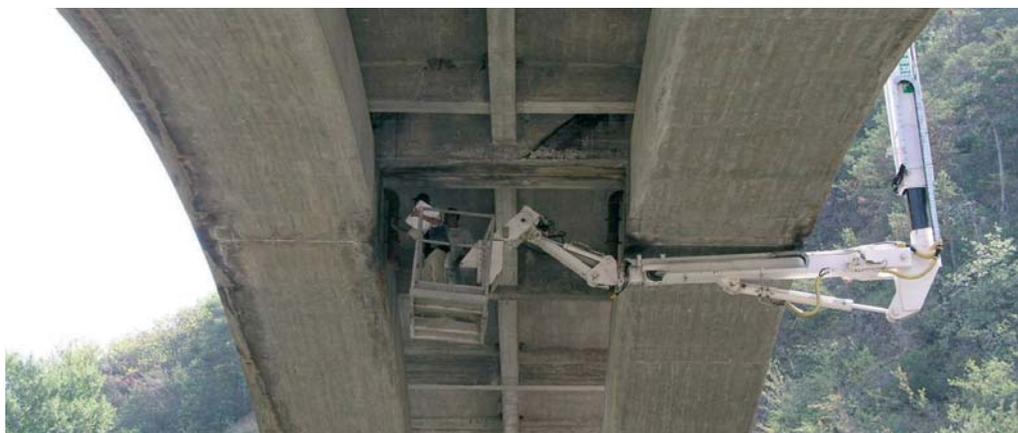
Si l'on s'en tient à ne retenir que les ouvrages d'une ouverture supérieure à 2 mètres (ce qui est généralement retenu en France), le patrimoine des ponts en France est d'environ 250 000 unités. La surface moyenne d'un tablier est de l'ordre de 300 m².

10.2.3 - A qui appartiennent-ils ?

Ces ouvrages appartiennent à différents maîtres d'ouvrage.

Répartition du patrimoine selon la maîtrise d'ouvrage

Maître d'ouvrage	Patrimoine
Etat	5 000
Départements	100 000
Communes et Collectivités locales	80 000
Sociétés autoroutières	15 000
Réseau ferré de France	50 000
TOTAL	250 000



10.2.4 - De quels matériaux sont-ils constitués ?

Répartition en fonction du type de matériau

Maître d'ouvrage	% en nombre
Maçonnerie	60
Béton armé	28
Béton précontraint	5
Mixte acier/béton ou métallique	7

Nota

Les ponts en béton sont majoritaires, si l'on considère une répartition en surface de tablier.

10.2.5 - Quel âge ont-ils ?

L'âge du patrimoine des ponts est précisé dans le tableau ci-après. L'évolution de l'architecture et de la conception des ponts est étroitement liée à l'évolution des matériaux.

Répartition de l'âge des ouvrages selon le type de matériau

Matériau	Age
Maçonnerie	Avant 1930
Béton armé	Après 1920
Béton précontraint	Après 1950
Mixte acier/béton ou métallique	Depuis 1850

Le parc est constitué à 60 % d'ouvrages construits après les années 50.

10.2.6 - Où sont-ils ?

Situés sur les routes nationales, départementales, communales et autoroutières, les 200 000 ponts (non compris les ouvrages du réseau ferroviaire) concernent environ 1 000 000 de km de routes, soit 1 pont tous les 5 km en moyenne.

Cette moyenne est très large, elle va d'un pont tous les km sur voies autoroutières à un pont tous les 8 km sur routes communales, en passant par un ouvrage tous les 3.5 km sur les routes départementales.

Ils représenteraient, mis bout à bout, environ 6 000 km de voie.



10.2.7 - Qui les entretient ?

De nombreux organismes et diverses entreprises sont concernés par l'activité d'entretien et de réparation de ce patrimoine d'ouvrage :

- les organismes publics ou privés d'études et de recherche qui étudient en particulier le comportement des ouvrages en service.
- les organismes d'inspection et de surveillance tels que les laboratoires des Ponts et Chaussées (LRPC) et les bureaux d'études privés.
- les organismes publics ou privés qui réalisent les expertises et assurent la maîtrise d'œuvre des travaux.
- les entreprises de travaux d'entretien et de réparation qui sont regroupées au sein du STRRES (Syndicat National des Entrepreneurs de Travaux de Réparation et Renforcement des Structures).

10.3 - Modèles de gestion

Les principes de base des modèles de gestion s'appuient sur 4 actions principales :

- | | |
|-------------------------|---|
| 1> Connaître | Qui sont ces ouvrages, où sont-ils, à qui appartiennent-ils ? |
| 2> Apprécier | Dans quel état sont-ils, quel est leur niveau de qualité ? |
| 3> Evaluer | Quels sont les remèdes et quel est le budget à prévoir ? |
| 4> Programmer | Par lesquels commence-t-on, quelles sont les priorités ? |

10.3.1 - Différents gestionnaires des ouvrages

10.3.1.1 - L'Etat

L'Etat est représenté par la Direction des Routes du ministère de l'Equipement et des Transports.

Il s'appuie sur un réseau exceptionnel de compétences et d'expertise représenté par son organisation technique, LCPC, CETE, SETRA, qui lui permet d'avoir les moyens humains (ingénieurs et techniciens) nécessaires à la surveillance de ses ouvrages.

Les services spécialisés de la Direction des Routes ont rédigé, en octobre 78, une instruction technique sur la surveillance des ouvrages d'art. C'est encore aujourd'hui, le seul document "officiel" disponible pour la surveillance des ouvrages d'art.

Cette instruction précise en particulier, les modalités de surveillance, par nature d'ouvrages, leurs différentes formes (simple visite, inspections détaillées initiales et périodiques, inspections détaillées spécialisées), leur fréquence, la forme du rapport, la qualité du personnel y étant affecté, les moyens d'accès nécessaires.

L'ensemble des ouvrages est visité par les services spécialisés du gestionnaire, de façon sommaire, une fois tous les trois ans (voir méthode IQOA*), ce qui permet de détecter les ouvrages à risque qui, eux, subiront une inspection détaillée tous les 6 ans, ou moins si leur état le nécessite. Les ouvrages de technologie particulière sont soumis à une inspection détaillée spécialisée de fréquence adaptée à leur état. Les inspections détaillées initiales sont réservées aux ouvrages neufs ou venant de subir de grosses transformations ou réparations, elles servent d'état de référence au cours de la vie de l'ouvrage. Des inspections détaillées sont effectuées également quelque temps avant la fin de période de garantie (décennale).

Les inspections détaillées sont réalisées par les services spécialisés du réseau technique du ministère de l'Équipement ou par des organismes privés spécialisés dans ce domaine.

A l'issue de ces inspections, l'ingénieur, responsable de la gestion du patrimoine, dresse un diagnostic de l'état de santé de l'ouvrage. Pour cela, il devra, si nécessaire, faire procéder par des laboratoires spécialisés à toutes les investigations lui permettant d'analyser et d'interpréter les causes des pathologies constatées. Ce diagnostic va permettre de préconiser un ensemble d'actions correctives permettant la remise en état de l'ouvrage.

Il est très important de préciser qu'à cette étape, les notions d'objectif et de niveau d'utilisation, auxquels doit répondre l'ouvrage concerné, influent fortement sur le choix de la méthode de réparation envisagée. Le niveau d'équipement de l'ouvrage devra, par exemple, être arrêté en fonction du niveau de qualité de service recherché pour la voie considérée.

*IQOA : Image Qualité d'Ouvrage d'Art.

Système mis au point par la Direction des Routes permettant un classement qualitatif des ouvrages suite à l'attribution d'une note de qualité attribuée, lors d'une visite sommaire et rapide d'un ouvrage (sans moyens d'accès particuliers), à chaque élément répertorié de cet ouvrage.

Classe 1 : ouvrage présentant un état satisfaisant.

Classe 2 : ouvrage présentant des pathologies courantes sans caractère d'évolution important.

Classe 2E : ouvrage présentant des pathologies courantes à caractère évolutif.

Classe 3 : ouvrage présentant des pathologies structurelles sans caractère d'urgence.

Classe 3U : ouvrage présentant des pathologies structurelles importantes nécessitant une action urgente.

C'est ensuite le Maître d'Ouvrage, dans ce cas l'Etat, qui doit décider de l'opportunité d'intervenir ou pas. Il le fera en fonction de plusieurs critères, l'urgence, l'importance "stratégique" de l'ouvrage, de l'itinéraire et bien entendu, le coût financier envisagé.

10.3.1.2 - Les Collectivités territoriales

Les Départements et les Communes ont une démarche analogue. La première loi de décentralisation leur a permis soit de conserver les services techniques des DDE comme prestataires privilégiés, soit de se constituer eux-mêmes leurs propres services, soit encore, et c'est aujourd'hui la pratique la plus courante, de faire appel à des prestataires spécialisés du privé.

Entretenir un pont, comme tout bien public, n'est soumis qu'à une seule règle, celle du Service Public. L'obligation est faite à chaque gestionnaire de s'assurer, en permanence, que l'ouvrage dont il a la gestion, est capable de remplir sa fonction. Les moyens qu'il doit mettre en place pour arriver à ce but n'ont aucun caractère réglementaire. Dans le cas où la Collectivité déclare ne pas avoir les moyens financiers pour réaliser efficacement cette tâche, elle doit prendre des mesures administratives que la loi lui permet, comme par exemple, un arrêté d'interruption de circulation ou une limitation de tonnage.

Si l'Etat admet que l'ensemble de ses ouvrages bénéficie sensiblement du même niveau d'importance, il n'en va pas de même pour les Collectivités territoriales. Plus proche des besoins du terrain, elle attribuera, à chaque ouvrage, une importance socio-économique propre liée à la catégorie de la voie concernée, à la longueur de la déviation devant être mise en place (si l'ouvrage devait être coupé), à son caractère historique ou technologique exceptionnel, à son niveau de dangerosité vis-à-vis des piétons et des riverains, à son "poids" économique dans le réseau de communication local. Autant de paramètres qui doivent être pris en compte lors de l'établissement des ordres de priorités d'intervention.

C'est en réalité une pondération entre le degré de dégradation constaté (rang d'état qualitatif) et celui du positionnement hiérarchique (rang socio-économique) qui déterminera l'ordre de priorité. En effet, un pont très endommagé et d'une importance socio-économique très élevée sera traité en priorité par rapport à un ouvrage moins dégradé et moins "important".

A partir de ce principe, toutes les nuances de positionnement sont possibles. Le gestionnaire dont le rôle est de faire des choix, a donc la possibilité de traiter, suivant les finances locales disponibles, en priorité les ouvrages les plus malades et les plus importants pour la société.



10.3.1.3 - Les sociétés d'autoroutes et Réseau Ferré de France

Pour les sociétés d'autoroutes concédées comme pour Réseau Ferré de France (propriétaire des infrastructures mises à disposition de la SNCF), la démarche ressemble davantage à celle du secteur privé. Elle est en principe calquée sur une logique d'entreprise puisque les ouvrages d'art représentent une valeur d'actif nécessaire à la production.

Dans la réalité, ce n'est pas toujours le cas car là aussi, les investissements liés à l'entretien des ouvrages restent étroitement liés aux possibilités financières. Les efforts d'investissement sont très différents entre les sociétés d'autoroute qui bénéficient d'un parc d'ouvrages relativement récent et Réseau Ferré de France qui a hérité d'un parc ancien, dont de nombreux ouvrages datent de plus d'un siècle. La grande majorité d'entre eux, en dehors des lignes modernes (TGV et autres voies rapides), a, de plus, dû faire face à de nouvelles contraintes entraînées par un accroissement du trafic et les augmentations de vitesse.

10.3.2 - Moyens d'investigation

Etablir un bilan de santé d'un ouvrage n'est pas une chose simple. Il nécessite en plus de la compétence, d'une solide expérience en pathologie des structures, ainsi que de moyens d'investigation approfondis. A l'image du médecin généraliste, tout commence par un bon examen "clinique" suivi d'analyses complémentaires réalisées par des laboratoires spécialisés. Le spécialiste doit ensuite tirer enseignement de toutes ces informations pour tenter d'interpréter les désordres constatés et dresser, in fine, le diagnostic pathologique de l'ouvrage. Il dispose désormais d'outils et de méthodes de plus en plus précis et sophistiqués.

10.3.3 - Inspection détaillée

L'inspection détaillée consiste à réaliser un constat exhaustif de l'état de l'ouvrage. Toutes les parties visibles de l'ouvrage sont examinées en détail par un personnel ayant une formation solide en fonctionnement et pathologies des structures de génie civil et en particulier, des ponts. Il doit relever chaque désordre suivant sa nature, sa position et son environnement.

Pour cela, il utilise des moyens d'accès adaptés tels qu'échelles, barques, nacelles hydrauliques à débattement positif ou négatif (accès sous le tablier depuis la chaussée).

D'autres méthodes sont aujourd'hui utilisées telles que les systèmes vidéo à distance ou embarqués sur des appareils volant du genre hélicoptères télécommandés, ballons aérostatiques et drones dans un futur immédiat. Il doit ensuite donner, dans la mesure du possible, une interprétation aux désordres constatés, avec appréciation de l'évolution des désordres. Enfin, il préconise les mesures d'urgence à envisager ainsi que les actions d'entretien courant et spécialisé dont l'ouvrage devra faire l'objet.

10.3.4 - Moyens d'investigation complémentaires

Pour établir son diagnostic, l'ingénieur a besoin d'informations très détaillées sur la nature des désordres constatés lors de l'inspection détaillée. Pour cela, il a à sa disposition toute une gamme de procédés très différents suivant la nature des informations qu'il souhaite obtenir. On peut citer, par exemple, parmi les essais non destructifs (END), l'utilisation de l'échographie, la gammagraphie, la thermographie, la tomographie, les mesures de déformation (jauges de contraintes, mesures laser, capteurs à fibre optique) et dans les méthodes destructives, les sondages in situ pour prélèvement de matériaux afin d'effectuer des analyses et des essais en laboratoire.

Tous ces dispositifs sont mis en œuvre par un personnel spécialisé.

10.3.5 - Diagnostic

Enfin, en analysant les éléments et informations recueillis, un diagnostic peut être avancé. Il peut mettre en évidence des déficiences de fonctionnement qui devront faire l'objet de vérifications de risques évolutifs et peut-être d'un recalcul de l'ouvrage pour vérifier sa capacité portante résiduelle avant d'engager une étude de réparation.

Le diagnostic ne doit donc pas seulement fournir une estimation des dégradations mais aussi donner les éléments permettant de choisir les solutions techniques adaptées.

Il permettra également, si nécessaire, de corriger et d'adapter la politique de surveillance pour l'ouvrage considéré.



10.3.6 - Étude de réparation

L'étude de réparation est l'aboutissement de toute la démarche décrite dans les paragraphes précédents : la visite sommaire, l'inspection détaillée, les investigations complémentaires, l'analyse, le diagnostic, la vérification de la capacité portante et l'évaluation des risques d'évolution.

L'ingénieur établira la préconisation d'intervention, en prenant en compte toutes les contraintes liées à un ouvrage existant en service :

- le maintien partiel ou complet de la circulation (véhicules et piétons) ;
- les délais souvent imposés par un calendrier particulier (départs en vacances, rentrée scolaire, utilisation de la voie pour des convois exceptionnels de charge ou gabarit) ;
- les contraintes architecturales ;
- l'intégration de l'ouvrage dans un futur schéma routier, etc.

Il faut insister sur la compétence très particulière que doit présenter le prescripteur. En effet, prescrire une réparation nécessite des compétences très affirmées dans divers domaines, mécaniques, chimiques, technologiques, avec beaucoup de retour d'expérience.

Le projet de remise en état de l'ouvrage doit être élaboré en cohérence avec l'objectif à atteindre en terme de niveau de service de la voie concernée.

Le marché sera ensuite établi et la consultation pour mise en concurrence lancée. Le choix du maître d'œuvre arrêté et l'entrepreneur choisi, les travaux peuvent enfin commencer.



10.4 - Grands principes de réparation

10.4.1 - Pathologies sur ouvrages béton

▶▶ Les dégradations physico-chimiques

La carbonatation et la présence de chlorures dans le béton armé sont à l'origine des principales causes de pathologie de ces structures.

Ceci est dû principalement à la qualité même du matériau béton, soit par une mauvaise mise en place (méthode de bétonnage inadaptée, serrage incorrect ou manque de protection vis-à-vis des conditions météorologiques au moment du coulage), soit par un manque d'entretien et de réparations.

Les agents agressifs (sels de déverglaçage en particulier) transportés par l'eau vont pouvoir pénétrer à l'intérieur du matériau et provoquer des réactions chimiques en se combinant avec les composants du matériau lui-même (réactions sulfatiques par exemple) et agir, dans certains cas, sur l'abaissement de la protection des armatures (diminution du PH), ce qui provoquera le début du phénomène de corrosion des aciers.

Toutes ces réactions, une fois amorcées, entraîneront des déformations par développement de contraintes à l'intérieur du matériau béton (foisonnement des armatures sous l'action de la corrosion). Ce dernier se fissurera davantage en surface et, permettant donc une pénétration plus facile des agents agresseurs, facilitera l'accélération du phénomène.

▶▶ Les déformations mécaniques

Elles sont principalement dues à une insuffisance structurelle par rapport aux conditions de charges auxquelles doit faire face l'ouvrage (problème de choix du matériau, de fabrication ou de mise en œuvre), conditions d'exploitation différentes de celles retenues dans le calcul initial de l'ouvrage, et bien d'autres raisons encore pouvant expliquer ces déformations comme par exemple, les phénomènes accidentels et météorologiques (action du gel / dégel).

Les conséquences dues aux phénomènes liés aux retraits et au fluage font aussi parties des déformations mécaniques. Elles doivent être anticipées et prises en compte dès la conception de l'ouvrage.

Toutes ces pathologies se traduisent par des ouvertures plus ou moins importantes de fissures à la surface du béton. Ces fissures pourront être à l'origine des dégradations citées ci-dessus. Ces familles de pathologies, d'origine physico-chimiques et mécaniques, sont donc tout à fait interdépendantes les unes par rapport aux autres.

10.4.2 - Principes de réparation

Deux documents de références : “Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion”, document rédigé par un groupe de travail AFGC et CEFRACOR en novembre 2003, et le guide technique sur la “Protection des bétons par application de produits à la surface du parement” édité par le LCPC et le SETRA en décembre 2002.

Comme pour les tâches successives qui mènent au diagnostic des pathologies et ensuite à la prescription des méthodes d'intervention, l'acte de réparer est aussi une affaire de spécialistes.

Il va falloir apprécier les difficultés particulières liées au chantier, accessibilité aux zones de travail, conditions de maintien en exploitation de l'ouvrage, phasage de travaux, respect de l'environnement, conditions météorologiques difficiles, etc.

Il faudra s'entourer du personnel le mieux à même, de par sa formation et son expérience, de réaliser ces travaux.

Une préparation du chantier minutieuse permettra d'éviter des erreurs, définition des méthodes d'exécution, choix des matériaux et des matériels, programmation, études des cadences, encadrement rigoureux et efficace.

Le travail sur le terrain peut enfin commencer. L'acte de réparer débute presque toujours par une démolition ou tout au moins une purge des matériaux instables. Cette tâche devra être menée avec beaucoup de soins, le matériel utilisé sera cohérent avec le matériau à démolir ou à purger et les conditions dans lesquelles doivent s'effectuer ce travail. La méthode retenue ne devra pas endommager les parties saines de l'ouvrage.

Comme pour le bureau d'étude devant établir la prescription de réparation, le choix du maître d'œuvre est capital. Il devra lui aussi, présenter des qualités particulières. Il aura à suivre de très près l'évolution des travaux et avoir l'expérience nécessaire pour adapter avec l'entrepreneur, rapidement et efficacement, une solution à un problème posé par des conditions nouvelles, découvertes, comme cela est souvent le cas lors de ces démolitions.

S'il s'agit d'une réparation de surface, le support ayant été traité et présentant un aspect sain et solide, le matériau de restructuration devra être mis en œuvre conformément aux prescriptions du fournisseur. Attention aux conditions prescrites qui, pour certains produits, sont des conditions “laboratoires”, donc souvent très éloignées de celles que l'entrepreneur rencontrera sur le chantier. Il devra dans ce cas, avec l'avis du fournisseur, adapter la méthodologie de mise en œuvre ou changer de produit.

Le plan d'assurance de la qualité (PAQ*) devra préciser toutes les procédures d'exécution ainsi que la chaîne de contrôle (interne, externe et extérieur) qui devra accompagner chaque tâche, conformément aux prescriptions du cahier des charges.

L'acte de réparer nécessite des capacités très particulières, faisant appel à une compétence adaptée ainsi qu'à un important retour d'expérience. Il reste une affaire de spécialiste.

Une réparation efficace et pérenne est le résultat d'un bon diagnostic, d'une prescription précise et adaptée ainsi que d'un contrôle régulier et ciblé.

10.5 - Conclusion

Le rôle du gestionnaire est d'intervenir aux bons moments afin de limiter le vieillissement naturel de l'ouvrage.

Comment définir temporellement ces interventions ?

Les moyens d'investissement étant limités, comment s'assurer de la meilleure adéquation entre les budgets consacrés et le niveau de service requis ?

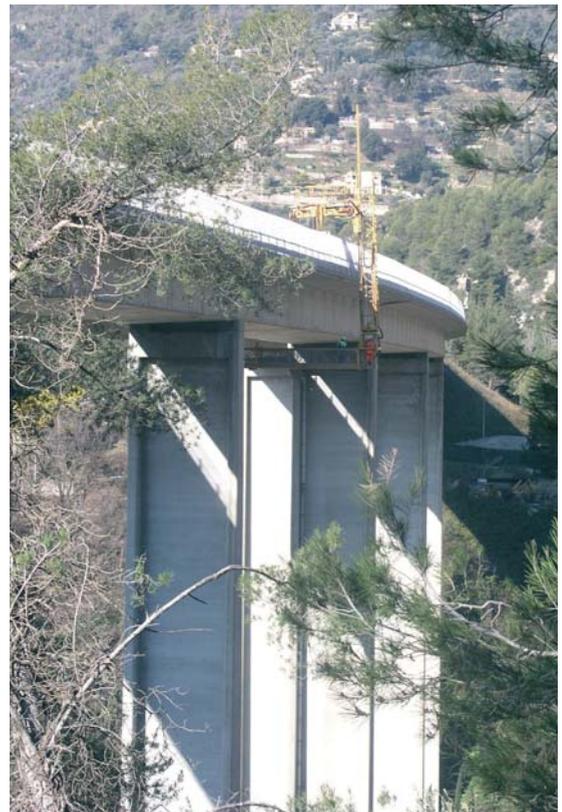
Des études sont aujourd'hui engagées, tant sur le plan économique** que technique. Elles portent sur des axes de réflexion qui pourront aider le gestionnaire dans sa décision d'intervention. Des études relatives à la modélisation du vieillissement des structures permettront d'en apprécier avec de plus en plus de précision les mécanismes.

Mais il faudra également modifier l'état d'esprit du gestionnaire d'ouvrages publics qui considère encore trop souvent que l'ouvrage, une fois construit, ne nécessite plus de moyens. Trop de curatif, pas assez de préventif. Les actions "pompiers" sont généralement des actions coûteuses en terme technique comme en terme financier.

Dépenser moins, c'est ,là aussi, dépenser mieux.

* A noter : le Guide pour l'aide à la rédaction d'un PAQ pour les travaux de réparation du Génie Civil rédigé par le STRRES.

** Voir le rapport du projet européen BRIME sur les méthodes de gestion en Europe.





Annexes

Annexe 1

- ▶ Normes et documents de référence

Annexe 2

- ▶ Éléments pour la mise au point du CCTP

Annexe 3

- ▶ Contenu des actions du contrôle extérieur

Annexe 4

- ▶ Exemple de bon de livraison

Annexe 1

Normes et documents de référence

1 - Principales normes de référence

1.1 - Normes ciments

- ▶▶ NF EN 197-1
Ciments - Partie 1
Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
- ▶▶ NF EN 197-1/A1
Amendement à la norme NF EN 197-1
- ▶▶ NF P 15-317
Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer
- ▶▶ XP P 15-319
Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates
- ▶▶ NF P 15-318
Liants hydrauliques - Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint
- ▶▶ NF P 15-314
Liants hydrauliques - Ciment prompt naturel
- ▶▶ NF P 15-315
Liants hydrauliques - Ciment alumineux fondu
- ▶▶ NF EN 197-4
Liants hydrauliques - Ciments de haut fourneau et à faible résistance à court terme
- ▶▶ NF EN 197-2
Ciments - Partie 2
Évaluation de la conformité

1.2 - Normes granulats

- ▶▶ NF EN 12620
Granulats pour béton
- ▶▶ XP P 18-545
Granulats - Éléments de définition, conformité et codification
- ▶▶ NF EN 13055-1
Granulats légers - Partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers
- ▶▶ Série NF EN 933
Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats
- ▶▶ Série NF EN 1097
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats
- ▶▶ Série NF EN 1744
Essais relatifs aux propriétés chimiques des granulats

1.3 - Normes adjuvants et produits de cure

- ▶▶ NF EN 934-2
Adjuvants pour béton, mortiers et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour béton
Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage
- ▶▶ NF P 18-370
Produits de cure pour bétons et mortiers

1.4 - Normes additions

- ▶▶ NF EN 450
Cendres volantes pour béton - Définitions, exigences et contrôle de conformité
- ▶▶ NF P 18-502
Additions pour béton hydraulique - Fumées de silice
- ▶▶ NF P 18-506
Additions pour béton hydraulique - Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau
- ▶▶ NF P 18-508
Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité
- ▶▶ NF P 18-509
Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critères de conformité
- ▶▶ EN 12878
Pigments de coloration des matériaux de construction à base de ciment et/ou de chaux - Spécifications et méthodes d'essais

1.5 - Normes bétons

- ▶▶ NF EN 206-1
Béton - Partie 1 - Spécifications, performances, production et conformité
- ▶▶ FD P 18-326
Bétons - Zones de gel en France
- ▶▶ NF EN 1008
Eau de gâchage pour béton

1.6 - Normes produits préfabriqués en béton

- ▶▶ NF EN 13369
Règles communes pour les produits préfabriqués en béton
- ▶▶ NF EN 1433
Caniveaux hydrauliques
- ▶▶ NF EN 1338/39/40
Produits de voirie
- ▶▶ NF EN 13230-1/5
Traverses de chemin de fer
- ▶▶ prEN 14844
Cadre sous chaussées
- ▶▶ prEN 14991
Éléments de fondation
- ▶▶ prEN 12794
Pieux de fondation
- ▶▶ prEN 15050
Éléments de ponts

1.7 - Normes de mise en œuvre

- ▶▶ ENV 13670-1
Exécution des ouvrages en béton - Partie 1 : Règles générales
- ▶▶ P 18-503
Surfaces et parements de béton
Éléments d'identification - Fascicule de documentation

1.8 - Normes d'essais sur ciments et sur bétons

- ▶▶ Série NF EN 196
Méthodes d'essais des ciments
- ▶▶ Série NF EN 12350
Essais sur béton frais - Parties 1 à 7
- ▶▶ Série NF EN 12390
Essais sur béton durci - Parties 1 à 8
- ▶▶ Série NF EN 12504
Essai pour béton dans les structures
- ▶▶ NF EN 13791
Évaluation de la résistance en compression dans les structures ou les éléments structuraux
- ▶▶ XP P 18-420
Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline
- ▶▶ XP P 18-424
Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau
- ▶▶ XP P 18-425
Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau
- ▶▶ NF P 18-454
Bétons - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Essai de performances

1.9 - Normes armatures

- ▶▶ XP A 35-014
Aciers pour béton armé - Barres, fils machine et fils en acier inoxydable
- ▶▶ NF A 35-015
Armatures pour béton armé - Ronds lisses soudables
- ▶▶ NF A 35-016
Armatures pour béton armé - Barres et couronnes soudables à verrous de nuance FeE500 - Treillis soudés constitués de ces armatures
- ▶▶ NF A 35-017
Armatures pour béton armé - Barres et fils machine non soudables à verrous
- ▶▶ NF A 35-019-1
Armatures pour béton armé - Armatures constituées de fils soudables à empreintes - Partie 1 : Barres et couronnes
- ▶▶ NF A 35-019-2
Armatures pour béton armé - Armatures constituées de fils soudables à empreintes - Partie 2 : Treillis soudés

- ▶▶ NF A 35-020-1
Produits en acier - Dispositifs de rabotage ou d'ancrage à armatures à haute adhérence pour le béton - Partie 1 : Prescriptions relatives aux performances mécaniques
- ▶▶ NF A 35-024
Aciers pour béton - Treillis soudés constitués de fils de diamètre inférieur à 5 mm
- ▶▶ NF A 35-027
Produits en acier pour béton armé - Armatures
- ▶▶ FD A 35-029
Armatures pour béton armé - Assemblages soudés - Qualification d'un mode opératoire de soudage - Qualification des soudeurs
- ▶▶ XP A 35-031
Armatures pour béton armé - Barres soudables à verrous de diamètre supérieur à 40 mm

2 - Principaux documents de référence

- ▶▶ **PROJET NATIONAL CALIBE**
Résultats et recommandations du projet National CALIBE - La maîtrise et la qualité des bétons - Presses de l'ENPC
- ▶▶ **FASCICULE 65-A du CCTG**
Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension - Août 2000
- ▶▶ **FASCICULE 65-B du CCTG**
Exécution des ouvrages de génie civil de faible importance en béton armé
- ▶▶ **ADDITIF au FASCICULE 65-**
Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint - Août 2000
- ▶▶ **LIVRET 2.01**
Règles de conception et de calcul des ouvrages en béton, en métal, ou mixte, SNCF - Février 1995
- ▶▶ **LIVRET 2.21**
Exécution des ouvrages en béton armé et en béton précontraint, SNCF
- ▶▶ **GUIDE DU PROJECTEUR OUVRAGES D'ART, PONTS COURANTS,**
SETRA - Janvier 1999

- ▶▶ **GUIDE DE CALCUL, PROGRAMME PRAD-EL** pour tabliers à poutres précontraintes par adhérence, SETRA - Janvier 2001
- ▶▶ **GUIDE DE CONCEPTION**
Ponts-routes à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence PRAD, SETRA - Septembre 1996
- ▶▶ **LES PONTS TYPES DU SETRA** - Septembre 1979
- ▶▶ **BÉTONS ET OUVRAGES D'ART**
La durabilité des bétons, CIMBÉTON - T 48
La maîtrise esthétique des parements, CIMBÉTON - T 49
- ▶▶ **CONCEPTION ET RÉALISATION DES OUVRAGES AVEC LES PRODUITS STRUCTURAUX EN BÉTON**
EUROPE LA NOUVELLE DONNE, CIMBÉTON - G 58
- ▶▶ **CONCEPTION DES PONTS**, Presse de l'ENPC
Anne BERNARD-GELY et Jean-Armand CALGARO
- ▶▶ **MAÎTRISE D'OUVRAGE ET MAÎTRISE D'ŒUVRE EN OUVRAGES D'ART**
Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques
- ▶▶ **VALORISATION DES BÉTONS A HAUTES PERFORMANCES DANS LES PILES ET PYLÔNES DE GRANDE HAUTEUR DES OUVRAGES D'ART, GUIDE TECHNIQUE BHP 2000** - LCPC
- ▶▶ **POMPAGE DES BÉTONS, OA 36**
LCPC- Denis KAPLAN
- ▶▶ **POMPAGE DES BÉTONS, GUIDE TECHNIQUE CALIBE** - LCPC
- ▶▶ **RÉSISTANCE DU BÉTON DANS L'OUVRAGE : LA MATUROMÉTRIE, GUIDE TECHNIQUE CALIBE** - LCPC

3 - Eurocodes

- ▶▶ **EUROCODE 0**
NF EN 1990 Base de calcul des structures
- ▶▶ **EUROCODE 1 Actions sur les structures**
NF EN 1991-1.1 Actions générales - Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments
NF EN 1991-1.2 Actions générales
Actions sur les structures exposées au feu
NF EN 1991-1.3 Actions générales - Charges de neige
NF EN 1991-1.4 Actions générales - Actions au vent
NF EN 1991-1.5 Actions générales - Actions thermiques
NF EN 1991-1.6 Actions générales - Actions en cours de construction
NF EN 1991-1.7 Actions générales
Actions accidentelles dues aux chocs et aux explosions
NF EN 1991-2 Charges sur les ponts, dues au trafic

- ▶▶ **EUROCODE 2 Calcul des structures en béton**
 - NF EN 1992-1.1 Calcul des structures en béton, règles générales et règles pour les bâtiments
 - NF EN 1992-1.2 Calcul des structures en béton, calcul du comportement au feu
 - NF EN 1992-2 Calcul des structures en béton, ponts en béton, calcul et dispositions constructives

- ▶▶ **EUROCODE 7 Géotechnique**
 - NF EN 1997-1 Géotechnique - Règles générales

- ▶▶ **EUROCODE 8 Séisme**
 - NF EN 1998-1 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
 - NF EN 1998-2 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Ponts
 - NF EN 1998-5 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques

4 - Fascicules de recommandations

- ▶▶ **FD P 18-011, BÉTONS - CLASSIFICATION DES ENVIRONNEMENTS AGRESSIFS**
- ▶▶ **RECOMMANDATIONS POUR LA PRÉVENTION DES DÉSORDRES DUS L'ALCALI-RÉACTION LCPC - Juin 1994**
- ▶▶ **ALCALI-RÉACTION DU BÉTON - ESSAI D'EXPANSION RÉSIDUELLE SUR BÉTON DURCI, PROJET DE MÉTHODE D'ESSAI LPC 44, LCPC - 1997**
- ▶▶ **RECOMMANDATION POUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS DURCIS SOUMIS AU GEL, LCPC - Décembre 2003**
- ▶▶ **GUIDE TECHNIQUE AFGC – CONCEPTION DES BÉTONS POUR UNE DURÉE DE VIE DONNÉE DES OUVRAGES - Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction - État de l'art et guide pour une mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité - Juillet 2004**

5 - Dossiers des ponts types et guides techniques du SETRA

- » Ponts cadres et portiques - Guide de conception (SETRA - 1992)
- » Portique ouvert double - Dossier pilote POD76 (SETRA - 1976)
- » Passage Supérieur à Gabarit Normal - Dossier PSGN77 (SETRA - 1977)
- » Passage Supérieur à Gabarit Réduit - Dossier PSGR71 (SETRA - 1971)
- » Ponts-dalles - Guide de conception (SETRA - 1989)
- » Passages Supérieurs ou Inférieurs en Dalles Nervurées - PSIDN 81 (SETRA - 1981)
- » Ponts-routes à tablier en poutrelles enrobées - Guide de conception et de calcul (SETRA / SNCF - Mai 1995)
- » Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension - VIPP - Guide de conception (SETRA - Février 1996)
- » Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence - PRAD - Guide de conception (SETRA - Septembre 1996)
- » Dossier Pilote Piles et Palées - PP73 (SETRA - 1974)
- » Guide Technique : Appareils d'appuis en caoutchouc fretté (Sept. 2000)
- » Guide Technique : Assainissement des ponts-routes (1989)
- » Guide Technique : Épreuves de chargement des ponts-routes et passerelles piétonnes (Mars 2004)
- » Ouvrage de soutènement, Guide de conception générale (1998)
- » Ponts courants en zone sismique - Guide de conception (SETRA, LCPC - Janvier 2000)
- » Bulletin technique n°7 du SETRA "Ponts construits par encorbellements successifs"
- » Guide pour la commande et le pilotage des études d'ouvrages d'art
- » Fascicule 32.2 de l'Instruction Technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art de 1979, modifiée en 1995
- » Document "l'Image de la Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA) ; catalogue des principaux défauts, aide à leur classification - Ponts à poutre caisson en béton précontraint" (SETRA -1997)

Annexe 2

Éléments pour la mise au point du CCTP

Cette annexe fournit quelques informations essentielles (mais non exhaustives) permettant la rédaction du CCTP (partie “BÉTON”) pour un marché d’ouvrage d’art courant.

Nota

Ces recommandations tiennent compte des nouvelles normes en vigueur, telles que la norme NF EN 206-1, les normes de produits préfabriqués (dont la norme NF EN 13369) et les normes de dimensionnement EUROCODES, mais pas les nouvelles spécifications du FASCICULE 65 (document en cours de mise au point, les références aux articles du FASCICULE 65 ne sont donc pas précisées).

1 - Dispositions générales Description de l’ouvrage

1.2 - Données générales

1.2.1. Contexte climatique et classes d'exposition

L'ouvrage est situé dans le département et le canton : ...

La norme NF EN 206-1 définit à l'article NA 4.1 les classes d'expositions auxquelles sont soumises les différentes parties de l'ouvrage pendant sa durée de service en fonction des actions dues à l'environnement.

CLASSES D'EXPOSITION

- ▶▶ XC : corrosion induite par la carbonatation
- ▶▶ XD : corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine
- ▶▶ XS : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
- ▶▶ XF : attaque gel/dégel avec ou sans agent de deverglage
- ▶▶ XA : attaques chimiques

Les classes d'exposition associées à chaque partie d'ouvrage sont précisées dans l'article 3.12

L'article 3.12 précise aussi les parties d'ouvrages exposées aux projections de sels de déverglaçage.

L'ouvrage est situé en zone de gel : ...

Nota

Le fascicule de documentation FD P 18-326 donne le niveau de gel par canton. Le type de salage peut être déterminé à l'aide des recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel (LCPC - Décembre 2003). Ce document reproduit un extrait du guide pratique d'élaboration du Dossier d'Organisation de la viabilité hivernale (DOVH) SETRA - Novembre 1994.

L'ouvrage est situé à une distance de ... du bord de la mer.

1.2.2 - Durée de service

La durée de service de l'ouvrage sera généralement prise égale à 100 ans.

1.2.3 - Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel

Les dispositions relatives à la prise en compte de la durabilité des bétons durcis vis-à-vis du gel/dégel et des agents de déverglaçage définies dans le guide LCPC (décembre 2003) "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel", seront appliquées.

Nota

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, contre-corniches, bordures de trottoirs, caniveaux, etc.).

Les parties d'ouvrage susceptibles d'être soumises à l'action du gel pur (G) ou à l'action du gel en présence de fondants ou de sels de déverglaçage (G+S) sont précisées dans l'article 3.12

1.2.4 - Prévention vis-à-vis des risques liés à l'alcali-réaction

Les dispositions et recommandations à mettre en œuvre sont définies dans l'article NA.5.2.3.4 de la norme NF EN 206-1 et dans le guide technique LCPC (juin 1994) "Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali réaction".

Le niveau de prévention à prendre en compte correspond aux recommandations de NIVEAU A / NIVEAU B / NIVEAU C.

Nota

Exemple de niveau de prévention :

- ouvrage courant : niveau B
- ouvrage exceptionnel : niveau C

1.2.5 - Prévention vis-à-vis des risques liés aux réactions sulfatiques internes

Des dispositions sont en cours de mise au point. Elles feront l'objet de recommandations LCPC.

1.2.6 - Caractéristiques chimiques des eaux de surfaces et souterraines et des sols en contact avec l'ouvrage

Les caractéristiques chimiques des eaux de surfaces et souterraines (SO_4^{2-} ; pH ; CO_2 ; NH_4^+) et des sols (SO_4^{2-} ; acidité) permettent de déterminer, en utilisant le tableau 2 de l'article 4.1 de la norme NF EN 206-1, les classes d'exposition correspondants aux attaques chimiques (XA1, XA2, XA3) à associer, si nécessaire, aux parties d'ouvrages concernées.

2 - Préparation et organisation du chantier

2.5 - Procédures d'exécution

2.5.1 - Assurance de la qualité pour les bétons

Réf. Article ... du Fascicule 65.

2.5.1.1 - Nature et qualité des différents constituants

- ▶▶ Le PAQ définit le type et la provenance des ciments
- ▶▶ Il précise pour les granulats :
 - leur provenance,
 - leurs caractéristiques :
 - granularité (norme NF EN 933-1),
 - teneur en fines (norme NF EN 933-10),
 - propreté (normes NF EN 933-8 et 9),
 - résistance à l'usure (Micro-Deval, norme NF EN 1907-1)
 - résistance aux chocs (Los Angeles, norme NF EN 1097-2),
 - friabilité des sables (norme P 18-576),
 - le niveau de réactivité vis-à-vis de la réaction alcali-silice (FD P 18-542, et norme XP P 18-594),
 - la non-géllivité (norme NF EN 1397-1)
- ▶▶ Il définit la nature, le dosage et la provenance des adjuvants.

2.5.1.2 - Dispositions particulières liées aux risques liés à l'alcali-réaction

Dispositions concernant le dossier d'étude des bétons :
réf. Fascicule FD P 18-542 et norme XP P 18-594

Si les granulats bénéficient du droit d'usage de la marque NF-Granulats, avec qualification vis-à-vis de l'alcali-réaction en NR (non réactif) ou PRP (potentiellement réactif à effet de pessimum), le certificat de conformité doit être annexé au dossier d'étude des bétons.

2.5.1.3 - Bétonnage sous conditions climatiques extrêmes

Le PAQ précisera les dispositions à mettre en œuvre en cas de bétonnage lorsque la température ambiante est inférieure à 5°C ou supérieure à 35°C.

2.5.1.4 - Dispositions particulières relatives à la durabilité vis-à-vis du gel

Les dispositions de guide "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel" s'appliqueront.

2.10 - Normes de calcul et textes réglementaires

2.10.1 - Normes de calcul

Les calculs des structures sont justifiés en utilisant les normes européennes Eurocodes.

- ▶▶ NF EN 1990 Bases de calcul des structures
- ▶▶ NF EN 1991 Actions sur les structures
 - NF EN 1991-1 Actions générales - Parties 1 à 7
 - NF EN 1991-2 Actions sur les ponts dues au trafic
- ▶▶ NF EN 1992 Calcul des structures en béton
 - NF EN 1992-1-1 Règles générales et règles pour les bâtiments
 - NF EN 1992-2 Ponts en béton - Calcul et dispositions constructives
- ▶▶ NF EN 1994 Calcul des structures mixtes acier-béton
- ▶▶ NF EN 1997 Calcul géotechnique
- ▶▶ NF EN 1998 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

2.10.2 - Textes réglementaires

Fascicule 65A du CCTG "Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension".

3 - Provenance, qualité et préparation des matériaux

3.10 - Constituants des bétons

3.10.1 - Ciments

Les ciments courants sont conformes à la norme NF EN 197-1.

Les ciments offrant des caractéristiques complémentaires font l'objet des normes :

- ▶▶ NF P 15-317 (Ciment pour travaux à la mer : PM)
- ▶▶ NF P 15-318 (Ciment à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint : CP)

- ▶▶ NF P 15-319 (Ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates : ES)
- ▶▶ NF EN 197-4 (Ciment de haut-fourneau et à faible résistance à court terme : L-LH)

Les ciments doivent être titulaires de la marque **NF** - Liants hydrauliques. Le choix du ciment sera fonction des spécifications liées aux classes d'exposition.

3.10.2 - Granulats

Les granulats sont d'origine naturelle conformes aux normes NF EN 12620 et XP P 18545. Ils sont titulaires de la marque **NF** - Granulats.

Conformément à l'article 10.7.2 de la norme XP P 18-545 pour les bétons de classe de résistance C 35/45 ou supérieure, les granulats de code indicé A conviennent (une ou deux caractéristiques peuvent être de code B après études ou selon références).

Pour les bétons de classe de résistance inférieure à C35/45, les granulats doivent être de code B (une ou deux caractéristiques peuvent être de code C après études ou selon références).

▶▶ Dispositions particulières vis-à-vis des risques liés à l'alcali-réaction

Les granulats doivent être qualifiés vis-à-vis de l'alcali-réaction, conformément aux prescriptions du fascicule de documentation FD P 18-542.

Les granulats doivent respecter les spécifications définies dans le guide - LCPC "Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction".

▶▶ Dispositions particulières pour la durabilité vis-à-vis du gel

Les caractéristiques des granulats doivent respecter les spécifications définies dans le guide "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel" du LCPC.

3.10.3 - Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit satisfaire les prescriptions de la norme NF EN 1008.

3.10.4 - Adjuvants

Les adjuvants seront conformes à la norme NF EN 194-2 et feront l'objet de la marque **NF** - Adjuvants pour bétons.

3.10.5 - Additions

Les additions devront être conformes aux normes :

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| ▶▶ NF EN 450 | Cendres volantes |
| ▶▶ NF P 18-502 et NF EN 12263-1 | Fumées de silice |
| ▶▶ NF P 18-508 | Additions calcaires |
| ▶▶ NF P 18-509 | Additions siliceuses |
| ▶▶ NF P 18-506 | Laitiers de haut-fourneau |

Nota

La nature et la quantité maximale d'additions utilisables en substitution partielle du ciment sont précisées dans le tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1.

3.10.6 - Bétons

Les documents de référence sont la norme NF EN 206-1, les normes de produits préfabriqués et le Fascicule 65 (chapitre... : Bétons et mortiers - Articles ...).

La détermination des résistances mécaniques en compression des bétons sera réalisée à l'aide d'éprouvettes cylindriques conformes à la norme NF EN 12390-1.

La classification et la désignation des bétons (classes d'exposition, classes de résistance à la compression, classes de chlorures, classes de consistance du béton frais) sont définies conformément à la norme NF EN 206-1.

Si le béton provient d'une centrale BPE, il doit être titulaire de la marque  - BPE.

Nota

La norme NF EN 206-1 définit les valeurs limites relatives à la composition et aux propriétés des bétons en fonction de la classe d'exposition. Elle précise dans le tableau NA.F.1 pour chaque classe d'exposition : le rapport eau efficace/liant équivalent maximal, la teneur minimale en liant équivalent, la classe de résistance minimale à la compression du béton et le cas échéant, la teneur minimale en air et des exigences complémentaires sur la nature des ciments.

3.10.7 - Produits préfabriqués en béton

Les documents de référence sont les normes de produits préfabriqués et le Fascicule 65 (chapitre ... : Bétons et mortiers - Articles ..., Produits préfabriqués).

Les produits préfabriqués doivent disposer d'une certification, c'est le cas notamment pour les éléments architecturaux (Certification )

Le béton des produits préfabriqués structuraux, autres que les blocs, doit être conforme aux tableaux NA.F.1 ou NA.F.2. Pour chaque type de produit préfabriqué, une procédure documentée doit mentionner le tableau auquel il est fait référence (NA.F.1 ou NA.F.2)

Nota

Les spécifications du tableau NA.F.2 reposent sur une approche performancielle de la durabilité qui permet de prendre en compte l'ensemble des facteurs liés aux formules de béton et aux procédés de fabrication. Les principales différences entre les tableaux NA.F.2 et NA.F.1 concernent :

- la prescription dans le tableau NA.F.2 de valeurs d'absorption d'eau maximales en remplacement des dosages minimaux en liant équivalent ;
- des limites sur les rapports eau efficace / liant équivalent plus contraignantes ;
- la possibilité pour les classes XF d'utiliser des essais de performance définis dans les normes : XP P 18-420, XP P 18-424 et XP P 18-425 ;
- des classes de résistances minimales plus élevées pour les classes d'exposition XC, XS, XD et XF.

3.11 - Armatures pour béton armé

Les armatures pour béton armé seront conformes aux normes suivantes :

- ▶▶ XP 35-014
Acier pour béton armé - Barres et couronnes lisses à verrous ou à empreintes en acier inoxydable
- ▶▶ NF A35-015
Armatures pour béton armé - Ronds lisses soudables
- ▶▶ NF A35-016
Armatures pour béton armé - Barres et couronnes soudables à verrous de nuance FE500 - Treillis soudés constitués de ces armatures
- ▶▶ NF A35-017
Armatures pour béton armé - Barres et fils machine non soudables à verrous
- ▶▶ NF A35-019-1
Armatures pour béton armé - Armatures constituées de fils soudables à empreintes - Partie 1 : Barres et couronnes
- ▶▶ NF A35-019-2
Armatures pour béton armé - Armatures constituées de fils soudables à empreintes - Partie 2 : Treillis soudés

- ▶▶ NF A35-021
Acier pour béton - Fils soudables utilisés pour la fabrication d'armatures pour béton
- ▶▶ NF A35-024
Acier pour béton - Treillis soudés constitués de fils de diamètre inférieur à 5 mm
- ▶▶ XP A 35-025
Armature pour béton armé-Ronds lisses galvanisés à chaud - Barres, fil-machine et fils haute adhérence, fils constitutifs de treillis soudés galvanisés à chaud

3.12 - Bétons

A chaque partie d'ouvrage est associée un Béton à Propriétés Spécifiées (BPS) satisfaisant aux exigences de la combinaison des classes d'exposition auxquelles il est soumis pendant sa durée de service.

Les spécifications des BPS sont définies dans l'article 6.2 de la norme NF EN 206-1.

3.11.1. Définition des différentes parties d'ouvrage

L'ouvrage est constitué des différentes parties d'ouvrages suivantes :

- ▶▶ **Bétons coulés en place**
 - Béton de propreté
 - Dalle de transition
 - Béton de remplissage
 - Béton immergé pour fondation
 - Semelles de fondation
 - Fondations profondes : pieux, barrettes
 - Radier
 - Piles
 - Culées
 - Cadre
 - Portique
 - Tablier
 - Parement
 - Dalle béton pour structure mixte
 - Hourdis pour structure PRAD
- ▶▶ **Produits préfabriqués en béton**
 - Bordures de trottoir
 - Corniches
 - Corniches caniveaux
 - Parements et coques de piles et culées
 - Poutres PRAD
 - ...

3.12.2 - Localisation des différentes parties d'ouvrage

Selon sa position dans l'ouvrage, chaque partie d'ouvrage peut être localisée en fonction de son environnement :

- Béton enterré hors gel (béton enterré de plus d'un mètre)
- Béton soumis au gel
- Béton totalement immergé (dans l'eau de mer)
- Béton partiellement immergé (dans l'eau de mer)
- Béton non immergé
- Béton exposé à l'air véhiculant du sel marin
- Béton en contact avec le sol
- Béton sans contact avec le sol
- Béton en contact avec les eaux de ruissellement de chaussée
- Béton en contact avec le sol et les eaux de ruissellement de chaussée
- Béton sans contact ni avec le sol ni avec les eaux de ruissellement de chaussée

Il convient de combiner ces localisations. Le béton pourra être, par exemple, en contact avec le sol, non immergé et en contact avec les eaux de ruissellement de chaussée.

3.12.3 - Combinaison des classes d'exposition

Le béton de chaque partie d'ouvrage peut être soumis pendant sa durée de service à plusieurs types d'actions dues à l'environnement, réparties en classes d'exposition.

Il doit respecter toutes les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition (cf tableau NA.F.1 pour les bétons coulés en place, tableaux NA.F.1 ou NA.F.2 pour les produits préfabriqués structuraux).

Il convient donc, pour définir les spécifications du béton, de combiner l'ensemble des valeurs limites et les propriétés du béton et de sélectionner les plus sévères.

3.12.4 - Valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition

Le tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1 précise les valeurs limites pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition.

En France, certaines classes d'exposition correspondent à des spécifications identiques (XC2 et XC1/XC3 et XF1/XC4 et XF1/XS1 et XS2/XD1 et XF1). Le tableau NA.F.1 peut donc ainsi être synthétisé :

Classes d'exposition											
	XC1 XC2	XC3 XC4 XF1 XD1	XS1 XS2	XD2	XS3 XD3	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Rapport $E_{eff}/$ liant équivalent maximal	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,55	0,55	0,45	0,55	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur minimale en liant équivalent	260	280	330	330	350	300	315	340	330	350	385
Teneur minimale en air %	-	-	-	-	-	4	4	4	-	-	-

Nota

Attaques chimiques : pour ce type d'environnement, l'Annexe Nationale de la norme NF EN 206-1 renvoie au fascicule de documentation FP P 18-011 "Bétons - classification des environnements chimiquement agressifs", notamment pour le choix de ciments.

Le tableau NA.F2 commun aux normes NF EN 13369 et NF EN 206-1 précise les valeurs limites qui peuvent être utilisées pour les produits préfabriqués en béton.

3.12.5 - Classes de chlorures

La norme NF EN 206-1 définit (articles 5.2.7 et NA 5.2.7) les teneurs maximales en chlorure du béton à respecter en fonction de son type d'utilisation. Elle définit quatre classes de teneur : Cl 1,0 / Cl 0,65 / Cl 0,4 / Cl 0,2. Les classes de chlorures permettent d'adapter la composition du béton en fonction des risques de corrosion des armatures.

La classe de chlorure à respecter en fonction des risques de corrosion des armatures est définie dans le tableau ci-dessous :

Classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton		
Utilisation du béton	Classe de chlorures	Teneur maximale en Cl
Béton ne contenant ni armatures en acier, ni pièces métalliques noyées	Cl 1,0	1 %
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulé avec un ciment de type CEM III	Cl 0,65	0,65 %
Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,40	0,4 %
Béton contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,20	0,2 %

La teneur maximale en ions chlorure est définie en pourcentage de la masse du ciment, elle concerne la somme des chlorures de tous les constituants.

3.12.6 - Spécifications des bétons (BPS) de chaque partie d'ouvrage

Le béton (BPS) de chaque partie d'ouvrage est défini par les spécifications minimales suivantes :

- classe de résistance à la compression
- classes d'exposition (suivie de la lettre F en France)
- dimension maximale nominale des granulats
- classe de teneur en chlorures
- classe de consistance (à la livraison)

et les exigences complémentaires éventuelles :

- rapport Eau efficace / Liant équivalent
- teneur minimale en liant équivalent
- type et classe du ciment
- caractéristiques complémentaires du ciment
- caractéristiques complémentaires relatives aux granulats
- caractéristiques complémentaires relatives au béton frais ou durcis
- teneur en air
- résistance en compression au jeune âge
- aspect particulier de parement (spécification basée sur le Fascicule de documentation FD P 18-513)
- béton pompable
- béton autoplaçant

3.12.7 - Caractéristiques complémentaires des bétons

Les bétons peuvent faire l'objet, par exemple, des caractéristiques complémentaires suivantes :

Prévention - Recommandations	Caractéristiques complémentaires
Vis-à-vis du gel/dégel	G
Vis du gel/dégel avec sels de déverglaçage	G + S
Vis-à-vis de l'alcali-réaction	RAG
Vis-à-vis de la qualité des parements	EQP

3.12.8 - Exemple de désignation du béton

- ▶▶ **Béton de semelle de fondation (béton armé), soumis au gel (gel sévère sans agent de déverglaçage), non immergé, en contact avec le sol et les eaux de ruissellement pour ouvrage non situé à proximité des côtes**

- Détermination des classes d'exposition
 - Gel sévère sans agent de déverglaçage : XF3
 - Prise en compte de la carbonatation : XC4
 - Eaux de ruissellement : XA1
- Détermination de la classe de chlorures
 - Béton contenant des armatures en acier : Cl 0,4
- Classe de résistance à la compression
 - Plus grande des classes de résistance minimale de chaque classe d'exposition (XF3 / XC4 / XA1) : C30/37
- Dimension maximale des granulats : 22,4 mm
- Classe de consistance :
 - À déterminer en fonction des contraintes d'exécution du chantier
- Teneur minimale en liant équivalent
 - Plus grande des valeurs de chaque classe d'exposition : (XF3 / XC4 / XA1) 330 kg/m³
- Rapport Eau efficace / Liant équivalent
 - Plus petite des valeurs de chaque classe d'exposition : (XF3 / XC4 / XA1) 0,55
- Nature du ciment
 - Selon le Fascicule de documentation P18-011 (pour respecter les spécifications liées à XA1)
 - Si présence de sulfate dans les eaux de ruissellement : ciment PM
- Caractéristiques complémentaires du béton :
 - Teneur minimale air occlus 4 % (XF3)

▶▶ **Béton de tablier (béton précontraint), soumis au gel (gel faible sans agent de déverglaçage)**

- Détermination des classes d'exposition
 - Gel faible sans agent de déverglaçage : XF1
 - Prise en compte de la carbonatation : XC4
- Détermination de la classe de chlorure
 - Béton contenant des armatures de précontrainte en acier : Cl 0,2
- Classe de résistance à la compression
 - Plus grande des classes de résistance minimale de chaque classe d'exposition (XF1 / XC4) : C30/37
- Dimension maximale des granulats : 22,4 mm
- Classe de consistance :
 - À déterminer en fonction des contraintes d'exécution du chantier

- Teneur minimale en liant équivalent
 - Plus grande des valeurs de chaque classe d'exposition :
(XF1 / XC4) 330 kg/m³
- Rapport eau coefficient / liant équivalent
 - Plus petite des valeurs de chaque classe d'exposition :
(XF1 / XC4) 0,55

4 - Exécution des travaux

4.4 - Mise en œuvre des bétons

La mise en œuvre des bétons sera réalisée conformément aux prescriptions de l'article ... du Fascicule 65 A du CCTG.

4.4.1 - Cure au béton

Les prescriptions du Fascicule 65 A (article ...) seront respectées scrupuleusement.

En particulier, les coffrages seront laissés en place tant que la cure des faces coffrées est nécessaire, à moins d'assurer une cure par d'autres moyens.

4.4.2 - Reprise de bétonnage

Les prescriptions du Fascicule 65 A (article ...) s'appliquent.

Les reprises de bétonnage non prévues sur les plans d'exécution sont interdites. Les reprises de bétonnage doivent être calepinées rigoureusement avec les joints de coffrage.

4.4.3 - Bétonnage sous conditions climatiques extrêmes

Les prescriptions pour le bétonnage sous conditions climatiques extrêmes font l'objet du fascicule 65 A (article ...).

Les résultats des mesures de températures sur chantier sont corrélés par l'entrepreneur avec ceux de la station météorologique la plus proche.

Nota

S'il est prévu que la température ambiante descende en dessous de 0°C pendant le bétonnage ou pendant les périodes de cure, des précautions doivent être prévues pour protéger le béton des effets du gel.

S'il est prévu que la température ambiante soit supérieure à 35°C pendant le bétonnage ou pendant la période de cure, des précautions doivent être prévues pour protéger le béton.

Le PAQ définit les dispositions à mettre en œuvre pour le bétonnage sous conditions climatiques extrêmes : température mesurée sur chantier inférieure à 5° C ou supérieure à 35° C.

Le béton ne doit pas être exposé à des températures négatives avant d'avoir atteint une résistance en compression d'au moins 15 MPa.

4.4.4 - Dispositions particulières liées aux réactions sulfatiques

Nota

Des recommandations sont en cours de mise au point. Elles viseront en particulier à limiter la température maximale au cœur du béton pour les pièces massives (pièces de taille critique).

4.4.5 - Décoffrage et désétalement

Les opérations de décoffrage et de désétalement ne peuvent être effectuées que lorsque la résistance du béton est suffisante, compte tenu des sollicitations de l'ouvrage, pour éviter toute déformation excessive. Ces opérations doivent se faire de façon régulière et progressive pour ne pas entraîner des sollicitations brutales dans l'ouvrage.

Par temps froid, les délais avant décoffrage doivent être augmentés.

Annexe 3

Contenu des actions du contrôle extérieur

3.1 - Analyse des PAQ

À la remise des offres et avant signature du marché, l'analyse des PAQ porte essentiellement sur le sommaire, sur l'organigramme du chantier, la liste des fournisseurs et des sous-traitants et sur le schéma organisationnel du contrôle intérieur (organisation des interfaces, circuits de diffusion des documents, contrôles internes et éventuellement externes, points sensibles...).

Dans les phases de préparation et d'exécution des travaux, l'analyse doit être exhaustive.

L'analyse de la Note d'Organisation Générale porte sur les descriptions de l'encadrement responsable, de l'organisation de l'entreprise et les modalités générales de contrôle intérieur (avec notamment la teneur de l'éventuel contrôle externe).

La vérification des procédures est effectuée point par point par rapport aux clauses techniques particulières ou générales, dans le respect des règles de l'art.

Cette analyse a une importance considérable car elle conduit à entériner en quelque sorte le référentiel qualité de l'entreprise. Elle se conclut d'ailleurs par un visa du maître d'œuvre.

3.2 - Vérification de l'application des PAQ Actions de suivi

Une action de suivi consiste à vérifier que l'entreprise respecte bien les engagements qu'elle a pris dans le PAQ visé.

Elle porte donc sur la façon dont l'entreprise suit sa procédure, dans l'optique des phases qu'elle réalisera en l'absence de la maîtrise d'œuvre.

Ceci implique évidemment que la procédure soit présente et connue sur le chantier.

3.3 - Vérification de l'application des PAQ Surveillance du contrôle intérieur

La surveillance du **contrôle interne** consiste à prendre connaissance de tous les documents de suivi, à s'assurer qu'ils sont établis selon le programme prévu par les personnes identifiées et qu'ils sont correctement renseignés.

Elle s'effectue sous forme d'examen et peut, en outre, comporter une vérification.

L'examen d'un document de suivi consiste à s'assurer que les indications prévues figurent sur le document, que ces indications sont conformes aux exigences du marché (détection de non-conformité) ou à ce qui est attendu ou prévu (détection d'anomalie) et que les suites à donner sont indiquées.

La vérification d'une indication figurant sur un document de suivi consiste à procéder à des mesures ou constats pour en vérifier la validité.

Dans le cas où le marché confie au **contrôle externe**, la réalisation d'**essais de conformité**, les actions de contrôle extérieur sont alors exercées selon l'une, l'autre, ou une combinaison des modalités suivantes :

- acceptation des résultats, dans le cas d'un laboratoire, indépendant de l'entreprise et accrédité (COFRAC, par exemple, pour les essais de compression sur éprouvettes de béton) ;
- audit initial, essais communs initiaux avec fixation d'un intervalle d'acceptation puis vérification périodique de la validité des résultats d'essais, par exécution d'essais appariés ;
- vérification de la validité du contrôle par l'exécution d'épreuves de conformité par le contrôle extérieur.

Lorsqu'une non-conformité, non détectée par le contrôle intérieur, est mise en évidence, tous les travaux jusqu'alors vérifiés par le contrôle intérieur sont remis en cause.

3.4 - Épreuves de contrôle

L'épreuve de contrôle comporte un ensemble de vérifications et d'essais dont l'exécution est jugée nécessaire et suffisante pour caractériser un produit ou le résultat d'une tâche d'exécution.

Elle porte sur l'aptitude à satisfaire les exigences (épreuve de convenance) et sur la conformité des travaux réalisés (épreuve de conformité).

Elle est généralement associée à un point d'arrêt.

Par exemple, les épreuves de contrôle du béton consisteront en l'inspection de la centrale à béton, la réalisation de l'épreuve de convenance et la réalisation de l'épreuve de conformité par lot de contrôle et partie d'ouvrage.

3.5 - Bilan qualité

Toute prestation de contrôle extérieur doit se conclure par un bilan qualité :

▶▶ sur l'ouvrage tout d'abord :

Le bilan porte sur :

- la qualité fonctionnelle de l'ouvrage, c'est-à-dire son aptitude à rendre le service attendu ;
- la vérification que les performances de durabilité sont bien remplies ;
- la vérification que l'entretien courant suffira à maintenir l'ouvrage en état de service, à l'exception du remplacement ou de travaux de maintenance sur certains équipements (joints de chaussée, appareils d'appuis, remise en peinture des garde-corps...) au bout d'un nombre d'années considéré normal ;
- la vérification des dispositions favorisant certaines opérations d'entretien spécialisé ultérieur (possibilité de vérinage pour remplacement des appareils d'appui par exemple) ;
- la vérification des conditions d'une bonne surveillance de l'ouvrage (accès aux différentes parties de l'ouvrage pour inspection).

▶▶ sur l'entreprise ensuite :

- a-t-elle obtenu la qualité requise ?
- a-t-elle respecté son PAQ ?

Ce bilan qualité peut être utilisé pour l'établissement des certificats de capacité ou de référence.

▶▶ sur l'organisation qualité enfin :

- a-t-elle bien fonctionné ?
- était-elle adaptée ?
- comment l'améliorer ?

Ce bilan qualité doit permettre que l'expérience acquise à chaque chantier ne soit pas perdue mais au contraire, conduite à une consolidation des pratiques.

Liste (non exhaustive) des contrôles intérieurs et extérieurs pour un tablier d'ouvrage en béton précontraint (en gras les points d'arrêt)

Contrôles intérieurs	Contrôles extérieurs
PAQ (entreprise, fournisseurs, sous-traitants)	Avis sur PAQ, visa
Étude de formulation des bétons (épreuves d'études)	Avis sur dossiers d'étude des bétons, acceptation des formules Réception des moyens de fabrication du béton Autorisation de réaliser les épreuves de convenueance
Épreuve de convenueance des bétons	Participation aux épreuves de convenueance de fabrication du béton, acceptation
Réalisation des éventuels éléments témoins	Participation aux épreuves de convenueance de mise en œuvre du béton, acceptation
Contrôles de fabrication du béton	Suivi Surveillance du contrôle intérieur
Contrôles de mise en œuvre : • étaielements • coffrages • armatures passives • conduits et ancrages de précontrainte par post-tension • béton	Suivi, surveillance du contrôle intérieur Vérifications des armatures du béton armé et des conduits de précontrainte en place Autorisation de bétonnage Épreuves de contrôle des bétons
Épreuve d'information de la résistance du béton	–
Contrôles de mise en œuvre : • mise en tension des câbles de précontrainte (mesure des pressions et allongements)	Vérification des matériels, des procédés et des produits Autorisation de mise en tension, autorisation de décentrement Suivi, surveillance du contrôle intérieur Mesure des coefficients de transmission des câbles Réception des mises en tension avant coupe des armatures
Épreuve de convenueance du coulis d'injection	Participation à l'épreuve de convenueance du coulis, acceptation
Contrôles de mise en œuvre : • injection des câbles de précontrainte	Vérification de l'étanchéité des conduits Autorisation d'injecter Suivi Épreuves de contrôle du coulis
Fiches de non-conformité	Acceptation

Liste (non exhaustive) des contrôles intérieurs et extérieurs pour les éléments structuraux préfabriqués d'un tablier d'ouvrage en béton précontraint (en gras les points d'arrêt)

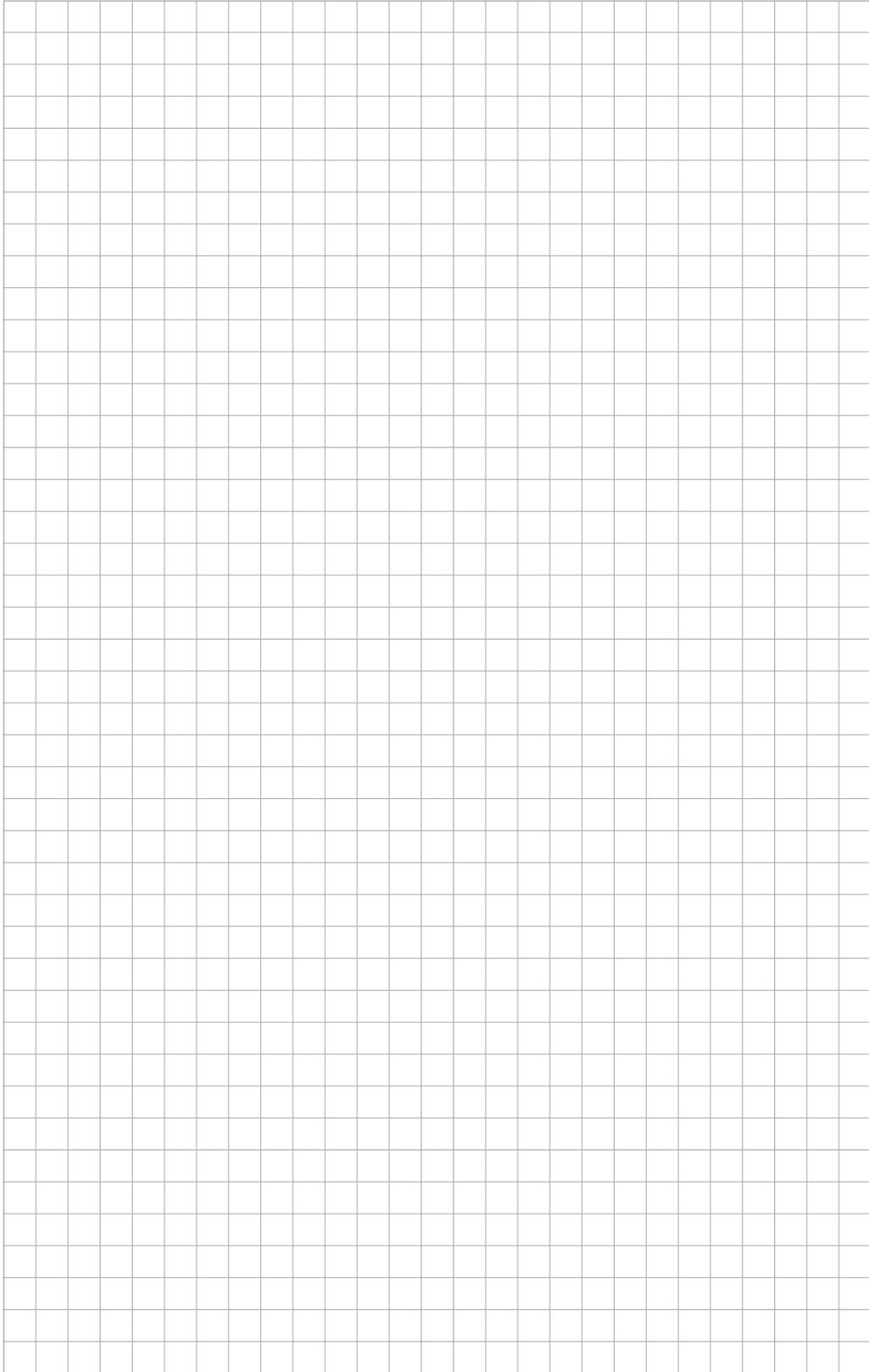
Contrôles intérieurs	Contrôles extérieurs
PAQ (entreprise, fournisseurs, sous-traitants)	Avis sur PAQ, visa
Étude de formulation du béton avec analyse de la répartition des températures dans les éléments traités thermiquement (épreuve d'étude)	Avis sur le dossier d'étude du béton, acceptation de la formule Réception de l'usine de préfabrication Autorisation de réaliser l'élément témoin ou le premier élément de la série
Réalisation de l'éventuel élément témoin ou du premier élément de la série	Participation à l'épreuve de convenance de fabrication, acceptation
Contrôles de fabrication du béton	Suivi Surveillance du contrôle intérieur
Contrôles de mise en œuvre : <ul style="list-style-type: none"> • moules • réservations • armatures passives • armatures de précontrainte et dispositifs de blocage • mise en tension armatures (mesures d'allongements) • béton • étuvage (enregistrement des températures) 	Suivi Surveillance du contrôle intérieur (vérifications périodiques des vérins, des manomètres...) Vérification des matériels, des procédés et des produits Vérifications des réservations, des armatures de béton armé et des armatures de précontrainte en place Contrôle éventuel de certaines mises en tension (au moyen de capteurs de force) Suivi éventuel du cycle d'étuvage du béton Épreuves de contrôle des bétons (béton étuvé, béton non étuvé)
Épreuve d'information de la résistance du béton	-
Contrôles de mise en œuvre : <ul style="list-style-type: none"> • mise en précontrainte des éléments (mesure de rentrées d'armatures, de contreflèches des éléments) • manutention, stockage 	Suivi Surveillance du contrôle intérieur
Fiches de non-conformité	Acceptation
-	Pré-réception en usine des éléments avant expédition Réception des éléments sur chantier après transport

Annexe 4

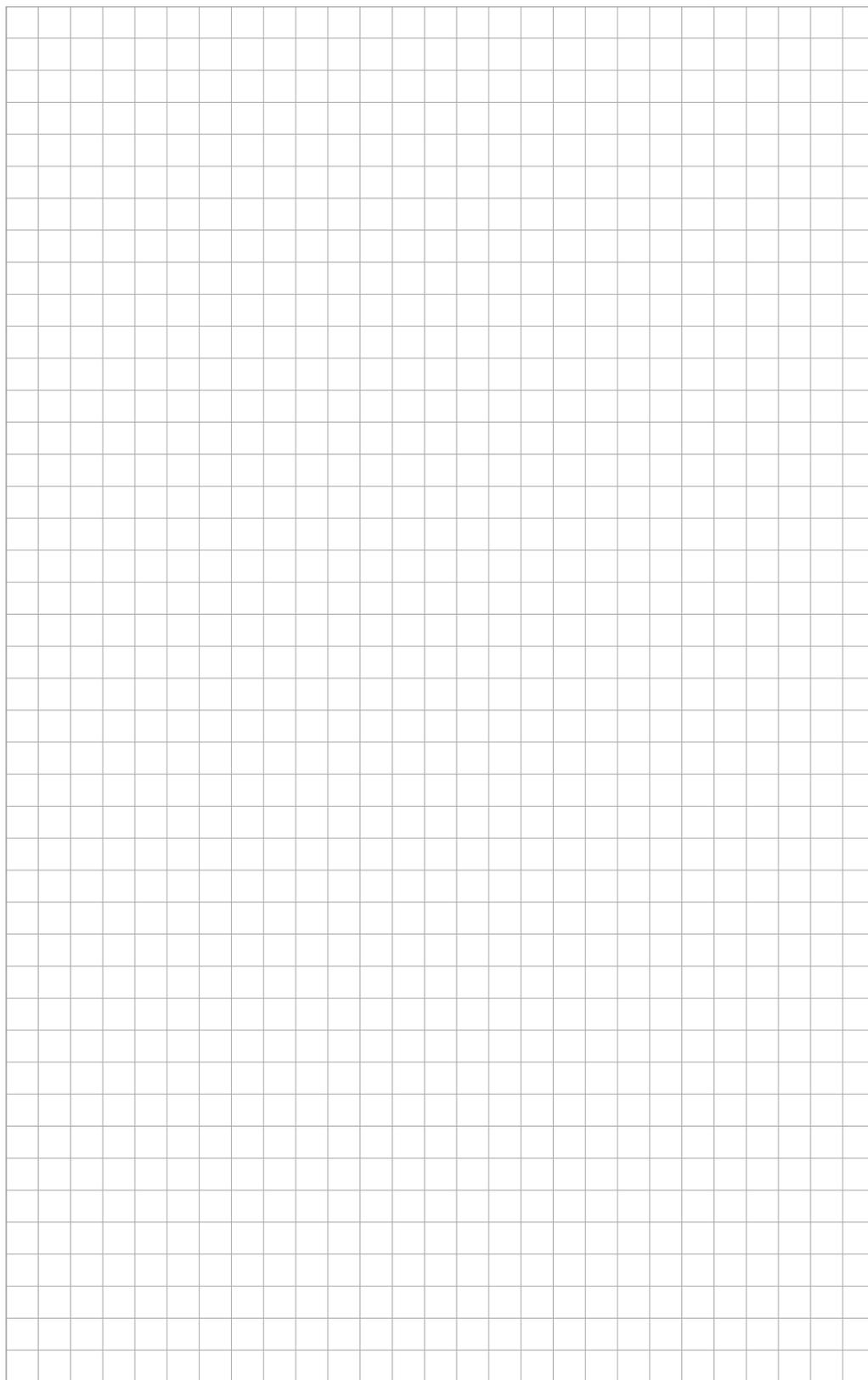
Exemple de bon de livraison

SUPERMIX 2, rue du Roi 75000 PARIS Tél. : 01.60.80.53.12 Fax : 01.60.80.53.55		Centrale de : Charenton Bon n° : 3605 Camion n° : 725 Volume (m3): 6 Date : 4/01/05		Heures (1) 1 ère gâchée : 7 h 00 Arrivée chantier : — convenue : 7 h 30 — réelle : 7 h 25 Début déchargement : 7 h 35 Fin déchargement : 8 h 00						
Client : MPL Chantier : 16, rue de la Révolution 94400 VITRY-sur-SEINE Référence commande :										
Désignation	Certification ou Attestation	Classe d'exposition (2)	Classe chlorures	Résistance caractéristique (3)	Type et classe du ciment	Type Additions	Dosage (4) (C+KA) kg/m3	Consistance	Dmax	Type adjuvant
BPS NF EN 206-1 OU	NF	XF1 (F)	0,4	C25/30	CEMI 52,5 N	V	350	S4	20	PRE
BCP NF EN 206-1 OU	NF				CEMII/A-L 42,5R PM-CP1				20	
Produit spécial (5) ou référence à une autre norme de produit										
Appellation commerciale						Consils de sécurité: En aucun cas nos produits ne doivent entrer en contact avec des surfaces métalliques ou des aciers, car cela provoque des allergies, des rougeurs ou des brûlures.				
Propriétés particulières spécifiées						xi:irritant 				
Livraison réceptionnée, le client						Type et quantité : Demandeur : Ajust sur chantier (6) Signature:				
(1) Sauf dispositions particulières, le béton doit être mis en œuvre, au plus tard, 2 heures après la fabrication de la première gâchée. (2) La classe X0 ne peut convenir que pour des bétons ne subissant aucune agression, non armés ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm. (3) Indiquer le mode de contrôle du béton (cylindres ou cubes) (4) Dosage minimal, si spécifié par le client, en BPS et dosage nominal en BCP. (5) L'appellation PRODUIT SPECIAL ne peut être utilisée pour des bétons entrant dans le domaine d'application de la norme NF EN 206-1. (6) Tout ajout sur chantier non prévu dans la formulation du béton rend le béton non conforme à la norme NF EN 206-1.						Les cases grisées doivent être remplies si spécifié à la commande				

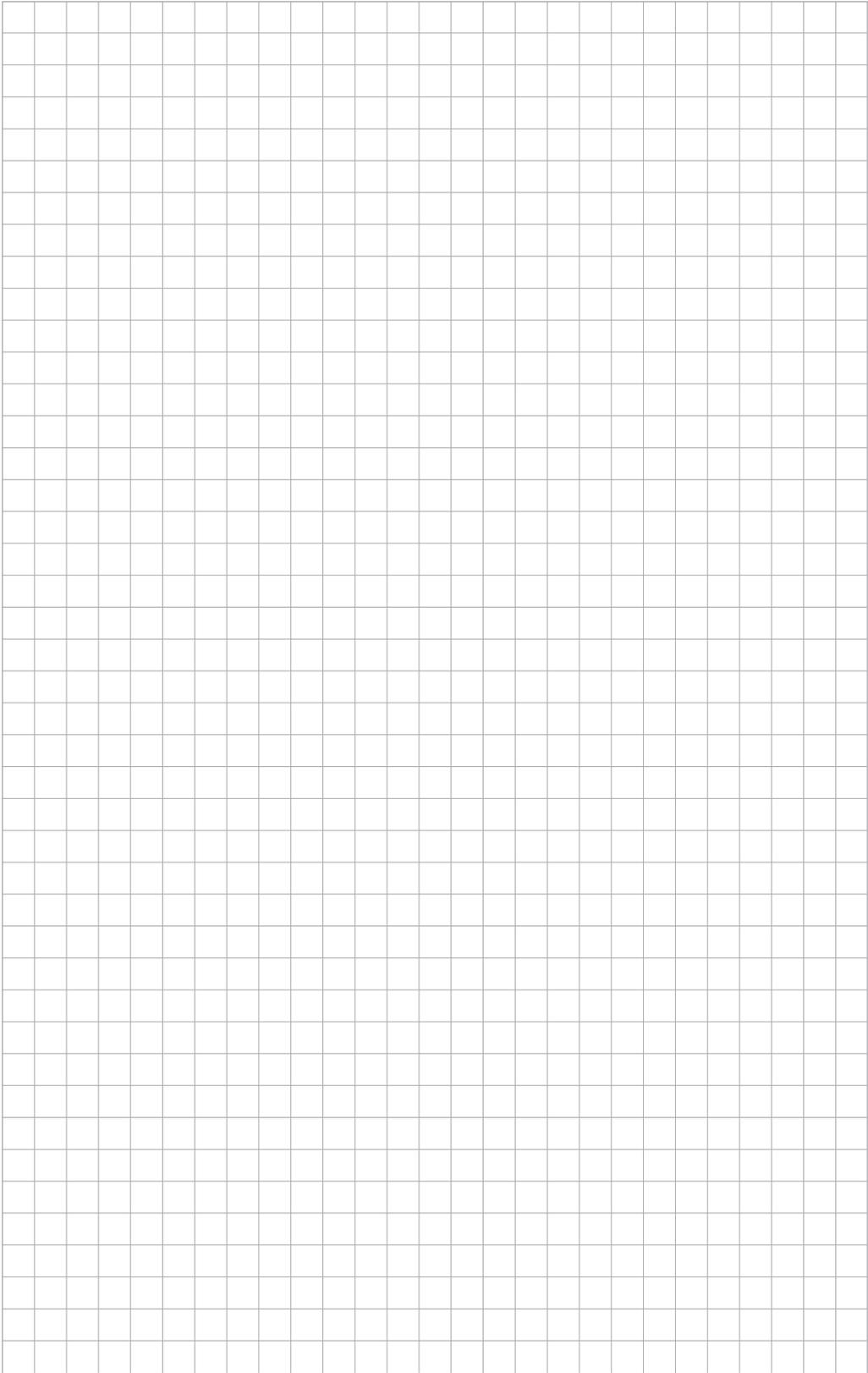
NOTES



NOTES



NOTES



Crédits photographiques et illustrations :

AMPRINCIPE - BONNA SABLA -
CAPREMIB - CELTYS - CERIB - CHAPSOL -
CIMBETON - CPC - DBG STUDIOS - PIERRE DEZEUZE -
FIB - JMB-FREYSSINET - MSA - Christophe RAULET-GETEC-ARTEM
SIMAT - SNPB - SNBPE - FREDERIC ZIRK

Mise en page :

DBG Studios - 3053e

Edition avril 2006



7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex
Tél. 01 55 23 01 00 • Fax 01 55 23 01 10

e-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr