

Béton hydraulique

Mise en œuvre

par **Jean-Marie GEOFFRAY**

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand

1. Rhéologie des bétons frais.....	C 2 230 - 2
2. Parements et autres surfaces coffrées en béton.....	— 5
3. Coffrage du béton.....	— 12
4. Serrage du béton.....	— 28
5. Bétonnage par temps froid	— 30
6. Bétonnage par temps chaud	— 31
7. Bétonnage en grande masse.....	— 33
8. Bétonnage de pieux de fondations	— 33
9. Bétons pompés	— 35
10. Bétons projetés	— 38
11. Mise en place des bétons sous l'eau.....	— 40
12. Essorage du béton par le vide (vacuum concrete).....	— 42
13. Traitements de surface des parements en béton	— 43
Pour en savoir plus.....	Doc. C 2 230

Le béton, matériau utilisé dans de nombreux cas de constructions, doit répondre à un ensemble d'exigences de sécurité, de durabilité et d'esthétique. Dans ce contexte, il doit présenter une stabilité définie après durcissement, une durabilité intrinsèque, une protection contre la corrosion des armatures métalliques qu'il enrobe, des propriétés esthétiques précises. L'ensemble de ces qualités doivent non seulement être attendues du produit fabriqué, mais encore des conditions dans lesquelles il est versé dans son moule, serré pour atteindre une compacité maximale et adopter la forme exacte du moule, puis démoulé après durcissement et protégé contre la dessiccation : un bon béton correctement fabriqué ne sera finalement qu'un mauvais béton si sa mise en œuvre est inadaptée au matériau et à son emploi. Dans ce contexte, un soin tout particulier doit être apporté au choix des moules, des méthodes et des moyens de coulage et de serrage, de la protection contre la dessiccation et des traitements de surface après décoffrage.

Après avoir défini les objectifs à atteindre en matière de parements, les conditions de mise en œuvre des bétons doivent être définies à tous les niveaux de la construction et dans les cas les plus fréquents :

- les coffrages (les fonctions attendues, les types, leurs composants, leur sécurité et leurs modes d'emploi) ;
- la vibration du béton ;
- les conditions de bétonnage par temps froid ;
- les conditions de bétonnage par temps chaud.

Pour acquérir la maîtrise du béton, la connaissance de certaines techniques spécifiques est également nécessaire au concepteur et à l'entrepreneur :

- les bétonnages en grande masse ;
- les bétonnages de pieux de fondations ;
- le pompage des bétons ;
- la projection de béton ;
- le bétonnage sous l'eau ;
- l'essorage du béton ;
- les différents traitements de surface.

1. Rhéologie des bétons frais

1.1 Gamme de consistance des bétons frais

Selon la norme P 18-325 (ENV 206), la consistance des bétons frais doit être déterminée par plusieurs méthodes :

- soit par un essai d'affaissement au cône d'Abrams (norme NF P 18-451) encore appelé *slump-test* (norme ISO 4109) ;
- soit par un essai Vébé (norme ISO 4110) ;
- soit par un essai de compactage (norme ISO 4111) ;
- soit par un essai d'étalement sur table à secousses ;
- ou par toute autre méthode d'essai convenue (maniabilité LCL, rhéométrie, wattmètre ...).

1.2 Essais usuels de consistance

Il existe un nombre important de méthodes d'essais permettant d'apprécier la consistance d'un béton frais ; tous ces essais conduisent à une caractéristique propre au matériau et liée à son ouvrabilité sur chantier. Toutes ces méthodes présentent des susceptibilités propres vis-à-vis des différents paramètres tels que la teneur en eau, la teneur en éléments fins, les proportions relatives de granulats entre eux, les moyens de mise en place du béton avant l'essai, les degrés de liberté autorisés pour la déformation de l'échantillon en cours d'essai. Il est donc rare de pouvoir corréler correctement les résultats obtenus par l'ensemble de ces essais [1].

Le choix de l'essai est réalisé de façon à rendre compte le mieux possible du comportement du béton lors de sa mise en œuvre ; ainsi, il ne serait guère judicieux de réaliser un essai avec vibration alors que le béton ne peut pas être vibré sur chantier. À cet effet, les paramètres suivants sont à prendre en compte lors de la réalisation de l'essai et de l'interprétation des résultats :

- l'état du béton en cours d'essai (équilibre, mouvement par gravité seule, mouvement sous vibration) ;
- la représentativité de l'échantillon, notamment par sa taille ;
- la nature de la grandeur mesurée (position d'équilibre, durée d'écoulement, vitesse de déformation, état physique particulier).

Les habitudes de chantier conduisent couramment à préférer un ou deux types d'essais bien connus, même si ceux-ci ne sont pas toujours parfaitement adaptés au matériau ou à sa mise en œuvre : il est alors nécessaire de recourir à des calibrations et d'accepter le risque d'avoir des réponses grossières parfois peu pertinentes.

Les différentes méthodes d'essais retenues soit pour leur diffusion, soit pour leur pertinence technique, sont les suivantes.

■ **Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams** (encore connu sous le vocable *slump-test*)

C'est l'essai le plus courant. Il s'agit d'un essai quasi statique où une différence de hauteur est mesurée entre un volume de béton préalablement moulé par piquage dans un coffrage en forme de tronc de cône et ce même échantillon démoulé et affaissé (figure 1).

La méthode d'essai est définie par la norme NF P 18-451. Les classes de consistance sont définies en fonction des variations de l'affaissement (tableau 1).

Les résultats sont donnés en centimètres d'affaissement et perdent une partie de leur signification à partir d'un affaissement supérieur à 18 cm : un autre type d'essai plus discriminant doit alors être recherché.

Tableau 1 – Classes de consistance définies par l'affaissement au cône d'Abrams		
Classe de consistance		Affaissement au cône (cm)
F	ferme	de 0 à 4
P	plastique	de 5 à 9
TP	très plastique	de 10 à 14
FL	fluide	≥ 15

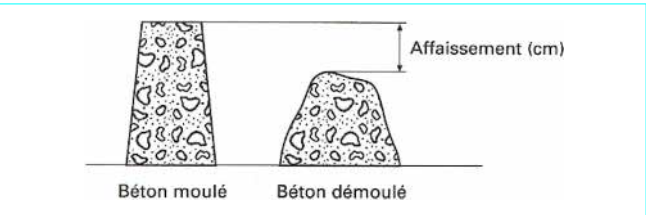


Figure 1 – Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

■ Mesure de l'affaissement au cône modifié

Elle est réservée pour analyser les bétons à gros gravillons ($D = 40$ mm), notamment en technique routière. L'essai est conduit selon la norme NF P 98-248-2 de la même façon que précédemment, mais avec un moule tronconique de dimensions supérieures.

■ Méthode slump-walz WA

Elle permet d'évaluer l'ouvrabilité d'un béton et de suivre son évolution dans le temps. L'essai est réalisé avec le cône d'Abrams posé sur la table vibrante du walz.

Dans la méthode WA, on mesure un premier tassement obtenu à l'intérieur du moule et à la stabilisation sous vibration imposée, puis l'affaissement total, après démoulage, h en cm. Le coefficient WA est donné par la relation [2] :

$$WA = 30 / (30 - h)$$

Les valeurs de WA varient entre 1 et 3 et décroissent en fonction de l'âge du béton frais (4 h au maximum).

À noter que si le béton est fluide, il n'y a pas de tassement à la vibration mais un effondrement au démoulage, alors que si le béton est sec il se produit au contraire un tassement important sous vibration et il n'y a pas d'affaissement au démoulage. Cette méthode est particulièrement intéressante pour évaluer le comportement des bétons destinés à être mis en œuvre dans les coffrages glissants, ou à être démoulés instantanément en préfabrication.

■ Méthode Vébé

Elle permet d'évaluer l'ouvrabilité d'un béton. L'essai est réalisé dans les conditions quasi inverses du *slump-walz* : l'affaissement statique dans un vase cylindrique est noté avant la mesure du temps d'étalement complet dans ce même récipient soumis à vibration. Si ce temps d'étalement (tableau 2), dit temps Vébé, est inférieur à 5 s ou supérieur à 30 s, le béton présente une consistance pour laquelle la méthode d'essai ne convient pas.

Tableau 2 – Classes Vébé

Classe	Temps Vébé (s)
V0	≥ 31
V1	30 à 21
V2	20 à 11
V3	10 à 5
V4	≤ 4

La méthode est surtout utile pour les bétons peu maniables, mais elle ne convient pas pour les bétons dont la dimension maximale de granulat dépasse 40 mm.

■ Maniabilité LCL (Laboratoire central – Lesage)

Elle est déterminée par la mesure du temps d'écoulement d'un échantillon de béton soumis à vibration. Cette méthode s'appuie sur un essai dynamique, mais n'est pas adaptée pour les bétons fluides. Le maniabilimètre est constitué par une cuve parallélépipédique rectangulaire divisée en deux compartiments par un dièdre amovible et sur l'extérieur de laquelle est fixé un vibreur (figure 2).

L'échantillon est placé dans le compartiment le plus éloigné du vibreur, le retrait du séparateur en forme de dièdre déclenche la vibration de l'ensemble et le béton s'écoule dans le compartiment laissé vide jusqu'à un repère donné. Les temps d'écoulement pour atteindre ce repère donnent une bonne idée de la maniabilité des bétons frais à un instant donné (tableau 3), et les mesures effectuées à différentes températures et à différents âges sur un même béton frais permettent de déterminer sa durée pratique d'utilisation dans toutes les conditions de chantier.

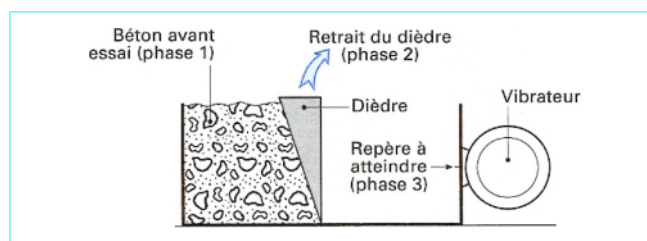


Figure 2 – Maniabilimètre Laboratoire Central – Lesage

Tableau 3 – Niveaux de maniabilité définis par le temps d'écoulement au maniabilimètre LCL

Niveau de maniabilité	Temps d'écoulement t (s)
Béton fluide	$t < 2$
Béton ouvrable	$2 < t < 10$
Béton peu maniable	$10 < t < 20$
Béton non utilisable avec les méthodes courantes	$20 < t < 60$
Béton non utilisable	$t > 60$

Les indications fournies par cette mesure sont précieuses car elles permettent d'optimiser les bétons en fonction de leur comportement sous vibration. Cependant, la lourdeur du matériel et l'importance de la taille des échantillons (35 L de béton par prise d'essai) freinent considérablement la diffusion de la méthode.

■ Essai d'étalement sur table à secousses

Il permet la mesure de l'étalement d'un tronc de cône de béton préalablement moulé, puis démoulé et soumis à des secousses transmises par l'intermédiaire du support. La consistance est appréciée par la mesure du diamètre de l'échantillon de béton affaissé (tableau 4).

Tableau 4 – Classes d'étalement

Classe	Diamètre d'étalement (cm)
F1	≤ 34
F2	35 à 41
F3	42 à 48
F4	49 à 60

Cet essai réalisé sur chantier est assez bien adapté aux bétons fluides. Sa réponse, intéressante du fait qu'elle est liée à la cohésion du matériau, reste cependant médiocre du point de vue répétabilité.

■ Plasticimètre

Il permet d'apprécier approximativement la consistance du béton frais par la mesure de l'effort de cisaillement en rotation, appliqué par une tête à trois ailettes plongée dans le béton. Cet essai, facile à réaliser, présente cependant une reproductibilité des résultats assez moyenne et nécessite un étalonnage préalable avec les mesures d'affaissement au cône d'Abrams pour chaque type de béton.

Mesure du degré de compactabilité

Elle repose sur la détermination de la réduction de volume d'un béton soumis à un serrage par vibration interne ou externe. Le degré de compactabilité d'un volume donné de béton frais est calculé par le rapport du volume non compacté au volume compacté. Il constitue ainsi un moyen d'approche de la consistance applicable aux bétons fermes à très plastiques et n'ayant pas de granulats dont le diamètre excède 40 mm. Les classes de consistance sont données dans le tableau 5.

Tableau 5 – Classes de compactage	
Classe	Affaissement (cm)
C0	≥ 1,46
C1	1,45 à 1,26
C2	1,25 à 1,11
C3	1,10 à 1,04

Wattmètre

C'est un indicateur intéressant pendant la fabrication du béton puisqu'il permet la détermination de la puissance instantanée nécessaire au malaxage du béton. L'établissement du palier de la puissance dissipée par le moteur montre que les limites d'efficacité du malaxeur sont atteintes. Le malaxage paraissant d'autant plus facile que le béton est fluide, l'indication reçue au wattmètre est naturellement liée à la plasticité de ce béton, mais à proprement parler il ne s'agit pas d'un essai de consistance.

Il existe des méthodes dérivées ou proches, qui consistent à réguler en temps réel la consistance du béton en cours de fabrication (servo-ouvrabilimètre) : le frottement d'un palpeur plongé dans la veine du béton en cours de malaxage est minimisé par des ajouts progressifs d'eau. Ces méthodes « interactives », actuellement plutôt réservées à la préfabrication, nécessitent un étalonnage préalable.

Rhéomètre

Développé par le LCPC, il permet de caractériser le comportement d'un échantillon de béton frais soumis à un mouvement de torsion [3]. Ce matériel prend aussi bien en compte les considérations du scientifique que celles du praticien de chantier. Il est spécialement adapté aux bétons très plastiques et fluides et permet d'évaluer les effets de la vibration, les évolutions de la maniabilité de ces bétons frais dans le temps et les effets de la température. L'échantillon de béton frais a la forme d'un cylindre creux et se trouve soumis à un cisaillement entre deux plans horizontaux. La conduite automatisée de l'essai permet d'accéder aux deux grandeurs physiques qui constituent les caractéristiques rhéologiques du matériau : le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, avec ou sans vibration.

1.3 Le béton comme corps de Bingham

Le comportement rhéologique d'un matériau est caractérisé par une équation d'état rhéologique qui permet de relier les valeurs de contraintes aux déformations et à leurs dérivées de divers ordres par rapport au temps [4]. Ces équations d'états rhéologiques sont représentées par des courbes dites d'écoulement (dépendance entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse).

Les différents types de comportements rhéologiques se subdivisent en trois catégories (figure 3) :

— le comportement exclusivement visqueux, lorsque l'écoulement se produit dès l'apparition d'une contrainte de cisaillement,

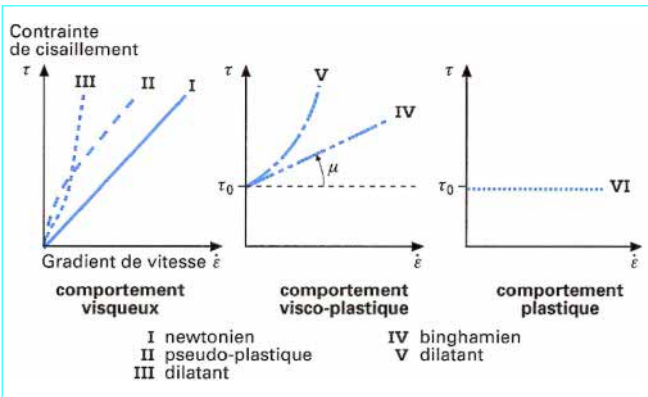


Figure 3 – Comportements rhéologiques : courbes d'écoulement

aussi faible soit-elle : c'est le cas des corps newtoniens (courbe I), pseudo-plastiques ou fluidifiants (courbe II) et dilatants (courbe III) ;

— le comportement viscoplastique, lorsque l'écoulement ne se produit qu'à partir d'un seuil de cisaillement : on distingue dans ce cas le comportement binghamien (courbe IV) et le comportement dilatant (courbe V) ;

— et le comportement plastique (courbe VI).

La réponse d'une pâte de ciment lors d'un cisaillement à vitesse donnée – reproduisant ainsi ce qui se passe lorsque le béton s'écoule dans le coffrage – montre que le comportement du matériau est celui d'un fluide de Bingham : ce comportement se caractérise par l'ordonnée de la droite à l'origine (seuil de cisaillement τ_0), contrainte minimale à exercer pour que le matériau se déforme, et par la pente de cette droite (viscosité plastique μ). Aux grandes vitesses de cisaillement les courbes s'écartent de la linéarité [3].

1.4 Comportement rhéologique sous vibration

Le seuil de cisaillement est le facteur qui limite l'écoulement du béton dans le coffrage.

Pour s'affranchir des effets de ce seuil de cisaillement, plusieurs techniques peuvent actuellement être mises en œuvre :

— la **vibration** constitue la technique la plus courante pour s'affranchir des effets de ce seuil et permettre au béton de remplir le plus rapidement possible le coffrage ; à cet effet, le comportement sous vibration d'une pâte de ciment se situe entre les modèles de Newton et de Bingham [3] ;

— l'**adjuvantation** du béton constitue également une voie exploitable pour rendre plus facile la mise en place du béton l'adjuvant permet de défloculer les grains du béton et le rend ainsi plus maniable. Du point de vue rhéologique, l'adjuvant abaisse le seuil de cisaillement et réduit la viscosité plastique.

1.5 Pertes de maniabilité

La maniabilité du béton frais peut évoluer sensiblement sous l'effet de différents facteurs propres au chantier :

— l'augmentation du temps de transport entre la centrale de fabrication et le chantier et des attentes sur chantier aggravent l'évaporation de l'eau de gâchage et la ségrégation de ses constituants

pendant le brassage dans le camion transporteur, et les conséquences des réactions chimiques déclenchées dès le premier contact du ciment avec l'eau risquent de se manifester avant la fin de la mise en œuvre ; cette perte de maniabilité est évidemment variable suivant les types de béton ;

— l'élévation de la température ambiante est également un facteur aggravant l'évaporation et favorisant l'accroissement de la cinétique de prise du béton.

Pour conserver une maniabilité suffisante à la mise en œuvre, tous ces facteurs d'influence doivent être pris en compte et leurs effets compensés dès la préparation du chantier.

Le **choix de la centrale de fabrication** repose sur les éléments suivants :

— durée de transport la plus faible possible et n'excédant pas 1 h 30 min lorsque la température ambiante reste inférieure à 20 °C ; au cas où des températures plus élevées risquent d'être relevées pendant la durée du chantier, cette durée de transport doit être réduite en proportion ;

— possibilité d'incorporation de plusieurs types d'adjuvants (plastifiants, super-plastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs...) ;

— malaxeur de capacité adaptée aux commandes de béton et présentant les équipements de brassage assurant une bonne homogénéisation des constituants du béton ;

— durée de malaxage modulable pour garantir une bonne réparation des additions, des adjuvants et des colorants éventuels.

Les **moyens de transport** sont adaptés de façon :

— à limiter au maximum l'évaporation pendant le transport (bennes à ouverture réduite) ;

— à éliminer tout risque de contamination pendant le transport et le déchargement ;

— à être munis de dispositif de brassage efficace (tambour comportant au moins deux vitesses de rotation).

La **composition du béton** est établie de façon à pouvoir prendre en compte les différents aléas climatiques susceptibles d'intervenir pendant le déroulement du chantier (basses et fortes températures) et à éviter tous les risques d'incompatibilité pouvant intervenir entre les adjuvants, le ciment, les additions et les éléments fins des granulats.

Au **niveau du chantier de mise en œuvre**, la commande du béton est passée de façon à limiter le plus possible les temps d'attente sur chantier ; pour ce faire, elle prend en compte :

— le moment de l'achèvement complet de la mise en place des coffrages et armatures ;

— les débits maximaux de coulage à la benne ou à la pompe ;

— les possibilités réelles des ateliers de vibration ;

— l'incidence des intempéries prévisibles ;

— l'absence occasionnelle de matériels de secours.

1.6 Effets de la température

La prise du béton relevant d'un ensemble de réactions chimiques, il est clair que toute élévation de température augmente les cinétiques de réaction et favorise la prise du béton, donc son raidissement ; les effets de cette élévation de température pourront être atténués, par exemple, par l'emploi d'un retardateur de prise ou par l'application des dispositions prévues lors des bétonnages par temps chauds (§ 6).

2. Parements et autres surfaces coffrées en béton

2.1 Classes de parements

Un parement de béton est une surface coffrée ou traitée destinée à être vue après achèvement des ouvrages ou à subir l'agression d'un environnement défini. Dans la grande majorité des cas, ces deux aspects d'esthétique et de durabilité devront être pris en compte.

■ Du point de vue **esthétique**, les parements sont classés prioritairement en fonction de leurs caractéristiques de teinte et de texture, sans négliger pour autant les caractéristiques de forme. À ce jour, plusieurs classements basés sur les seuls critères esthétiques coexistent et ne sont pas rigoureusement équivalents (tableau 6).

Tableau 6 – Classement des types de parements en béton

CIB (Conseil international du bâtiment)	DTU 21	Fascicule 65 A du CCTG [5] [6]	Norme P 18-503
Grossiers	Élémentaires		0
Ordinaires	Ordinaires		1
Soignés	Courants	Soignés simples	2
Soignés	Soignés	Soignés fins	3
Spéciaux		Soignés ouvragés	4

■ Du point de vue **durabilité**, le rôle essentiel des parements est la protection contre la corrosion des armatures métalliques placées dans le béton. Il serait donc utile de développer un classement basé sur les caractéristiques de texture et plus spécialement sur celles de perméabilité aux agents agressifs. En l'état actuel, le manque d'expérience ne permet pas de disposer d'une classification fiable, mais *a priori* il semble nécessaire de rechercher les compacités les plus élevées possibles dans le béton, et notamment dans les zones d'enrobage des armatures de peau. La norme P 18-305 préconise à cet effet de prendre en compte l'environnement de l'ouvrage et fixe la valeur minimale correspondante du dosage en ciment d'une part, et la valeur maximale du rapport eau efficace/liant à ne pas dépasser d'autre part.

2.2 Spécifications

Des spécifications particulières sont attachées à chaque classe de parements en béton : spécifications de teinte, de texture et de forme pour les aspects esthétiques, et spécifications de composition de béton pour les aspects de durabilité. Bien entendu, chaque type de classement comporte ses spécifications particulières.

2.2.1 Classement selon le DTU 21

Le cahier des clauses techniques du DTU 21 définit des classes de parements plutôt adaptées aux emplois en bâtiment (tableau 7). Ainsi, le parement élémentaire est réservé aux parois de locaux utilitaires pour lesquelles une finition soignée n'est pas nécessaire, ou aux parois destinées, soit à recevoir une finition rapportée et non directement appliquée sur le support, soit à être masquées par une cloison de doublage indépendante de ces parois.

Tableau 7 – Spécifications des parements. Parois latérales et sous-faces (DTU 21)			
Parement	Planéité d'ensemble	Planéité locale	Spécification de peau
Élémentaire	Pas de spécification particulière	Pas de spécification particulière	Pas de spécification particulière
Ordinaire	Flèche < 15 mm	Flèche < 6 mm	Uniforme et homogène Nids de cailloux ragrés Zones sableuses ragrées
Courant	Flèche < 7 mm	Flèche < 2 mm	Balèbres meulées Aire individuelle des bulles < 3 cm ² Profondeur des bulles < 5 mm Étendue maximale des nuages de bulles 25 % Arêtes rectifiées et dressées
Soigné	Flèche < 5 mm	Flèche < 2 mm	Identique au parement courant, avec étendue des nuages de bulle ramenée à 10 %

Le parement ordinaire peut convenir pour les emplois précédents lorsque la paroi est destinée à recevoir un enduit de parement traditionnel épais.

Le parement courant correspond à des parois susceptibles de recevoir des finitions classiques de papiers peints ou peintures, moyennant un rebouchage préalable et l'application d'un enduit garnissant.

Enfin, le parement soigné convient aux mêmes usages que le parement courant, mais sa meilleure finition permet de limiter les travaux ultérieurs de revêtement éventuel et n'exige qu'une moindre réparation. Le parement extérieur exposé à la pluie doit, lorsqu'il est destiné à rester brut ou à être revêtu par une peinture, être un parement soigné.

La planéité d'ensemble est déterminée par la mesure de la flèche maximale avec la règle de 2 m, alors que la planéité locale l'est avec la règle de 20 cm.

Le DTU 21 spécifie, en outre, des caractéristiques particulières pour les parements de dalles, dallages et planchers (tableau 8).

Tableau 8 – Spécifications des parements de dalles, dallages et planchers (DTU 21)			
Surface	Planéité d'ensemble	Planéité locale	Spécification de peau
Béton brut	Pas de spécification particulière	Pas de spécification particulière	Pas de spécification particulière
Béton surfacé : — parement courant — parement soigné	Flèche < 10 mm Flèche < 7 mm	Flèche < 3 mm Flèche < 2 mm	Aspect régulier Aspect fin et régulier
Béton à chape incorporée	Flèche < 7 mm	Flèche < 2 mm	Aspect fin et régulier
Chape rapportée	Flèche < 5 mm	Flèche < 2 mm	Aspect lisse, fin et régulier
Dalles préfabriquées : — parement courant — parement soigné	Flèche < 7 mm Flèche < 5 mm	Flèche < 2 mm Flèche < 1 mm	Aspect fin et régulier Désaffleurl aux joints < 3 mm

2.2.2 Classement selon le fascicule 65 A du CCTG

Le fascicule 65 A du CCTG [5] et son additif [6], relatifs à l'exécution des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint par post-tension, stipulent que les surfaces coffrées sont réparties en deux catégories :

- les surfaces qui ne sont soumises qu'à des exigences de précision dimensionnelle ;
- les surfaces soumises à des exigences d'aspect, et pour lesquelles seuls les parements soignés sont autorisés.

Ces parements soignés se subdivisent en trois classes :

- parements simples, qui sont laissés bruts de décoffrage avec une exigence de régularité générale d'aspect ;
- parements fins, qui font en sus l'objet d'exigences particulières concernant la texture, la teinte et les formes ;
- parements ouvragés, préfabriqués ou coulés en place qui doivent satisfaire à des exigences précisées d'ordre décoratif.

Les spécifications respectives de ces trois classes de parements sont données dans le tableau 9.

Tableau 9 – Spécifications des parements définis dans le fascicule 65 A du CCTG			
Parement soigné	Planéité d'ensemble	Planéité locale	Spécification de peau
Simple	Flèche < 8 mm	Flèche < 3 mm	Teinte uniforme Ni taches ni marbrures Texture homogène Pas de ségrégation Pas de nids de cailloux
Fin	Flèche < 5 mm	Flèche < 2 mm	Teinte uniforme et définie (nuancier) Ni taches, ni marbrures Texture homogène et définie (échelle) Pas de ségrégation Pas de nids de cailloux
Ouvragé			Spécifications particulières définies par le marché

2.2.3 Classement selon la norme P 18-503

Cette norme s'appuie sur l'essentiel des stipulations du Cahier n° 24 du CIB [9] et prend en compte trois critères de classement : planéités, texture (bullage de surface) et teinte.

■ Du point de vue **planéité**, le classement est établi, comme pour les autres types de classement, à partir des planéités d'ensemble et locales (tableau 10).

Tableau 10 – Spécifications de planéités selon la norme P 18-503		
Niveau	Planéité d'ensemble	Planéité locale
P0	Critère non considéré	
P1	Flèche < 15 mm	Flèche < 6 mm
P2	Flèche < 8 mm	Flèche < 3 mm
P3	Flèche < 5 mm	Flèche < 2 mm
P4	À préciser au marché	

■ Du point de vue **texture**, seul le bullage de surface est pris en compte en faisant référence à une échelle de bullage annexée au fascicule P 18-503 et comprenant 7 degrés de taille de bulles (figure 4). Cette échelle est identique à celle retenue dans le cahier n° 24 du CIB. La prise en compte du bullage de surface est réalisée sous les deux aspects (tableau 11) :

- niveau du bullage moyen réparti sur l'ensemble de la surface ;
- pourcentage relatif des surfaces des nuages de bulles concentrées à la surface du parement.

Tableau 11 – Spécifications de texture selon la norme P 18-503

Niveau de parement	Bullage moyen : niveau	Bullage moyen : taux maximal	Bullage concentré : taux maximal
E0	Critère non considéré		
E1	7	< 10 %	< 25 %
E2	5	< 3 %	< 10 %
E3	3	< 2 %	< 5 %
E4	À préciser au marché		

■ La **teinte** est appréciée par référence à un nuancier de gris pur annexé au fascicule P 18-503 (figure 5). Chaque niveau de qualité est caractérisé par deux valeurs spécifiant, dans l'ordre, les écarts admis sur l'échelle de gris respectivement entre deux zones adjacentes de teintes différentes et entre deux zones éloignées de teintes extrêmes (tableau 12).

Tableau 12 – Spécifications de teintes selon la norme P 18-503

Niveau de parement	Écart de proximité	Écart maximal
T0	Critère non considéré	
T1	< 3	< 4
T2	< 2	< 3
T3	< 1	< 2
T4	À préciser au marché	

2.3 Principaux défauts d'aspect

Un défaut d'aspect est une anomalie visuelle précise dont la gravité doit être déterminée en définissant, au préalable, les critères d'appréciation tant qualitatifs que quantitatifs. La recherche des causes systématiques ou accidentelles doit conduire à la prévention ultérieure du défaut. La définition de la qualité d'aspect d'un parement en béton est un problème délicat. La fonction principale d'un parement est essentiellement esthétique et l'aptitude à cette fonction ne repose donc en première approche que sur des critères d'appréciation visuelle [7]. Il y a cependant lieu de considérer que certains défauts (tâches et souillures) peuvent être provoqués ou accentués par des défauts de porosité de surface ou de rugosité.

La plupart des défauts d'aspect de parements ont souvent été classés en distinguant les variations de couleur et les irrégularités de surface d'une part, et en prenant en compte l'instant de leur formation d'autre part. Il apparaît souvent plus intéressant de regrouper ces défauts suivant leurs conséquences sur l'aspect des parements

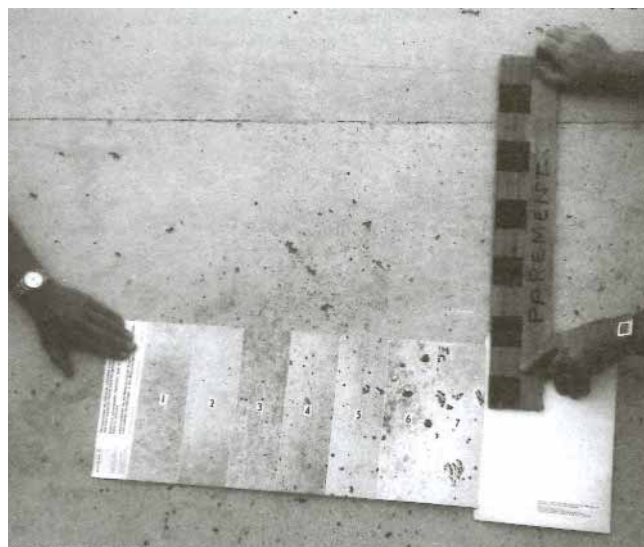


Figure 4 – Échelle de bullage (CIB)

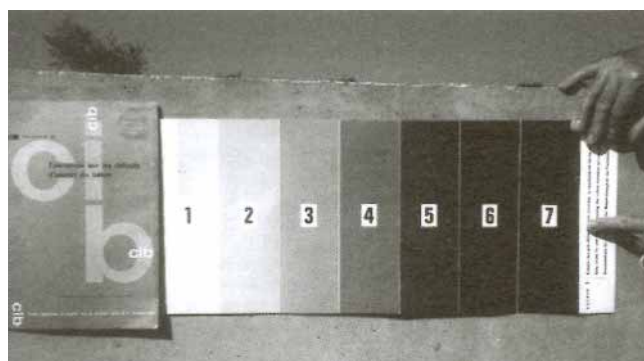


Figure 5 – Échelle de gris (CIB)

au moment de la construction [8]. De nouveaux types de défauts peuvent également apparaître avec le temps : c'est le cas notamment du développement des efflorescences, des fissures, des manifestations de réaction liant-granulat, des souillures de toute nature, ou d'apparition de mousses.

À cet effet, trois grandes familles de défauts se dégagent : les défauts de forme, de texture et de teinte (tableau 13).

Tableau 13 – Principaux défauts d'aspect

Forme	Texture	Teinte
Désaffleurl	Bullage	Pommelage
Écornure	Ressuage	Taches noires
Épaufrure	Fuite de laitance	Variations de teinte
Planéité	Nids de cailloux	Efflorescence
Rectitude	Écaillage	Rouille
Fissures	Faiçage	Marbrures
Inclusion	Poudrage	Souillures
Protubérance	Peau de crapaud	Graffitis
Tassure	Porosité	

2.3.1 Défauts de forme

Tous les documents existants s'accordent pour apprécier les défauts de forme suivant la méthode du rapport n° 24 du CIB [9]. Si cette méthode est parfaitement adaptée aux défauts de planéité (mesure à la règle), elle peut s'étendre aux défauts de désaffleurement, d'épaufrures, d'écornures ou de rectitude des arêtes. Mais elle devient particulièrement délicate, voire impossible, pour les parements ouvragés ou courbes : d'autres déterminations géométriques doivent alors lui être associées.

Les principaux défauts de forme sont les suivants.

■ Le **désaffleurement** se manifeste sur un parement par un défaut d'alignement des surfaces élémentaires successives. Il est particulièrement préjudiciable du point de vue esthétique par les zones d'ombres régulières qu'il génère. Un désaffleurement important en dénivellation (supérieur à 1 cm) peut remettre en cause le bon enrobage des armatures.

■ L'**écornure** est un éclatement du béton dans un coin de partie moulée. Elle résulte généralement d'un accident mécanique pouvant intervenir au démoulage, ou par choc pour les pièces coulées en place, et au démoulage, à la manutention ou au stockage pour les pièces préfabriquées.

■ L'**épaufrure** est un éclatement du béton le long d'une arête. Cet éclatement intervient le plus souvent lors du démoulage et provient soit d'une erreur de conception de moule, soit d'une résistance insuffisante du béton au démoulage.

■ Les **défauts de planéités** d'ensemble ou locaux résultent la plupart du temps d'un mauvais calage ou d'une déformation des parois coffrantes.

■ La **mauvaise rectitude des arêtes** est pénalisante du point de vue esthétique. Le mauvais positionnement et le manque de calage des coffrages en sont les deux causes principales.

■ Les **fissures** sont généralement bien plus dommageables pour la durabilité des structures (corrosion des armatures) que pour l'aspect esthétique : pour cette raison les causes de toute apparition de fissures doivent être recherchées et il est souvent recommandé d'effectuer un suivi de leur évolution. Différents types de fissures doivent être distingués :

— les tasses horizontales qui se produisent avant prise du béton ;

— les fissures de premier retrait, provenant de l'absence de cure au moment de la prise sur les surfaces non coffrées ou du décoffrage pour les parois coffrées ;

— les fissures de second retrait et de retrait à long terme pouvant avoir des causes très variées telles que l'hétérogénéité du béton, l'évaporation de l'eau libre, les insuffisances des armatures, les manques de vibration, les distances entre joints mal calculées... ;

— et ultérieurement les fissures dues aux gonflements provenant de réaction sulfatique ou alcali-granat.

■ Les **inclusions** sont dues à la présence d'éléments étrangers apportés sur la peau coffrante avant bétonnage (traces de boue, déchets de rouille...) ou par le béton et poussés vers le coffrage sous l'influence de la vibration. Elles nécessitent des reprises souvent délicates.

■ Les **protubérances** proviennent essentiellement des anomalies locales des peaux coffrantes (trous non bouchés, traces de meulages, arrachements localisés). Les protubérances peuvent être accompagnées par d'autres défauts tels que fuite de laitance, chute de compacité...

2.3.2 Défauts de texture

Les défauts de texture peuvent aussi bien provenir du matériau lui-même ou de ses conditions de mise en place, sans oublier bien entendu l'influence du coffrage. Les défauts les plus fréquents sont les suivants.

■ Le **bullage de surface ou soufflure** est caractérisé par la présence de cavités isolées, de taille variable et sensiblement hémisphériques. Si esthétiquement, les bulles de surface sont gênantes, elles peuvent également provoquer des hétérogénéités de perméabilité et ainsi engendrer des risques de corrosion des armatures lorsque leur taille croît. Leur présence est particulièrement néfaste lorsque le parement doit être peint.

■ Le **ressuage** résulte d'un délavage de surface pendant la vibration : il se manifeste par la présence de zones verticales irrégulièrement érodées ou par des petites rigoles verticales où le sable apparaît délavé. Ces traces sont provoquées par les remontées d'eau le long des peaux coffrantes.

■ Les **fuites de laitance** se manifestent au droit des joints de coffrages par des zones sombres, ou par des nids de graviers ou des coulures de laitance à la base des pièces moulées. Elles sont particulièrement néfastes pour la durabilité du béton et les risques de corrosion des armatures sont accentués dans le cas d'enrobage faible. L'aspect esthétique n'est pas acceptable pour des parements soignés.

■ Les **nids de cailloux** sont caractérisés par l'absence de mortier et d'éléments fins. La plupart du temps, ils se situent aux séparations de gâchées successives ou en pied de mur. Ils doivent être considérés comme des défauts graves vis-à-vis de la durabilité du fait qu'ils ne sont pas que superficiels ; la démolition de la partie d'ouvrage demeure la meilleure solution si les surfaces affectées sont importantes.

■ L'**écaillage** résulte d'une adhérence superficielle du béton à la surface coffrante entraînant des arrachements partiels de la peau du béton au décoffrage ; l'emploi ou le changement d'un démoulant peut remédier à la formation de ce défaut.

■ Le **faïençage** se manifeste par une micro-fissuration de surface provoquée par une dessiccation due elle-même à un manque de cure.

■ Le **poudrage** de la surface du béton est provoqué par une hydratation incomplète de la peau, provenant elle-même d'une dessiccation rapide après un durcissement insuffisant ou l'inhibition de l'hydratation par un démoulant inadapté ou excessif. L'emploi de ciments contenant des fillers, des cendres volantes ou des éléments fins inertes peut accentuer le poudrage du béton, notamment en cas de décoffrage trop précoce [10].

■ La « **peau de crapaud** » est un défaut assez rare, assimilable à un écaillage très prononcé en surface et en profondeur. Ce défaut est bien sûr inacceptable du point de vue esthétique en parement soigné. Il peut apparaître avec des surfaces coffrantes incomplètement nettoyées entre chaque bétonnage et principalement en période hivernale où la prise peut être naturellement retardée. L'emploi d'un démoulant trop maigre peut également engendrer ce type de défaut.

■ La **porosité de surface** (ou perméabilité de surface) a une influence sur la durabilité du béton et la corrosion des armatures : elle est généralement décelable par la faculté qu'a le parement à prendre une teinte sombre lorsqu'il est humidifié. Le degré de perméabilité peut être apprécié par des mesures de circulation d'air dans les premiers centimètres de peau du béton.

Trois méthodes différentes et très souvent complémentaires permettent actuellement d'apprécier les défauts de texture :

— l'utilisation d'une échelle de référence de bullage (échelle du CIB, figure 4), sera possible dans le cas de trous ou aspérités sur les parements ; elle permet donc d'apprécier les soufflures (ou bullage de surface), les tasses d'ouverture inférieure à 5 mm, et les petits nids de cailloux de quelques cm² de surface ;

— la mesure de rugosité s'appliquera plus spécialement sur les faïençages, ressusage, écaillage, « peau de crapaud » ;

— la mesure de perméabilité de surface, peut se révéler efficace dans le cas de soufflures, de défauts très limités (petits nids de cailloux), défauts de porosité, ressusage, écaillage, poudrage, « peau de crapaud » et pommelage.

2.3.3 Défauts de teintes

La teinte d'un parement ou plus exactement les écarts de teinte par rapport à la teinte moyenne doivent être appréciés par référence à une échelle de gris : l'échelle la plus répandue est proposée par le rapport n° 24 du CIB [9], et reprise par la RILEM (Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux) et le fascicule P 18-503 (figure 5). Cette échelle de gris présente malgré tout l'inconvénient de ne comporter que 5 niveaux réels de gris purs, puisqu'à chaque extrémité de l'échelle se trouvent quasiment les teintes noir et blanc. De plus, dans la réalité, les teintes de parements en béton s'avèrent être des gris nuancés. Pour ces raisons, l'emploi de nuanciers plus complets et donc plus discriminants est préférable.

■ Les principaux défauts de teinte formés dès la mise en œuvre sont les suivants.

- Le **pommelage** est un phénomène de transparence des gros granulats à la surface des bétons ; il résulte essentiellement d'un phénomène de ségrégation du béton au cours de la vibration. Seule l'esthétique peut être considérée affectée par ce défaut qui peut être accentué par la formation de taches noires.

- Les **taches noires** qui apparaissent à la surface du béton sont constituées par des zones très sombres et brillantes, paraissant quasi émaillées. La pâte de ciment semble alors très compacte et sans aucun pore. Ces taches proviennent des survibrations généralisées ou locales.

- Les **variations de teinte** sur des zones de grande surface peuvent être constatées sur des parois verticales de forte hauteur (le phénomène devient notable à partir d'une hauteur à bétonner voisine de 4 m ou sur des poutres préfabriquées de grande longueur bétonnées à l'avancement dans des moules vibrés par l'extérieur). La cause principale est la post-vibration de la partie inférieure lors de la vibration des parties supérieures. Un autre cas de variation de teinte peut apparaître si les conditions de réemplois des coffrages sont mal maîtrisées.

- Les **efflorescences** se traduisent par des dépôts irréguliers de teinte claire et blanchâtre à la surface des bétons. Elles sont constituées par du carbonate de calcium (calcite) et ne se produisent qu'en présence d'eau. Les efflorescences dites primaires apparaissent sur les bétons frais soumis à une forte évaporation. Les efflorescences secondaires se produisent plus tard et sont dues à l'imbibition de la surface par l'eau de condensation atmosphérique ou par la pluie. Une forte porosité est un facteur aggravant pour la formation des efflorescences.

- Les **traces de rouille** sont des taches d'hydroxyde ferrique provenant de la corrosion des armatures avant ou après bétonnage, des ligatures d'armatures mises accidentellement en contact avec la peau coffrante ou plus rarement des granulats contenant des sulfures de fer qui s'oxydent à l'air.

Dans la plupart des cas, elles sont dues à une mauvaise maîtrise dans l'entretien des coffrages et dans la protection des armatures avant bétonnage. Lors de l'emploi de coffrages en bois, les risques d'oxydation des pointes en acier doivent être également pris en compte.

- Les **marbrures** qui se manifestent par des hétérogénéités de teintes en veines ou paquets proviennent essentiellement des ségrégations qui se produisent au transport, au coulage, ou à la vibration. Les projections de bétons (directes ou par éclaboussures) sur le coffrage engendrent également des taches assimilables aux marbrures.

■ D'autres défauts de teinte peuvent être transmis par les défauts de la peau coffrante ou être appliqués sur le parement après décoffrage. Ce sont les suivants.

- Les **souillures** de toutes espèces peuvent rendre un parement inapte à l'emploi. Les plus fréquentes sont des souillures d'huile ou de terre. Les zones affectées par ces défauts sont délicates à réparer

du fait que les souillures peuvent affecter le béton sur plusieurs millimètres de profondeur.

- Les **graffitis** sont des inscriptions ou dégradations superficielles apportées sur les parements. La difficulté de remise en état est évidemment liée à la nature et au pouvoir pénétrant du produit de marquage des graffitis ; le développement de nouveaux produits anti-graffitis qui limitent la pénétration du produit de marquage apporte une nette amélioration pour la remise en état des parements affectés.

2.4 Facteurs d'influence

Les causes les plus fréquentes d'apparition des défauts d'aspect sont de trois ordres :

- les choix ou les dosages mal étudiés des constituants du béton ;
- les coffrages (mauvais choix sur les matériaux, l'étanchéité, les calages, la préparation de peau, le démoulant) ;
- la vibration des bétons (mauvaise adaptation de la fréquence, de la durée et de l'application).

Les autres facteurs tels que les procédés et la vitesse de bétonnage, les conditions climatiques, la cure des bétons non coffrés ou décoffrés, ne sont pas pour autant à négliger, mais apparaissent moins souvent comme causes de défauts graves.

2.4.1 Rôle du béton

Certaines qualités de béton peuvent intrinsèquement engendrer des défauts d'aspect des parements en béton. De par leur nature ou teneur, les constituants du béton peuvent directement provoquer l'apparition des défauts ou simplement favoriser leur développement sous l'effet d'autres causes. À cet effet, une synergie de différentes causes est fréquemment constatée au cours de la construction d'ouvrages en béton.

Suivant les nécessités du chantier, les facteurs provoquant les défauts doivent être distingués de ceux les favorisant (tableau 14), et l'influence des éléments les moins défavorables peut alors ne plus être prise en compte.

Certaines caractéristiques rhéologiques ou physiques du béton frais peuvent également générer divers défauts d'aspect (tableau 15), mais, en général, ces anomalies rhéologiques peuvent être corrigées en modifiant la nature ou la teneur des constituants et, au besoin, les méthodes de fabrication.

2.4.2 Rôle des coffrages

L'expérience démontre que l'obtention de parements corrects ne peut pas être assurée sans la prise en compte de critères précis dans le choix de la peau coffrante (tableau 16) et la mise en œuvre des coffrages (tableau 17).

Les vérifications systématiques des postes d'entretien et de préparation de la peau coffrante d'une part, et du serrage et du calage des structures coffrantes d'autre part, apportent une meilleure garantie de résultats tant au point de vue de l'esthétique des parements que la durabilité des structures en béton armé.

2.4.3 Rôle des conditions de bétonnage

Les conditions de bétonnage ont également un rôle non négligeable sur l'aspect des parements. Dans ces conditions de bétonnage, les actions propres à l'entreprise doivent être distinguées des actions extérieures telles que les conditions climatiques (tableau 18).

Tableau 14 – Influence des constituants du béton sur l'aspect des parements

Facteur	Anomalie	Favorisant	Provoquant
Ciment	Changement de provenance	Fissures	Variations de teinte
	Variations de dosage	Fissures	Variations de teinte
	Dosages faibles	Efflorescences et soufflures	
	Variations de densités des grains	Taches noires	
	Granularité grossière (grains > 80 µm)	Taches noires	
Plastifiant	Variations de dosage	Fissures	
Sable	Homométrie marquée	Variations de teinte Pommelages	
	Variations de propreté		Variations de teinte
	Changement de provenance		Variations de teinte
	Mélange de sables	Taches noires	Variations de teinte
	Dosages variables		Variations de teinte
	Sous-dosage	Pommelages	Ressuage
	Manque de fines (< 300 µm)	Taches noires Nids de cailloux	Ressuage Soufflures
Gravillons	Écart de masse volumique entre mortier et gravillons	Pommelages	
	Forte porosité	Pommelages	
	Trop anguleux	Pommelages	
	Surdosage	Pommelages Ressuage	
	Présence de sulfure de fer		Traces de rouille à moyen terme
Air	Faible mouillabilité	Soufflures	
	Excès d'air occlus		Soufflures
Eau	Variation de teneurs	Taches noires	Variations de teinte et marbrures
	Manque d'eau en peau par évaporation		Fissures
	Impuretés		Variations de teinte
	E/C trop élevé	Efflorescences	Ressuage
	Excès résiduel	Efflorescences Fuites de laitance	Ressuage
Granulo-métrie	Trop continue	Soufflures	

Tableau 15 – Influence des caractéristiques rhéologiques et physiques du béton sur l'aspect des parements

Facteur	Anomalie	Favorisant	Provoquant
Porosité	Tailles trop importantes		Efflorescences
Ouvrabilité	Mauvaise ouvrabilité	Variation de teintes Soufflures	Nids de cailloux
Fluidité	Trop forte	Fuite de laitance Pommelages Soufflures	
Compacité	Fort manque de compacité (cas du béton armé)		Traces de rouille
Prise retardée	Excès de retard de prise	Ressuage	
Homogénéité	Malaxage mal contrôlé		Variations de teinte

Tableau 16 – Influence des choix de peaux coffrantes sur l'aspect des parements

Anomalie	Favorisant	Provoquant
Imperméable	Soufflures	
Trop lisse	Soufflures	
Non ou peu mouillable	Soufflures	
Non absorbante	Soufflures	
En bois trop sec	Soufflures Ressuage	
Bois avec inclusion métallique		Rouille
Variations locales d'absorption		Variations de teinte
Trop dure	Taches noires	
Trop flexible	Pommelages Fuite de laitance	

2.4.4 Rôle de la vibration

Aussi bien l'excès que le manque de vibration peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'aspect final des parements en béton. L'absence d'un plan de vibration conduit inévitablement à la coexistence de zones survibrées et de zones sous-vibrées. L'hétérogénéité des caractéristiques du béton en place se manifeste alors sous l'angle esthétique et sous l'angle durabilité. La forme de la partie d'ouvrage constitue le second paramètre à prendre en compte ; à cet effet, une attention particulière sera apportée à la hauteur des pièces et à l'accessibilité des pervibrateurs internes (tableau 19).

Tableau 17 – Influence de la mise en œuvre des coffrages sur l’aspect des parements

Facteur	Anomalie	Favorisant	Provoquant
Préparation	Manque de rigidité	Ressuage	
	Mauvais calage		Fuite de laitance
	Fuites d’étanchéité		Fuite de laitance Nids de cailloux
	Résonance	Pommelages	
	Raidisseurs mal placés	Taches noires	
	Désactivant mal appliqué		Désactivation hétérogène
	Excès d’huile	Souillures	Nids de cailloux en partie inférieure
	Mauvais choix ou mauvaise application de démoulant	Adhérences	Poudrage Souillures
	Cales d’écartement des coffrages en acier non gainé		Taches de rouille après décoffrage
Entretien	Absence de nettoyage après décoffrage		Poudrage Variations de teinte Souillures
	Manque de nettoyage des peaux métalliques	Poudrage	Taches de rouille
	Peau perforée		Fuite de laitance
	Réemplois anarchiques		Variations de teinte

Tableau 18 – Influence des conditions de bétonnage sur l’aspect des parements

Facteur	Anomalie	Favorisant	Provoquant
Coulage	Vitesse de coulage trop lente	Bullage	
	Quantité de béton trop importante (en bétonnage vertical)	Variations de teinte Taches noires	Pommelages
	Béton déversé contre la peau coffrante	Soufflures Nids de cailloux	Risques d’adhérence du béton au coffrage
	Chute trop forte du béton dans le coffrage	Nids de cailloux	Ségrégation
	Éclaboussures du béton sur la peau coffrante		Marbrures
Talochage	Absence de double talochage des surfaces horizontales	Fissure de tassement au-dessus des armatures	
Durée de coffrage	Durée variable		Variations de teinte
	Longue durée	Risque d’adhérences	
Méthode de décoffrage	Coffrage insuffisamment éloigné du béton après ouverture	Formation de taches et coulures à la surface du béton	
	Absence de cure après décoffrage		Fissuration
Basses températures	Retard de prise	Ressuage	Forte perméabilité
Fortes températures	Manque de protection du béton frais coulé et serré		Défaut de compacité en surface
	Retrait thermique non pris en compte Fort gradient thermique	Fissuration	
Vent	Manque de protection contre la dessiccation		Fissuration

Tableau 19 – Influence des conditions de vibration sur l’aspect des parements			
Facteur	Anomalie	Favorisant	Provoquant
Manque de vibration	Nombre insuffisant de vibrateurs Vibrateurs inefficaces Durée de vibration trop faible	Nids de cailloux Bullage Efflorescences	Manque de compacité
Vibration inorganisée	Excès locaux de vibration	Pommelage	Taches noires Variations de teinte Marbrures
Survibration	Durée de vibration trop longue Résonance des coffrages Résonance des armatures		Pommelage Taches noires
	Tringlage excessif		Fuite de laitance
Post-vibration	Vibration de parties d’ouvrages trop hautes (hauteur > 4 m)		Variations de teinte Pommelage Taches noires

3. Coffrage du béton

Au moment de sa mise en œuvre, le béton se présente sous une forme plus ou moins fluide ; cette fluidité lui permet d’être coulé dans un moule et, sous l’effet de la vibration ou de son propre poids s’il est suffisamment fluide, il prend la forme du moule qui le contient. Avec le temps, ce béton durcit et devient suffisamment autostable pour être libéré du coffrage qui constituait son moule. Il va de soi que les caractéristiques du béton durci vont dépendre très étroitement de la qualité de l’ensemble des éléments constitutifs de ce coffrage, de son entretien et de sa préparation ; dans tous les cas, le coffrage fait l’objet d’une étude spécifique dans laquelle les coffrages pour les travaux publics ou le génie civil sont distingués de ceux pour la construction de bâtiments, du fait qu’ils ne reprennent pas les mêmes niveaux de charges [11].

3.1 Fonctions générales

Outre sa fonction première de moulage, le coffrage peut remplir un grand nombre de fonctions ; ses quatre fonctions principales peuvent être définies comme suit :

- moulage de la forme ;
- moulage de la texture de surface ;
- maintien de la stabilité jusqu’au durcissement ;
- protection contre la dessiccation pendant la prise et le durcissement.

Accessoirement, les coffrages peuvent, suivant les circonstances ou les nécessités de chantier, jouer d’autres rôles :

- protection contre les intempéries (pluie, neige) ;
- protection contre les chocs mécaniques ;
- limitation des échanges thermiques avec l’environnement ;
- élément vecteur de vibration dans le cas de vibration externe ;
- possibilité d’intégrer une plate-forme de travail.

3.1.1 Moulage

Le coffrage donne sa forme au béton, il est donc primordial que sa structure ne subisse aucune déformation tant pendant l’emploi que pendant les opérations de transport, de nettoyage, de préparation et de stockage.

Les causes de déformation de coffrages sont multiples, mais certaines sont plus fréquentes :

- certains matériaux utilisés comme peau coffrante présentent des gonflements notables sous l’effet de l’humidité ; si la rigidité du support contrarie ces gonflements, des flambements locaux peuvent se former ;
- les chocs sur la peau coffrante peuvent entraîner des déformations, des blessures ou des trous ; si ces défauts ne sont pas réparés, il est clair que la paroi moulée de béton présentera des défauts de planéité ou des protubérances ;
- le voilement des coffrages métalliques provenant d’une mauvaise fabrication ou de stockages défectueux engendre des défauts répétitifs de forme ;
- les déformations progressives des tôles coffrantes entre raidisseurs, du fait de la minceur de ces tôles, provoquent des défauts de même type qui s’aggravent au fur et à mesure des bétonnages.

3.1.2 Soutien

Les coffrages et étais doivent être suffisamment rigides pour supporter sans tassement ni déformation excessive les charges permanentes ou de service auxquelles ils sont exposés pendant la construction ; pour dimensionner les coffrages, le projeteur devra prendre en compte, avec une marge de sécurité, les éléments suivants :

- la poussée du béton frais ;
- le poids du béton mis en œuvre ;
- les charges de service (personnel et matériel de mise en œuvre) ;
- les contraintes dues à l’environnement climatique ;
- les informations techniques du fabricant sur le comportement des matériaux de coffrages et des composants ;
- le nombre de réemplois prévisibles.

3.1.3 Étanchéité

L'étanchéité en fond de coffrage, entre panneaux jointifs de la peau coffrante et entre éléments coffrants adjacents, doit être traitée de façon telle qu'aucune fuite de laitance ne soit possible après fermeture du coffrage. La déformabilité des éléments coffrants sous la poussée du béton frais et sous les conséquences de la vibration doit être prise en compte.

3.1.4 Cure

Le coffrage constitue la meilleure protection de la surface du béton coffré, mais dès l'ouverture des coffrages cette protection disparaît : ceci peut conduire, pour les parties d'ouvrage dont l'esthétique des parements n'est pas primordiale, à laisser les coffrages fermés quelques jours supplémentaires. Il convient, à l'ouverture des coffrages ou dans le cas de décoffrage immédiat, d'adopter des dispositions pour limiter la dessiccation de surface.

3.2 Rôle des intervenants

Différentes personnes interviennent au niveau des coffrages pendant le déroulement de la construction :

- le maître d'ouvrage précise ses exigences essentielles pour l'ouvrage (généralement résistance mécanique, stabilité, sécurité en cas d'incendie, environnement, sécurité d'utilisation, protection contre le bruit...);

- le maître d'œuvre traduit ces exigences en spécifications de résultats et peut, le cas échéant, ajouter des prescriptions de moyens ;

- l'entrepreneur effectue le choix de ses sous-traitants, de ses moyens et de ses matériaux ;

- les sous-traitants de l'entrepreneur peuvent être nombreux et vont du projeteur de coffrages au fabricant de coffrages, au monteur de coffrages et au contrôleur de coffrages.

Chaque personne a bien entendu un rôle défini, mais parfois ce rôle peut être partagé entre deux personnes. Le concept du rôle est à distinguer de celui de la responsabilité qui implique la notion de contrat entre seulement deux parties : la responsabilité contractuelle ne s'applique qu'entre ces deux parties.

De plus, le maître d'œuvre a tendance à privilégier l'obligation de résultats par rapport à celles des moyens [5] : les coffrages ne constituant qu'un moyen pour obtenir les qualités requises de structure et d'esthétique de l'ouvrage d'une part, et n'étant la plupart du temps qu'un ouvrage provisoire d'autre part, le maître d'œuvre ne limitera souvent le champ de ses spécifications en matière de coffrage qu'à la satisfaction des exigences essentielles de stabilité, de sécurité d'utilisation et d'environnement.

Pendant l'exécution proprement dite des travaux, la responsabilité de l'entrepreneur est pleine et entière vis-à-vis du maître d'ouvrage, tant en cas de dommages causés aux tiers qu'en cas d'accident survenu sur l'ouvrage en construction. De son côté, l'entrepreneur aura des exigences particulières avec chaque sous-traitant : le projeteur, le fabricant, le monteur et le contrôleur (lorsque ce dernier relève du contrôle intérieur à l'entreprise qu'il soit interne ou externe à la chaîne de production). Les rôles de chaque intervenant peuvent être répartis comme indiqué dans le tableau 20.

Il est recommandé de prévoir une coordination de l'ensemble des opérations propres au chantier et à sa préparation : sur les chantiers de moyenne et grande importance, ce rôle est confié à l'entrepreneur qui nomme un chargé des ouvrages provisoires.

Tableau 20 – Rôle des intervenants dans une opération de coffrage

Opération	Intervenant concerné
Définition des spécifications traduisant les exigences d'aspect formulées par le maître d'ouvrage	Maître d'œuvre
Définition des charges de service intéressant les coffrages et étais	Entrepreneur
Choix des coffrages et étais	Entrepreneur
Programme de bétonnage	Entrepreneur
Fourniture des coffrages (matériel et équipements) avec certificats d'essais correspondants	Fabricant de coffrages
Note de calcul et plans pour les coffrages et étalements	Projeteur du coffrage
Préparation des appuis (fondations provisoires, etc.)	Entrepreneur
Vérification de la portance du sol (appuis)	Entrepreneur ou son contrôleur
Préparation de surface des coffrages avant bétonnage : nettoyage, démoulant...	Entrepreneur ou son monteur (si sous-traitance)
Mise en place des coffrages	Entrepreneur ou son monteur (si sous-traitance)
Vérification avant bétonnage	Entrepreneur ou son contrôleur Le maître d'œuvre peut effectuer une vérification dans le cadre de son contrôle extérieur
Pendant la mise en place du béton (transport, pompage, coulage, vibration, protection)	Entrepreneur ou son contrôleur Le maître d'œuvre peut effectuer une vérification dans le cadre de son contrôle extérieur
Épreuves d'information pour décoffrer	Entrepreneur ou son contrôleur
Décoffrage	Entrepreneur
Application des produits de cure et protection des parties bétonnées	Entrepreneur
Nettoyage des coffrages	Entrepreneur ou son monteur
Stockage des coffrages	Entrepreneur ou son monteur

3.3 Typologie des coffrages

Les coffrages peuvent être classés suivant leur mode d'utilisation ou les fonctions particulières qu'ils doivent remplir ; les principales familles comprennent donc les coffrages verticaux, horizontaux, spéciaux (galerie, vousoir, préfabrication) et les coffrages perdus [11].

3.3.1 Coffrages verticaux

Mis à part les coffrages tunnel qui permettent le bétonnage simultané d'une dalle et de voiles, les coffrages verticaux sont réservés aux seuls bétonnages d'appuis ou de murs. Parmi ceux-ci, on distingue les petits panneaux, les banches, les coffrages tunnel, les coffrages de poteaux, les coffrages circulaires, et les coffrages grimpants.

3.3.1.1 Petits panneaux

Les petits panneaux sont constitués par une peau coffrante (contreplaqué, ou composite) fixée sur une ossature métallique (acier ou aluminium) ; ils sont surtout utilisés pour la construction de soutènements de maisons individuelles, de longrines et de murs.

3.3.1.2 Banches

Les banches utilisées pour le coffrage des murs ou des voiles peuvent être constituées par (figure 6) :

- la peau coffrante ;
- les raidisseurs de cette peau ;
- les poutres de poussée empêchant la déformation des raidisseurs ;
- les étais de réglage de contre-flèche, les buttons (fonction de béquilles de stabilité) ;
- les étais de contreventement ;
- les étais contrepoids ;
- les échelles de sécurité ;
- les passerelles de travail dotées de leur équipement de sécurité ;
- les portiques et autres dispositifs de préhension.

Tous les types de peaux coffrantes sont adaptables sur les banches : contreplaqué, contreplaqué bakélinisé, métal, composite, matrices collées, apport possible de pièces décoratives.

3.3.1.3 Coffrage tunnel

Les coffrages tunnel sont des coffrages outils qui permettent le moulage simultané de voiles et de dalles. Les peaux coffrantes sont généralement métalliques. Il existe deux types de coffrages tunnel :

- le tunnel est réalisé à partir de deux demi-coquilles réunies au milieu de la dalle ;
- le tunnel est monocoque et le décoffrage est assuré par le fléchissement du plateau par l'intermédiaire de vérins.

3.3.1.4 Coffrage de poteaux

La conception des panneaux servant au coffrage des poteaux se rapproche de celle des banches. Plusieurs types peuvent se trouver sur le marché :

- les coffrages en aile de moulin (figure 7), permettant de réaliser des poteaux de section variable (forme carrée ou rectangulaire) ;
- les coffrages en deux demi-coquilles, employés lorsque la section du poteau est constante (forme carrée, rectangulaire ou circulaire) ;
- les coffrages pistons permettant la réalisation de poteaux rectangulaires où une seule dimension est variable ;
- les coffrages circulaires en carton avec toutes les variantes décoratives possibles.

3.3.1.5 Coffrage circulaire

Les coffrages circulaires sont utilisés pour la réalisation de pièces circulaires de grands rayons. La courbure peut être obtenue de deux façons :

- bridage d'une paroi de coffrage avec des tendeurs à vis ;
- fixation des éléments de coffrage sur des profilés cintrés et à haute inertie.

3.3.1.6 Coffrages grimpants

Il convient de regrouper dans cette catégorie tous les coffrages à progression verticale qui comprennent eux-mêmes :

- les coffrages grimpants proprement dits ;
- les coffrages autogrimpants ;
- les coffrages semi-glissants ;
- les coffrages glissants continus.

■ Coffrages grimpants proprement dits

Ces coffrages peuvent être constitués par un à trois étages d'éléments coffrants, avec un support doté de passerelles permettant le bétonnage, la dépose et la repose des éléments de fixation à la paroi. Chaque levée nécessite une désolidarisation d'un étage d'élément coffrant avec la paroi bétonnée, sa montée à la grue vers le nouveau niveau de bétonnage, sa fixation et son réglage. L'équipage est parfois muni d'une ou deux banches de reprise permettant à la dernière et aux deux précédentes parties bétonnées de conserver

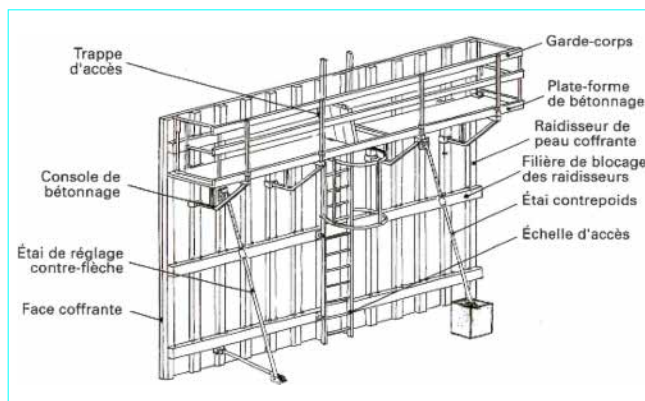


Figure 6 – Principaux éléments constitutifs d'une banche

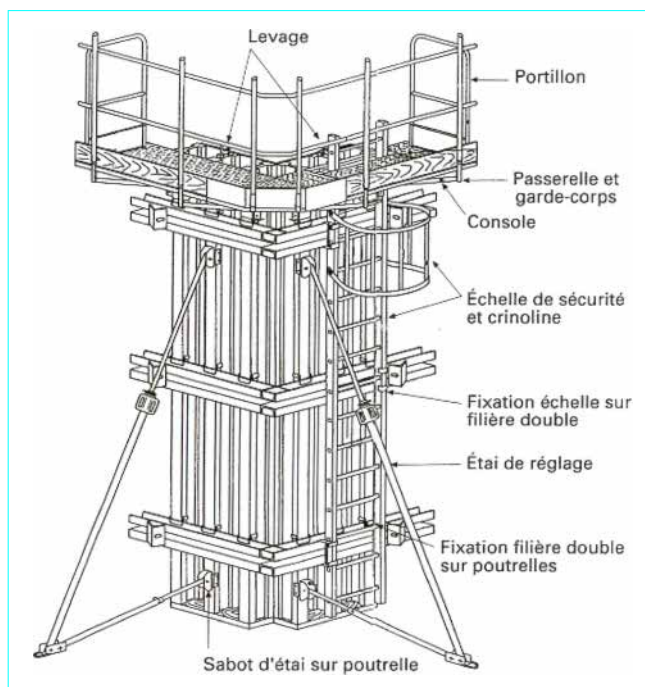


Figure 7 – Coffrage de poteau

leur coffrage. Dans certains cas, les coffrages peuvent être auto-grimpants pour réduire les manutentions : les faces restent alors soutenues par une potence fixée à la structure, même pendant les transferts.

■ Coffrages semi-glissants

Lors de leurs transferts, les coffrages semi-glissants ne sont pas séparés de la structure réalisée, mais glissent sur celle-ci jusqu'à leur mise en position pour le bétonnage du niveau supérieur. Ils nécessitent des moyens de supports importants (deux à trois étages).

■ Coffrages glissants continus

La technique des coffrages glissants continus constitue au départ une variante des coffrages glissants, avec le glissement vertical pour principale différence (figure 8).

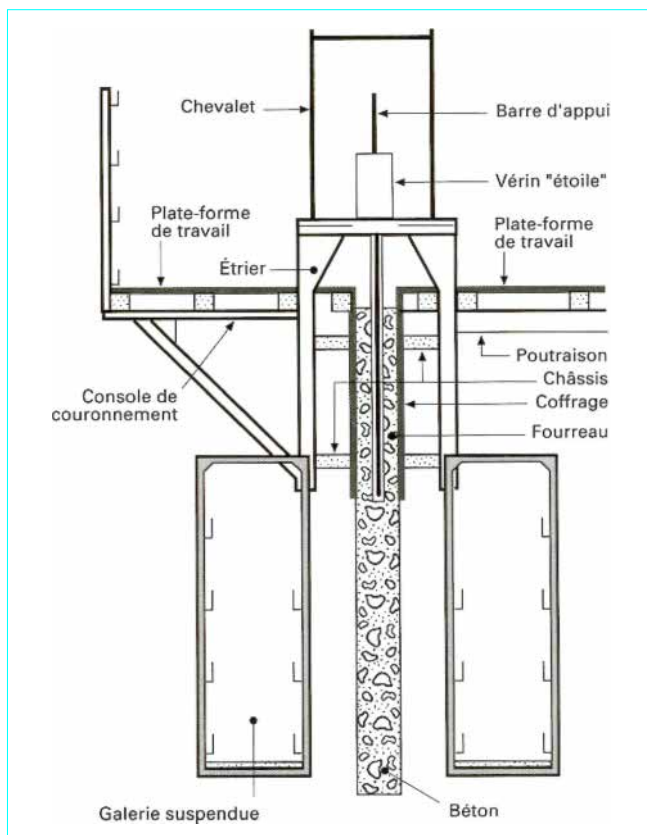


Figure 8 – Coffrage glissant vertical (Doc. PMI)

Le glissement s'effectue cependant à une vitesse lente n'excédant pas 6 m par jour, pour des raisons évidentes de reprise de charges par le béton jeune. La vitesse de glissement doit également prendre en compte les possibilités de talochage des bétons à leur sortie du coffrage. Il est recommandé de prendre en compte le degré de maturité du béton à sa sortie de coffrage pour définir cette vitesse de glissement.

Dans de nombreux cas, le démoulant n'est pas indispensable. La régularité des structures et de leurs parements est étroitement liée à celle de l'ascension et à la forme du moule : à cet effet, il y aura intérêt à préférer des vérins hydrauliques synchronisés aux vérins à vis manuels qui interdisent toute montée régulière et synchrone. Le recours à la technique des coffrages grimpants nécessite sur chantier une organisation générale sans faille, notamment au niveau de la mise en place et du calage des armatures, des réservations, du coulage et de la vibration des bétons (les parois d'épaisseurs inférieures à 15 cm sont à proscrire dans ce type de mise en œuvre).

De plus, il faut signaler que l'aspect des parements varie en fonction de l'instant du décoffrage, et seule l'application immédiate d'un produit de cure permet d'en atténuer les effets. L'animation du parement peut également constituer une solution atténuante, mais cette animation de forme ne peut se faire que par création de lignes d'ombre verticales.

3.3.2 Coffrages horizontaux

Les coffrages horizontaux servent au bétonnage des poutres, des planchers et dalles diverses (à nervures, alvéolaires et dalles pour ouvrages d'art). Par extension, les coffrages glissants sont principalement utilisés en technique routière (chaussée béton, séparateur en béton, caniveaux continus...).

3.3.2.1 Coffrage à poutre

Les coffrages à poutre sont constitués par un fond de moule en deux parties verticales (jouées de poutre). Pour le choix du type de coffrage, plusieurs possibilités peuvent être envisagées suivant le nombre de poutres à réaliser :

- si le nombre de poutres est faible, les coffrages seront réalisés en bois : peau coffrante en contreplaqué sur raidisseurs en bois ; si le nombre de poutres augmente, les coffrages pourront être métalliques ou mixtes ; dans ce cas, les moules peuvent être démontables (jouées amovibles) ou non démontables, mais avec un fruit des parties verticales pour faciliter le démoulage ;
- si les poutres sont de petites dimensions et sans dépouille, elles peuvent être préfabriquées dans un seul moule compartimenté appelé « batterie » ;
- les poutres précontraintes présentant des dépouilles doivent être coulées dans des moules spéciaux dotés de chevêtres à chaque extrémité pour effectuer la mise en précontrainte ;
- dans le cas où l'étalement n'est pas envisageable, on a recours à des coffrages de poutre autoportants réalisés en tôles soudées et résistant à la flexion.

3.3.2.2 Coffrage de dalle pleine

Trois types de coffrages de dalle pleine peuvent être utilisés suivant les cas [11] :

- les **coffrages sur étalement traditionnel**, pour les dalles de dimensions faibles à contours non simples ; la face coffrante (contreplaqué bakélisé ou non) est fixée sur des traverses, elles-mêmes fixées sur des poutrelles supportées par des étais à tête escamotable et par des trépiéds ;
- les **panneaux modulaires sur poutrelles** ; dans cette technique, les panneaux de dimensions faibles et identiques (cadres en acier ou aluminium ceinturant une plaque de contreplaqué bakélisé) sont glissés sur des poutrelles reposant elles-mêmes sur des étais munis de tête de décoffrage rapide. L'étanchéité d'un tel dispositif est assez médiocre ;
- les **tables** (échafaudage roulant et télescopique de surface variant entre 10 et 30 m²), constituées par une série de longerons fixés sur deux poutres à treillis.

3.3.2.3 Coffrage nervuré

Les planchers nervurés sont réalisés dans le cas de portée élevée ou de surcharges. Les outils coffrants sont généralement des bacs métalliques qui réalisent simultanément le coffrage des nervures et des hourdis et parfois celui des poutres principales. Dans certains cas, le coffrage sera collaborant à la structure et sera considéré comme coffrage perdu.

3.3.2.4 Coffrage alvéolaire

Ces coffrages sont constitués par des caissons dont les bords coffrent les nervures. Ces caissons peuvent être en acier, en bois ou en composite. Le démoulage est effectué à l'aide de pinces spéciales, si les caissons sont indépendants, ou par injection d'air comprimé, s'ils sont solidaires.

3.3.2.5 Coffrage glissant horizontalement

Les machines à coffrage glissant sont composées d'un bâti supporté par un train de chenilles par l'intermédiaire de vérins hydrauliques. La machine est asservie en niveau et en direction à l'aide de palpeurs et de fil guide. Selon la destination des bétons, deux types de machines à coffrage glissant peuvent être distingués :

- les machines pour l'exécution des chaussées en béton ;
- les machines à coffrage glissant pour l'exécution en béton extrudé d'éléments routiers longitudinaux (séparateurs en béton, bordures, cunettes, caniveaux, profilés pour passages de câbles, fossés armés ou non).

Les machines utilisées sont très variables puisque leur masse varie entre 2 et 20 t et leur puissance entre 35 et 200 ch. Les machines guidées par des palpeurs peuvent couler le béton en déporté à gauche ou à droite [12].

Parmi les machines destinées à l'exécution des chaussées en béton, on distingue principalement [12] :

- les vibro-finisieurs, qui sont munis de trois poutres vibrantes et qui se déplacent sur des rails longitudinaux servant de coffrage latéral ; la largeur de travail peut varier entre 1 et 6,5 m ;
- les finisseurs adaptés, qui sont des engins automoteurs sur roues ou sur chenilles, très proches de ceux utilisés pour les bétons bitumineux ;
- les machines pour l'exécution des chaussées en béton travaillant en grande largeur ($\geq 7,5$ m). Ces machines possèdent deux fonctions et deux dispositifs particuliers ayant une influence primordiale sur l'uni de la dalle :
 - la fonction répartition du béton, dont le but est d'éviter les manques locaux de béton, de charger symétriquement la machine et d'exercer ainsi une pression uniforme sur le béton,
 - la fonction moulage de la dalle, qui utilise les dispositifs de réglage et de lissage d'une part, et ceux de vibration d'autre part,
 - les dispositifs permettant d'assurer l'assise de la machine comprennent les chenilles motrices et des vérins qui permettent de contrôler la stabilité,
 - le guidage permet, indépendamment de l'état des chemins de roulement, de réaliser la chaussée au profil théorique, matérialisé par la couche sous-jacente si la machine travaille à vérins calés, par des fils tendus si la machine travaille avec des palpeurs.

3.3.3 Coffrages perdus

Le bétonnage des hourdis au-dessus de poutres nécessite souvent l'emploi de coffrages non démontables. Ces coffrages perdus ne participent généralement pas à la résistance de la structure finale, mais doivent résister aux sollicitations appliquées en cours de construction : décoffrage et manutention de ces éléments d'une part et charges diverses en cours de bétonnage d'autre part. Le SETRA (Service d'études techniques des routes et autoroutes) a publié une note d'information relative à l'utilisation de ces éléments coffrants et définissant les actions et sollicitations qui leur sont appliquées [13].

Lorsque la portée entre poutres dépasse 0,80 m, il est nécessaire d'utiliser des éléments coffrants en béton armé, et en dessous de cette portée, les coffrages perdus pourront être constitués par des plaques minces en mortier fibré.

Lors de leur démontage et de leur manutention à la fabrication, ces coffrages préfabriqués sont soumis à diverses actions :

- dans le cas d'un levage normal (tirage en plusieurs points perpendiculaire au plan de coffrage), l'effort de décoffrage F est évalué à :

$$F = 1,36 M$$

avec M masse propre de l'élément

- dans tous les autres cas, les recommandations du CNTBTP (Centre national technique du bâtiment et des travaux publics) concernant le démontage des éléments préfabriqués [14] doivent être appliquées.

En cours de bétonnage du hourdis, les éléments de coffrage perdu sont soumis à deux types d'actions :

- les actions permanentes G comprenant le poids propre de l'élément M et le poids du béton du hourdis coulé par-dessus ;
- les actions variables Q prenant en compte la pression exercée par le béton frais lors des déversements localisés et les charges courantes de chantier estimées généralement comme suit :
 - 500 kg/m² sur une surface de 9 m² disposée de la manière la plus défavorable,
 - 75 kg/m² sur le reste de la surface horizontale à bétonner.

Les sollicitations de calcul à considérer vis-à-vis des états-limites ultimes de résistance résultent de la combinaison suivante des actions précédentes : 1,35 G + 1,5 Q .

Les sollicitations de calcul à considérer vis-à-vis des états-limites ultimes de service résultent de la combinaison suivante des actions précédentes : $G + Q$.

La fissuration, pour ces éléments coffrants, doit être considérée :

- peu préjudiciable si le milieu est peu agressif (ouvrages aérés dans des atmosphères non agressives par exemple) ;
- préjudiciable en milieu moyennement agressif (ouvrages soumis à des condensations fréquentes par exemple) ;
- très préjudiciable en milieu fortement agressif (ouvrages en zones d'embruns riches en sels de déverglaçage).

Dans chacun de ces cas, les prescriptions particulières [13] données dans le tableau 21 sont à appliquer pour l'enrobage des armatures par le béton.

Tableau 21 – Taux de gravité de la fissuration en fonction de l'enrobage des armatures			
Spécification particulière	Fissuration peu préjudiciable	Fissuration préjudiciable	Fissuration très préjudiciable
Épaisseur minimale du coffrage	> 4,5 cm	> 5 cm	> 6 cm
Enrobage minimal en intrados des armatures porteuses	>2 cm		> 2,5 cm
Enrobage minimal en extrados des armatures de répartition	> 1 cm		

Par ailleurs, le béton constituant ces coffrages perdus doit :

- être formulé et protégé en fonction de l'agressivité du milieu d'emploi (classification des milieux agressifs de la norme P 18-011) ;
- présenter la classe de résistance du béton du hourdis sans descendre en dessous de la classe B 30 ;
- être au moins dosé à 400 kg de ciment CEM I – CPA ou CEM II – CPJ normal ou prise mer par m³ de béton en place ;
- avoir au moins 28 j d'âge pour employer les coffrages.

Pour éviter toute fuite de laitance au moment du bétonnage du hourdis, des produits de calfeutrement ou de pontage sont à mettre en œuvre au droit des joints. De plus, la partie de l'élément coffrant appuyée sur la poutre doit être armée, ainsi que la partie de la poutre servant d'appui. Des armatures de liaison doivent être utilisées entre l'élément coffrant et le béton de hourdis pour éviter toute chute de tout ou partie de cet élément coffrant en cas de fortes dégradations.

3.3.4 Coffrages spéciaux

La construction de certains ouvrages particuliers à partie d'ouvrage répétitive (tabliers à voussoirs, galerie de tunnel, barrage...) nécessite le recours à des coffrages particuliers. Ces coffrages spéciaux justifient des études particulières de conception, d'autant plus que très souvent ils sont équipés de dispositifs de vibration externe et parfois de moyens de traitement thermique. La conception de ces coffrages spéciaux ne peut qu'être confiée à un bureau d'études ; les démarches de ce bureau d'études associé à l'atelier de montage prennent en compte les éléments suivants :

- la forme des pièces à mouler et les éventuels problèmes de dépouilles ;
- le poids du coffrage ou de l'équipage supportant le coffrage ;
- les dispositifs de préhension, de manutention, de déplacement et d'accessibilité pour la préparation ;

- les conditions d'emploi (fenêtres d'accès, position des vibreurs externes, arrêts et reprises de bétonnage, décoffrage et décintrément) ;
- le nombre et les conditions de réemplois ;
- le choix de la peau coffrante ;
- la protection thermique éventuelle ;
- les dispositifs éventuels de traitement thermique actif ou de refroidissement ;
- les équipements de sécurité des personnels (accès, passerelles de travail, garde-corps, isolation électrique, éclairage, ventilation...) ;
- l'étanchéité du coffrage fermé ;
- les dispositifs permettant l'emploi des inserts.

3.3.5 Coffrage de préfabrication

Outre la production de séries de composants identiques en béton, la préfabrication permet la plupart du temps de soulager la production foraine et de raccourcir les délais globaux de construction. La préfabrication peut couvrir des domaines très divers allant des composants du bâtiment à ceux des voiries, du mobilier urbain et même des ouvrages d'art.

Tous les composants du gros-œuvre en bâtiment peuvent ainsi être produits :

- murs de refends et de façades des bâtiments ;
- poutrelles, longrines, hourdis, planchers, prédalles ;
- escaliers, balcons, acrotères ;
- autres composants plus élémentaires tels que les parpaings, les tuiles...

Dans le cas de la préfabrication de poutres de grandes portées, ce n'est plus tellement le nombre de pièces qui prévaut, mais plutôt l'impossibilité de couler une dalle sur cintres ou sur étais (cas des ouvrages d'art au-dessus des voies ferrées ou des canaux), ou encore le gain de temps à la construction (construction des halls et hangars de grande superficie).

Pour les composants pour voirie (pavés, caniveaux, bordures...), l'emploi d'un grand nombre de pièces identiques dans leur forme, leur texture et leur teinte impose la préfabrication en usine.

Pour le mobilier urbain, seule la préfabrication peut apporter une solution correcte pour l'uniformisation et le fini des équipements, pour les traitements spéciaux de surface des bétons et pour la réduction des coûts.

D'autres composants d'utilisation intensive sont également préfabriqués à une échelle industrielle et constituent désormais des produits normalisés (cas des tuyaux en béton).

Ces coffrages pour préfabrication sont conçus comme des coffrages spéciaux et offrent les mêmes possibilités (vibration externe, traitement thermique...). Ils se présentent sous différentes formes :

- bancs de poutres ou de dalles ;
- tables relevables (fixes ou mobiles) ;
- batteries pour murs et cloisons ;
- moules particuliers (escaliers, corniches, éléments décoratifs) ;
- ateliers automatiques de moulage et généralement à démoulage instantané (pavés, caniveaux, bordures...).

3.4 Choix des composants et des matériaux

Dans la conception d'un outil coffrant, les choix portant sur la structure coffrante, la peau coffrante, les divers composants (inserts, entretoises...), les dispositifs d'étanchéité des joints et les démoulants ont une importance technique et économique primordiale pour le chantier.

3.4.1 Structure coffrante

La structure coffrante doit assurer la rigidité de l'ensemble de l'outil coffrant et sa stabilité en premier lieu et doit également être conçue pour :

- permettre l'accès et le travail des équipes avec toute la sécurité requise ;
- faciliter ou au moins permettre le décoffrage ;
- permettre le transport et le stockage ;
- recevoir des vibreurs si l'application de vibration externe est prévue ;
- permettre les traitements thermiques (actifs ou passifs) si ceux-ci sont envisagés pendant le chantier.

3.4.2 Peau coffrante

Si la peau coffrante est un des facteurs qui influe le plus sur les homogénéités de teinte et de texture des bétons, elle présente l'avantage de rester un facteur parfaitement maîtrisable. Son choix est conditionné par la prise en compte d'un ensemble de paramètres :

- la qualité requise pour le parement (texture, teinte et forme) ;
- le nombre d'emplois prévus ;
- les traitements éventuels du béton (traitement thermique) ;
- les traitements ultérieurs du parement (désactivation, polissage, peinture...) ;
- les possibilités de sa fixation sur la structure coffrante.

Certaines incompatibilités peuvent apparaître entre le nombre prévu de réemplois et les techniques utilisables : dans ce cas, le recours au renouvellement des peaux coffrantes est prévu dans le programme de coffrage. Dans de nombreux cas, la réalisation d'un élément témoin de béton est conseillée ; l'élément témoin doit être construit avec les moyens (personnels, matériels et matériaux) réels du chantier et sa forme doit intégrer toutes les difficultés de moulage pouvant intervenir lors du chantier (arêtes, parties courbes, fruit, détails architectoniques...).

3.4.2.1 Peaux courantes

Si les conditions d'utilisation et d'entretien après chaque bétonnage restent normales, les taux de réemplois des peaux courantes peuvent être donnés par le tableau 22.

Tableau 22 – Nombre de réemplois selon les peaux coffrantes [7]

Peau	Type	Nombre de réemplois normaux		
		Parois ordinaires	Parement simple	Parement fin ou ouvrage
Métal	Éléments légers assemblés Éléments lourds uniques	50 à 150 > 100	50 à 150 > 100	10 à 50 emploi rare
Béton	Fond de moule	> 100	> 100	sans objet
Bois	Planches	1 à 20	1 à 20	< 10
	Contreplaqué baké Contreplaqué ordinaire	15 à 60 10 à 40	15 à 60 < 20	< 15 < 10
Composites	Rigides	50 à 300	50 à 300	< 100
	Souples Polystyrène	sans objet 1	< 50 1	< 50 1
Drainante	Géotextile	sans objet	1	1

Les matrices destinées à peu de réemplois (environ une dizaine) et présentant de forts reliefs sont réalisées à base de mousse de polyuréthane expansé ; ces matrices résistent à l'abrasion du béton et à la déchirure pour des hauteurs de bétonnage inférieures à 3 m environ ; cependant, elles craignent les chocs durs.

Les matrices destinées à un nombre élevé de réemplois sont généralement réalisées en élastomère compact ou allégé à haute résistance à la déchirure et à l'abrasion ; certains types de matrices peuvent résister à plus d'une centaine de réemplois si l'entretien est réalisé correctement.

La peau coffrante en composite est en général un système multicouche de voiles de polyester, de stratifiés additionnés de polyester, de tôles et d'une couche de gelcoat « anti-béton » sur un cadre en bois.

La peau coffrante en tôle émaillée est constituée par une tôle d'environ 0,3 mm recouverte de deux couches d'émail au-dessus et d'une couche d'émail au-dessous (épaisseur de chaque couche d'émail : 0,1 mm). Cette peau coffrante peut être collée sur toutes les matières (bois, acier, composite, aluminium). Elle ne nécessite pas l'application d'huile de décoffrage.

3.4.2.2 Double peau

Le principe de la double peau coffrante est utilisé pour homogénéiser la teinte des parements en béton ; il consiste principalement à rajouter sur une paroi coffrante une feuille de contre-plaqué mince (5 à 10 mm) ; cette feuille, seulement fixée à la périphérie, permet d'atténuer les excès locaux inévitables de la vibration et leurs conséquences néfastes (variations de teinte, pommelages, taches noires). Dans le cas de murs dont une face est enterrée, l'application de la double peau côté parement peut être utilement complétée par l'interposition d'une feuille d'amortissement de vibration (feuille mince de polystyrène par exemple) sur le coffrage côté partie enterrée.

3.4.2.3 Peau drainante

Pour éviter la prolifération de bulles à la surface des parements lisses en béton, notamment sur les plans inclinés, les coffrages peuvent être revêtus par une peau drainante qui permet ainsi l'absorption de l'excès d'eau qui arrive à l'interface béton-coffrage sous l'influence de la vibration (figure 9). La peau drainante peut être constituée soit par un textile à double tissage de fibres polyester et polypropylène [16], soit par un géotextile non tissé en fibres de polypropylène, soit par des systèmes plus épais en aiguilleté recouvert d'un tissage côté béton.

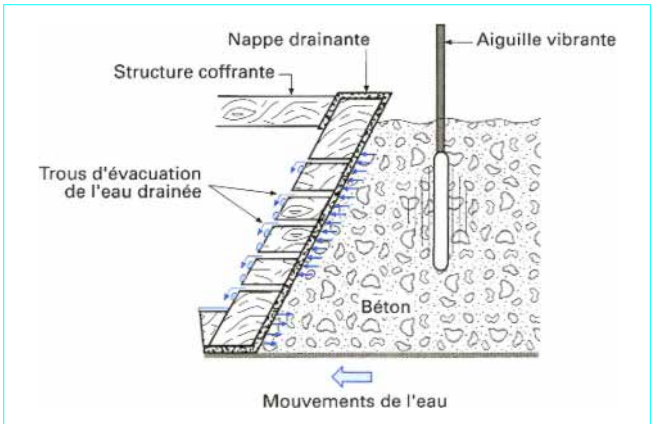


Figure 9 – Principe de fonctionnement du coffrage drainant

Les résultats sont particulièrement significatifs avec l'emploi de ces coffrages drainants, puisque tout bullage de surface disparaît. Cependant, si l'emploi des membranes drainantes permet un drainage très efficace, plusieurs problèmes restent actuellement mal résolus :

- une grande partie de l'eau drainée descend par gravité en partie basse du coffrage et, sous l'effet de la pression, l'eau contenue dans la membrane repénètre à ce niveau dans la peau du béton et lui confère ainsi une perméabilité importante après séchage, nuisant ainsi à la durabilité ;
- le réemploi des membranes drainantes provoque une diminution très rapide des capacités drainantes du fait de l'encrassement par la laitance de ciment ;
- la conservation de la nappe drainante lors des opérations de décoffrage reste une opération délicate.

Ces deux derniers problèmes nécessitent souvent le renouvellement de la membrane à chaque emploi.

3.4.3 Composants

Les étais doivent être assemblés en respectant les prescriptions des fabricants et du concepteur des coffrages. Lors de cet assemblage, le monteur doit veiller notamment aux points suivants :

- ne pas employer simultanément des matériaux de modules d'élasticité différents ;
- l'emploi de matériaux métalliques différents risque d'engendrer une corrosion d'origine électrolytique ;
- dans le cas d'emploi d'éléments corrodés, les contraintes admissibles seront affectées d'un coefficient de réduction défini dans le tableau 23 ;
- l'emploi des tubes gauchis ou incomplets (platines d'appui en mauvais état ou absentes) est interdit.

Tableau 23 – Coefficient de réduction des contraintes admissibles par l'étalement en cas de corrosion		
Taux de corrosion	Nature de la corrosion	Coefficient de réduction
Légère	Traces de rouille éliminables par essuyage	0,95
Notable	Piqûres superficielles de rouille non éliminables	0,85
Importante	Section réduite par la corrosion	0

Les **serre-joints** ne doivent pas être employés pour des poussées de béton frais supérieures à 50 kPa ; ils ne doivent être utilisés que pour reprendre des efforts de cisaillement ou de traction.

Les **entretoises** étant des pièces travaillant en traction, toutes les soudures doivent être plus résistantes que les pièces reliées ; les coefficients de sécurité correspondants sont :

- 2,5 pour l'acier doux ;
- 1,5 pour l'acier dur.

3.4.4 Dispositifs d'étanchéité des joints

Pour éviter toute perte de béton ou de laitance lors des bétonnages, il est recommandé d'utiliser des coffrages étanches. Cette étanchéité peut être obtenue par différents dispositifs relativement spécifiques à la nature des peaux coffrantes (tableau 24) :

L'emploi d'un couvre-joint rigide peut apporter une sécurité complémentaire si les conditions suivantes sont satisfaites :

- le motif en creux créé par ce couvre-joint est acceptable esthétiquement ;

Tableau 24 – Conditions d'emploi des divers types de joints

Peaux coffrantes	Types de joints			
	Simple contact	Bourrage par matériau résilient	Liaison par mastic adhérent	Joint par rainure et languette
Métal ou arêtes métalliques	0	**	0	*
Planches en bois	0	0	0	**
Contreplaqué (baké ou non)	0	**	**	0
Panneaux de fibres agglomérés	0	*	**	0
Panneaux synthétiques	0	**	0	0
Panneaux composites	0	*	**	*
0 déconseillé	* utilisable		**recommandé	

— le couvre-joint est parfaitement plaqué aux surfaces coffrantes (pour éviter toute pénétration d'éléments fins) ;
 — la forme du couvre-joint ne doit pas créer d'épaufures lors du décoffrage.

3.4.5 Démoulant

Les démoulants sont des produits d'interposition dont le rôle principal est de faciliter la séparation entre le béton et la peau coffrante. Les principaux éléments constituant les agents de démoulage sont les suivants :

- les agents de séparation proprement dits (paraffines, cires liquides ou en pâtes, corps gras acides ou esters et tensioactifs) ;
- les agents protecteurs des peaux coffrantes (antirouille, anti-corrosion) ;
- les agents anti-abrasion (pour éviter l'adhérence à la peau coffrante).

Les démoulants peuvent être classés en 4 catégories :

- les produits à base d'hydrocarbures ;
- les produits avec solvants de synthèse ;
- les produits biodégradables ;
- les émulsions en phase aqueuse (variante des trois catégories précédentes).

Mais, plus généralement, on se bornera à distinguer les démoulants « maigres », donc plus fluides, des démoulants « riches », plus visqueux.

Dans le cas de séparation immédiate entre le béton et la peau coffrante, le démoulant est préférentiellement un liquide peu visqueux à base de tensioactif spécifique.

Dans le cas de séparation différée, deux possibilités peuvent se présenter :

- si le béton n'est pas étuvé ou ne subit qu'un étuvage à moins de 60 °C (en surface), le démoulant doit :
 - ne pas contenir de solvant pour les peaux coffrantes en composite,
 - être plus visqueux et plus adhérent pour les bétonnages en grandes hauteurs,
 - être chargé en éléments gras pour bétonnage par temps froid ;
- si le béton subit un étuvage à plus de 60 °C (en surface), le démoulant doit :
 - être moins chargé en éléments gras (dopes),
 - mais plus visqueux pour un étuvage à haute température.

Le choix du démoulant est également fonction de la nature des peaux coffrantes [7] (tableau 25).

Tableau 25 – Choix du démoulant en fonction des peaux coffrantes

Peau coffrante	Démoulant
Bois brut scié ou raboté Contreplaqué non traité	Produits en émulsion directe dans l'eau, en double application pour nourrir le bois
Bois ou contreplaqué vernis	Huile ou cire (liquide ou pâteuse)
Contreplaqué baké ou métal (à température normale)	Cire liquide
Métal (à basse température)	Cire pâteuse
Matrices synthétiques (caoutchouc, plastique, polystyrène...)	Huile fluide pure, cire pâteuse à solide, émulsion inverse, sans solvants nocifs
Moules en béton recouverts d'un vernis époxydique	Cire pâteuse

Dans le cas d'emploi d'un nouveau couple démoulant-peau coffrante, il est recommandé de vérifier leur compatibilité et de réaliser un élément de béton témoin. Les excès de produits sur les peaux coffrantes sont toujours néfastes et doivent être essuyés. Lorsque le démoulant est pulvérisable, il est conseillé d'employer un pulvérisateur muni d'une buse avec filtre pour les impuretés.

3.5 Sécurité

3.5.1 Stabilité des banches

Les banches doivent être conçues pour résister simultanément aux efforts dus :

- au poids propre et à sa manutention ;
- aux charges de service :
 - circulation du personnel et matériels de mise en œuvre,
 - pression du béton ;
- aux charges climatiques et dues au vent.

Les éléments essentiels à considérer en matière de sécurité sont les suivants :

- les dispositifs de préhension ;
- la plate-forme de bétonnage ;
- les protections de la plate-forme ;
- l'ossature et la surface coffrante ;
- les dispositifs assurant la stabilité des banches sous l'effet du vent (vitesse de service), quelle que soit sa direction ;
- les dispositifs de maintien et de réglage.

Les dispositifs de maintien, réglage et stabilité peuvent être confondus en un seul système.

La pression dynamique créée par l'action du vent et l'action résultante unitaire sur une banche est la combinaison des actions unitaires sur chacune des faces de la paroi :

$$p = (c_1 - c_2) q$$

avec q pression sur le coffrage

$$q = V^2 / 1,63 \text{ (en Pa)}$$

avec V (m/s) vitesse du vent,

$c_1 = + 0,8$ pour la face au vent,

$c_2 = - 0,5$ pour la face sous le vent.

La vitesse du vent de service pour un coffrage vertical lesté ou à patins a été fixée à 85 km/h [17], soit une poussée de 342 Pa.

La vitesse maximale du « vent hors service » est fixée, par convention, à 150 km/h soit une poussée de 1 065 Pa.

3.5.2 Charges de service

Parmi les principales charges verticales, les charges inhérentes au matériau et à son moulage sont à dissocier des charges de service ou d'exploitation. Ces charges peuvent être très variées :

- charges dues à la circulation du personnel de mise en œuvre ;
- matériels de bétonnage et de vibration ;
- voies particulières de circulation ;
- charges provisoires de matériaux stockés (armatures, précontrainte, démoulants, produits de cure...) ;
- effets dynamiques (benne de béton...).

Des précautions particulières doivent être prises concernant :

- l'incidence des dispositifs vibrants, des vibreurs externes de coffrage, des matériels de mise en précontrainte ;
- le stockage temporaire et localisé des armatures avant leur mise en place dans le coffrage ;
- les déversements massifs et localisés de béton doivent être strictement limités, notamment dans le cas de coffrages calculés pour la réalisation de dalles de faible épaisseur ;
- les chocs et effets d'impact dus au déchargement brutal d'une benne de béton ;
- la transmission d'efforts de précontrainte par le coffrage.

3.5.3 Charges permanentes

Les charges propres au matériau et à son moulage comprennent :

- le poids propre des coffrages ;
- le poids propre des étais ;
- le poids des armatures et des différents inserts dans le béton ;
- le poids du béton frais.

3.5.4 Poussée du béton frais

Le béton serré par vibration ou par toute autre méthode adaptée à sa plasticité exerce sur les parois verticales du coffrage une pression de type hydrostatique qui ne peut qu'être évaluée du fait de l'influence sensible d'un grand nombre de paramètres mal contrôlés.

Pour des parties d'ouvrage présentant des hauteurs inférieures à 2 m, la poussée du béton frais (de masse volumique apparente < 2 500 kg/m³) peut être estimée par la relation :

$$P = 25 \, h \text{ (en kN/m}^2\text{)}$$

avec h (m) hauteur réelle < 2 m.

Pour des parties d'ouvrages présentant des hauteurs supérieures à 2 m, le manuel de technologie du groupe mixte CIB – FIP (Conseil international du bâtiment – Fédération de l'industrie du béton) et CEB (Comité euro-international du béton) présente une méthode de calcul pratique et reprise par le mémento CATED d'octobre 1992 relatif aux coffrages [11]. Cette méthode s'appuie sur trois valeurs simultanées de la pression sur les parois du coffrage :

- une pression P_1 qui affiche la pression hydrostatique et qui est fonction de la hauteur du béton dans le coffrage (béton de masse volumique apparente < 2 500 kg/m³) ;
- une pression P_2 qui prend en compte l'effet de voûte pour les blocs de béton peu épais (épaisseur < 0,50 m) ;
- une pression P_3 qui intègre le niveau, dans le coffrage, où un effet de durcissement du béton est susceptible normalement de se manifester.

En toute circonstance, seule la plus petite de ces trois valeurs de pressions P_1 , P_2 et P_3 , directement données par les tableaux 26, 27 et 28, est prise en compte pour le calcul du coffrage.

Tableau 26 – Pression hydrostatique P_1 en fonction de la hauteur de béton frais

Hauteur (m)	2	3	4	5	> 6
P_1 (kN/m ²)	50	75	100	125	150

Tableau 27 – Pression P_2 (en kN/m²).
Prise en compte de l'effet de voûte

Épaisseur (m)	Vitesse de remplissage v (m/h)											
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30	> 40
0,15	35	35	40	45	45	50	55	60	75	90	120	150
0,20	40	40	45	50	50	55	60	65	80	95	125	150
0,30	50	50	55	60	60	65	70	75	90	105	135	150
0,40	60	60	65	70	70	75	80	85	100	115	145	150
0,50	70	70	75	80	80	85	90	95	110	125	150	150

Tableau 28 – Pression P_3 (en kN/m²).
Prise en compte de l'effet de durcissement

Affais- sement au cône (cm)	Température du béton (°C)	Vitesse de remplissage v (m/h)									
		1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7	8
5	5	50	70	95	115	135	150	150	150	150	150
	10	40	55	70	85	100	135	150	150	150	150
	15	40	45	55	65	75	100	125	150	150	150
	20	35	40	45	50	55	70	90	105	125	150
7,5	5	60	85	110	140	150	150	150	150	150	150
	10	50	65	85	105	125	150	150	150	150	150
	15	40	50	65	80	95	125	150	150	150	150
	20	35	40	50	60	70	90	115	135	150	150
10	5	70	100	130	150	150	150	150	150	150	150
	10	55	75	100	120	150	150	150	150	150	150
	15	45	60	75	90	110	150	150	150	150	150
	20	35	45	55	70	80	110	130	150	150	150

Cependant, les frottements appliqués au béton par la paroi de coffrage et les armatures permettent de considérer que la pression n'augmente pratiquement plus à partir de 2,5 m de hauteur de béton. La norme NF P 93-350 relative aux banquettes pour ouvrages en béton limite alors cette pression à 60 kN/m². Un diagramme triangulaire est donc adopté jusqu'à 2,50 m, et rectangulaire en dessous (figure 10).

La conception du coffrage doit conduire à une structure pouvant résister, sans flèches intempestives, à des vitesses normales de bétonnage, des températures habituelles, et supporter les efforts dus à leur manutention à l'élingue.

3.5.5 Déformation des ouvrages provisoires

Les systèmes coffrants utilisés pour l'exécution des dalles ou des tabliers sont supportés, soit par un étaielement vertical constitué par un ensemble de tours, soit par un cintre constitué par un système de poutres horizontales. L'expérience montre que les déformations du cintre ou des étaielements peuvent engendrer certains désordres au niveau même de l'ouvrage : fissuration du béton jeune, voire des

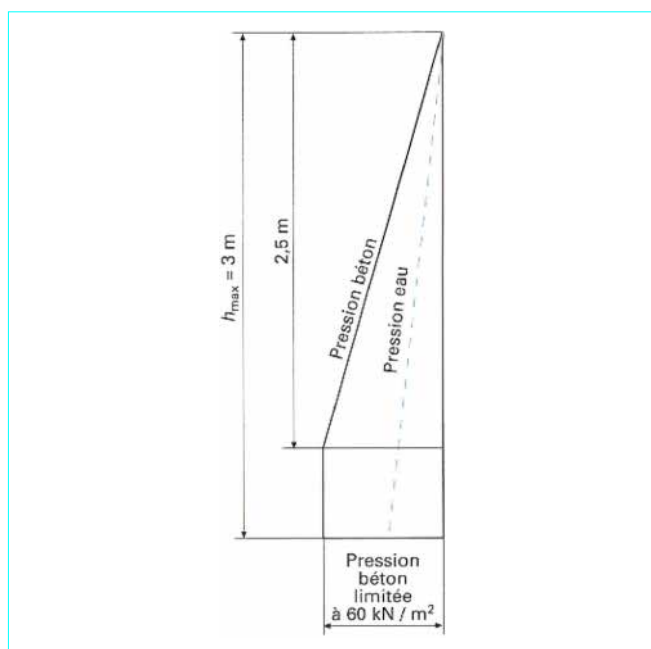


Figure 10 – Limitation de la poussée du béton frais

cassures et des ruptures d'adhérence dans le béton en cours de prise ou dans le béton coulé lors d'une phase précédente. Il y a donc intérêt à limiter les contraintes de traction dans le béton pendant les premières heures suivant leur coulage. Ainsi, dans le cas d'un ouvrage nécessitant un cintre à plusieurs travées, il sera indispensable, dans l'impossibilité de retarder le béton, de procéder à un phasage du bétonnage pour éviter que la fissuration se développe dans les zones des appuis (figure 11).

Le SETRA (Service d'études techniques des routes et autoroutes) précise également les limites admissibles de la déformation de ces ouvrages provisoires sous le poids du béton frais [19] :

- les étalements ne doivent pas subir de déplacement supérieur à 2 cm en quelque point que ce soit pendant toute la durée de bétonnage et de maintien sur cintre ;
- la flèche limite du cintre sous le poids du béton frais et des charges de services liées à sa mise en œuvre est admissible si elle reste inférieure à :

$$f < \frac{\ell}{2\,000} + 2$$

avec f et ℓ étant exprimés en centimètres.

De façon plus générale, l'admissibilité de cette flèche limite peut être appréciée sur le graphique de la figure 12 où les droites d'équation $f = (\ell/2\,000) + 2$ et $f = \ell/300$ partagent le secteur en trois zones :

- dans la zone 1, les flèches sont admissibles sans vérifications ni précautions particulières ;
- dans la zone 2, les flèches sont admissibles dans la mesure où des vérifications sont effectuées et des précautions particulières sont à respecter (par exemple, phasage de bétonnage approprié ou limitation de la traction du béton) ;
- dans la zone 3, les flèches ne sont pas admissibles.

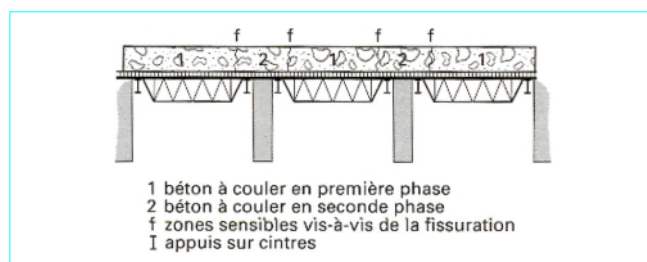


Figure 11 – Phases de bétonnage sur ouvrage à plusieurs travées

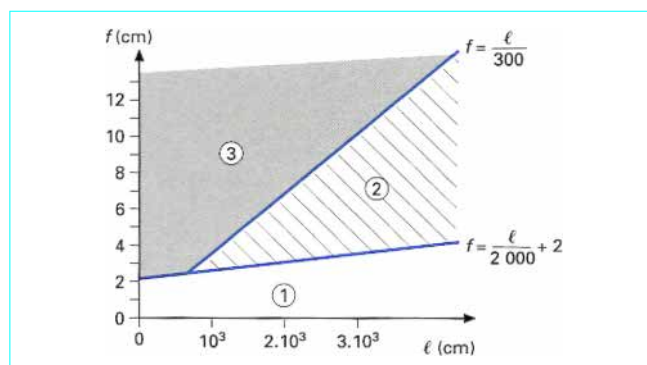


Figure 12 – Admissibilité des flèches des cintres en fonction de leur portée

3.5.6 Charges sur planchers

Dans le cas des bâtiments, les cadences de bétonnage doivent rester assez élevées (bétonnage d'un étage par semaine) et, très souvent, le dernier béton coulé n'a pas encore la résistance pour supporter le poids d'une nouvelle dalle avec ses charges de services ; de ce fait, les dalles successives vont devoir rester étayées sur plusieurs semaines.

Les charges maximales sur les étais se retrouvent au niveau du sol. Avant que la structure commence à reprendre une partie de son poids propre, les étais inférieurs supportent la totalité de tous les étages bétonnés avant qu'on ne les retire. Le calcul doit prendre en compte la totalité du béton, des coffrages et des charges de service existant avant leur retrait. Aucune réduction dans les charges n'est admise quand on remplace des étais, mais une telle opération provoque toujours un accroissement de la charge sur le plancher qui reçoit les étais.

L'exemple suivant donne l'analyse simplifiée des charges [20] sur les étais et sur les dalles d'une structure à 4 étages construite avec les hypothèses de construction suivantes (tableau 29) :

- une dalle est bétonnée en mobilisant au plus 3 niveaux consécutifs par des étais ;
- lorsque les étais du niveau le plus bas sont retirés, les charges qu'ils reprenaient sont réparties sur les niveaux supérieurs, y compris le dernier niveau coulé ;
- le poids total des coffrages et des étais est appliqué en tête des étais ;
- le poids total du ré-étiement est appliqué en tête de celui-ci ;
- les étais et ré-étiements sont infiniment rigides par rapport aux dalles ;
- les charges de service sont retirées avant tout décoffrage.

**Tableau 29 – Analyse simplifiée des charges sur étais et sur dalles
en cours de construction d'une structure à 4 étages**

Phase	Opérations constructives	Charges reprises par les étais (E) et les dalles (D) (en multiple de P , masse propre du béton)								Aides au calcul des charges
		E1	D1	E2	D2	E3	D3	E4	D4	
1	Bétonnage de la dalle 1	1,6	0							La dalle étant étayée, elle ne reprend aucune charge, la charge totale est reprise par les étais
2	Bétonnage de la dalle 2	2,7	0	1,6	0					Les dalles étant étayées, elles ne reprennent aucune charge La charge totale est reprise par les deux niveaux d'étais : les charges de service s'appliquent au niveau 2 des étais
3	Retrait des charges de service	2,2	0	1,1	0					Ce retrait soulage les étais
4	Décoffrage et retrait de l'étais 1	0	1,05	0,05	1,05					Les charges sont reprises par les dalles 1 et 2 Le retrait du coffrage et des étais est à déduire de ces charges Chaque étai reprend la charge non reprise par la dalle supérieure
5	Ré-étalement niveau 1	0,05	1,05	0,05	1,05					Le ré-étalement supporte son propre poids
6	Bétonnage de la dalle 3	1,65	1,05	1,65	1,05	1,6	0			Les dalles 1 et 2 ne peuvent plus fléchir La nouvelle charge est reprise par les 3 niveaux d'étais
7	Retrait des charges de service	1,15	1,05	1,15	1,05	1,1	0			Ce retrait soulage les étais
8	Retrait du ré-étalement niveau 1	0	1,41	0,41	1,42	0,73	0,37			La charge que reprenait le ré-étalement diminuée du poids de ce ré-étalement est reprise équitablement par les trois dalles Chaque étai reprend la charge non reprise par la dalle supérieure
9	Décoffrage et retrait de l'étais 2	0	1	0	1,58	0,58	0,52			La charge reprise par la dalle 1 diminuée du poids de cette dalle et du poids du coffrage et des étais est reprise équitablement par les dalles 2 et 3 Chaque étai reprend la charge non reprise par la dalle supérieure
10	Ré-étalement niveau 2	0	1,05	0,1	1,58	0,58	0,52			Ce ré-étalement supporte son propre poids
11	Bétonnage de la dalle 4	0	1,59	0,59	2,11	1,65	1,05	1,6	0	Les dalles 1, 2 et 3 reprennent équitablement la nouvelle charge Chaque étai reprend la charge non reprise par la dalle supérieure
12	Retrait des charges de service	0	1,42	0,42	1,94	1,31	0,89	1,1	0	La décharge de ce retrait est répartie équitablement sur les étais 2, 3 et 4
13	Retrait du ré-étalement niveau 2	0	1	0	2,07	1,07	1,01	0,98	0,12	La charge reprise par la dalle 1 diminuée du poids de cette dalle et du ré-étalement est reprise équitablement par les autres dalles Chaque étai reprend la charge non reprise par la dalle supérieure
14	Décoffrage et retrait de l'étais 3	0	1	0	1	0,10	1,50	0,50	0,60	La charge reprise par la dalle 2 diminuée du poids de cette dalle et de l'étais 3 est reprise équitablement par les dalles 3 et 4 Chaque étai reprend la charge non reprise par la dalle supérieure
15	Décoffrage et retrait de l'étais 4	0	1	0	1	0	1	0	1	Les dalles 3 et 4 prennent la charge de leur propre poids

Les charges maximales sur les dalles prennent en compte :

- la masse propre du béton..... P ;
- la masse des coffrages et étais..... $0,1 P$;
- la masse propre des étais de reprise $0,05 P$;
- les charges de service $0,5 P$.

Les charges que doivent reprendre les dalles successives doivent être comparées aux paramètres suivants :

- les caractéristiques mécaniques du béton des dalles aux mêmes instants respectifs des reprises de charges ;
- le planning des bétonnages ;
- les cadences de retrait des étais.

3.5.7 Sécurité du chantier

Le problème de la sécurité sur chantier est primordial aux niveaux du montage et de l'emploi des coffrages et se pose sous différents aspects [23] :

- respect des règlements nationaux et locaux ;
- garantie de la sécurité des personnels travaillant sur le chantier ;
- garantie de la sécurité du public susceptible de passer ou de séjourner sur le site ou à proximité des travaux (notamment dans le cas de la réparation ou de la restauration des ouvrages ou de bâtiments) ;
- garantie de la stabilité des ouvrages provisoires.

3.5.8 Causes d'accident

Les accidents de coffrages les plus fréquents relèvent de façon quasi systématique d'erreurs de construction ou de défauts de surveillance sur chantier. Ces carences peuvent apparaître avant, pendant ou après le bétonnage.

3.5.8.1 Anomalies avant le bétonnage

Les **anomalies** les plus fréquentes se situent bien souvent au **niveau de l'étalement ou du calage** :

- mauvais contreventement des étais ;
- mauvais couplage d'étais en bois ;
- raboutement d'étais ;
- entretoisement aux jonctions d'étais absents ou défectueux ;
- mauvaise verticalité des étais ;
- blocage des tubes d'étais défectueux ;
- entretoisement de banches insuffisant ou défectueux ;
- insuffisance de la portance du sol d'appui ;
- ignorance des consignes de montage données par le projeteur.

Mais certaines **erreurs de conception** peuvent s'avérer tout aussi graves que les précédentes anomalies :

- mauvaise prise en compte de la poussée du béton frais ;
- appréciation erronée des reprises de charges sur les étages sous-jacents ;
- non-prise en compte des composantes de force non verticale ;
- non-prise en compte de la composante verticale vers le haut des coffrages en surplomb ;
- non-reprise des efforts aux extrémités des structures ;
- ignorance des consignes d'emploi données par le fabricant ;
- non-prise en compte du développement d'efforts dissymétriques ;
- définition incorrecte des points de transmission des forces.

Au niveau proprement dit du coffrage et des postes de travail :

- rives et garde-corps mal fixés ;
- moyens d'accès défectueux, mal calés et mal arrimés ;
- non-délimitation des zones de travail, notamment le manque de balisage de la zone de stationnement pour la livraison du béton.

3.5.8.2 Anomalies pendant le bétonnage

Ce sont :

- un manque de surveillance de la déformation des coffrages sous la poussée du béton ;
- une mauvaise vitesse de remplissage des coffrages ;
- un manque de contrôle de la plasticité du béton ;
- l'inobservation du plan de bétonnage ;
- des chocs violents (benches, camions...) ;
- des déversements locaux et imprévus de béton ;
- une vibration intensive et incontrôlée.

3.5.8.3 Anomalies après le bétonnage

Ce sont :

- un démontage prématuré des étais ;
- la stabilité des banches non assurée après décoffrage ;
- la chute de panneaux de coffrages mal arrimés.

3.6 Programme de coffrage

Les objectifs principaux d'un programme de coffrage sont la coordination des opérations et l'optimisation des moyens de chantier (personnel, matériel). Le programme débouche sur des méthodes de travail :

- respectant les stipulations du marché, les plans, les divers règlements et les délais imposés ;
- prenant en compte les conditions d'environnement pendant toute la durée du chantier (influence des variations climatiques sur le durcissement du béton) ;
- optimisant l'investissement dans les coffrages et leurs conditions de réemplois ;
- assurant la continuité de débit des équipes.

Dans le cas de chantier où un cycle de construction peut être établi, la coordination des opérations s'appuie naturellement sur la continuité des équipes, en adéquation avec les types de bétons, la nature des lots et les conditions particulières de chantier. La taille de chaque équipe est définie de façon à leur assurer une durée égale d'intervention ; ces équipes peuvent alors réaliser les mêmes tâches en continu, optimisant par là le coût des opérations et la sécurité. Elle prend également en compte l'accessibilité au poste de travail : une surpopulation dans un espace de travail ou sur un passage commun abaisse le rendement.

Ainsi, pour une tâche dont l'exécution nécessite un nombre d'heures donné, le programmeur a le choix entre :

- fixer la durée du poste et calculer le nombre d'ouvriers ;
- ou fixer le nombre d'ouvriers et déduire la durée du poste.

Ce choix est, bien entendu, fonction des types de chantier et peut évoluer en fonction des conditions climatiques ou des phases du chantier.

Le programme comporte les phases courantes suivantes :

- mise en place des coffrages ;
- mise en place des armatures ;
- fermeture des coffrages (verticaux) avec vérifications ;
- bétonnage ;
- durcissement du béton ;
- décoffrage ;
- démontage et remise en état des coffrages.

3.7 Utilisation des coffrages

Le coffrage étant conçu et fabriqué est livré sur chantier ; il doit alors être réceptionné par le monteur.

3.7.1 Plan assurance qualité

Le plan assurance qualité constitue en fait une garantie donnée par l'entrepreneur et ses sous-traitants au maître d'œuvre [22] :

- à maintenir sur le chantier un ensemble de moyens en personnels et en matériels ;
- à utiliser des matériaux, des méthodes de construction et de vérification définis préalablement.

3.7.2 Montage *in situ*

Le monteur réceptionne les éléments constituant l'outil coffrant et l'assemble *in situ* et en conformité avec les prescriptions du concepteur et du fabricant. Après vérifications (stabilité, sécurité générale, dimensions), il le remet à l'entrepreneur avec toutes les prescriptions d'emploi et d'entretien.

3.7.3 Préparation des coffrages

Le coffrage monté doit recevoir une préparation avant le bétonnage ; la vérification de cette préparation incombe au chargé des ouvrages provisoires (ou coffrages). La préparation des coffrages montés comprend un ensemble de dispositions et de vérifications :

- dans le cas d'emploi de panneaux de contreplaqué, le fil des plis extérieurs est disposé dans le sens de la portée principale ;
- les réservations doivent être prévues de façon à ne pas créer d'épaufrures ou d'écornures au moment du décoffrage ;
- les inserts doivent être positionnés de façon à pouvoir rester intacts et fixes au moment du bétonnage et du décoffrage ;
- l'application et la vérification de la pérennité du démoulant sur la peau coffrante ;
- l'élimination de l'huile ou de l'eau présente en partie basse du coffrage ;
- l'élimination des souillures ou des déchets divers (chutes de ligatures, gravillons, poussières, outils, pointes...) ;
- éventuellement la fixation correcte des systèmes de désactivation de surface ;
- la vérification générale de l'étalement.

Évidemment, ces opérations propres aux coffrages restent indépendantes des autres vérifications nécessitées par les conditions propres du chantier :

- la conformité du ferrailage ;
- le positionnement des gaines de précontrainte ;
- le fonctionnement des vibreurs externes ;
- les dispositifs de traitement thermique actif ;
- etc.

3.7.4 Surveillance en cours de bétonnage

La surveillance de l'outil coffrant pendant toute la durée du bétonnage est placée sous la responsabilité du coordinateur de coffrage ou du chargé des ouvrages provisoires suivant les types de chantier (personnel appartenant à l'entreprise). Les tâches de ce dernier sont principalement les suivantes :

- pour rappel, vérification du blocage des étais et de la stabilité des sols d'appui ;
- surveillance des flèches prises par les coffrages pour prévenir tout risque de rupture ;
- surveillance du respect des zones de travail (positions des camions de livraison, des pompes...) ;
- vérification du respect des zones de stockage préalablement définies ;
- maintien des dispositifs de sécurité pour le personnel d'exécution (passerelles, garde-corps, échelles, ventilation, éclairage...).

Par ailleurs, l'entrepreneur doit veiller à l'homogénéité du béton livré et à la régularité du bétonnage.

3.7.5 Reprises de bétonnage

Les reprises de bétonnage volontaires ou involontaires peuvent avoir des effets catastrophiques au niveau de la durabilité et de l'esthétique si leur traitement n'a pas été envisagé préalablement.

Dans le cas de **reprises volontaires**, il est facile de concevoir des dispositions constructives qui viendront atténuer leur impact :

- n'effectuer des reprises de bétonnage que sur des arrêts parfaitement réguliers, voire horizontaux dans le cas de parois verticales ;

il est préférable de faire coïncider ces arrêts soulignés avec les différentes contingences architecturales ;

- vibrer complètement le béton avant l'arrêt de bétonnage et marquer cet arrêt par des dispositifs ajoutés en surépaisseur sur la peau coffrante, ce qui revient à dire qu'une reprise volontaire de bétonnage ne sera pas dissimulée mais au contraire nettement marquée ;

- éviter tout talochage fin sur la section d'arrêt et éliminer l'eau superficielle en cas de ressuage ;

- ne pas tarder pour faire la reprise de bétonnage et utiliser la même composition de béton (mêmes constituants, mêmes dosages et même consistance) et les mêmes matériels et méthodes de mise en œuvre ;

- adopter les mêmes délais de décoffrage et les mêmes démoulants pour les bétonnages successifs ;

- retenir les mêmes procédés et les mêmes durées de cure.

Dans le cas de **reprise accidentelle**, il convient de s'efforcer de revenir sur les précautions précédentes, notamment aux niveaux suivants :

- si la durée prévisible de l'arrêt de bétonnage reste inférieure à 1 h, les 10 cm supérieurs de la couche de béton doivent rester légèrement foisonnés et la couche est arasée horizontalement ;

- si la durée prévisible de l'arrêt de bétonnage reste inférieure à 3 h, la couche est arasée horizontalement et vibrée ; en cas de ressuage, l'eau excédentaire est évacuée et les formations de tassures légèrement revibrées ;

- si la durée prévisible de l'arrêt de bétonnage excède 3 h, les prescriptions adoptées sont celles décrites pour un arrêt programmé.

Dans le cas où la **reprise est différée de plusieurs jours**, il est nécessaire de protéger les aciers en attente par un bâchage étanche ; cette mesure permet de s'affranchir des traînées de rouille.

Avant toute reprise, il est nécessaire de remettre à vif la surface du béton et d'éliminer la laitance de peau ; plusieurs techniques peuvent être utilisées suivant l'âge du béton :

- l'emploi d'un retardateur sur la surface du béton en fin de bétonnage, suivi d'un lavage et d'un soufflage juste avant la reprise ; du fait des dispositions à prendre pour la non-pénétration du retardateur le long du parement, cette méthode reste assez délicate d'emploi ;

- un léger bouchardage de la surface de reprise suivi d'un soufflage efficace constitue la solution la plus courante, mais cette méthode est proscrite dans le cas de bétons précontraints ;

- l'interposition de grillages en parties verticales constitue une disposition constructive acceptable pour les arrêts verticaux, mais la consistance du béton doit être adaptée et la maille du grillage doit rester compatible avec la granularité du béton ;

- le sablage léger peut constituer une solution pour retirer la laitance superficielle de la surface de reprise, mais il faut particulièrement prendre soin à ne pas affecter les parements latéraux adjacents ;

- le lavage seul est inefficace et dangereux pour l'aspect du parement inférieur ;

- le soufflage seul est inefficace.

3.7.6 Durcissement

Le durcissement du béton est influencé par un certain nombre de paramètres liés au béton et aux conditions thermiques dans lesquelles il est placé :

- le dégagement de chaleur du béton en cours de prise est un facteur prépondérant ; il est évidemment relié à la chaleur d'hydratation et au dosage du ciment constituant le béton ; la connaissance du degré d'avancement des réactions ou degré de maturation du béton, peut être appréciée par la mesure du dégagement de chaleur et, après calibrage, elle devient un outil non destructif permettant d'estimer la résistance du béton au jeune âge ;

- les conditions climatiques dans lesquelles est placé le béton jouent également un rôle non négligeable ; à cet effet, le coffrage constitue une enveloppe de protection plus ou moins efficace suivant

sa nature : un coffrage constitué par un matériau isolant génère un traitement thermique passif du béton ;

— lorsque les conditions climatiques sont trop sévères pour permettre un décoffrage dans les délais souhaités, le béton peut être soumis à un traitement thermique actif.

3.7.7 Décoffrage et décintrement

Les opérations de décoffrage ne peuvent être lancées qu'à partir du moment où le béton a atteint une résistance suffisante pour reprendre la charge, et qu'aucune déformation dommageable de la structure n'est à craindre [21]. La norme P 18-504 précise qu'aucun décoffrage ne peut être réalisé si la résistance à la compression du béton n'atteint pas au moins 3 MPa pour les ouvrages coulés en place, et 8 MPa pour les pièces préfabriquées : ces valeurs restent cependant assez faibles vis-à-vis des autres sollicitations auxquelles seront soumises les structures.

Dans le cas de risque d'exposition aux actions des cycles de gel-dégel, le béton ne doit plus être gélif au moment du décoffrage : cet état de fait peut conduire à l'emploi de compositions particulières de béton (emploi d'entraîneurs d'air par exemple). Un produit de cure doit être immédiatement appliqué après décoffrage.

Les opérations de décoffrage doivent être réalisées avec soin, sans choc et sans prise d'appui directe sur le parement en béton.

Pour le décintrement, il est souhaitable d'effectuer l'opération suivant un programme établi par le bureau d'études et précisant, en outre, la déformation admissible, et de prescrire une valeur minimale de la résistance du béton (tableau 30).

Tableau 30 – Prescriptions générales de la résistance du béton pour autoriser le décintrement (cas courants)

Contrainte des pièces sous leur propre poids	Résistance du béton		
Principalement des efforts de flexion	$> 1,67 \sigma_b$	$> 0,6 f_{c28}$	$> 15 \text{ MPa}$
Principalement des efforts de compression (en l'absence de vent fort)	$> 1,67 \sigma_b$	$> 0,4 f_{c28}$	$> 8 \text{ MPa}$
Très faibles contraintes (sans risque de gel)		$> 0,2 f_{c28}$	$> 5 \text{ MPa}$

σ_b contrainte calculée vis-à-vis des états-limites de service dans la section la plus sollicitée de la structure en béton armé sous une combinaison de chargement (1,05 G + 1,5 Q), c'est-à-dire le poids propre de la structure à décoffrer multiplié par un facteur de sécurité de 1,05, augmenté des charges amovibles multipliées par un facteur de sécurité de 1,5

f_{c28} résistance caractéristique du béton à 28 jours d'âge

Le décintrement prématuré d'un béton peut entraîner :

— des déformations excessives de pièces minces fléchies ;
— une fissuration des parties tendues ;
— ne microfissuration préjudiciable au niveau de la durabilité de la structure.

Le décoffrage trop tardif peut également être préjudiciable.

3.7.8 Cure du béton décoffré

Pour son hydratation, le ciment a besoin d'un minimum d'eau évalué à environ 28 % de sa masse, ce qui conduit à un rapport eau efficace/ciment (E/C) de 0,28, valeur qui est très nettement inférieure à celles couramment utilisées dans les bétons courants puisque la norme P 18-305 fixe les valeurs maximales de E/C entre 0,45 et 0,70

suivant les types d'emploi des bétons et leurs conditions d'environnements. Ces valeurs plus élevées sont justifiées pour assurer une bonne maniabilité aux bétons frais.

De plus, les réactions d'hydratation du ciment peuvent durer longtemps et il est nécessaire de disposer d'une réserve d'eau libre dans le béton le plus longtemps possible. Tant que le béton reste protégé par son coffrage, l'eau libre n'est consommée que par les réactions d'hydratation et la réserve d'eau libre reste importante.

Mais dès le décoffrage, surtout si celui-ci est effectué tôt, c'est-à-dire moins de 72 heures, une forte perte d'eau est constatée en surface si aucune protection n'est appliquée, et l'eau s'évaporera d'autant plus vite que la température sera élevée, que l'humidité ambiante sera faible et que le vent sera fort.

Les conséquences de cette dessiccation des premiers jours sont nombreuses :

— mauvaise hydratation du ciment dans les premiers centimètres extérieurs du béton, d'où une augmentation de la porosité entraînant un défaut de protection des premières armatures métalliques ;
— développement des résistances mécaniques affectées à tous les âges ;
— apparitions de fissures et de micro-fissures.

L'ACI (American Concrete Institute) a publié un abaque pratique permettant d'estimer la quantité d'eau susceptible de s'évaporer en fonction de la vitesse du vent, de l'humidité relative de l'air ambiant et de la température du béton (figure 13).

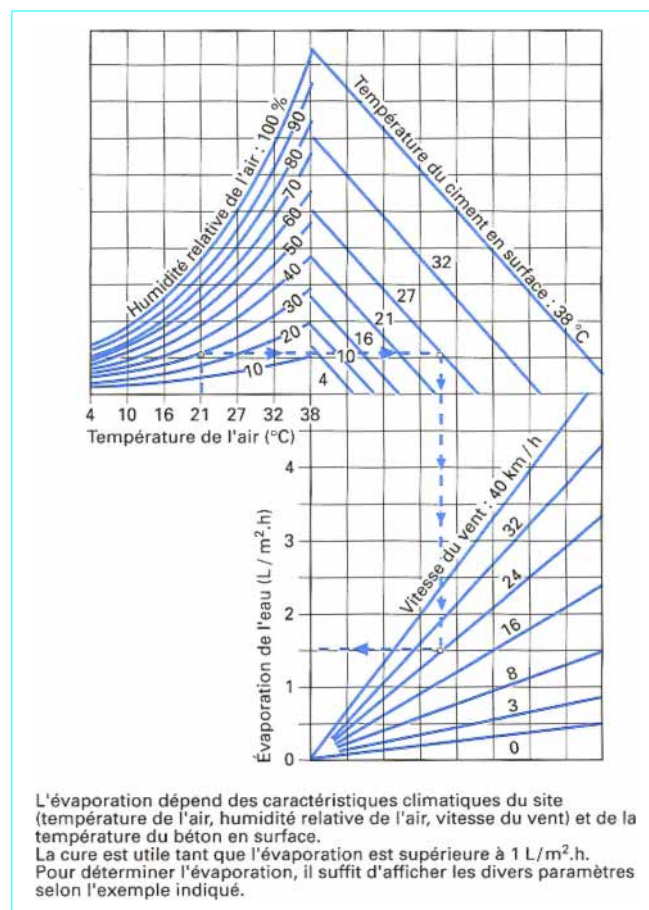


Figure 13 – ABAQUE ACI permettant d'estimer la quantité d'eau évaporable par m² de parement en béton et par heure

L'exploitation de cet abaque nécessitant des matériels assez rares sur chantiers courants, la norme P 18-504 recommande l'utilisation des spécifications du fascicule 65 A du CCTG [5] d'emploi plus simple (tableau 31).

Le durcissement du béton est lié à la classe de résistance du ciment utilisé (tableau 32).

- Plusieurs méthodes de cure peuvent être envisagées sur chantier :
- le maintien des coffrages en place pendant toute la durée de cure constitue une solution économique, mais présente des risques d'adhérence et conduit à un aspect de parements défavorable ;
 - la mise en place de bâches étanches maintenues en permanence au contact de la surface à traiter, en évitant tout renouvellement d'air ; cette méthode peut également conduire à certains déboires au niveau de l'aspect final des parements ;
 - la mise en place de paillasons, nattes, toiles perméables maintenues humides par arrosages intermittents ; ces dispositions sont assez efficaces, mais ne permettent pas de s'affranchir totalement des problèmes posés par la dessiccation de surface qui se manifeste à l'instant du décoffrage ;
 - l'application de produits de cure généralement à base de résines constitue également une solution intéressante, mais demeure une opération délicate et suffisamment longue (4 à 5 m² à la minute dans le meilleur des cas) pour ne pas s'affranchir complètement de la dessiccation de surface au décoffrage ;
 - l'arrosage permanent sous faible pression constitue une solution économique et pratique pouvant être mise en œuvre dès l'ouverture des coffrages ; cependant, les gradients thermiques devront être limités à 20 °C dans les pièces massives (épaisseur supérieure à 60 cm environ) ;
 - les techniques comme l'immersion et la mise en atmosphère saturée d'eau (salles de brouillard) des pièces bétonnées sont plutôt réservées aux petits éléments préfabriqués.

Tableau 31 – Durées minimales de cure des bétons (en jours) selon le fascicule 65A du CCTG [5]									
Conditions ambiantes (1)	Classe 1			Classe 2			Classe 3		
Classe de durcissement (2)	R	M	L	R	M	L	R	M	L
$\theta > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	0	1	1	1	2	4	1	4	5
$5 \leq \theta \leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	1	2	2	2	4	8	2	8	10
$\theta < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	À défaut de protection isotherme, la cure est maintenue tant que la température θ reste inférieure à 5 °C ; ensuite, se reporter aux cas ci-dessus.								
(1) Classe 1 : béton à l'abri du soleil et du vent avec une humidité relative de l'air au moins égale à 80 % Classe 2 : tous les autres cas non visés dans les classes 1 et 3 Classe 3 : humidité relative de l'air inférieure à 50 % et, soit un fort ensoleillement, soit du vent (vitesse supérieure à 30 km/h)									
(2) cf. tableau 32 Conventionnellement, la température à prendre en compte est la moyenne sur deux jours de la température relevée à midi sous abri, et le degré d'humidité relative de l'air retenu est le plus faible enregistré à ces deux moments									

Tableau 32 – Ciments des classes de durcissement du béton		
Classe de durcissement		
Rapide (R)	Moyen (M)	Lent (L)
CPA-CEM I 52,5 R CPA-CEM I 52,5 CPA-CEM I 42,5 R CPA-CEM I 42,5 CPJ-CEM II 52,5 R CPJ-CEM II 52,5 CPJ-CEM II 42,5 R CPJ-CEM II 42,5 CPJ-CEM II 32,5 R	CPJ-CEM II 32,5 R	CHF-CEM III 52,5 CHF-CEM III 32,5 CLK-CEM III 32,5 CLC-CEM V 32,5

3.7.9 Cure du béton non coffré

La cure des bétons non coffrés est réalisée dans les mêmes conditions générales que celle des bétons coffrés. Cependant, son application est à réaliser au fur et à mesure de la réalisation du talochage pour les surfaces supérieures des dalles, dès la fin du bétonnage pour les parties supérieures de pièces de faibles surfaces, dès l'extrusion pour les bétons coulés à l'aide de coffrages glissants, et dès la fin du traitement de surface dans le cas de chaussée béton. Les conditions d'application sont beaucoup plus faciles sur les bétons non coffrés que sur les bétons coffrés. Pour les dalles d'ouvrage d'art destinées à recevoir une étanchéité ou pour les parements destinés à être recouverts par un revêtement adhérent (peinture, enduit...), les produits de cure employés doivent pouvoir être retirés facilement après avoir assuré leur fonction protectrice.

3.7.10 Nettoyage et entretien des coffrages

Dans le cas d'emploi de banches, celles-ci sont immédiatement entreposées après décoffrage en assurant leur stabilité vis-à-vis du vent et la protection de leur peau coffrante contre les chocs. Les autres types de coffrages sont déposés ou retirés de façon à pouvoir effectuer toutes les opérations de nettoyage, d'entretien et de remise en état de la peau coffrante. Les peaux coffrantes sont ensuite nettoyées des différentes souillures rémanentes (restes de laitance de ciment, excès d'huile, coulures de rouilles...), lavées au besoin avec remise en état de la forme ou de la texture des peaux endommagées (trous, arrachements, décollements...). Dans le cas où le coffrage peut être stocké hors poussière, la couche de démoulant peut être appliquée sur la peau coffrante pour assurer une fonction protectrice.

3.7.10.1 Peau coffrante en bois et en contreplaqué

Les peaux coffrantes en bois ou en contreplaqué peuvent être brossées, soufflées puis recirées. L'emploi d'huile sur le bois brut ou le contreplaqué ordinaire est dommageable pour la texture du béton.

3.7.10.2 Peau coffrante en contreplaqué bakérisé

Les peaux coffrantes en contreplaqué bakérisé peuvent être lavées à l'eau sous pression et essuyées au chiffon. Toute opération effectuée sur les revêtements bakérisés doit tendre à ne pas provoquer de rayures ou de blessures. Dans le cas de blessures, il conviendra d'utiliser un mastic polymérisable dont l'adhérence a été reconnue au préalable.

3.7.10.3 Peau coffrante métallique

Le nettoyage à l'aide d'acide n'est pas conseillé du fait de l'endommagement progressif qu'il apporte à la rugosité de la peau coffrante (risque d'adhérences entre la peau coffrante et le béton) et de l'aspect

rouillé qu'il confère au béton moulé. Le polissage des banches métalliques entraîne des risques de marbrures sur le béton et doit être refait pratiquement à chaque utilisation [7]. Le sablage léger des banches métalliques donne des résultats acceptables, mais doit être refait approximativement tous les 10 emplois.

3.7.10.4 Peau coffrante en tôle émaillée

Pour les peaux coffrantes en tôle émaillée, un simple arrosage d'eau sous pression suffit pour le nettoyage ; les défauts de surface consécutifs à un choc sur l'émail (profondeur < 0,3 mm) peuvent être rebouchés à l'aide de produit de rebouchage spécifique (produit vitrifiable).

3.7.10.5 Peau coffrante en composite

Après quelques réemplois, les peaux coffrantes en composite peuvent être nettoyées à l'eau ou avec un produit légèrement détersif pour éviter l'accumulation de laitance de ciment. Les réparations de rayures ou de percements accidentels peuvent être réalisées sur chantier par application de résine auto-géifiante.

3.7.10.6 Matrice coffrante

Les matrices se nettoient avec des solvants spécifiques à la nature même de la matrice : il est alors conseillé de se rapprocher du fournisseur dans chaque cas d'espèce pour connaître le solvant adapté. En cours d'utilisation (montage, vibration, décoffrage et transport), il peut se produire des chocs qui entraînent des altérations des reliefs de la matrice. Dans le cas d'altérations mineures (surfaces de l'ordre de quelques dizaines de centimètres carrés), il est possible de reconstituer la forme à partir de mastic polymérisable et de même nature que la matrice.

3.7.10.7 Autres peaux coffrantes

Les peaux coffrantes en carton ou en polystyrène n'étant généralement pas réutilisables, les travaux porteront essentiellement sur une dépose de la peau coffrante non dommageable pour le support.

3.7.11 Stockage des coffrages

Bien qu'ayant des conséquences importantes sur la qualité d'aspect des parements en béton, l'opération de stockage des coffrages reste assez souvent négligée sur chantier. Pour éviter le maximum de déboires, un ensemble de précautions, avec prise en compte du type de structure coffrante et de la nature des peaux coffrantes, doivent être prises :

- de façon générale, il est préférable de stocker un coffrage après nettoyage complet et remise en état de la peau coffrante ; en effet, un nettoyage juste après décoffrage est beaucoup plus facile et rapide à réaliser et les résultats des remises en état beaucoup plus probants ;
- en aucun cas les peaux coffrantes ne doivent être posées sur le sol ;
- le meilleur stockage de coffrage reste le stockage vertical ;
- pendant le stockage, éviter toutes souillures, telles que projection d'eau, huiles, graisses, peintures...

D'autres précautions spécifiques à la nature de la peau coffrante doivent également être prises (tableau 33).

Certaines peaux coffrantes en composite nécessitent des précautions spéciales pour le stockage des systèmes coffrants (tableau 34).

Tableau 33 – Précautions spécifiques de stockage des coffrages avec une peau coffrante courante

Peau coffrante	Précautions spécifiques
Métal	<p>Stockage avec produit de protection superficielle</p> <p>Stockage à l'abri de l'humidité</p> <p>Ne pas appuyer la peau coffrante contre une arête vive ou un point dur</p> <p>Éviter tout choc dur sur la peau coffrante</p> <p>En cas d'impossibilité de s'affranchir de la présence de poussières pendant le stockage, prévoir un nettoyage général avant réemploi</p> <p>Le coffrage stocké doit être calé et arrimé pour éliminer tous risques de chutes sur le sol ou sur un autre élément quelconque</p> <p>Le stockage doit être assuré pour éviter tous risques de chutes d'éléments lourds ou de matériaux sur la peau coffrante</p> <p>Le stockage du coffrage doit être réalisé de façon à éviter son voilement, le plus léger soit-il (risque de désaffleurement du parement > 2 mm)</p>
Bois brut ou traité Contreplaqué ordinaire	<p>L'application d'huile sur les peaux coffrantes avant stockage des coffrages risque de former un amalgame pâteux qui pénétrera dans la peau du béton lors du coulage</p> <p>Ne pas appliquer de cire avant stockage, tout contact créant une marque indélébile</p> <p>Éviter tout choc d'outils métalliques ou d'autres pièces lourdes sur la peau coffrante</p> <p>Tout contact de la peau coffrante avec un quelconque élément entraîne des traces indélébiles sur le parement en béton</p> <p>Limiter les risques de condensation dans le cas où la peau coffrante est protégée par une bâche imperméable</p>
Contreplaqué baké	<p>Ne pas appuyer la peau coffrante contre une arête vive ou un point dur</p> <p>Éviter tout choc sur la peau coffrante</p> <p>L'application d'huile sur les peaux coffrantes avant stockage risque de former avec la poussière un amalgame gras qui pénétrera dans la peau du béton lors du coulage</p> <p>Tout choc d'outils métalliques ou de toutes autres pièces lourdes sur la peau coffrante nécessite le remplacement de celle-ci dans son intégralité</p>

Tableau 34 – Précautions spécifiques de stockage des coffrages avec une peau coffrante spéciale

Peau coffrante	Précautions spécifiques
Matrice en polystyrène	L'expérience montre que ces matrices sont généralement blessées lors du décoffrage et qu'elles doivent être remplacées à chaque emploi Il est conseillé de préparer le support destiné à recevoir la matrice avant stockage et à la protéger contre les intempéries et la poussière
Matrice en caoutchouc ou souple	Stocker le système coffrant pour éviter tout risque de décollage de la matrice de son support Ne pas appuyer la peau coffrante contre une arête vive ou un point dur ; à cet effet, stocker deux éléments coffrants, les peaux coffrantes face à face, mais sans contact Éviter tout choc sur la peau coffrante L'application d'huile sur les peaux coffrantes avant stockage risque de former, avec la poussière, un amalgame gras qui pénétrera dans le béton au moment du coulage
Peau coffrante en composite	Éviter tout choc violent sur la peau coffrante L'application de cire sur les peaux coffrantes avant stockage risque de former, avec la poussière, un amalgame gras qui tachera la peau du béton Prendre les précautions nécessaires pour éviter toute coulure de rouille provenant d'éléments métalliques extérieurs

4. Serrage du béton

Pour acquérir un moulage satisfaisant du béton traditionnel, son adhérence aux armatures et développer ses caractéristiques optimales de résistances mécaniques et de durabilité, il est nécessaire de lui appliquer un moyen intense de serrage. Ce serrage est habituellement obtenu par une vibration à haute fréquence imposée au béton frais introduit dans son moule. Au cours de cette vibration, chaque grain du béton est soumis à des amplitudes et accélérations qui provoquent leurs mouvements relatifs les uns par rapport aux autres ; les forces d'adhérence et de frottement diminuent, l'eau excédentaire et l'air peuvent être libérés. Les cailloux, en se déplaçant, modifient les bases d'appui des couches supérieures et, sous l'action de la pesanteur, provoquent un tassement qui conduit au serrage du béton [25] [26].

- Il existe quatre catégories de vibrations :
- la **vibration interne**, où le dispositif vibrant est plongé dans la masse de béton frais à compacter ;
 - la **vibration externe**, où le dispositif vibrant agit par les faces du volume de béton frais par l'intermédiaire des parois moulantes ; le moule peut être posé directement sur une table vibrante, ou les vibrateurs peuvent être bridés à l'extérieur du moule ;
 - la **vibration de surface**, où le dispositif vibrant n'agit qu'à partir de la surface du béton (dame, règle et truelle vibrantes) ;
 - la **table à chocs** : la vibration est externe, mais avec une fréquence faible et une accélération très forte et variable suivant l'élasticité des matériaux en contact.

4.1 Vibration interne

4.1.1 Vibrateurs

Les dispositifs vibrants se présentent sous forme de cylindres communément appelés « aiguilles vibrantes ». Ces aiguilles vibrantes, qui sont des cylindres vibrant radialement dont le mode d'entraînement peut être pneumatique, mécanique ou électrique, doivent être introduites rapidement dans la zone de béton à vibrer et retirées lentement après serrage. Lors de la vibration, l'énergie absorbée est d'autant plus forte que la structure est moins compacte ; après serrage, le béton n'absorbe pratiquement plus d'énergie mais la transmet davantage. Le rayon d'action de l'aiguille vibrante comprend les zones qui transmettent l'énergie et celles qui l'absorbent.

Les aiguilles vibrantes (ou pervibrateurs) sont caractérisées en première approche par :

- leur diamètre, qui donne une idée assez précise de la puissance relative des appareils d'une même gamme, mais qui doit être également en fonction de la densité des armatures des pièces à vibrer ;
- leur masse, qui est liée à leur efficacité mais qui doit rester aussi réduite que possible pour les rendre manœuvrables ;
- la longueur de leur partie vibrante, du fait que la force développée est transmise par la surface de cette partie.

La fréquence et la force centrifuge sont également des caractéristiques importantes à prendre en compte dans le choix d'une aiguille vibrante.

■ La **fréquence** a un effet sélectif en fonction de la grosseur des grains :

- à basse fréquence, le mortier et les gravillons ont un mouvement de même amplitude, et les gros éléments sont mis en résonance sans que le mortier soit fluidifié ;
- à fréquence élevée, les gravillons ont une amplitude faible et l'énergie cinétique est transmise au mortier qui se liquéfie, entraînant le tassement du squelette des gravillons.

Des déphasages entre les oscillations du vibrateur et celles de ces grains peuvent également se produire et varier de 0 à π quand on passe des éléments fins aux très gros gravillons ; ces derniers peuvent alors s'immobiliser au cours d'une même séquence de vibration. Les travaux de L'Hermite ont permis de déterminer les ordres de grandeur de la taille des grains entrant en résonance aux différentes fréquences (tableau 35).

Tableau 35 – Taille des grains entrant en résonance en fonction de la fréquence de vibration

Fréquence		Diamètre des grains mis en vibration (cm)
(Hz)	(Vibrations/minute)	
10	600	10 à 28
20	1 200	2,4 à 6,9
25	1 500	1,6 à 4,4
50	3 000	0,4 à 1,1
100	6 000	0,1 à 0,28
150	9 000	0,04 à 0,12

Ces résultats tendent à montrer l'intérêt qu'il y aurait à utiliser les fréquences faibles au début du serrage pour mettre en place les gros éléments, puis des fréquences plus fortes pour agir sur les constituants du mortier. Dans la pratique, les fréquences des différentes aiguilles vibrantes se situent entre 12 000 et 22 000 vibrations/minute.

■ La **force centrifuge** est reliée à l'amplitude par la relation :

$$a = F/(2\pi f)^2 m$$

avec a amplitude,
 F (N) force centrifuge,
 f (Hz) fréquence,
 m (kg) masse vibrée.

Cette force centrifuge fournit l'énergie nécessaire au serrage du béton ; le rayon d'action des vibreurs croît évidemment avec cette force centrifuge qui varie dans le même sens que le diamètre des aiguilles (valeurs variant de 1 000 à 22 000 N pour des diamètres variant entre 25 et 90 mm).

4.1.2 Choix du nombre de vibreurs

À la suite de nombreux essais ayant conduit à la rédaction de la norme NF P 18-422, G. Dreux [27] a proposé deux relations empiriques permettant de déterminer le temps total de vibration d'un volume donné de béton et, par là-même, de définir l'atelier de vibration pour une cadence de bétonnage donnée.

Pour un volume de béton $V > 25$ L, le temps total de vibration est donné par la relation :

$$t_v = 2,5 \left[G + \frac{1}{A + 0,05} \right] \frac{VF}{\varnothing} \quad (\text{en s})$$

avec t_v (s) temps total de vibration,
 V (m³) volume du béton,
 A (m) affaissement au cône d'Abrams,
 \varnothing (m) diamètre de l'aiguille vibrante,
 F coefficient de ferrailage défini dans le tableau 36,
 G coefficient d'angularité des granulats défini dans le tableau 37.

Tableau 36 – Coefficient de ferrailage F

Ferrailage	F
Très dense	1,50
Dense	1,35
Normal	1,20
Faible	1,10
Nul	1,00

Tableau 37 – Coefficient d'angularité G des granulats suivant mélanges

Gravier	Sable	G
Roulé	Roulé	1
Semi-concassé	Roulé	2
Concassé	Roulé	3
Concassé	Semi-concassé	4
Concassé	Concassé	5

Cette relation n'est applicable ni pour les bétons trop fluides (affaissement au cône d'Abrams > 18 cm) ni pour les bétons auto-nivelants qui, par principe, ne nécessitent pas de vibration.

En fixant la vitesse de bétonnage v_b (en m³/h), le temps de coulée t_c est immédiatement déduit par la relation :

$$t_c = 3\,600 \, V/v_b \quad (\text{exprimé en s})$$

En admettant que l'emploi correct des vibreurs conduit au temps de vibration t_v , il est possible de déterminer le nombre minimal de ces vibreurs par la relation :

$$N = (t_v/t_c) - k$$

Le terme correcteur k est introduit pour compenser les effets induits par le fait que la méthode décrite pour le calcul du temps de vibration ne discrimine ni les différents types de pervibrateurs, ni leur fréquence, ni leurs forces centrifuges associées. L'expérience sur chantier montre qu'il est possible de travailler avec un facteur de correction k fonction de l'efficacité au moment de l'emploi et du nombre des pervibrateurs utilisés (tableau 38).

Tableau 38 – Variation du terme k en fonction du nombre et de l'efficacité des vibreurs

t_v/t_c	Vibreur peu efficace	Vibreur efficace	Vibreur très efficace
≤ 2	-1	0	0
> 2 et ≤ 4	0	0	1
> 4 et ≤ 6	0	1	2
> 6	0	2	3

L'efficacité d'un vibreur usagé peut être appréciée sur chantier par la mesure du temps nécessaire de vibration pour amener un volume donné de béton non ferrailé à sa densité optimale, et en comparant la valeur mesurée à celle calculée par la relation de Dreux.

4.1.3 Conduite de la vibration

La vibration interne du béton doit être conduite de façon uniforme et avec un certain nombre de précautions :

- vibrer des couches d'épaisseur inférieure à 50 cm ;
- ne pas utiliser le pervibreur pour déplacer le béton dans un plan horizontal ;
- plonger verticalement et rapidement l'aiguille en fond de couche en veillant à pénétrer légèrement (10 cm environ) dans la couche sous-jacente et la remonter lentement et à vitesse la plus constante possible ;
- ne pas revibrer une couche déjà vibrée ;
- éviter les contacts entre le pervibreur et les armatures d'une part, et avec le coffrage d'autre part ;
- piquer le pervibreur dans le béton à des distances variant entre 35 à 50 cm pour les aiguilles courantes (diamètres variant entre 55 à 75 mm) ;
- en fin de vibration d'une couche, sortir le pervibreur en laissant la cavité se refermer.

4.2 Vibration externe de béton coffré

La vibration externe est réservée pour les bétonnages où l'accès des vibreurs internes s'avère très difficile, voire impossible, et pour le coulage de pièces relativement minces et répétitives. Si elle est très fréquemment utilisée en préfabrication, son emploi est rare sur chantier courant. Dans ce cas, les vibreurs sont placés sur les parois externes du coffrage ou sur des tables à des endroits parfaitement définis, et il est conseillé de prévoir des fenêtres à différents niveaux pour suivre la progression du béton et intervenir si nécessaire par vibration interne ; leur fixation est assurée par boulonnage, glissières ou clavettes. L'étude du positionnement des vibreurs de coffrages reste une affaire souvent délicate, coûteuse et seulement justifiable dans le cas de coulages très répétitifs.

Les vibrateurs sont constitués par des systèmes utilisant un mode de propulsion électrique, pneumatique ou hydraulique et sont caractérisés par leur fréquence et la force centrifuge développée.

Pour les vibrateurs les plus courants, les plages de vibrations de ces caractéristiques sont définies dans le tableau 39.

La force centrifuge de nombreux vibrateurs électriques est réglable suivant les matériels (de 20 à 100 %).

Tableau 39 – Caractéristiques des vibrateurs de coffrages		
Modes de propulsion	Fréquences (tr/min)	Force centrifuge (kN)
Électrique	1 000 à 12 000	1,4 à 98
Pneumatique	3 600 à 16 000	2,9 à 60
Hydraulique	6 000	6 à 13

4.3 Vibration externe superficielle

Cette technique est utilisée sur les grandes surfaces non coffrées, c'est-à-dire sur les dalles et les chaussées dont l'épaisseur n'excède guère 0,25 m. Le ou les vibrateurs sont fixés sur une règle simple ou double déplacée à la surface du béton ; le serrage est alors assuré par la surface. Pour le fonctionnement, deux guides sont noyés provisoirement dans le béton à serrer en vue d'assurer la planéité et le respect des épaisseurs. À titre de rappel, ces surfaces doivent recevoir un produit de cure après serrage du béton pour limiter au maximum l'évaporation de l'eau, cette évaporation étant génératrice de fissures [28].

4.4 Bétons compactés routiers

Les bétons compactés routiers sont définis par la norme NF P 98-128 comme des mélanges d'une grave reconstituée et de un ou plusieurs liants hydrauliques ou pouzzolaniques, d'eau et quelquefois d'additifs, réalisés en centrale et mis en œuvre conformément à la norme NF P 98-115.

Le compactage de ces matériaux s'effectue après leurs répandages et réglages. Tous les matériaux approvisionnés sur le chantier doivent être compactés et protégés dans les limites de leurs délais de maniabilité [29].

Les matériels de compactage peuvent être des rouleaux vibrants, des compacteurs à pneumatiques, des rouleaux mixtes vibrants-pneus. Les pilonneuses et les plaques vibrantes peuvent être utilisées pour les travaux en faible largeur. L'exploitation de chaque engin présent sur le chantier doit respecter un plan de marche global et cohérent pour l'ensemble des matériels.

Cette prescription nécessite la connaissance *a priori* des performances de chaque matériel :

- soit par application des avis techniques ou certificats d'aptitude élaborés dans le cadre de liste d'aptitude du ministère chargé des routes ;
- soit par planche d'essai lorsque les matériels ne sont pas suffisamment connus.

En sus des moyens utilisés pour atteindre les densités désirées en moyenne et en fond de couche, un compactage supplémentaire doit être réalisé pour assurer le serrage en partie supérieure.

Un ensemble de caractéristiques (tableau 40) est à prendre en compte pour apprécier l'efficacité des différents engins de compactage.

Tableau 40 – Caractéristiques des engins de compactage routiers		
Compacteur à pneumatiques	Rouleaux vibrants	Plaque vibrante
Largeur de compactage et vitesse de travail		
Charges par roue avec ou sans lest	Masse par centimètre de génératrice vibrante	Masse par unité de surface de la plaque
Pressions maximales de gonflage des pneumatiques	Plages de fréquences utilisables par amplitude nominale	Moments de l'excentrique
Caractéristiques des pneumatiques	Amplitudes nominales et moments excentriques	Fréquence de vibration
	Rapport de la masse suspendue à la masse vibrante	

Dans tous les cas, le débit pratique *Q* de l'atelier de compactage doit être supérieur ou égal au débit de répandage et se trouve défini comme suit :

- engin vibrant ou à pneumatiques seul, ou engin vibrant en tête suivi de compacteur à pneumatiques ; *Q* est la somme des débits de chaque engin ;
- engins à pneumatiques en tête, *Q* est le plus faible entre, d'une part, le débit des compacteurs à pneumatiques pour amener le mélange à un niveau de qualité donné et, d'autre part, le débit des compacteurs vibrants permettant de porter la qualité précédente jusqu'au niveau désiré.

Le débit de chaque engin est défini par la relation :

$$Q = Q_{th} K_1 K_2 k_v$$

- avec *Q*_{th} débit théorique de l'engin,
- K*₁ taux d'activité prenant en compte les inversions de marche, les arrêts, etc.,
- K*₂ coefficient intégrant les recouvrements dans le profil en travers, donc < 1,
- k*_v coefficient d'influence de la vitesse de translation si elle est inférieure à la vitesse optimale.

5. Bétonnage par temps froid

5.1 Comportement au gel du béton frais

Les basses températures agissent de façon néfaste sur les caractéristiques des bétons jeunes et les préjudices ainsi causés peuvent se ressentir ultérieurement sur les caractéristiques des bétons plus âgés. Les basses températures ralentissent les réactions de prise et de durcissement, et ces ralentissements sont très marqués en dessous de 5 °C.

Aux températures négatives, les préjudices causés ne sont pas récupérables du fait que l'eau du béton, en gelant, désorganise la structure du béton, voire la détruit, avec une réduction définitive des performances mécaniques et avec une forte augmentation de la perméabilité [31]. La répétition de cycles de gels et de dégels sur un béton jeune encore humide réduit considérablement ses qualités mécaniques du fait de l'évaporation de l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment ; l'emploi d'un produit de cure efficace permet de limiter en partie ces inconvénients. Enfin, le raccourcissement du béton sous l'effet du froid (retrait thermique) et surtout la formation de gradients thermiques entre le cœur et la peau de la partie d'ouvrage augmente les risques de fissuration.

5.2 Durée d'attente avant décoffrage

Les forts gradients thermiques responsables de la fissuration risquent surtout de se produire dès que le béton ne sera plus protégé par le coffrage ; pour cette raison, il est souhaitable que le béton ait acquis une résistance minimale à la compression d'au moins 5 MPa avant d'être soumis à un premier gel. En cas de gelées fortes ou modérées, il semble préférable de prévoir un calorifugeage des coffrages et de corriger les durées de maintien sous coffrages par les coefficients donnés dans le tableau 41.

Tableau 41 – Coefficient de correction pour le maintien sous coffrages par basses températures [48]

Température journalière moyenne (°C)	- 10	- 5	0	5	10	15	20
Coefficient de correction (par rapport à 20 °C)	(1)	6,7	3,3	2,2	1,7	1,3	1

(1) Tant que la température reste inférieure ou égale à - 10 °C, maintenir le béton sous coffrage calorifugé, puis appliquer les corrections dès que la température s'élève.
Exemple : un besoin de 8 j de coffrage à 20 °C deviendra 8 x 6,7 soit 53 j à - 5 °C

5.3 Précautions particulières

Le bétonnage par temps froid nécessite la recherche de solutions qui seront toujours le résultat de compromis entre les facteurs techniques (précautions particulières) et économiques [32] [33] avec prise en compte du nombre de composants identiques à fabriquer, de la durée des opérations concernées par les basses températures et des autres caractéristiques exigées d'une part, et les méthodes proprement dites de fabrication, de mise en œuvre et de coffrage d'autre part (tableau 42).

En cas de gelées fortes à modérées, il peut être nécessaire de chauffer les constituants du béton. À cet effet, il est recommandé de rechercher des températures comprises entre 10 et 30 °C juste après malaxage. Le contact du ciment avec une eau à plus de 60 °C est à éviter du fait qu'il entraîne une accélération trop forte de la prise.

La formule suivante permet de calculer la température du béton à la sortie du malaxeur en fonction de celles des constituants [30] :

$$\theta = \frac{0,22 (C \theta_c + G \theta_g + S \theta_s) + E_a \theta_{ea} + G W_g \theta_g + S W_s \theta_s}{0,22 (C + G + S) + E_a + G W_g + S W_s}$$

avec :

Matériaux	Quantité (kg)	Température (°C)
Ciment	C	θ_c
Eau d'ajout	E_a	θ_{ea}
Gravillons secs	G	θ_g
Eau totale des gravillons (1)	$G W_g$	θ_g
Sables secs	S	θ_s
Eau totale des sables (1)	$S W_s$	θ_s

(1) W_g et W_s représentent les teneurs en eau totales respectives des gravillons et des sables.

Tableau 42 – Précautions pour bétonner par temps froid

Température	Effet	Précautions
$0 < \theta < 5 \text{ °C}$	Retard de prise Durcissement ralenti	Ciment CEM I, CPA 52,5 ou 52,5 R Dosage minimal en ciment > 350 kg/m ³ de béton $E/C < 0,50$ Emploi de béton chaud Possibilité d'emploi d'accélérateur de prise Protéger les surfaces non coffrées
$-5 < \theta < 0 \text{ °C}$	Prise arrêtée Durcissement arrêté	Dégel des granulats et des coffrages Traitement thermique actif du béton Utilisation d'eau chaude à la fabrication Utilisation de granulats chauds Fabrication de béton chaud Ciment CEM I, CPA 52,5 ou 52,5 R Dosage minimal en ciment > 400 kg/m ³ de béton $E/C < 0,45$ Emploi d'accélérateur de prise avec entraîneur d'air Coffrages calorifugés
$-10 < \theta < -5 \text{ °C}$	Forte gelée	Dégel des granulats et des coffrages Utilisation d'eau très chaude à la fabrication (> 50 °C) Traitement thermique actif du béton Utilisation de granulats chauds Fabrication de béton chaud Ciment CEM I, CPA 52,5 ou 52,5 R Dosage minimal en ciment > 400 kg/m ³ de béton $E/C < 0,45$ Emploi de réducteur d'eau Emploi d'accélérateur de prise avec entraîneur d'air Coffrages calorifugés Forte protection thermique des surfaces non coffrées
$-15 < \theta < -10 \text{ °C}$	Froid intense	Précautions ci-dessus Arrêt de bétonnage sauf pour les ouvrages massifs

6. Bétonnage par temps chaud

Les températures plus élevées que la normale agissent à différents niveaux sur le béton ; elles ont d'abord un effet sur l'ouvrabilité du béton frais, puis elles agissent sur les vitesses de prise et de durcissement pour enfin aggraver les conséquences du retrait [34].

6.1 Effets sur l'ouvrabilité du béton frais

Toute élévation de température favorise l'évaporation de l'eau libre d'un béton frais et ce départ d'eau abaisse tout naturellement la plasticité de celui-ci. Cette chute de plasticité est constatée autant

par des essais statiques (affaissement au cône d'Abrams, § 1.2) que par des essais dynamiques (maniabilité LCL par exemple, § 1.2).

Cette perte de plasticité nécessite alors une dépense d'énergie supplémentaire pour le coulage (cas du pompage notamment) et pour la vibration. Dans les cas d'emploi de béton à teneur en eau efficace relativement faible, cette évaporation peut également conduire à restreindre le développement des réactions d'hydratation ; dans ce dernier cas, les possibilités d'augmenter légèrement le dosage en eau ou d'ajout de plastifiant réducteur d'eau au malaxage pourront être expérimentées préalablement en fonction :

- de la température ;
- des temps de transport ;
- des temps d'attente ;
- des temps et conditions de vibration.

Les ajouts d'eau volontaires, mais non justifiés par ces études, s'avèrent nuisibles à la qualité finale du béton et doivent être interdits : ils abaissent directement la teneur en ciment du béton et provoquent une augmentation brutale du rapport eau/ciment.

Pour limiter l'évaporation pendant le transport, les rotations lentes des cuves des bétonnières portées doivent être préférées aux rotations rapides.

Au niveau de la fabrication, l'utilisation de granulats saturés en eau, c'est-à-dire des matériaux dont la teneur en eau totale est au moins égale à leur absorption capillaire, est vivement conseillée ; à cet effet, il y aura intérêt à prévoir une humidification des stocks et leur conservation si possible à l'ombre.

Il peut également être intéressant de limiter les volumes transportés pour réduire les temps d'attente sur chantier et d'augmenter les moyens de l'atelier de mise en œuvre pour accélérer celle-ci.

6.2 Accélération de la prise

La chaleur est un facteur prépondérant dans la cinétique des réactions déclenchant la prise du ciment en présence d'eau, et donc de celle du béton frais ; elle a pour effet immédiat de réduire rapidement la durée pendant laquelle le béton peut être mis en œuvre (coulage, vibration et talochage). Il est généralement admis que le temps de prise est divisé par 2 lorsque la température du matériau passe de 20 à 40 °C. Les conséquences de cet état de fait se traduiront par l'apparition de fissures de retrait plastique après le coulage, lors du début du raidissement. Ces fissures, dans la mesure où elles restent peu profondes, peuvent être refermées rapidement par un nouveau talochage de surface appelé « double talochage ».

Pour lutter contre les inconvénients précédents, il est possible d'utiliser un adjuvant retardateur de prise conforme à la norme P 18-337.

Dans le cas de très fortes chaleurs, il y aura intérêt à incorporer de l'eau très froide (température proche de 0 °C), voire de la glace pilée, dans le malaxeur, au détriment de l'eau de gâchage normale. La formule suivante permet de calculer la température du béton à la sortie du malaxeur en fonction de celles des constituants [35] :

$$\theta = \frac{0,22 (C\theta_c + G\theta_g + S\theta_s) + E_a\theta_{ea} + GW_g\theta_g + SW_s\theta_s - G_{la}(79,6 - 0,5\theta_{gla})}{0,22 (C + G + S) + E_a + GW_g + SW_s + G_{la}}$$

avec G_{la} (kg) quantité de glace ajoutée,
 θ_{gla} (°C) température de la glace ajoutée.

Les autres symboles sont définis dans le paragraphe 5.3.

Il est également possible d'adapter les horaires de bétonnage suivant les variations climatiques (bétonnage pendant les heures les plus fraîches).

Enfin, dans certains cas, il est possible d'utiliser un ciment à faible chaleur d'hydratation, mais dans ce cas, ce choix s'appliquera pour toute la partie d'ouvrage.

6.3 Accélération du durcissement

L'incidence des fortes températures ambiantes est évidente sur le durcissement du béton, puisqu'elles vont avoir les mêmes conséquences que celles d'un traitement thermique actif ; malheureusement les conséquences de ce traitement thermique, guère maîtrisables, vont se traduire souvent par l'apparition de fissures de retrait thermique. L'apparition de gradients thermiques peut aggraver celles-ci.

6.4 Recommandations particulières

Les recommandations proposées par la FNB (Fédération nationale du bâtiment), la FNTF (Fédération nationale des travaux publics) et le SNBATI (Syndicat national du béton armé et des techniques industrialisées) [35] prennent en compte les conditions climatiques bien entendu, les granulats, l'eau de gâchage, les liants et les conditions de fabrication et de mise en œuvre du béton (tableau 43) :

Tableau 43 – Recommandations pour bétonnage par temps chaud [35]

Prise en compte du climat	S'enquérir des caractéristiques climatiques et de leurs variations habituelles dans le cas de chantiers de longue durée (> 6 mois) À défaut de pouvoir utiliser l'évaporation potentielle comme indicateur climatique, limiter la température du béton frais à 30 °C
Granulats	Augmenter la fréquence des mesures de teneurs en eau des gravillons N'utiliser, si possible, que des granulats (sables et gravillons) saturés en eau (teneur en eau totale \geq absorption capillaire) S'il est impossible de conserver la saturation des granulats sur stocks, augmenter à la fabrication la teneur en eau totale du béton d'une quantité d'eau égale à celle juste nécessaire pour saturer les granulats Prendre en compte la température des granulats (cette dernière variant rapidement lorsque les granulats sont secs)
Ciments	Utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation Ne pas utiliser de ciments riches en aluminat tricalcique (C3A) Prendre en compte la température du ciment au moment du dosage
Eau de gâchage	Utiliser de l'eau froide et prendre en compte sa température Dans les cas extrêmes, remplacer partiellement l'eau de gâchage par des paillettes de glace (uniquement) Ne pas augmenter le dosage en eau pour rétablir la consistance voulue
Fabrication et mise en œuvre	Limiter la température des matériels en peignant en blanc les silos, les trémies, les canalisations et le malaxeur d'une part, les matériels de transport et les parois extérieures des coffrages d'autre part Placer le malaxeur à l'ombre En cas d'impossibilité, recourir à des revêtements en toile de jute maintenus humides Limiter l'évaporation du béton non coffré en cours de prise en bétonnant au petit jour, ou pendant la nuit Exécuter rapidement la finition de surface et l'application de la cure Limiter les volumes transportés de béton et réduire les temps d'attente entre porteurs

7. Bétonnage en grande masse

Les ouvrages massifs tels que digues, barrages, bétons de substitution nécessitent bien souvent des mises en œuvre unitaires de grandes quantités de béton. Le principal problème qui se pose, dans ces conditions, est d'origine thermique ; en effet, le volume important de béton engendre un dégagement de chaleur important qui provoque à son tour une dilatation thermique de la masse, alors la surface reste relativement plus froide (notamment après décoffrage). Un phénomène de fissuration va donc se développer de manière assez intense.

Généralement, pour atténuer ces dégradations de peau du béton, l'ingénieur aura tendance :

- à réduire la chaleur d'hydratation du ciment employé par l'emploi d'additions telles que cendres volantes de houille, filler siliceux, laitier vitrifié de haut-fourneau, filler calcaire ;
- à réduire le dosage en ciment ;
- à utiliser des granulats de forte dimension maximale (D pouvant dépasser 100 mm), en veillant cependant à limiter la ségrégabilité du béton ;
- à refroidir le béton mis en œuvre par des dispositifs évacuateurs de calories (circulation d'eau froide dans des canalisations noyées dans le béton) ;
- à prévoir un béton fin pour la réalisation du parement, ce béton fin étant coulé en même temps que le béton de masse à l'aide d'une tôle de séparation comme indiqué sur la figure 14.

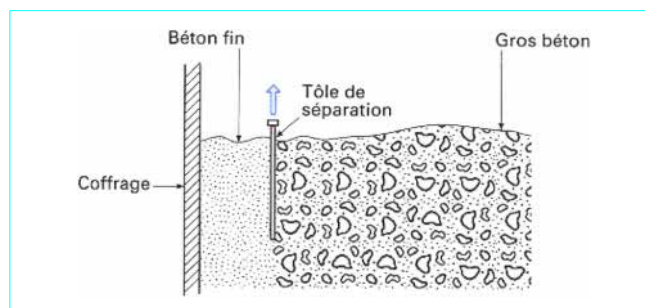


Figure 14 – Réalisations simultanées d'un parement en béton fin et du gros béton d'un ouvrage massif

8. Bétonnage de pieux de fondations

Dans le cas des pieux de fondation (article *Fondations profondes* [C 248] dans ce traité), la mise en œuvre du béton reste une opération délicate, et tout défaut risque de provoquer la ruine générale de l'appui et donc de l'ouvrage. Les techniques de mise en œuvre pouvant valablement être retenues sont les suivantes [36] :

- au tube plongeur ;
- à la pompe refoulant le béton en fond de pieu ;
- à la benne à ouverture commandée dans le cas des puits de grands diamètres et des barrettes.

8.1 Bétonnage au tube plongeur

8.1.1 Tube plongeur

Le tube plongeur est composé d'un tube et d'une trémie de remplissage en partie supérieure. Il permet de guider le déversement du béton jusqu'au fond de forage en évitant le délavage, la ségrégation, la discontinuité et la pollution de la masse de ce béton.

Le tube même doit présenter les caractéristiques suivantes :

- être constitué de plusieurs tronçons facilement démontables ;
- avoir des parois internes et externes lisses ;
- présenter un diamètre intérieur d'environ 6 fois supérieur à celui du plus gros gravillon du béton ;
- présenter un diamètre extérieur permettant de respecter une distance minimale égale à 4 fois le diamètre du plus gros gravillon du béton entre le tube et les premières armatures du pieu ;
- être crénelé à l'ouverture inférieure ;
- être muni, en tête supérieure, d'un dispositif de centrage.

La trémie est de forme tronconique avec un angle au sommet du cône compris entre 60 et 80°.

8.1.2 Positionnement du tube plongeur

Avant amorçage et bétonnage, le tube doit reposer sur le fond de forage soigneusement curé. Si le tube ne repose pas au fond, il y a risque de délavage et de pollution du premier béton : ce premier béton ne remontant pas en totalité, il vient tapisser le fond et la partie latérale du forage, nuisant ainsi au bon contact de pointe et au frottement latéral (figure 15).

Pour le bétonnage des puits de plus de 2 m de diamètre et des barrettes, il peut être nécessaire d'utiliser simultanément plusieurs tubes plongeurs : dans ce cas, la remontée du béton devra être maintenue homogène sur toute la section.

8.1.3 Amorçage

Une descente trop rapide du premier béton dans le tube plongeur provoque sa dispersion et sa ségrégation avec tous les risques de délavage et de pollution. Pour pallier cet inconvénient, un amorçage correct et comprenant les opérations suivantes doit être réalisé :

- remplissage homogène du tube plongeur ;
- chasse correcte en fond de forage.

Le bouchon-piston peut être constitué en polystyrène expansé fendu en quatre, d'un diamètre très légèrement supérieur à celui du tube (figure 16), ou en pâte pure de ciment très ferme, ou encore en mélange « élastique » de pâte pure de ciment armée de fibres métalliques ou de polypropylène. L'emploi de bouchons en papier ou en chiffon est à éviter dans toute la mesure du possible.

Pour réaliser l'amorçage, un bouchon-piston sera placé juste au sommet du tube plongeur avant le déversement du béton. Lors du déversement du béton, ce bouchon va freiner la descente du matériau et favoriser la formation d'une colonne continue et homogène qui, par effet de piston, chasse l'eau ou la boue dont elle reste cependant isolée par le bouchon-piston. À la base du tube, la chasse sera facilitée par le crénelage.

La technique d'amorçage par obturateur placé à l'extrémité inférieure du tube n'évite pas la ségrégation du béton et nécessite un tube reniflard de décompression ; de ce fait, elle n'est plus guère utilisée. Elle reste cependant possible dans le cas de pieux de faible longueur (quelques mètres).

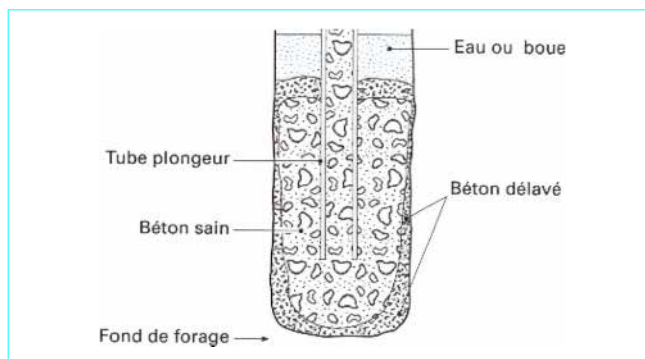


Figure 15 – Répartition du béton délavé à la suite d'un défaut d'amorçage

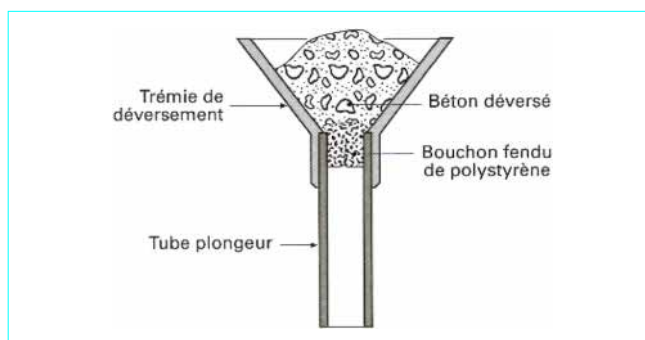


Figure 16 – Principe d'amorçage à l'aide d'un bouchon fendu de polystyrène

8.1.4 Conduite de bétonnage

L'amorçage étant fait, le béton remonte dans le forage et se met en place sous son propre poids. Si l'alimentation en béton est arrêtée, il s'établit un équilibre entre la colonne du béton à l'intérieur du tube plongeur et le béton à l'extérieur dans le forage à un niveau plus bas du fait des frottements internes. Un nouveau déversement de béton dans la trémie provoque une montée dans le forage. Mais au bout d'un certain temps, la différence de pression ne suffit plus pour permettre une remontée dans le forage. Le tube plongeur est alors remonté d'une certaine hauteur sans provoquer de désamorçage dans le tube, et l'élément supérieur de tube, sous la trémie, est retiré ; le bétonnage est ensuite repris comme auparavant. De proche en proche, il est ainsi possible de bétonner la totalité du pieu quelle que soit sa longueur.

Deux défauts principaux sont à éviter :

- le désamorçage accidentel qui entraînera des discontinuités graves dans le béton constituant le fût du pieu ;
- l'idée préconçue qui attribue à tort aux mouvements verticaux du tube la faculté de favoriser l'enrobage des armatures, qui ne dépend en fait que de la fluidité du béton.

Dans tous les cas, l'alimentation en béton est maintenue régulière et continue, la trémie de déversement devant toujours contenir du béton.

8.2 Bétonnage à la pompe

8.2.1 Matériel de pompage

Le béton est livré par camions malaxeurs et déversé dans une pompe à piston puissante (pression pouvant atteindre 120 bar) et de forte capacité (conduits de diamètre compris entre 100 et 120 mm). Cette pompe permet d'acheminer le béton vers la conduite plongeante et introduite dans le forage. La conduite plongeante est elle-même équipée de plusieurs dispositifs (figure 17) :

- une crosse favorisant la saturation de la conduite d'amenée et évitant toute inclusion d'air ;
- un obturateur verrouillable en partie supérieure et surmontable éventuellement d'une trémie de secours ;
- un tube de reprise et d'amorçage fixé lui-même à la tête de la conduite plongeante proprement dite ;
- la conduite plongeante rigide et lisse à l'intérieur et à l'extérieur (similaire au tube plongeur précédent).

8.2.2 Amorçage

Du fait de l'impossibilité d'introduire un bouchon d'amorçage au départ de la pompe, celui-ci est introduit par l'obturateur au sommet de la conduite plongeante, en dessous de l'arrivée de la crosse (phase 1).

La pompe est alors mise en route et chasse le béton vers la conduite plongeante ; ce béton chasse alors l'air contenu dans la conduite et cet air s'échappe par l'obturateur laissé ouvert (phase 2). Lorsque le béton a atteint le bouchon, l'obturateur est fermé et, le pompage se poursuivant, le béton descend dans la conduite plongeante (phase 3). La chasse de l'eau et de la boue contenues dans le forage s'effectue de la même façon qu'avec le tube plongeur traditionnel.

8.2.3 Bétonnage

Du fait des fortes pressions de pompage, le bétonnage est continu et régulier ; il n'y a donc pas nécessité de remonter la conduite plongeante ou de lui imposer des mouvements verticaux alternés et, de ce fait, il n'y a pas de risque de désamorçage.

8.3 Bétonnage à la benne à clapet

Cette technique est utilisée pour le bétonnage des barrettes et des puits de grande section. La benne à béton est munie à sa base d'un clapet de vidange dont l'ouverture peut être commandée automatiquement dès contact avec le fond de forage ou manuellement à partir de la surface. Les difficultés d'ouverture de clapet rendent délicate son utilisation et peuvent provoquer des ségrégations importantes du béton.

8.4 Achèvement du bétonnage

Lorsque le bétonnage est réalisé à l'intérieur d'un tube de travail (rôle de coffrage dans certains types de sols), il faut retirer ce tube en cours ou dès la fin du bétonnage, et dans tous les cas avant la prise du béton. Une extraction trop tardive risque d'entraîner des désordres très graves du type :

- ruptures de la masse de béton avec possibilité d'inclusions du sol ;
- déplacement des armatures en acier ;
- suppression du contact de pointe ;
- réduction des frottements latéraux ;
- arrachage du pieu.

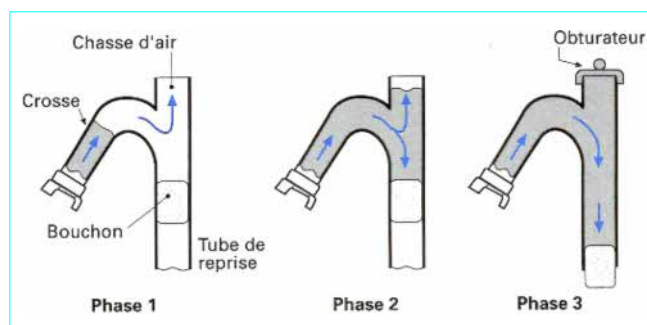


Figure 17 – Bétonnage de pieu de fondation. Amorçage à la pompe à béton

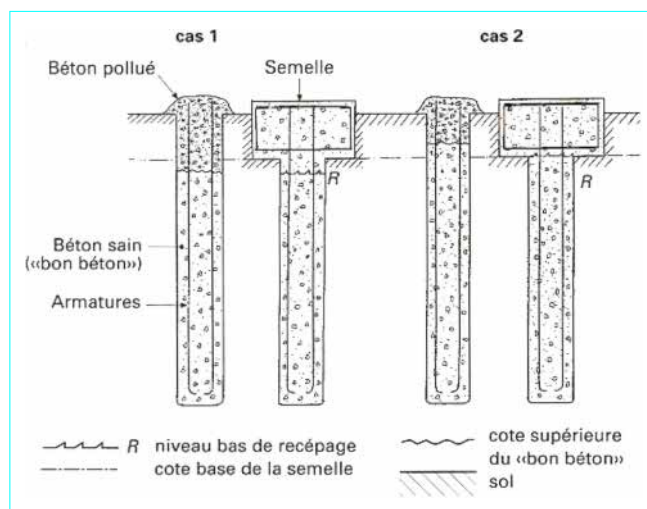


Figure 18 – Définition du niveau de recépage en fonction de la cote « bon béton »

Lors du bétonnage, le premier béton arrivant en surface est généralement pollué ou partiellement délavé malgré les précautions prises à l'amorçage ; le bétonnage est effectué jusqu'à un niveau suffisant pour s'affranchir de toute pollution sous le niveau d'arase et pour purger jusqu'à une cote supérieure ou égale à la cote de reprise suivant qu'un recépage est prévu ou non (figure 18).

Lorsque le béton aura suffisamment durci (48 à 72 h), la tête de pieu sera recépée jusqu'au niveau de béton sain.

9. Bétons pompés

Arrivé sur chantier, le béton doit être acheminé au coffrage ou au lieu de projection (cas de la projection par voie humide). Le moyen qui connaît le plus fort développement est actuellement le pompage.

9.1 Critères de formulation des bétons

Un béton réputé pompable doit présenter les caractéristiques suivantes [38] :

- ne pas engendrer d'excès de pression lors de son transfert à la pompe ;

- garder son homogénéité ;
- ne pas engendrer de ségrégation en cours de pompage.

Comme indiqué au paragraphe 1.3, le béton se comporte comme un fluide de Bingham : en conséquence, l'obtention d'une bonne pompabilité passera par la recherche d'un béton à faible viscosité apparente et à seuil de cisaillement élevé. Cette recherche permettra concrètement d'obtenir une déformabilité limitée de la colonne de béton déplacée tout en appliquant une pression la plus basse possible pour provoquer ce déplacement. Certaines règles générales sont à observer pour atteindre ce résultat :

- le béton doit présenter une teneur en éléments fins, inférieurs à 80 μm , supérieure 350 kg/m^3 ;
- le béton doit présenter une teneur en éléments fins, inférieurs à 160 μm , supérieure 420 kg/m^3 ;
- le module de finesse du sable roulé et lavé doit rester compris entre 2,3 et 2,8 ;
- ne pas utiliser un sable homométrique ;
- ne pas utiliser des sables concassés défilés, ou présentant des formes plates ou en aiguille ;
- en cas d'emploi de matériaux concassés de forme douteuse, la pompabilité peut être améliorée par l'addition de 70 à 100 kg d'un sable fin roulé par mètre cube de béton ; mais cette addition aura souvent une incidence défavorable sur l'aspect final des parements ;
- la fraction granulaire 0/4 doit être ajustée dans la composition du béton en fonction de son module de finesse et des dosages en liant équivalent (ciment et addition) ;
- le diamètre des plus gros gravillons du béton devra rester inférieur au quart du diamètre de la conduite de refoulement ;
- en l'absence d'adjuvants (plastifiant, plastifiant réducteur d'eau ou fluidifiant), la consistance du béton devra rester plastique ;
- en présence d'adjuvant (plastifiant, plastifiant réducteur d'eau ou fluidifiant) et de teneur en eau relativement basse (rapport eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,45), la consistance du béton pourra être très plastique à fluide.

Cependant, l'ensemble des paramètres influençant la pompabilité du béton étant loin d'être identifié, il est recommandé de tester celle-ci avant le démarrage du chantier lors d'une épreuve de convenance :

- un béton ne peut pas être qualifié de pompable indépendamment des conditions de mise en œuvre ;
- un béton n'est réputé non pompable pour un chantier donné que lorsque plusieurs pompes de puissances différentes ont été testées et qu'elles ont toutes conduit à des résultats défavorables dans les conditions propres à ce chantier.

9.2 Pompes à béton

Le pompage va être réalisé par des pompes de chantier montées sur remorques ou des pompes automotrices avec ou sans flèche de distribution. Trois types de matériel coexistent sur le marché :

- les pompes à piston ;
- les pompes à rotor ;
- le transport pneumatique du béton.

9.2.1 Pompe à piston

Ce type de pompe, caractérisé par ses fortes pressions de refoulement, est adapté pour les grands débits et pour les pompages sur grandes distances. Il est constitué par deux ensembles piston-cylindre à commande hydraulique travaillant en alternance, le premier ensemble aspirant une charge de béton en provenance de la trémie d'approvisionnement pendant que le second ensemble refoule sa charge, préalablement aspirée, dans le tuyau de transport (figure 19).

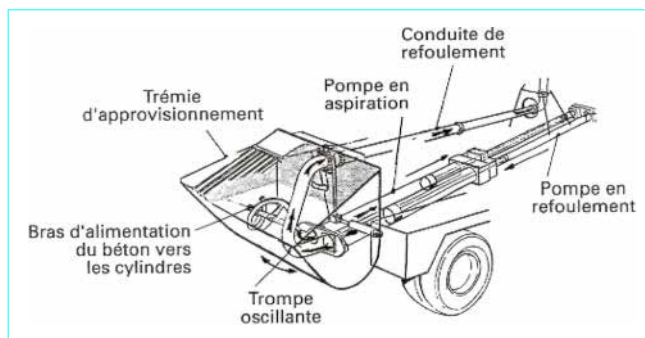


Figure 19 – Exemple de pompe à piston avec répartition par trompe oscillante

Les différentes pompes se distinguent :

- par leur fluide de commande (généralement l'huile, mais aussi l'eau) ;
- par leur dispositif de distribution d'admission ou de refoulement (clapet, tiroir, casque, trompe, etc.).

Elles se caractérisent par le diamètre du cylindre de pompe, par la course du piston et le nombre de cycles par minute. La combinaison de ces caractéristiques détermine le débit horaire maximal théorique V_m de la pompe [37] :

$$V_m = 60 \varnothing^2 L N \quad (\text{en m}^3/\text{h})$$

avec \varnothing (m) diamètre des cylindres,
 L (m) course des pistons,
 N (min^{-1}) nombre de cycles par minute,

mais ce débit théorique n'est pas suffisant pour caractériser les performances de la pompe. La pompe travaille en effet à puissance constante et son fonctionnement réel est conditionné par les pertes de charge lors de l'écoulement dans la conduite. Pratiquement, le débit maximal théorique est approché à une pression de service égale aux deux tiers de la pression normale de tarage.

La pression de service étant inversement proportionnelle à la section de la conduite de refoulement, il est possible de réduire celle-ci pour pomper plus loin ou plus haut ; de ce fait, il est plus judicieux de privilégier le recours de pompes à pression élevée plutôt qu'à débit théorique élevé.

9.2.2 Pompe à rotor

Une pompe à rotor ou à tuyau écrasé comprend essentiellement :

- une trémie pour la réception du béton ;
- un système de malaxage et d'alimentation à l'intérieur de cette trémie ;
- un tuyau souple torique constituant la conduite de pompage ;
- un rotor à galets de caoutchouc diamétralement opposés ou un ensemble de galets entraînés par deux chaînes, avec éventuellement une pompe auxiliaire pour créer la dépression dans la conduite ;
- une conduite de refoulement (figure 20).

Dans un premier temps, le béton est introduit dans la trémie de déversement puis progresse vers la conduite de pompage située en partie basse par gravité et à l'aide d'une vis d'alimentation et de malaxage. La conduite de pompage est constituée par un tuyau torique souple.

Dans une seconde phase, le béton est légèrement aspiré dans ce tuyau flexible par la dépression créée dans la chambre de pompage du fait de la mise en route du rotor.

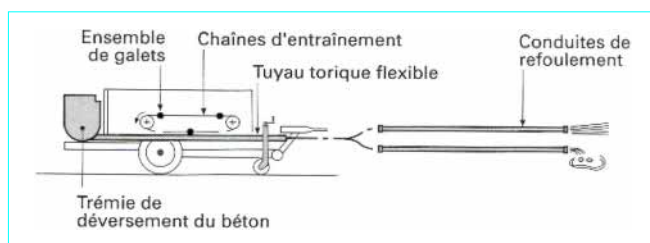


Figure 20 – Principe de la pompe à tuyau écrasé

Le béton arrivant dans le flexible est alors soumis à l'action extérieure des galets tournants qui, en comprimant le tuyau, poussent régulièrement le béton dans la conduite de refoulement.

Après avoir été écrasé, le tuyau retrouve sa forme initiale sous l'effet du vide créé par une pompe auxiliaire et aspire de nouveau le béton contenu dans la trémie.

Le débit est lié à la vitesse du rotor et au diamètre du tuyau. La pompe à rotor travaille à débit constant et faible pression (< 25 bar). Pour ne pas engendrer de pertes de charges, le tuyau flexible de pompe et la conduite de refoulement ont les mêmes diamètres ; le débit maximal de ce type de matériel n'excède pas 50 m³/h. La durée de vie du tuyau flexible reste le point faible des pompes à rotor puisqu'elle dépasse rarement 2 000 m³ de béton pompé. La pompe à rotor constitue cependant une solution économique pour les pompages courts ou de répartition.

9.2.3 Pompe pour transport pneumatique du béton

Le transport pneumatique du béton consiste à le déplacer sous la poussée d'air comprimé. Le béton est préalablement stocké dans un caisson ; après fermeture étanche de ce caisson, une pression élevée d'air est appliquée à la surface libre du béton et le déplace à travers la conduite de refoulement (figure 21).

Ce procédé de transport est discontinu, et il n'est plus guère utilisé qu'en technique de béton projeté lorsque la distance de pompage est limitée (< 50 m) et que les quantités unitaires de béton à projeter restent faibles (de l'ordre du m³). Le procédé tend cependant à être abandonné au profit des autres techniques de pompage.

9.3 Transport et distribution du béton

Comme indiqué précédemment, le transport du béton est réalisé dans les conduites de refoulement généralement constituées de tuyaux métalliques rigides et joints, de façon étanche. Pour les pompages sur très courte distance (< 20 m) et trajet horizontal, les tuyaux en caoutchouc semi-dur peuvent être tolérés, mais un essai préalable doit alors être réalisé. Dans de nombreux cas, les pompes automotrices sont équipées de flèches entièrement hydrauliques ; ces flèches, dont la longueur peut atteindre 45 m, peuvent être rabattues latéralement sans démontage.

Le cheminement du béton dans une conduite en acier est conditionné par trois paramètres :

- les frottements internes du béton qui se comporte comme un fluide binghamien ;
- le frottement du béton sur l'acier ;
- et sa déformation à chaque franchissement de coudes.

La distance équivalente D_{eq} de pompage peut être estimée par la relation empirique suivante :

$$D_{eq} = L + 5 H + 10 C_1 + 5 C_2 \quad (\text{en m})$$

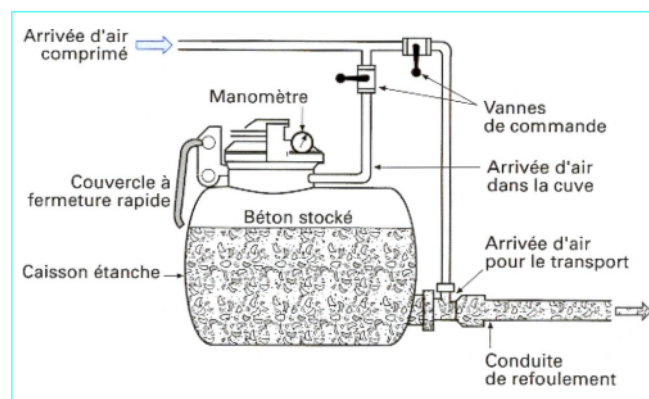


Figure 21 – Principe général du transport pneumatique du béton

- avec L distance horizontale,
 H dénivellation vers le haut,
 C_1 nombre de coudes à 90°,
 C_2 nombre de coudes à 135°.

Dans les cas courants, la distance maximale de pompage est d'environ 300 m horizontalement ou de 100 m verticalement. Au-delà de ces valeurs, des dispositions particulières doivent être envisagées, tant au niveau composition du béton qu'au niveau matériel général de pompage, pouvant aller jusqu'à l'emploi de pompes en relais.

9.4 Conduite de pompage

La position de la pompe à béton sur un chantier doit être choisie de façon à ce que sa capacité nominale soit compatible avec la distance équivalente de pompage définie comme précédemment indiqué. De plus, il est recommandé d'avoir un trajet horizontal supérieur à 5 m dès la sortie de la pompe et d'éviter, dans la mesure du possible, les transferts qui ne seraient ni verticaux ni horizontaux.

Dans le cas de pompage en descente, un ensemble de précautions particulières sont à prendre :

- pas d'utilisation de béton fluide et surdosé en eau ;
- incorporation, dans la descente, de raccords en forme de S pour éviter les désamorçages ;
- dans la mesure du possible, placer les conduites descendantes en fin de transport et les faire précéder d'une crosse ;
- éventuellement, placer une vanne à la sortie de la conduite (fermeture en cas d'arrêt de bétonnage).

Le pompage doit être amorcé par le passage d'un mélange graissant composé de coulis ou de mortier très fluide de ciment : ce mélange encore appelé **barbotine** a pour objectif la réduction des forces de frottement du béton sur les parois de la conduite de refoulement.

Pendant le pompage, les précautions suivantes doivent être appliquées :

- contrôler et assurer la régularité de consistance du béton avant déversement dans la trémie ;
- en cas de difficultés de pompage, ne jamais rajouter d'eau, ce qui ne ferait qu'accroître les difficultés ;
- maintenir la trémie de déversement en charge pour ne pas provoquer le désamorçage de la conduite de refoulement ;
- maintenir constantes les pressions de pompage dans la plage de variations donnée par le constructeur ou appréhendée lors d'une épreuve de convenance.

9.5 Incidents de pompage des bétons

Les deux incidents les plus fréquents dans le pompage sont le **désamorçage** et la **formation de bouchons**.

Il a été vu précédemment par quelles méthodes il restait possible de s'affranchir des désamorçages. La montée en pression ne constitue pas une bonne solution pour pallier un désamorçage, et très souvent le seul recours sera la purge de la conduite et le démarrage d'un nouveau pompage.

La formation de bouchon en cours de pompage provient souvent de l'emploi d'un béton ou trop riche en eau, ou trop sec, ou trop chaud ; parfois il peut être la conséquence d'un arrêt de bétonnage ou d'un désamorçage mal maîtrisé. Sa position peut être estimée par la vitesse de montée de la pression (détectable au manomètre) :

- montée rapide de la pression : bouchon dans la pompe ;
- montée lente : bouchon dans la conduite ou à son extrémité.

Mais dans la pratique, l'attention de l'opérateur n'est guère attirée par une montée lente.

10. Bétons projetés

Le béton projeté est un béton mis en œuvre par refoulement dans une conduite et projeté sur une paroi par un jet d'air comprimé. Le terme de gunité jadis employé pour désigner indistinctement le béton ou le mortier projeté est désormais à proscrire. Le béton projeté est employé dans les structures lorsque le moulage du béton devient une opération impossible ou délicate et notamment dans les cas suivants :

- remplissage de cavités (regarnissage de zones de bétons dégradés, réenrobage d'armatures après dégarnissage) ;
- rejointoiement de maçonneries ;
- exécution de couche superficielle de protection ;
- augmentation de la section résistante de béton ;
- enrobage d'armatures nouvelles pour renforcement de structure ;
- exécution d'éléments porteurs tels que les contrevoutes portantes et les soutènements divers (tunnels, galeries et murs).

10.1 Procédés de projection

Les procédés de projection varient suivant l'instant et le mode d'incorporation de l'eau du béton :

- projection par voie sèche avec et sans prémouillage ;
- projection par voie humide avec flux dense ou dilué.

10.1.1 Projection par voie sèche

La projection par voie sèche est surtout utilisée :

- pour les chantiers intermittents ou ne nécessitant que des quantités unitaires de béton assez restreintes ;
- pour des chantiers d'accès très difficile ;
- pour des chantiers où la distance de transport entre la machine de projection et la lance est supérieure à une centaine de mètres (longueur horizontale et sans coude).

Dans le cas de béton projeté par voie sèche, la fabrication du béton est spécifique à la technique ; les constituants dosés au stade du pré-mélange sont le ciment, les granulats, les ajouts (fibres par exemple) et adjuvants éventuels (accélérateur de prise par exemple) [41]. Les granulats utilisés doivent être les plus secs possible, en veillant cependant à ce que leur saturation soit au moins

assurée (un granulat est dit saturé lorsque sa teneur en eau totale est égale à son absorption capillaire) ; cette précaution permet de s'affranchir de certains blocages dans le transport et limite très sérieusement les émissions de poussières (figure 22).

L'ensemble malaxé sans eau ajoutée est envoyé dans une trémie munie d'une grille d'entrée à barreaux dans le cas d'emploi de fibres.

Le matériau tombe alors dans les alvéoles d'un rotor vertical et par lesquelles il est acheminé vers l'orifice de la conduite de refoulement.

Deux flux d'air comprimé chassent alors le matériau à travers la conduite de refoulement.

La lance de projection est fixée à l'extrémité de cette conduite ; l'eau est admise à la lance avec un débit réglé. Dans le cas de prémouillage, une distribution annulaire de l'eau est ajoutée entre 1 et 3 m en amont de la lance : le prémouillage permet souvent d'obtenir une amélioration de l'homogénéité du mélange et une réduction des poussières sur le site de projection, améliorant ainsi la visibilité du projeteur.

Dans le cas d'emploi de raidisseurs (silicates, par exemple), les doseurs de raidisseurs en poudre sont installés en amont du mélangeur, et les doseurs de raidisseurs liquides sont branchés sur le circuit de l'eau de mouillage au niveau de la lance.

Suivant la cadence de projection et la section des conduites, le débit d'air peut varier entre 7 et 25 m³/min.

10.1.2 Projection par voie humide

La projection par voie humide est plutôt réservée pour les chantiers à haut rendement ou pour les galeries étroites où des problèmes de sécurité (poussières) doivent être pris en compte.

La fabrication du béton est identique à celle d'un béton traditionnel destiné à être pompé.

Dans le cas de projection par flux dense (figure 23), le béton est réceptionné dans une trémie, puis pompé à travers la conduite jusqu'à la lance de projection. Au niveau de cette lance, l'arrivée d'air comprimé accélère le mouvement du mélange pour la projection. C'est également à ce niveau qu'est introduit le raidisseur éventuel.

Dans le cas de flux dilué, le béton est introduit dans une machine à transport pneumatique d'où il est chassé par air comprimé dans la conduite vers la lance (figure 24). La lance est équipée pour recevoir les ajouts d'adjuvants tels que les accélérateurs ou les raidisseurs et une injection d'air comprimé nécessaire à la projection.

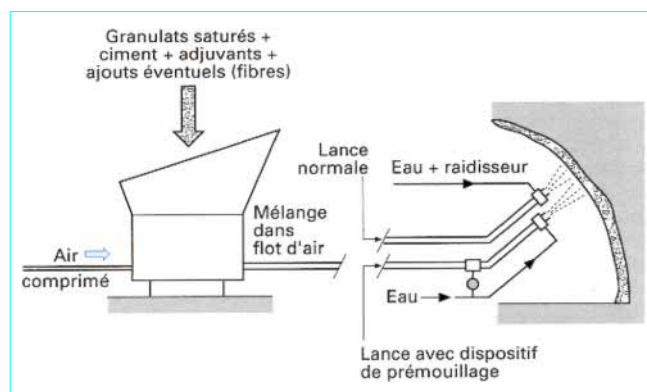


Figure 22 – Projection par voie sèche

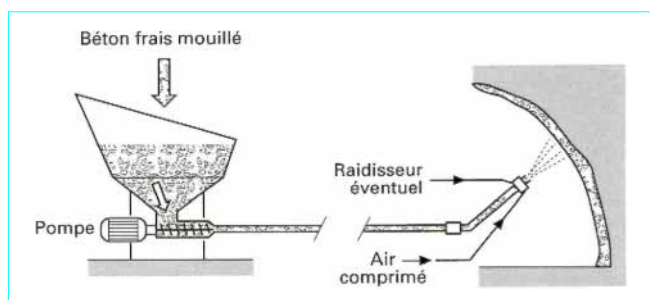


Figure 23 – Projection par voie mouillée à flux dense

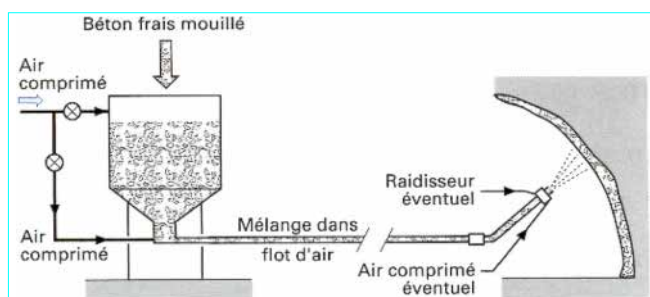


Figure 24 – Projection par voie mouillée à flux dilué

Tableau 44 – Dosage en ciment à la fabrication des bétons projetés en fonction de leur destination et de la teneur en ciment du béton en place

Destination du béton projeté	Teneur en ciment du béton en place ⁽¹⁾ (kg/m ³)	Dosage en ciment du mélange (kg/m ³)	
		Voie sèche	Voie humide
Mortier de rejointoiement de maçonnerie	500	400	500
Réparation de surface	350	280	350
Réparation de structure Renforcement de structure	450	360	450

(1) La valeur indiquée est une valeur moyenne du ciment actif (équivalent en clinker) pour toute l'épaisseur de la couche projetée (> 2 cm)

de retardateurs (transports de longue distance entre la centrale de fabrication et le chantier) et de raidisseurs en sortie de lances de projection. Tous les adjuvants utilisés devront rester compatibles entre eux dans les conditions propres à chaque chantier.

Dans certains cas particuliers de réparation, voire de renforcement, l'incorporation de fibres métalliques ou plastiques apporteront au béton projeté des caractéristiques accrues en résistance en traction, à la déformation en flexion, à la résistance aux chocs et à l'abrasion, et à des effets du retrait plus limités. À cet effet, il conviendra de s'assurer de l'innocuité des adjuvants sur les fibres.

10.2 Composants. Formulation du béton

L'Association française des travaux en souterrains (AFTES) a émis un certain nombre de recommandations sur les matériaux et les compositions de bétons à retenir dans les différentes techniques de béton projeté [41].

En matière de granulats, il est recommandé de ne pas dépasser le diamètre maximal de 10 mm pour le plus gros gravillon : au-delà, les éléments font totalement partie des pertes par rebond lors de la projection.

Du point de vue forme, il est souhaitable de ne pas utiliser de granulats plats (coefficient d'aplatissement < 25 % pour les gravillons).

Comme déjà signalé pour les bétons projetés par voie sèche, la teneur en eau des granulats doit rester homogène et faible (< 7 %), mais supérieure à leur absorption capillaire. Dans le cas de bétons projetés par voie humide, il n'existe pas de restrictions particulières par rapport à celles requises pour les bétons traditionnels destinés à être pompés. Le dosage en sable S (éléments minéraux inférieurs à 4 mm) doit être suffisamment élevé pour que les rapports du sable 0/4 à l'ensemble des granulats (sable S + gravillons G) respecte les prescriptions suivantes :

- projection par voie humide : $0,70 < S/S + G < 0,90$;
- projection par voie sèche : $0,60 < S/S + G < 0,80$.

Les ciments employés doivent tenir compte de l'environnement (norme P 18-011) dans lequel est placé l'ouvrage et être conformes à la norme NF P 15-301. Les dosages conseillés (tableau 44) dépendent de la destination des bétons projetés et des teneurs en ciment souhaitées pour le béton en place.

Les divers adjuvants employés doivent bénéficier du droit d'usage de la marque NF-Adjuvants. En projection par voie sèche, les adjuvants utilisés sont généralement des accélérateurs de prise. En voie humide, plusieurs types d'adjuvants peuvent être incorporés : suivant les conditions il peut s'agir de plastifiants, de fluidifiants, parfois

10.3 Mise en œuvre

10.3.1 Préparation des supports

Avant toute projection, la qualité du support doit être vérifiée :

— dans le cas de **réparations d'ouvrages en béton**, il faut tout d'abord remédier aux causes des désordres et éliminer tous les matériaux dégradés en veillant à maintenir la stabilité de la structure existante. Les surfaces à traiter sont soufflées par l'intermédiaire d'un jet de fluide ou de sable puis humidifiées légèrement avant projection ;

— pour les **réparations de joints de maçonneries**, les joints en bon état ou superficiellement altérés (moins de 3 cm à partir de la surface) peuvent être laissés tels quels, les autres sont repiqués jusqu'au matériau sain, sans épauper les arêtes ni compromettre la stabilité de la zone traitée ;

— pour les **réparations de parements de maçonneries**, après élimination de la végétation, les parties friables des moellons et des joints sont repiquées, puis l'ensemble reçoit un sablage avec prise en compte de la friabilité des matériaux. Les venues d'eau sont colmatées et les systèmes de drainage implantés. Ensuite le parement est humidifié avant projection.

10.3.2 Projection du béton

La projection est réalisée avec la lance dirigée perpendiculairement à la paroi à traiter, en cherchant à obtenir la couche la plus homogène et la plus compacte possible et à limiter au maximum les pertes par rebond. La projection vers le bas donne de mauvais résultats sur les caractéristiques du béton en place.

La distance entre la lance et la paroi varie entre 0,50 m et 1,50 m et reste fonction de la vitesse de projection (elle-même liée à la pression de refoulement et à la longueur des conduites).

L'épaisseur maximale d'une couche doit rester inférieure à 10 cm dans tous les cas.

À la fin de la projection, il est nécessaire d'appliquer une cure pour éviter toute dessiccation de surface. Les méthodes à employer sont identiques à celles utilisées pour les bétons traditionnels.

10.4 Avantages et inconvénients des divers procédés

Chaque méthode présente, bien entendu, des avantages et des inconvénients récapitulés dans le tableau 45.

Tableau 45 – Avantages et inconvénients des divers procédés		
	Projection par voie sèche	Projection par voie humide
Avantages	Compacité élevée Bonne adhérence au support Caractéristiques mécaniques élevées	Teneur en eau maîtrisée Proportion en raidisseur maîtrisée Pertes par rebond assez limitées
Inconvénients	Mélange difficile à homogénéiser Mauvaise maîtrise de la teneur en eau du béton Pertes par rebonds élevées Forte production de poussières sans précaution particulière Projection vers le bas déconseillée car elle entraîne des manques de bétons et des nids de cailloux Abrasion forte des conduites	Distance horizontale de transport plus faible que par voie sèche : — maximum 100 m à flux dilué — maximum 150 m à flux dense Caractéristiques mécaniques moins élevées Adhérence moins bonne que celle obtenue par voie sèche Pénétration délicate derrière les armatures En rejointoiement, pénétration plus limitée

10.5 Contrôle des bétons projetés

Pour le contrôle des bétons projetés, trois paramètres doivent être analysés :

- les caractéristiques propres du matériau une fois projeté ;
- son adhérence au support et éventuellement l'adhérence des différentes couches entre elles ;
- l'homogénéité du matériau.

Les **caractéristiques propres du matériau** une fois projeté sont déterminées sur des échantillons carottés dans le matériau projeté lors de la mise en œuvre dans des bacs spécialement destinés au prélèvement.

Les essais réalisés portent généralement sur la masse volumique apparente et sur la résistance à la rupture en compression simple à 7, 28 jours d'âge ou à d'autres âges prédéterminés.

Dans le cas où la connaissance de la résistance à la rupture en traction est nécessaire, un essai de traction par fendage sera réalisé sur carottes de 6 cm de diamètre avec un élanement de 1,7. Dans certains cas, il peut être utile d'effectuer une analyse de béton frais sur matériau directement prélevé sur le support : l'attention est attirée sur la dispersion des résultats du fait des conditions opératoires de l'essai d'une part, et des variations de la composition du béton dans une même couche d'autre part.

L'**adhérence** du béton sur son support et, le cas échéant, l'adhérence entre couches peuvent être appréciées par un essai *in situ* consistant en un arrachement en traction d'une carotte prédécoupée dans le revêtement et le support.

L'**homogénéité du matériau** en place peut être contrôlée pour s'assurer de l'absence de vides entre le support et le béton projeté d'une part, et dans la masse du béton projeté d'autre part. La méthode d'essai non destructive et la plus courante reste l'auscultation sonique avec analyse plus fine à l'oscilloscope. Il peut également être utile de mesurer les épaisseurs de béton projeté par implantation préalable de repères sur le support.

11. Mise en place des bétons sous l'eau

Il est très fréquemment constaté des décohésions de matériau lors du bétonnage sous l'eau avec un béton formulé et fabriqué de façon traditionnelle ; il se produit une séparation du mortier et des gravillons et un lessivage de la laitance. Cependant, le recours au bétonnage sous l'eau est incontournable pour tous les travaux maritimes et hydrauliques (construction ou renforcement de fondations immergées, d'assises pour superstructures, de digues, de canaux...). L'addition de colloïde actif permet de limiter très sensiblement ces problèmes de décohésion.

11.1 Béton immergé traditionnel

Pour limiter le délavage d'un béton coulé sous l'eau, certaines règles doivent être adoptées dans le choix des constituants et la composition du béton. L'ouvrabilité du matériau devra être privilégiée pour conduire à la meilleure compacité en place par simple serrage gravitaire.

S'il est nécessaire de disposer au minimum de 425 kg de fines inférieures à 80 µm par mètre cube de béton en place pour assurer la bonne tenue du matériau frais, les conditions d'environnement de l'ouvrage doivent également être prises en compte pour les choix et dosages du ciment (tableau 46).

Les additions d'éléments fins nécessaires pour atteindre la quantité minimale de 425 kg/m³ peuvent être d'origines diverses : laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau, cendres volantes de houille, additions calcaires, fumées de silice ou fillers siliceux. En général, il conviendra de retenir les additions qui améliorent l'ouvrabilité du béton. Dans le cas où ces additions bénéficient du droit d'usage de la marque NF, elles pourront, suivant la norme P 18-305, être partiellement prises en compte avec le ciment sous l'appellation de liant équivalent.

Au niveau des sables, il est conseillé d'utiliser un sable roulé présentant une granulométrie continue dont le module de finesse est compris entre 2,3 et 2,7.

Pour les gravillons, le diamètre des plus gros éléments sera inférieur à 40 mm, et leur dosage sera tel que le rapport sable/gravillon (S/G) soit compris entre 0,85 et 0,95.

Du point de vue adjuvantation, **deux types d'adjuvants** pourront être utilisés :

- les plastifiants réducteurs d'eau, pour obtenir des bétons très plastiques (affaissement au cône d'Abrams de l'ordre de 15 cm au coulage) tout en travaillant avec des rapports E/C ne dépassant pas 0,50 à 0,55 (C étant la quantité de ciment ou de liant équivalent) suivant les conditions d'environnement de l'ouvrage (tableau 47) ;
- un retardateur de prise permettant au béton de conserver sa plasticité et son bon écoulement lors de la formation du bulbe sous l'eau, jusqu'à remplissage complet du moule.

Tableau 46 – Influence des conditions d’environnement sur le choix et le dosage en ciment des bétons immergés

Environnement		Ciment			
Classe	Descriptif	Nature	Dosage (kg/m ³)		
			Béton non armé	Béton armé	Béton précontraint
2 a	Humide sans gel ou avec gel faible (1) Parties en contact avec de l’eau		200	280	300
2 b 1	Humide avec gel modéré (2) Parties en contact avec de l’eau		240	280	300
2 b 2	Humide avec gel sévère (3) Parties en contact avec de l’eau		300	310	315
4 a 1	Éléments complètement et en permanence immergés dans l’eau de mer	PM (4)	330	330	330
4 a 2 4 b	Éléments partiellement immergés dans l’eau de mer ou éclaboussés par celle-ci	PM (4)	350	350	350

(1) Gel faible : pas plus de 2 jours (5) ayant atteint une température inférieure à – 5 °C.

(2) Gel modéré : entre gel faible et gel sévère.

(3) Gel sévère : plus de 10 jours (5) ayant atteint une température inférieure à – 10 °C.

(4) PM : prise mer.

(5) Durées moyennes annuelles sur les 30 dernières années.

Tableau 47 – Rapport E/C en fonction des conditions d’environnement

Classes d’environnement (1)		E/C
2 a	Humide sans gel ou avec gel faible Parties en contact avec de l’eau	0,55 (2)
2 b 1	Humide avec gel modéré Parties en contact avec de l’eau	0,55
2 b 2	Humide avec gel sévère Parties en contact avec de l’eau	0,55
4 a 1	Éléments complètement et en permanence immergés dans l’eau de mer	0,55
4 a 2	Éléments partiellement immergés dans l’eau de mer ou éclaboussés par celle-ci, sans gel ou avec gel faible	0,50
4 b	Éléments partiellement immergés dans l’eau de mer ou éclaboussés par celle-ci, avec gel sévère ou modéré	0,50

(1) Pour la définition des gels, se reporter au tableau 46

(2) Valeur plus stricte que celle préconisée par la norme P 18-305 du fait du coulage sous l’eau

Il existe principalement **deux méthodes** pour couler le béton sous l’eau :

— la méthode ancienne, quasi inutilisée de nos jours, consistait à descendre le béton dans une benne qui était ouverte dans l’eau au niveau de la couche à bétonner. Cette méthode, très pénalisante du point de vue décohérence du béton, nécessitait des dosages en ciment et éléments fins très élevés (au moins 450 kg par m³ de béton) et ne conduisait que rarement à de bons résultats en place : béton hétérogène et peu compact ;

— la méthode à la goulotte, désormais généralisée, se rapproche de celle utilisée pour le coulage du béton des fondations profondes. La goulotte utilisée est constituée en partie supérieure par une trémie de remplissage, puis par un ou plusieurs tubes rigides et lisses à l’intérieur (diamètre intérieur d’environ 6 fois celui du plus gros

granulat) et de faible longueur (environ 3 m), et un tube de reprise de bétonnage et d’amorçage (dispositif permettant d’évacuer l’air emprisonné sous le bouchon lors de l’amorçage). Par tube plongeur, il est recommandé de ne pas dépasser des surfaces de bétonnage de 28 m² en caisson rectangulaire et de 14 m² en caisson circulaire.

Pour effectuer le bétonnage, la base de la goulotte est descendue au fond de l’eau. Un bouchon (en polystyrène, en mousse, ou en fibres de polypropylène) est placé à la base de la trémie fixée au sommet du tube plongeur. Le rôle de ce bouchon est de freiner la descente du premier béton, de créer un effet de chasse, et de générer un débit homogène et continu de béton. À partir du moment où le bétonnage est commencé, l’alimentation doit rester continue pour assurer le maintien d’un bulbe de béton autour de la goulotte qui augmente constamment jusqu’à remplir le moule en chassant l’eau. Ainsi, seule la partie superficielle du bulbe subit l’action de l’eau et, ainsi, seule la partie supérieure de la pièce aura été affectée par le délavage : ce délavage pourra être recépé après durcissement du béton.

11.2 Béton extrudé derrière un bouclier

Dans les travaux de galeries et en présence de fortes venues d’eau ne pouvant pas être captées et évacuées par les voies simples et traditionnelles, il est recommandé de travailler avec des boucliers à pression de boue. Le béton pompé sous pression est alors extrudé à travers le coffrage dans l’espace situé derrière le bouclier. Le béton utilisé devra présenter des propriétés rhéologiques particulières :

- une bonne pompabilité ;
- une tenue vis-à-vis de la ségrégabilité et du délavage ;
- un bon maintien de sa fluidité pendant toute la durée du bétonnage.

Ces exigences conduisent à utiliser des compositions particulières de béton où :

- le dosage en sable sera assez élevé (un rapport S/S + G compris entre 0,50 et 0,55) ;
- des teneurs en éléments fins comprises entre 480 et 500 kg de fines, avec des teneurs minimales en ciment correspondant aux classes 2a et 4a1 du tableau 46 ;

- l'emploi d'un fluidifiant pour obtenir un rapport E/C le plus faible possible ($< 0,55$) ;
- l'emploi d'un retardateur de prise pour assurer le maintien de la fluidité pendant tout le coulage.

11.3 Bétonnage avec addition d'un colloïde actif

Le béton coulé sous l'eau doit présenter une capacité à retenir l'eau et un seuil de cisaillement élevé (fluide de Bingham). L'incorporation de colloïde actif permet d'obtenir un béton gras et collant, plus facile à pomper qu'un béton ordinaire et présentant un retard sensible de prise. Le serrage du béton avec addition de colloïde actif (encore dénommé **hydrobéton**) peut se réaliser sans vibration. Cependant, ce béton nécessite une précaution particulière à la fabrication : l'additif colloïde doit être introduit dans un béton déjà dosé en eau et pré-malaxé.

Il existe deux types d'hydrobétons :

- l'hydrobéton de type étanche pour lequel la structure même du béton empêche l'eau de pénétrer par capillarité ;
- l'hydrobéton de type perméable pour lequel la structure caverneuse permet de drainer les eaux tout en résistant au délavage.

12. Essorage du béton par le vide (*vacuum concrete*)

Le but de l'essorage par le vide est de retirer l'excédent d'eau dont le béton a besoin pour être transporté, coulé et travaillé, mais qui non seulement n'est pas nécessaire pour assurer les réactions d'hydratation de la prise du béton, mais encore génère une porosité matricielle qui empêche le bon développement des caractéristiques de résistance mécanique et de durabilité du béton.

12.1 Principes de l'essorage

L'eau excédentaire est expulsée en provoquant une dépression à l'intérieur du béton de sorte que la pression atmosphérique agisse à la surface du béton. Cette dépression est obtenue en posant sur le béton frais un tapis d'aspiration qui est relié à une pompe à vide.

L'air intermédiaire étant retiré par aspiration, la pression atmosphérique agit sur la surface du béton.

Si la pression d'air dans l'espace intermédiaire et la partie supérieure du béton est réduite à 20 % de la pression atmosphérique, le béton est soumis à une pression de 0,08 MPa. La dépression est encore plus marquée vers le fond. Sous l'influence de la pression atmosphérique, l'eau est alors expulsée du béton. Après un essorage d'environ 30 min, le rapport eau/ciment est réduit à la valeur moyenne de 0,30 dans la partie supérieure de la dalle et le béton devient si dur qu'il est possible de marcher dessus. Le retrait du béton essoré par le vide est également réduit de 50 %.

12.2 Matériel

Le tapis est constitué par une chambre à air formée par la superposition d'un élément filtrant (une étamine en nylon) et d'un grillage (treillis plastique ou métallique) par-dessus d'une part, et par une membrane étanche (surtapis) d'autre part. Le tapis est mis en contact avec le béton par sa face filtrante et l'étanchéité sur les bords de la dalle en béton est quasi assurée par le tapis ; l'expérience montre par ailleurs que l'air pénétrant par le pourtour du tapis ne diminue pas sensiblement l'essorage.

À ce tapis d'aspiration est évidemment adjoint un ensemble de matériels :

- une pompe à vide automatique pouvant être reliée à un ou plusieurs tapis aspirants ;
- un dispositif de glissières et de règles vibrantes ;
- une ou plusieurs truelles mécaniques (plus communément appelées « hélicoptères ») pour le talochage et le lissage (pour le lissage, la truelle est équipée de pales).

Les tapis filtrants doivent être lavés après usage, et les autres matériels nécessitent des entretiens spécifiques courants.

12.3 Méthode *in situ*

La dalle de béton est coulée de façon traditionnelle, et sa mise en place est réalisée avec les règles vibrantes. Dès la fin du serrage du béton, le tapis est posé sur la surface du béton à essorer en veillant au bon recouvrement de la périphérie de la pièce à essorer. Le tapis est relié à la pompe d'aspiration (pression de l'ordre de 0,08 MPa). L'essorage atteint son optimum au bout de 20 min dans le cas où la dalle atteint 0,2 m d'épaisseur ; la quantité d'eau évacuée peut alors varier de 6 à 10 L par mètre carré de ce type de dalle.

Après essorage, la dalle subit un talochage pour aplanir la surface qui peut également recevoir un lissage de finition, puis, si les conditions d'environnement le nécessitent, l'application d'un produit de cure.

12.4 Amélioration des caractéristiques du béton

Les avantages découlant de l'essorage par le vide sont multiples :

- l'essorage du béton provoque un accroissement des teneurs en ciment dans le béton en place et entraîne, par conséquent, de meilleures caractéristiques mécaniques pour le béton. Les durées de coffrage peuvent donc être réduites et, ainsi, les délais de construction sont écourtés. La dalle est carrossable dans les 24 à 48 h après coulage et la qualité du matériau en place est sensiblement améliorée puisque les résistances finales sont accrues de 30 à 60 % ;
- au niveau du retrait, une diminution de 50 à 75 % permet une diminution de fissuration dans les mêmes conditions climatiques extrêmes et un plus grand espacement des joints pour dallages industriels ;
- au niveau de la surface du béton, des améliorations très sensibles de la résistance à l'usure et de la planéité sont constatées, et la surface exempte de laitance autorise la pose directe de revêtements sans préparation spéciale ;
- une augmentation de l'imperméabilité et de la résistance au gel et aux sels de déverglaçage.

12.5 Contrôle du béton

Le problème de l'estimation de la résistance mécanique du béton en place est délicat à solutionner du fait des incertitudes quant à la représentativité des éprouvettes. La solution la moins défavorable consiste actuellement à procéder à une auscultation dynamique par mesure du temps de propagation du son en surface ou à un carottage ; la maturométrie avec étalonnage préalable sur béton témoin peut constituer une solution d'avenir intéressante et pratique.

13. Traitements de surface des parements en béton

13.1 Possibilités générales de traitements

La diversité des fonctions demandées au béton (résistance mécanique, forme, couleur, étanchéité, durabilité, protection contre la corrosion des armatures et facilité d'entretien) a conduit les concepteurs à développer tout un ensemble de procédés de traitement de surface des parements et parois réalisés en béton. Ainsi, au travers de toutes ces méthodes, il est loisible de favoriser une ou plusieurs fonctions selon les conditions d'environnement ou d'utilisation de l'ouvrage. À cet effet, trois grandes voies peuvent être prospectées par le projeteur [42] :

- utilisation directe des surfaces brutes de démoulage ;
- modification de l'aspect des surfaces brutes de démoulage ;
- apport d'un revêtement sur une paroi en béton pour conférer à l'ensemble réalisé une fonction définie.

13.2 Béton à surface brute de démoulage

Pour l'utilisation des surfaces brutes de démoulage et devant présenter une uniformité de teinte, de texture et des formes simples, on se reportera opportunément au paragraphe 2 pour définir le type de parement souhaitable.

Pour la recherche d'effets particuliers, il est possible d'avoir recours à d'autres techniques spécifiques :

- les produits polychromes, qui sont des mélanges aléatoires de bétons de couleurs différentes donnent des effets marbrés de taille variable ;
- les surfaces veinées obtenues par injection de coulis ou de mortier coloré sur un lit de béton frais de couleur différente ou éventuellement sur des composants en béton fraîchement démoulés ; cette technique permet de reproduire les effets des flammes sur la terre cuite ;
- les traitements d'aspect par moulage permettent de reproduire tous les types de formes, de reliefs ou de textures au moyen de moules, de revêtements de moules spéciaux ou de matrices en élastomères.

13.3 Béton à surface modifiée après décoffrage

Pour la modification de l'aspect d'un parement après décoffrage, il existe plusieurs méthodes selon que la modification sera réalisée sur le béton frais, le béton jeune ou le béton durci.

13.3.1 Intervention sur béton frais

Les méthodes d'intervention sur béton frais, essentiellement utilisées sur des parois horizontales, sont généralement les suivantes :

- le **dressage** consistant à niveler la surface du béton peut être assuré à l'aide de règles simples ou vibrantes tirées en général manuellement ;
- le **talochage** réalisé après le dressage appelle le mortier en surface ; il peut être réalisé à l'aide de taloches manuelles en bois ou en plastique, de taloches vibrantes ou circulaires pneumatiques ;

- le **feutrage** ou talochage fin obtenu par le frottement léger de brosses à poils très souples, de tampons en chiffons ou de plaques de polystyrène ;

- le **lissage** et le **glaçage** par l'action de truelles métalliques ;
- le **brossage** permettant de créer une macrorugosité et réalisé à l'aide de brosses à poils durs ;

- le **profilage, striage ou crantage** peut être obtenu à l'aide de râtaux, de peignes, de règles lisses ou à dents et permet d'obtenir des empreintes régulièrement espacées dans une direction ;

- l'**impression** réalisée à partir de rouleaux spécifiques permet de reproduire des dessins géométriques simples, en général dans deux directions ;

- la **sculpture** à l'état frais de certains bétons et mortiers spéciaux avec des rouleaux vibrants garnis de matrices adaptées (métal ou élastomère) permet d'imiter les pavages ou empierrements ;

- les techniques comme la **pose de granulats sur lits de sable** avant bétonnage ou sur béton frais compacté et lissé, l'application d'une **couche de mortier** relativement sec suivie d'un retrait des éléments fins ou l'emploi de **béton injecté** permettent l'obtention de granulats apparents en parements, mais la qualité des résultats obtenus reste très variable selon les conditions particulières de réalisation et très souvent le travail de lavage ou de décapage de béton jeune est préféré.

13.3.2 Interventions sur béton jeune

Les travaux sur béton jeune sont utilisés pour l'obtention de parements à granulats apparents, mais d'autres effets ou fonctions peuvent être recherchés, tels que le débullage et les ragréages en restauration de la texture ou de la forme des surfaces. Les différentes techniques disponibles sont les suivantes :

- le **lavage** du parement à l'eau sous pression sur **béton jeune** (méthode manuelle ou automatique) permet d'obtenir un aspect à granulats plus ou moins apparents ;

- le **lavage** du parement à l'eau sur **béton jeune à peau retardée** conduit aux mêmes résultats mais reste une technique plus souple et plus sûre que précédemment ; le retard peut être provoqué par des produits retardateurs enduisables, pulvérisables ou par l'application de papiers retardateurs dont la couleur indique la profondeur d'action (tableau 48) ;

- le **décapage** du parement à l'acide dilué suivi d'une neutralisation est une technique provoquant les mêmes effets ; il peut être réalisé par trempage, par brossage ou pulvérisation, ou par application d'un gel décapant. Il est déconseillé pour des bétons trop fluides à fort rapport E/C ou mal serrés, et pour des bétons à granulats calcaires ou schisteux. Moyennant ces précautions, l'aspect final est particulièrement intéressant du fait de la mise en valeur des couleurs des granulats et de la suppression des voiles blancs d'efflorescences ;

- le **sablage** par projection d'abrasif sur la surface de béton provoque un décapage par érosion ; suivant son intensité, il peut conduire de la simple élimination de laitance au dégagement des gravillons sur 3 à 4 mm de profondeur, mais à cet effet la surface des gravillons subit également une usure. Le sablage présente l'inconvénient d'accentuer ou de révéler les défauts d'aspect tels que pommelages, fissures, fuite de laitance et bullage ;

- le **ragréage** est plutôt une technique de réparation permettant de pallier les inconvénients des épaufrures, écornures ou autres fractures ; cette technique, couramment utilisée, conduit très souvent à des résultats médiocres sur l'aspect des parements et nécessite l'application d'un revêtement ;

- le **débullage** est une technique visant à réduire les bullages de surface, notamment dans le cas où le parement est destiné à recevoir une peinture.

Tableau 48 – Profondeur d'action des papiers retardateurs

Couleur du papier	Profondeur d'action (mm)
Gris	< 2
Jaune	1 à 3
Bleu	2 à 4
Vert	3 à 5
Rouge	5 à 8

13.3.3 Interventions sur béton durci

Pour les travaux sur béton durci, certaines techniques sur béton jeune (décapage, ragréage et débullage) peuvent encore être utilisées, mais conduisent à des résultats moins bons. D'autres possibilités d'intervention sur béton durci sont offertes pour rechercher des effets particuliers au niveau des parements :

- le **grenailage** qui provoque une érosion de la surface résultant des impacts de grains durs (métalliques, non métalliques ou abrasifs) sur les constituants du béton. En général, le grenailage est réalisé dans des machines à turbines et à tapis sans fin, mais il est possible de rencontrer également des machines à tables rotatives, à charges suspendues rotatives, des cabines à jets libres et même des grenailleuses mobiles ;
- le **bouchardage** (piquetage, ciselage) permet d'obtenir, à l'aide d'aiguilles ou de pointes, des éclatements profonds de 1 à 8 mm à la surface du béton. Le bouchardage n'est pas autorisé sur les éléments en béton précontraint ou en béton armé fortement sollicité ;
- le **layage** est une technique très proche de la précédente mais permet d'obtenir des éclatements sous forme de rayures grossières ; le layage est réalisé à l'aide de molettes ou d'outils à arêtes rectilignes ;
- les **rainurages** longitudinaux ou transversaux des couches de roulement sur chaussées, et parfois sur parements verticaux sont réalisés par sciage ;
- le **sablage** sous très forte pression ;
- le **grésage** permet de dresser la surface du béton. L'aspect grésé convient surtout pour les granulats de teinte claire. En général il constitue un dégrossissage précédant le polissage ;
- le **polissage**, parfois précédé par des opérations de débullage, ponçage ou grésage, est réalisé à l'aide de meule à grains très fins à pierres tendres ou à feutres ; le « poli mat » obtenu par quatre passes de meules est à distinguer du « poli brillant ou marbrier » obtenu après six passes de meule, imprégnation et protection par film à base de résine ;
- le **fendage** ou **clivage** provoque des ruptures du béton selon des plans définis en faisant apparaître la structure interne du béton ;
- le **flamitage** ou **décapage au chalumeau** provoque l'éclatement superficiel du béton durci et laisse apparaître la structure du matériau.

13.4 Béton à surface revêtue

Nota : on se reportera à la rubrique Maçonnerie du présent traité.

Dans ce cas, le béton coulé ne constitue plus un parement mais une simple paroi servant de support à un revêtement pouvant être une peinture, un produit d'imprégnation, un enduit ou des éléments minces collés ou scellés. À cet effet, il est commode de distinguer :

- les revêtements esthétiques ;
- les revêtements hydrofuges ;
- les revêtements assurant l'étanchéité ;
- les revêtements esthétiques et protecteurs ;
- les revêtements de protection perméables à la vapeur d'eau ;
- les revêtements de protection particuliers ;
- les revêtements scellés ou collés.

13.4.1 Revêtements esthétiques

Les revêtements dont le rôle est essentiellement esthétique apportent également une certaine protection du béton contre les agents agressifs extérieurs, mais cette protection reste très variable selon les produits appliqués. Trois types de produits sont à distinguer :

- les peintures et vernis ;
- les enduits hydrauliques ;
- les revêtements plastiques épais.

■ Les **peintures et les vernis** pour béton, produits qui font l'objet des normes NF P 74-201-1 et NF P 74-201-2 (référence DTU 59.1) pour les travaux de peinture des bâtiments et d'une note d'information technique du LCPC avec des listes de systèmes ayant subi avec succès les essais de qualité en laboratoire [43] [44] [45] [46] pour les travaux de peinture des bétons pour ouvrages d'art. La norme NF T 36-005 prévoit dix classes de peintures et vernis :

- les peintures à l'eau, qui recouvrent les badigeons, peintures à la colle et peintures silicatées sans pigment métallique ;
- les peintures aux huiles et aux vernis gras avec les huiles normales, les huiles modifiées et les vernis gras contenant des résines naturelles, artificielles ou synthétiques ;
- les produits broyés pour peintures, les produits contenant des pigments métalliques étant exclus ;
- les alkydes, séchant à l'air ou au four (alkydes moyennes ou courtes en huile et alkydes hydrosolubles) ;
- les celluloses comprenant les nitrocelluloses et les autres dérivés en phase solvant ;
- les polyesters et polyéthers, qui recouvrent les polyuréthanes, les époxydiques, les polyesters saturés ou insaturés ;
- les vinyliques, acryliques et autres copolymères ;
- les élastomères, avec caoutchoucs chlorés, caoutchoucs cyclisés, les polybutadiènes, polyéthylènes chlorés et autres élastomères ;
- les résines à base de produits bitumineux (bitume naturel, brai de houille, bitume de pétrole, brai modifié aux résines synthétiques) ;
- et tous les autres liants tels que les résines naturelles ou synthétiques solubles dans l'alcool ou dans les huiles, les peintures contenant des pigments métalliques (silicates), les liants minéraux (alcalins), les liants organiques (d'éthyle), les résines de silicone, les aminoplastes, les phénoplastes, les résines fluorées, les esters époxydiques, les résines coumarone-indène et résines de pétrole, etc.

L'application de tout système de peinture nécessite une préparation particulière du support (dénommé dans ce cas subjectile). Le cahier des clauses techniques du DTU 59.1 distingue à cet effet les travaux d'intérieur et d'extérieur pour les parements de béton bruts de décoffrage, les enduits de liants hydrauliques, les produits industriels du béton et les blocs et dalles de béton cellulaire.

■ Les **enduits hydrauliques** ou plus précisément les enduits aux mortiers de ciments sont définis par les normes NF P 15-201-1 et 15-201-2 (référence DTU 26.1). Les enduits de dressement sont à distinguer des enduits de finition :

- les enduits de dressement sont destinés à rattraper les irrégularités de surface des parois en béton et à assurer l'adhérence de l'enduit de finition. Ces enduits de dressement diffèrent des enduits de ragréage dans le sens où ils sont destinés à recouvrir la totalité du parement ;
- les enduits de finition, ou plus exactement la couche de finition de l'enduit dit à trois couches, ont un rôle essentiellement décoratif mais peuvent jouer un rôle dans l'imperméabilisation.

Les enduits de finition peuvent être réalisés soit :

- par un mortier ordinaire ou coloré sur une épaisseur variant entre 5 à 7 mm, la couche étant talochée fin, mais non lissée ;
- par un mortier décoratif appliqué manuellement ou par projection en une ou plusieurs passes. Ces mortiers peuvent subir différentes finitions telles que « mouchetis tyrolien », grattée, grattée-grésée, grésée, bouchardée ou lavée.

En ce qui concerne les enduits colorés par pigments minéraux, la non-nocivité des pigments sur la prise des mortiers devra être vérifiée et le dépassement d'un dosage de 3 % du poids de ciment est à éviter.

Les supports en béton doivent être propres et exempts de poussières et de résidus de démoulant. Les parties saillantes sur les parements doivent être arasées et les zones trop lisses brossées pour permettre l'accrochage. Si besoin, ils peuvent recevoir un gobelet (couche d'accrochage) ou un enduit de dressement. Les enduits ne doivent pas être appliqués, en période de gel, sur des supports trop chauds ou trop secs et sous vent sec.

■ Les **revêtements plastiques épais** à base de polymères ou de liants hydrauliques sont appliqués conformément aux stipulations respectives des normes NF T 30-700 et NF P 74-202-2 (référence DTU 59.2) sur des parements soignés ou courants selon les références du DTU 23.1. Leurs conditions générales d'application sont identiques à celles des enduits.

13.4.2 Revêtements hydrofuges

Les revêtements hydrofuges ont pour unique vocation l'imperméabilisation d'un parement non fissuré et peuvent se présenter sous différentes formes :

- enduits à base de liants hydrauliques tels qu'ils sont définis dans la norme NF P 15-201-1 (référence DTU 26.1. Cahier des clauses techniques) ;
- enduits à base de liants organiques commercialisés sous forme de barbotine (applicables à la brosse ou au rouleau sur une épaisseur de l'ordre du millimètre) ou de pâte prête à l'emploi pour des épaisseurs de quelques millimètres ;
- enduits minces à base de mortiers hydrauliques enrichis par des hydrofuges, produits organiques en poudre ou liquides (résines) ;
- enduits d'imperméabilisation à base de brai de pétrole strictement réservés aux parois de fondations.

13.4.3 Revêtements assurant l'étanchéité

Ces revêtements ont la caractéristique particulière d'assurer l'étanchéité du parement en cas de fissuration ou de microfissuration de celui-ci. Diverses catégories de systèmes permettent d'assurer cette fonction particulière :

- les systèmes multicouches à base de liants organiques, avec une couche intermédiaire armée ;
- les systèmes multicouches à base de liant hydraulique et amélioré aux résines synthétiques, avec couche intermédiaire dotée d'une armature de verre traité ;
- les bardages (plastiques ou enduits armés) rapportés et fixés sur une ossature ;
- les systèmes multicouches de dispersions aqueuses à base de copolymères acryliques, réservés pour une résistance au faïencage et à la microfissuration ;
- les revêtements bitumineux épais pour l'étanchéité des sous-bassements.

Il est également possible d'utiliser les revêtements hydrofuges associés à des bandes de pontage au droit des fissures apparues sur le parement ; cette technique est forcément limitée aux travaux de réparation.

13.4.4 Revêtements esthétiques et protecteurs

La conception des parements en béton doit tenir compte de leur évolution dans le temps et prévoir des revêtements protecteurs qui, sans modifier l'aspect, en assurent la durabilité. Dans la plupart des cas, ces revêtements devront rester perméables à la

vapeur d'eau. Les matériaux utilisés en imprégnation confèrent au support traité des propriétés hydrofuges et oléofuges limitant ainsi au maximum la fixation et la pénétration de salissures aqueuses ou grasses, souvent vecteurs d'agents agressifs. L'imprégnation de ces produits peut également bloquer la formation d'efflorescences et faciliter la lavabilité des parements.

Ils sont constitués soit par des imprégnations :

- de solutions aqueuses de dérivés siliconés ;
- de savons métalliques de type stéarate d'aluminium de calcium ou de zinc ;

soit par des revêtements liquides applicables à la brosse, au rouleau ou au pistolet :

- revêtements pelliculaires de mortiers flexibles à base de liant hydraulique enrichis de résines et de fumée de silice ;
- revêtements colorés à base de méthacrylate.

13.4.5 Revêtements de protections particulières

Dans de nombreux cas, le parement en béton doit satisfaire des besoins particuliers d'emplois ne pouvant pas être assurés par le béton normal seul. Des types de revêtements susceptibles d'apporter des solutions aux besoins exprimés ont donc été développés par les fournisseurs de produits spéciaux :

- les revêtements pour la protection contre les sels de déverglaçage ;
- les revêtements réducteurs de poussière ;
- les revêtements antistatiques ;
- les chapes d'usure pour sols industriels (article *Revêtements de sols industriels* [C 3 684] dans ce traité) ;
- les revêtements résistant aux chocs ;
- les revêtements anti-abrasion ;
- les revêtements anti-graffiti ;
- les revêtements minces auto-lissants à base de résines époxydiques ;
- les revêtements anti-corrosion des ouvrages immergés ;
- etc.

13.4.6 Revêtements scellés ou collés

L'emploi des revêtements scellés ou collés est fréquent à l'intérieur des constructions tels que locaux d'habitation, bureaux, établissements d'habitation et, dans le cas où les matériaux utilisés résistent aux intempéries, les revêtements scellés sont employés en parement extérieur. Ces revêtements dont l'emploi fait l'objet du cahier des charges du DTU.55 peuvent être classés en trois catégories :

- carreaux et éléments minces ;
- revêtements en plaques ;
- revêtements coulés en place.

■ Les **carreaux et éléments minces** sont généralement fixés sur un mortier de pose après avoir été trempés dans l'eau claire – sans atteindre cependant la saturation – et peuvent être jointoyés par des coulis de ciment ou de ciment-sable fin (certains coulis avec matières plastiques peuvent également être utilisés). Les supports neufs en béton doivent recevoir un piquage, un arrosage, puis un crépi dressé et non lissé en mortier de ciment, de chaux ou bâtard.

Ces matériaux se répartissent selon toute une gamme de produits variés (cf. rubrique *Matériaux* dans ce traité) tels que :

- les carreaux de faïence ;
- les produits en grès cérame ;
- les produits en demi-grès ;
- les produits en grès émaillé ;
- les carreaux de Salernes ;
- les produits de terre cuite ;
- les carreaux de terre cuite à surface vernissée ou vitrifiée ;
- les carreaux de ciment ;

- les carreaux de pierre reconstituée (réalisés en deux couches ou en pleine masse) ;
- les carreaux de granito (réalisés en deux couches ou en pleine masse) ;
- les carreaux de brèche de marbre ;
- les éléments semi-mats de Briare ;
- et les émaux de Briare.

■ Les **revêtements en plaques ou dalles**, sont posés sur support rigide, soit par des agrafes scellées dans le support, soit par des vis, soit par des goujons ou des ressorts fixés sur la face arrière des dalles. Pour les dalles minces, la pose est comparable à celle des carreaux. Pour les emplois à l'extérieur, on distingue :

- les revêtements autoporteurs, où les plaques sont accrochées au support ou à l'ossature en laissant un vide d'au moins 2 cm. L'accrochage de la dalle est assuré par deux agrafes en bronze, cuivre ou laiton scellées dans le support. La stabilité propre des dalles peut être obtenue lors du montage, dès que celles-ci ont une épaisseur supérieure à 8 cm ;

- les revêtements portés, où les plaques sont écartées du support et fixées au voisinage des quatre angles par des agrafes de bronze, cuivre ou laiton scellées ;

— les revêtements coffrants, où ce sont des dalles qui servent de coffrages et qui sont scellées par le coulage du béton. Les dalles utilisables à cet effet sont principalement :

- des dalles en pierre naturelle,
- des dalles en produits verriers opacifiés pouvant être fixées mécaniquement ou collées,
- des dalles de verre moulé.

■ Les **revêtements coulés en place** sont principalement constitués par les revêtements de granito ou de mignonnette lavée.

Les revêtements en granito sont coulés en deux couches : sous-couche de dressage et d'accrochage, puis couche d'usure avec incorporation de marbres.

Les revêtements de mignonnette lavée sont constitués par une couche d'enduit de ciment, de sable et d'un enduit de finition composé de ciment CEM I – CPA et de mignonnette (gravillon dont la taille est inférieure à 10 mm) ; après dressage, la couche de finition est lavée à l'eau avec une brosse douce.

Béton hydraulique

Mise en œuvre

par **Jean-Marie GEOFFRAY**

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand

Références bibliographiques

- [1] DE LARRARD (F.). – *Formuler les bétons. Proportions et maniabilité*. Stage ENPC. Paris, mai 1994.
- [2] DULIEU (C.). – *Rhéologie des bétons frais et sa variation dans le temps. Méthodes d'essais*. Revue Ciments, bétons, plâtres, chaux, n° 737, avril 1982.
- [3] DE LARRARD (F.), HU (C.), SZITKAR (J.C.), JOLY (M.), CLAUX (F.) et SEDRAN (T.). – *Le nouveau rhéomètre LCPC pour bétons très plastiques à fluides*. Conférence ITBTP. Paris, nov. 1993.
- [4] LEGRAND (C.). – *Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais*. Revue Matériaux de construction, vol. 5, n° 29 (1972).
- [5] Fascicule 65 A du CCTG. – *Exécution des ouvrages en béton armé ou précontraint par post-tension*. Décret n° 92-72 du 16 janv. 1992.
- [6] Additif au Fascicule 65 A du CCTG. – *Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint applicables aux marchés publics de travaux*. Décret n° 93-446 du 23 mars 1993.
- [7] ADAM (M.). – *Aspect du béton, techniques, réalisations, pathologie*. ITBTP (1971).
- [8] *Défauts d'aspect des parements en béton*. Guide technique LCPC, mars 1991.
- [9] *Les tolérances sur les défauts d'aspect du béton*. Rapport n° 24. Groupe de travail CIB. W 29 « Parements de béton » (1973).
- [10] *Les défauts d'aspect des bétons apparents. Classification. Remèdes*. CERIB. Fiche pratique Fg 702, nov. 1987.
- [11] CARREL (P.). – *Les coffrages*. Mémento du CATED, oct. 1992.
- [12] RAY (M.), CHARONNAT (Y.). – *Les machines à coffrage glissant et l'uni des chaussées en béton. Chaussées béton*. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, sept. 1978.
- [13] *Éléments coffrants en béton armé utilisés comme coffrages perdus*. SETRA. Note d'information n° 14, fév. 1991.
- [14] *Recommandations relatives au démoulage des éléments préfabriqués*. CNTBTP du 10 juin 1981. Annales de l'ITBTP n° 405, juin 1988.
- [15] VENUAT (M.). – *Comment bétonner en période hivernale*. Revue Le Moniteur du 14 janv. 1983.
- [16] TANAKA (K.), IKEDA (H.). – *Meilleure qualité de surface du béton avec une nouvelle méthode de coffrage*. Journées AIPC de Versailles, sept. 1987.
- [17] *Recommandations du CNTBTP 02 n° R 280 du 9 juillet 1986 : stabilité des banches*.
- [18] Décret n° 65-48 du 8 janv. 1965.
- [19] *Limitation de la déformation des ouvrages provisoires sous le poids du béton frais*. SETRA. Note d'information n° 07, juil. 1989.
- [20] GRUNDY (P.) et KABAILA. – *Construction loads on slabs with shored formwork in multistoried building*. ACI, déc. 1963.
- [21] BINICK (A.). – *Le démoulage des bétons*. Cahiers techniques du Bâtiment n° 38, sept. 1981.
- [22] GPET/M. – *Établissement du schéma directeur de la qualité (SDQ) – Recommandation aux maîtres d'ouvrage publics de bâtiment* (recommandation n° T.1-89 parue au BOCC-RF du 27 mars 1990, dans le Moniteur du 27 avril 1990).
- [23] GPET/M. – *Recommandations aux maîtres d'ouvrages publics au sujet de l'individualisation des dépenses d'hygiène dans les marchés de travaux* (recommandation n° T.2-89 parue au Bulletin Officiel 90-6 du 28 fév. 1990).
- [24] Fascicule 63 du CPC. – *Exécution et mise en œuvre des bétons non armés, confection des mortiers*. Décret 79-923 du 16 oct. 1979.
- [25] LEGRAND (S.). – *La vibration du béton. Pourquoi ? Comment ?* Publication PTC (Procédés techniques de Construction).
- [26] COLLIN (J.-P.). – *La vibration du béton*. Les chroniques du CATED. Note technique. Le Bâtiment – Bâtir, déc. 1976.
- [27] DREUX (G.). – *Nouveau guide du béton*. 6^e édition. Eyrolles (1990).
- [28] CIMBETON. – *Recueil de fiches techniques*. Centre d'information de l'industrie cimentière.
- [29] *Voirie à faible trafic en béton de ciment*. CIIC. Guide du prescripteur, janv. 1990.
- [30] MAMILLAN (M.). – *Bétonnage par temps froid et résistance au gel du béton durci*. Annales de l'ITBTP n° 477, oct. 1989.
- [31] *Traitement des bétons. Froid : bétonnage aux basses températures*. Ciment Lafarge. Note technique d'octobre 1968.
- [32] *Le béton exposé aux agressions hivernales*. ATILH, janv. 1989.
- [33] *Recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons pour les parties d'ouvrage non protégées des intempéries et soumises à l'action du gel*. GRA. Publication du Groupe de travail Rhône-Alpes sur la durabilité des bétons soumis au gel, direction départementale de l'Équipement de Haute-Savoie, mars 1992.
- [34] *Bétonnages par temps chaud*. Revue Le Bâtiment-Bâtir, juin 1978.
- [35] *Bétonnage par temps chaud. Connaissances actuelles et recommandations*. FNB. FNTF. SNBATI. Annales de l'ITBTP n° 474, mai 1989.
- [36] *Recueil des règles de l'art. Les pieux forés*. SETRA. LCPC, déc. 1978.
- [37] *Le pompage du béton*. Note technique. Revue Le Bâtiment. Bâtir n° 617, juin 1982.
- [38] *Guide général de chantier (GGOA 70). Niveau 1 à l'usage du surveillant. Niveau 2 à l'usage du maître d'œuvre (1970). Niveau 3 sur les coffrages glissants, les pompes à béton, les palplanches, tablier VIPP...* SETRA (1977).
- [39] Fascicule 74 du CCTG. – *Construction des réservoirs et châteaux d'eau en béton armé et en béton précontraint ou en maçonnerie et des ouvrages annexes*. Décret 83-251 du 29 mars 1983.
- [40] Fascicule 31 du CCTG. *Bordures et caniveaux en pierres naturelles ou en béton et dispositifs de retenue en béton*. Décret 83-905 du 7 oct. 1983.
- [41] *La technologie et la mise en œuvre du béton projeté renforcé de fibres*. AFTES. Revue Tunnel et Ouvrages souterrains n° 126, nov. et déc. 1994.
- [42] *Les Traitements de surface des produits en béton*. CERIB. Monographie n° 11, juin 1994.
- [43] *Mise en peinture des bétons de génie civil*. Note d'information technique LCPC (1978).
- [44] *Mise en peinture des bétons de génie civil : liste des systèmes ayant subi avec succès les essais de qualité en laboratoire*. LCPC (1983).
- [45] *Mise en peinture des bétons de génie civil : complément à la liste des systèmes ayant subi avec succès les essais de qualité en laboratoire*. LCPC (1986).
- [46] *Mise en peinture des bétons de génie civil : complément à la liste des systèmes ayant subi avec succès les essais de qualité en laboratoire*. LCPC (1992).
- [47] GALABRU (P.). – *Traité des procédés généraux de construction*. Les ouvrages d'art. Eyrolles.
- [48] VENUAT (M.). – *Comment bétonner en période hivernale ?* Le Moniteur du 14 janv. 1983.
- [49] MATHIVAT (J.) et BOITEAU (Ch.). – *Procédés généraux de construction*. Eyrolles (1992).
- [50] LACOMBE (G.). – *L'exécution des réfrigérants de grande puissance. Exemples de Dampierre-en-Burly et Chinon*. Annales de l'ITBTP n° 397, sept. 1981.

Normalisation

Association française de normalisation AFNOR

NF P 15-301	6.94	Liants hydrauliques. Ciments courants. Composition, spécifications et critères de conformité.
P 18-011	6.92	Bétons. Classification des environnements agressifs.
P 18-305	12.94	Bétons. Béton prêt à l'emploi.
P 18-325	8.91	Bétons. Performances, production, mise en œuvre et critères de conformité.
NF P 18-337	3.90	Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Retardateurs de prise.
NF P 18-418	12.89	Béton. Auscultation sonique. Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton.
NF P 18-422	12.81	Béton. Mise en place par aiguille vibrante.
NF P 18-451	12.81	Béton. Essai d'affaissement (éq. ISO 4109).
P 18-503	11.89	Surfaces et parements de béton. Éléments d'identification.
P 18-504	6.90	Béton. Mise en œuvre des bétons de structure.
P 18-554	12.90	Granulats. Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.
P 18-555	12.90	Granulats. Mesures des masses volumiques, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables.
P 18-561	9-90	Granulats. Mesure du coefficient d'aplatissement.
NF P 93-350	11.89	Banches pour ouvrages en béton.
NF P 95-102	06.92	Ouvrages d'Art. Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie. Béton projeté.
NF P 98-115	1.92	Assises de chaussées. Exécution des corps de chaussées. Constituants. Composition des mélanges et formulation. Exécution et contrôle.
NF P 98-128	11.91	Assises de chaussées. Bétons compactés routiers et graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques à hautes performances. Définition. Composition. Classification.
NF P 98-248-2	11.93	Essais relatifs aux chaussées. Essais propres au béton de D supérieur à 40 mm. Partie 2 : affaissement au cône.

P 98-443	11.93	Barrières de sécurité routière. Séparateurs et murets en béton coulé en place. Contrôle d'exécution.
NF T 30-700	3.83	Peintures. Revêtements plastiques épais. Spécifications.
NF T 36-005	9.89	Peintures et vernis. Classification des peintures, vernis et produits connexes.

International Organization Standardization (ISO)

ISO 4103	1979	Béton. Classification de la consistance.
ISO 4109	1980	Béton. Essai d'affaissement.
ISO 4110	1979	Béton frais. Détermination de la consistance. Essai Vébé.
ISO 4111	1979	Béton frais. Détermination de la consistance. Degré de compactabilité.

Documents techniques unifiés DTU

DTU 21	08.84	Exécution des travaux en béton (NF P 18-201).
DTU 23.1	02.90	Murs en béton banché (NF P 18-210).
DTU 59.1	10.94	Peinture. Travaux de peinture des bâtiments. Peinture. Partie 1 : cahier des clauses techniques (NF P 74-201-1). Peinture. Partie 2 : cahier des clauses spéciales techniques (NF P 74-201-2).
DTU 26.1	05.90	Travaux de bâtiment. Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. Travaux de bâtiment. Partie 1 : cahier des clauses techniques (NF P 15-201-1/A1). Travaux de bâtiment. Partie 2 : cahier des clauses spéciales (NF P 15-201-2).
DTU 55	4.61	Cahier des charges applicables aux travaux de revêtements muraux scellés destinés aux locaux d'habitation, bureaux et établissements d'enseignement.
DTU 59.2	12.80	Revêtements plastiques épais sur béton et enduits à base de liants hydrauliques. Revêtements plastiques épais sur béton et enduits à base de liants hydrauliques. Cahier des charges (NF P 74-202-1). Revêtements plastiques épais sur béton et enduits à base de liants hydrauliques. Marchés privés. Cahier des clauses spéciales (NF P 74-202-2).

Constructeurs. Fournisseurs

Coffrages du béton

Coffrages Ricard
Doka France
Lheureux et Cie
Mills
Péri S.A.
PMI Procédés et Matériels Industriels SARL
Pronal S.A.
Satéco S.A.
Secatol
Simpra
Sofar S.A.
Unimétal S.A.

Étaisements. Échafaudages

Comabi S.A.
Duarib S.A.
Entrepose Montalev S.A.
Layher S.A.

Mills
Peiner France (Sté)
Potain
Retotub S.A.
Tractel S.A.

Machines à projeter

Aquarex
Atlas Copco France Holding
Nard H.P.
Putzmeister France SARL
Regero S.A.
Semafor (Sté)
Telstar Diffusion

Pompes à béton

Béton de France
Béton Rationnel Contrôlé
Bip Diffusion
Elba France S.A.

Putzmeister France SARL

Schwing Stetter

Semafor (Sté)

Serrage du béton

Artéon S.A.

Casadio Vibrateurs Industriels

Comessa

Dynapac

PTC Procédés Techniques de Construction

STV

Sullair Europe S.A.

Wacker France

Traitements de surface

Aquarex

ATS Auxerroise de Traitement de Surfaces

Karcher S.A.

Nard H.P.

Regero S.A.

Simox S.A.

Sotrame

STV

Sullair Europe S.A.

Transporteurs de béton

Béton de France

Béton Rationnel Contrôlé

Imer France

Liebherr France S.A.

Pataud

Schwing Stetter S.A.

Secatol

Tunneliers

Atlas Copco Mines et Travaux Publics

Hitachi Construction Machinery. France

MF Industrial (Massey Fergusson)