

Béton hydraulique – Mise en œuvre

Coffrage et protection des armatures

par **Jean-Marie GEOFFRAY**

Cete de Lyon. Laboratoire régional de Clermont-Ferrand

1. Coffrage du béton	C 2 228 –	2
1.1 Fonctions générales.....	–	2
1.2 Rôle des intervenants pour la conception	–	2
1.3 Typologie des coffrages	–	2
1.4 Choix des composants et des matériaux.....	–	5
1.5 Sécurité.....	–	8
1.6 Préparation, emploi et entretien des coffrages	–	12
2. Armatures dans le béton	–	18
2.1 Préparation des armatures.....	–	18
2.2 Enrobage minimal des armatures	–	18
2.3 Prévention des risques liés à la carbonatation.....	–	21
2.4 Prévention contre l'action des chlorures	–	22
2.5 Intervalle d'écoulement des bétons auto-plaçants	–	22
2.6 Précautions avant bétonnage	–	22
Pour en savoir plus	Doc. C 2 231	

Cette seconde partie des techniques liées à la mise en œuvre des bétons hydrauliques recense les points essentiels à traiter en matière de choix, de conception et d'utilisation des coffrages d'une part, et les précautions à prendre pour assurer une bonne durabilité aux armatures employées dans le matériau béton armé, d'autre part.

Elle fait suite au dossier [C 2 227] et sera, à son tour, prolongée par les dossiers [C 2 229], [C 2 230v2] et [C 2 231].

1. Coffrage du béton

Au moment de sa mise en œuvre dans un moule, le béton se présente sous une forme plus ou moins fluide. Cette fluidité lui permet de s'écouler sous l'effet de la vibration, ou de son propre poids s'il est suffisamment fluide, et d'occuper complètement la forme du coffrage. Avec le temps, ce béton hydraulique durcit, ou devient suffisamment auto-stable pour être décoffré. Ses caractéristiques à l'état durci sont influencées par la qualité des éléments constitutifs du coffrage, entretien et préparation compris.

Dans tous les cas, le coffrage fait l'objet d'une étude spécifique avec distinction des différents emplois du fait de variété des niveaux de charges à reprendre [11].

1.1 Fonctions générales

Outre sa fonction première de moulage de la forme, le coffrage remplit d'autres fonctions telles que le moulage de la texture de surface, le maintien de la stabilité jusqu'au durcissement, et la protection contre la dessiccation pendant la prise et le durcissement.

Selon les nécessités de chantier les coffrages peuvent aussi jouer les rôles suivants :

- 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.

1.1.1 Moulage de la forme

Le coffrage donnant sa forme à l'élément en béton, il est primordial de garantir l'absence de déformation de sa structure, tant pendant l'emploi, que pendant les opérations de transport, de nettoyage, de préparation et de stockage. Les causes de déformation de coffrages peuvent être 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 entraînent des déformations, des blessures ou des trous ; si ces défauts ne sont pas réparés, la paroi moulée de béton présentera des défauts en négatif de planéité ou de protubérances ;
- le voilement des coffrages métalliques provenant d'une mauvaise fabrication ou de stockages défectueux engendre des défauts de forme répétitifs ;
- les déformations progressives des tôles coffrantes entre raidisseurs, du fait d'une épaisseur insuffisante des tôles, provoquent des défauts de forme de même type dont l'amplitude s'aggrave au fur et à mesure des bétonnages.

1.1.2 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 prend 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 **notes techniques du fabricant** sur le comportement des matériaux de coffrages et des composants ;
- le **nombre de remplois prévisibles**.

1.1.3 Étanchéité

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

1.1.4 Cure

La présence du coffrage constitue la meilleure protection de la surface du béton. Dès l'ouverture des coffrages, cette protection disparaît et une dessiccation se produit immédiatement. 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, et à adopter des dispositions de cure pour limiter la dessiccation.

1.2 Rôle des intervenants pour la conception

Le **maître d'ouvrage** précise ses exigences essentielles pour l'ouvrage (généralement l'usage, la stabilité, la sécurité en cas d'incendie, l'environnement, la sécurité d'utilisation, la protection contre le bruit, ...).

L'**architecte** définit le modèle d'ouvrage répondant aux exigences précédentes, notamment en précisant les formes, les textures superficielles, les couleurs à atteindre, ...

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

Le maître d'œuvre privilégie l'obligation de résultats par rapport à celles des moyens [5]. Ses spécifications ne se limitent souvent qu'à la satisfaction des exigences essentielles de stabilité, de sécurité d'utilisation et d'environnement.

L'**entrepreneur** effectue le choix de ses moyens et matériaux, et de ses sous-traitants (projeteur, fabricant, monteur et contrôleur de coffrages).

Les rôles de chaque intervenant peuvent être répartis comme indiqué dans le tableau 1.

Tableau 1 – Rôle des intervenants pour la conception 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 prévisionnel de bétonnages	Entrepreneur
Note de calcul et plans pour les coffrages et étalements	Projeteur du coffrage

1.3 Typologie des coffrages

Les coffrages peuvent être classés suivant leur mode d'utilisation ou les fonctions particulières remplies. Les principales familles comprennent les coffrages verticaux, horizontaux, spéciaux (galerie, voussoir, préfabrication) et les coffrages perdus.

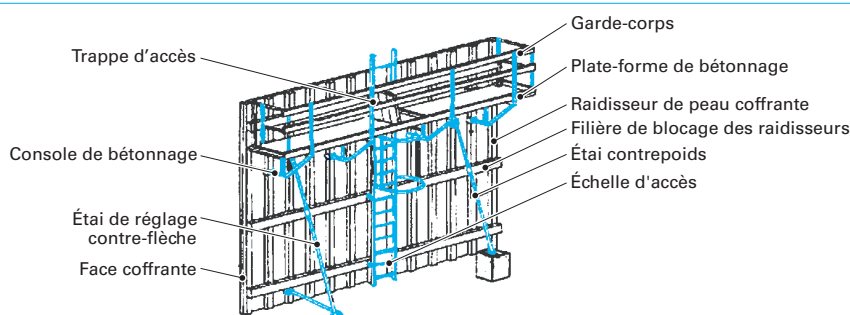


Figure 1 – Principaux éléments d'une banche

1.3.1 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 appuis ou aux murs. Parmi ceux-ci, on distingue les petits panneaux, les banches, les coffrages de poteaux, les coffrages tunnel, les coffrages circulaires, et les coffrages grimpants.

■ Les **petits panneaux** sont faits d'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.

■ Les **banches** (figure 1), utilisées pour le coffrage des murs ou des voiles, peuvent être constituées par :

- la peau coffrante (contreplaqué, contreplaqué bakélisé, métal, composite, matrices collées, apport possible de pièces décoratives) ;
- 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 et de contrepoids ;
- les échelles de sécurité et les passerelles de travail avec leur équipement ;
- les portiques et autres dispositifs de préhension.

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

- en aile de moulin (figure 2), permettant de réaliser des poteaux de section variable (forme carrée ou rectangulaire) ;
- en deux demi-coquilles, employés lorsque la section du poteau est constante (forme carrée, rectangulaire ou circulaire) ;
- pistons permettant la réalisation de poteaux rectangulaires où une seule dimension est variable ;
- circulaires en carton avec toutes les variantes décoratives possibles.

■ Les **coffrages tunnel** sont des coffrages outils permettant le moulage simultané de voiles et de dalles. Les peaux coffrantes sont généralement métalliques.

Soit le tunnel est réalisé à partir de deux demi-coquilles réunies au milieu de la dalle, soit il est monocoque et le décoffrage est assuré par le fléchissement du plateau par déverinage.

■ Les **coffrages circulaires** sont utilisés pour la réalisation de pièces circulaires de grands rayons. La courbure peut être obtenue par bridage d'une paroi de coffrage avec des tendeurs à vis ou par fixation des éléments de coffrage sur des profilés cintrés et à haute inertie.

■ Les **coffrages grimpants** regroupent tous les coffrages à progression verticale, parmi lesquels se distinguent les coffrages grimpants proprement dits, les auto-grimpants, les semi-glissants et les glissants continus.

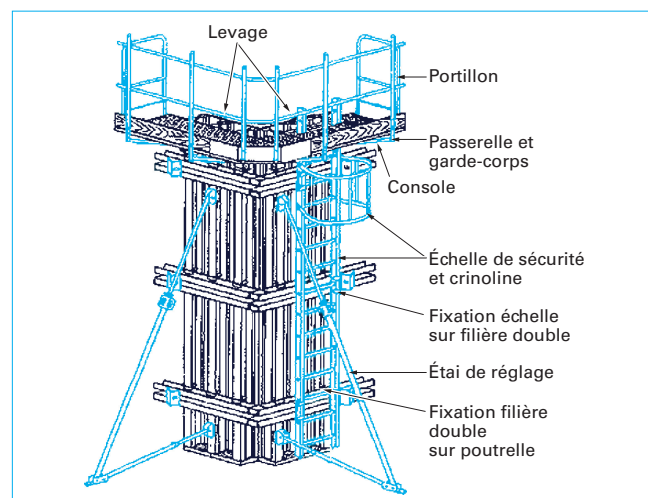


Figure 2 – Coffrage de poteau

- Les **coffrages grimpants proprement dits** sont 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 aux dernières parties bétonnées de rester sous coffrage.

- Dans certains cas, les coffrages peuvent être **autogrimpants** pour réduire les manutentions. Les faces restent alors soutenues par une potence fixée à la structure même pendant les transferts.

- Les **coffrages semi-glissants** qui, lors de leurs transferts, 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).

- Les **coffrages glissants continus** constituent au départ une variante des coffrages glissants, avec le glissement vertical pour principale différence (figure 3).

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.

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, les vérins hydrauliques synchronisés sont préférables aux vérins à vis manuels qui interdisent toute montée régulière et synchrone.

Le recours aux coffrages grimpants nécessite sur chantier une organisation générale complète, notamment au niveau de la mise en place, 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.

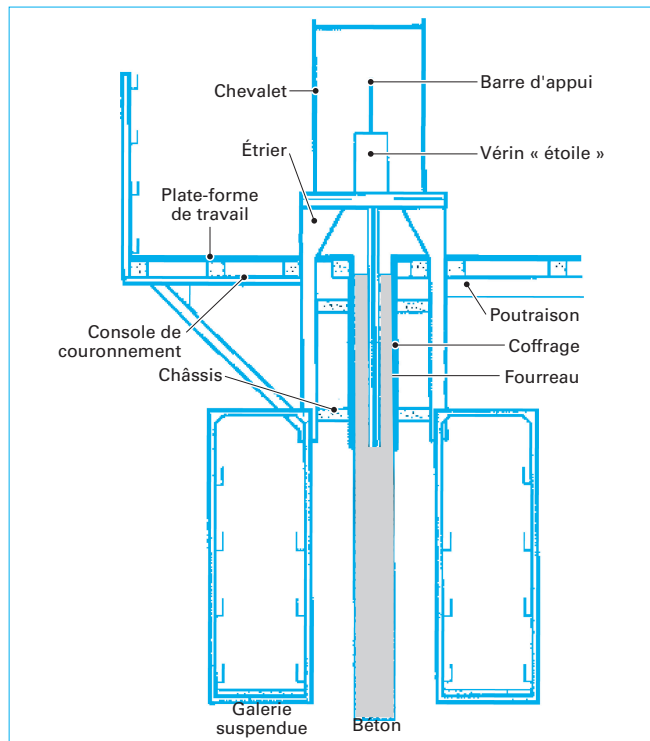


Figure 3 – Coffrage glissant vertical (Doc PMI)

1.3.2 Coffrages horizontaux

Les coffrages horizontaux servent au bétonnage des poutres, des planchers, et des dalles. Par extension, les coffrages glissants sont principalement utilisés en technique routière (chaussée béton, séparateur en béton, caniveaux continus, ...).

■ Les **coffrages à poutre** sont constitués par un fond de moule et deux parties verticales (jouées de poutre). Le choix du type de coffrage est conditionné par le nombre de réemplois :

- si ce nombre est faible, les coffrages peuvent être réalisés en bois : peau coffrante en contreplaqué sur raidisseurs en bois ;
- si le nombre de poutres augmente, les coffrages métalliques ou mixtes sont conseillés. Dans ce cas, les moules peuvent être démontables (jouées amovibles) ou non, mais doivent comporter 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 des poutres coulées en place n'est pas envisageable, on a recours à des coffrages de poutre autopor-
tants, réalisés en tôles soudées et résistant à la flexion.

■ Trois types de **coffrages de dalle pleine** sont utilisés suivant les cas :

- les coffrages sur étalement traditionnel, pour les dalles de dimensions faibles à contours non simples. La face coffrante (contreplaqué

bakélinisé ou non) est fixée sur des traverses, elles-mêmes fixées sur des poutrelles supportées par des étais à tête escamotable ainsi que par des trépieds ;

- les panneaux modulaires de dimensions faibles et identiques (cadres métalliques encadrant une plaque de contreplaqué bakélinisé) sont glissés sur des poutrelles reposant sur des étais munis de tête de décoffrage rapide ;

- 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.

■ Les machines à **coffrage glissant horizontalement** comportent un bâti supporté par un train de chenilles par l'intermédiaire de vérins hydrauliques. 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, et plusieurs types de machines peuvent être utilisées [12] :

- les vibro-finisieurs, munis de trois poutres vibrantes et se déplaçant sur des rails servant de coffrage latéral. La largeur de travail peut varier entre 1 et 6,5 m ;

- les finisseurs adaptés, engins automoteurs sur roues ou sur chenilles, très proches de ceux utilisés pour les bétons bitumineux ;

- les machines pour l'exécution des chaussées en grande largeur (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**, pour éviter les manques locaux de béton et exercer une pression uniforme sur le béton ;

- la **fonction moulage de la dalle**, avec dispositifs de réglage, de lissage et de vibration ;

- les **dispositifs pour l'assise** de la machine avec chenilles motrices et vérins stabilisateurs ;

- le **guidage** permettant, selon l'état des chemins de roulement, la réalisation des profils théoriques, matérialisés par la couche sous-jacente si la machine travaille à vérins calés, ou par des fils tendus si la machine travaille avec des palpeurs.

1.3.3 Coffrages perdus

Le bétonnage des hourdis au-dessus de poutres nécessite souvent l'emploi de coffrages non démontables, ou perdus, ne participant pas à la résistance de la structure, mais devant résister aux sollicitations en cours de construction. Une note d'information du Setra (service d'études techniques des routes et autoroutes) précise les conditions d'emploi de ces éléments coffrants et définit les actions et sollicitations à prendre en compte [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 fibre. Lors de leur démoulage 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 perpendiculaires au plan de coffrage), l'effort de décoffrage F est évalué à :

$$F = 1,36 M$$

avec M masse propre de l'élément ;

- dans les autres cas, les recommandations du centre national technique du bâtiment et des travaux publics, concernant le démoulage des éléments préfabriqués [14] peuvent leur 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 et celui du béton du hourdis ;

Tableau 2 – Taux de gravité de la fissuration en fonction de l'enrobage des armatures

Spécifications particulières	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		

– 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 sont les suivantes, vis-à-vis des états limites ultimes :

$$\begin{aligned} \text{de résistance : } & 1,35 G + 1,5 Q ; \\ \text{de service : } & G + Q. \end{aligned}$$

Pour ces éléments coffrants, la fissuration doit être considérée :

- peu préjudiciable si le milieu est peu agressif (en exposition non agressive) ;
- préjudiciable en milieu moyennement agressif (sous des condensations fréquentes) ;
- très préjudiciable en milieu fortement agressif (zones d'embruns avec sels).

Dans chacun de ces cas, des prescriptions particulières sont appliquées en matière d'enrobage des armatures par le béton (tableau 2) :

Pour éviter toute fuite de laitance au moment du bétonnage du hourdis, des produits de calfeutrement ou de pontage sont mis 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 sont 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 dégradations.

1.3.4 Coffrages spéciaux

La construction des ouvrages à éléments répétitifs (voussoirs, tuyaux, ...) nécessite le recours à des coffrages spécifiques justifiés par des études de conception. Les démarches du bureau d'études associé à l'atelier de montage prennent en compte les éléments suivants :

- la forme des pièces à mouler et les 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 vibrateurs externes, arrêts et reprises de bétonnage, décoffrage et décintrement) ;
- le nombre et les conditions de remplois ;
- 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.

1.3.5 Coffrage de préfabrication

Outre la production de séries de composants identiques en béton, la préfabrication permet de soulager les plannings de la

production foraine et de raccourcir les délais globaux de construction. Tous les composants du gros-œuvre en bâtiment peuvent être produits :

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

Les coffrages pour préfabrication sont conçus comme des coffrages spéciaux et offrent les possibilités courantes de 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, souvent à démoulage instantané (pavés, caniveaux, bordures...).

1.4 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.

1.4.1 Structure coffrante

Si la structure coffrante assure, en premier lieu, la rigidité de l'outil coffrant et sa stabilité, elle est également conçue pour permettre :

- l'accès et le travail des équipes avec toute la sécurité requise ;
- le décoffrage le plus facile possible ;
- le transport et le stockage ;
- l'application de vibration externe si elle est prévue ;
- les traitements thermiques (actifs ou passifs) envisagés pendant le chantier.

1.4.2 Peau coffrante

Si la peau coffrante est un des facteurs influents sur les homogénéités de teinte et de texture des bétons, elle constitue un facteur maîtrisable et son choix est fonction :

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

Vis-à-vis des compatibilités pouvant apparaître entre le nombre prévu de remplois et les techniques utilisables, la solution sera recherchée dans les conditions de renouvellement des peaux coffrantes, et inscrite au programme de coffrage.

■ Peaux courantes

Si les conditions d'utilisation et d'entretien restent normales après chaque bétonnage, les taux de remplois des peaux courantes sont indiqués par le tableau 3.

Tableau 3 – Nombre de remplois selon les peaux coffrantes (d'après [7])

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

Les matrices destinées à peu de remplois (moins d'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, mais craignent les chocs ours. Lorsque le taux de remplois augmente, les matrices sont 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 remplois si l'entretien est réalisé correctement.

La peau coffrante en composite est, en général, un système multicouches de voiles de polyester, de stratifiés additionnés de polyester, de tôles et d'une couche de gelcoat « anti-béton » sur un cadre en bois. Enfin, la peau coffrante en tôle émaillée (usage rare) 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). Elle peut être collée sur toutes les matières (bois, acier, composite, aluminium) et ne nécessite pas l'application d'huile de décoffrage.

■ Double peau

Le principe de la double peau coffrante est utilisé pour homogénéiser la teinte des parements en béton. Il consiste principalement à ajouter 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.

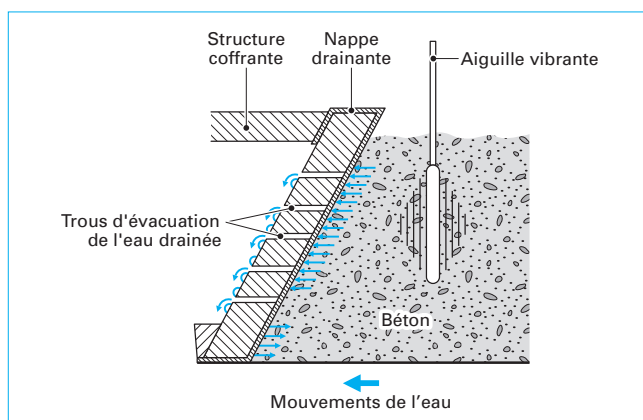
■ Peau drainante

Pour éviter le bullage de surface des parements lisses en béton, notamment sur les plans inclinés, les coffrages sont revêtus par une peau drainante qui absorbera l'excès d'eau arrivant à l'interface béton-coffrage sous l'influence de la vibration (figure 4).

La peau drainante est 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.

Les résultats sont probants avec l'emploi de ces coffrages drainants, puisque tout bullage de surface disparaît, mais plusieurs problèmes restent mal résolus :

- l'eau drainée migre par gravité en partie basse du coffrage et, sous l'effet de la pression, l'eau contenue dans la membrane

**Figure 4 – Fonctionnement du coffrage drainant**

réintègre à ce niveau la peau du béton lui conférant une perméabilité dommageable 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 derniers problèmes imposent le renouvellement de la membrane à chaque emploi.

1.4.3 Composants

■ Les étais sont assemblés en respectant les prescriptions des fabricants et du concepteur des coffrages, et 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 4 ;
- l'emploi des tubes gauchis ou incomplets (platines d'appui en mauvais état ou absentes) est interdit.

Tableau 4 – 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

Tableau 5 – 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 (bakéliné ou non)	0	••	••	0
Panneaux de fibres agglomérés	0	•	••	0
Panneaux synthétiques	0	••	0	0
Panneaux composites	0	•	••	•

Légende : 0 **déconseillé** ; • **utilisable** ; •• **recommandé**

Tableau 6 – Choix du démolant en fonction des peaux coffrantes

Peau coffrante	Démolant
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 bakéliné 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

■ Les **serre-joints** ne doivent pas être employés pour des poussées de béton frais supérieures à 50 kPa.

■ 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, et 1,5 pour l'acier dur.

1.4.4 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 5) :

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 esthétiquement acceptable ;
- 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.

1.4.5 Démoulants

Les démolants sont des produits d'interposition pour faciliter la séparation entre le béton et la peau coffrante. Les principaux éléments constituant les agents de démolage sont les suivants :

- séparation proprement dite (paraffines, cires liquides ou en pâtes, corps gras acides ou esters et tensioactifs) ;
- protecteurs des peaux coffrantes (antirouille, anticorrosion) ;

- anti-abrasion (pour éviter l'adhérence à la peau coffrante).

Les démolants sont répartis 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).

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

Dans le cas de séparation différée, et si le béton n'est pas étuvé ou ne subit qu'un étuvage à moins de 60 °C (en surface), le démolant doit être :

- exempt de solvant pour les peaux coffrantes en composite ;
- plus visqueux et adhérent pour les bétonnages en grandes hauteurs ;
- riche en éléments gras pour bétonnage par temps froid.

Si le béton subit un étuvage à plus de 60 °C (en surface), le démolant sera moins chargé en éléments gras (dopes), mais plus visqueux pour un étuvage à haute température.

Le choix du démolant est établi en fonction des peaux coffrantes (tableau 6).

Les excès de produits sur les peaux coffrantes sont néfastes et doivent être essuyés. Lorsque le démolant est pulvérisable, il est conseillé d'employer un pulvérisateur muni d'une buse avec filtre pour les impuretés.

1.5 Sécurité

1.5.1 Stabilité des banches

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

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

Les éléments essentiels à considérer en matière de sécurité sont multiples :

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

$$p = \frac{(c_1 - c_2) V^2}{1,63} \quad (\text{Pa})$$

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, est fixée à 85 km/h, soit une poussée de 342 Pa [17].

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

1.5.2 Charges en 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, souvent 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 ;
- effets dynamiques (benne de béton, ...).

Les précautions particulières à prendre concernent :

- l'incidence des dispositifs vibrants, et des matériels de mise en précontrainte ;

- le stockage temporaire et localisé des armatures avant leur mise en place ;
- les déversements massifs et localisés de béton ;
- les chocs et effets d'impact dus au déchargement brutal d'une benne de béton ;
- la transmission d'efforts de précontrainte par le coffrage.

1.5.3 Charges permanentes

Les charges propres au matériau et à son moulage comprennent :

- le poids propre des coffrages ;
- le poids propre des étais (bâtiment à plusieurs niveaux) ;
- le poids des armatures et des inserts dans le béton ;
- le poids du béton frais.

1.5.4 Poussée du béton frais courant sur les coffrages

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 estimée du fait de l'influence 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 :

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

avec h (m) hauteur réelle < 2 m.

Pour des parties d'ouvrages présentant des hauteurs supérieures à 2 m, le memento Cated, d'octobre 1992 et relatif aux coffrages [11], présente une méthode pratique de calcul qui s'appuie sur trois valeurs simultanées de la pression sur les parois du coffrage :

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

Seule la plus petite de ces trois valeurs de pressions, P_1 , P_2 et P_3 , données par les tableaux 7, 8 et 9 est prise en compte pour le calcul du coffrage.

Tableau 7 – Pression hydrostatique P_1 en fonction de la hauteur de béton frais

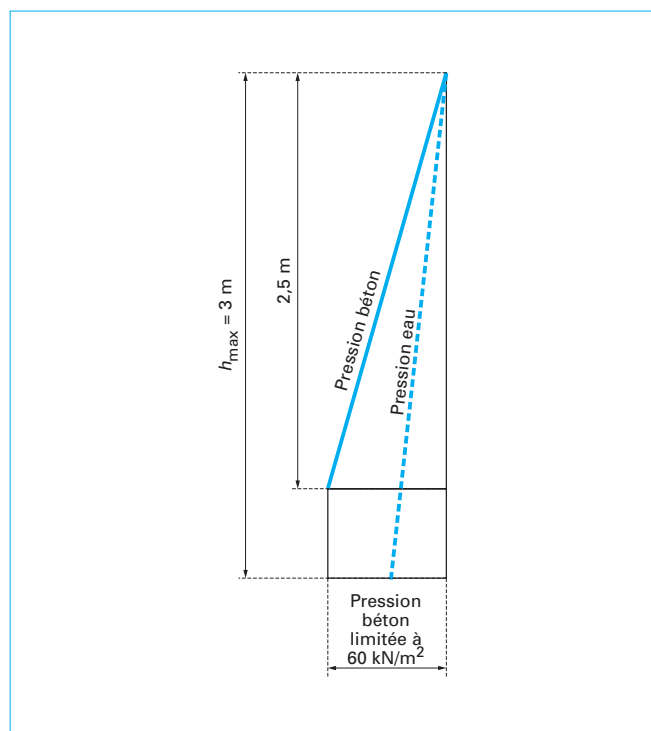
Hauteur (m)	2	3	4	5	> 6
P_1 (kN/m ²)	50	75	100	125	150

Tableau 8 – Pression P_2 . Prise en compte de l'effet de voûte (en kN/m²)

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

Affaissement au cône (cm)	Température du béton (°C)	Vitesse de remplissage <i>v</i> (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		
	15	40	45	55	65	75	100	125	150	150		
	20	35	40	45	50	55	70	90	105	125		
7,5	5	60	85	110	140	150	150	150	150	150		
	10	50	65	85	105	125	150	150	150			
	15	40	50	65	80	95	125	150	150			
	20	35	40	50	60	70	90	115	135			
10	5	70	100	130	150	150	150	150	150			
	10	55	75	100	120	150	150	150	150			
	15	45	60	75	90	110	150	150	150			
	20	35	45	55	70	80	110	130	150			

**Figure 5 – Limitation de la poussée du béton frais**

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 banches 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 5).

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

1.5.5 Poussée du béton auto-plaçant sur les coffrages

Actuellement, il n'existe pas de modèle scientifique permettant d'évaluer la pression qui peut être atteinte dans le coffrage. Le recours à quelques règles empiriques déterminées sur certains types de bétons est alors inévitable :

- la fluidification du béton auto-plaçant, ou simplement fluide, conduit à estimer que les poussées sur les coffrages sont *a priori* sensiblement supérieures à celles prises en compte avec les bétons courants plastiques ou très plastiques ;
- la pression du béton est fonction des dimensions (hauteur, mais aussi largeur) de l'élément coulé, de la nature du béton (évolution de la fluidité et de la viscosité du mortier, teneur en gravillons, ...) et de ses conditions de mise en œuvre (température, hauteur de chute, vitesse de montée dans le coffrage).

Les premières expérimentations ont montré :

- que la poussée à prendre en compte était la poussée hydrostatique du béton frais pour une vitesse de montée normale dans le coffrage ;
- qu'il existe une vitesse critique, au-delà de laquelle il convient de prévoir des renforcements de structure coffrante ;
- et qu'à vitesse lente, il est possible de considérer une poussée un peu plus faible que la poussée hydrostatique.

La mise en place par pompage par le bas des coffrages peut entraîner des pressions localement supérieures à la poussée hydrostatique.

1.5.6 Déformation des ouvrages provisoires

Les systèmes coffrants utilisés pour l'exécution des dalles ou des tabliers sont supportés, soit par un étaieement vertical constitué de tours, soit par un cintre fait d'un système de poutres horizontales. L'expérience montre que les déformations du cintre ou des étaieements peuvent engendrer des désordres au niveau de l'ouvrage, comme une fissuration du béton jeune, des 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.**

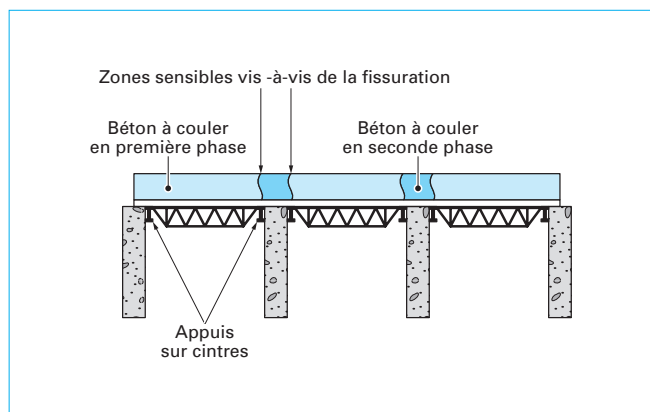


Figure 6 – Phases de bétonnage sur ouvrage à plusieurs travées

Pour un ouvrage nécessitant un cintre à plusieurs travées, il est 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 6). Le Setra précise les limites admissibles de la déformation des ouvrages provisoires sous le poids du béton frais [19] :

- les étalements ne doivent pas subir de déplacement supérieur à 2 cm pendant 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 exprimés en centimètres.

L'admissibilité de cette flèche limite peut être appréciée sur la figure 7 où les droites d'équation $f = \frac{\ell}{2\,000} + 2$ et $f = \frac{\ell}{300}$ partagent le secteur en trois zones :

- **zone 1**, les flèches sont admissibles sans précautions particulières ;
- **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) ;
- **zone 3**, les flèches ne sont pas admissibles.

1.5.7 Charges sur planchers

Pour les bâtiments, les cadences de bétonnage restent élevées et le dernier béton coulé n'atteint pas la résistance pour supporter une nouvelle dalle avec ses charges. Les dalles restent alors étayées pendant plusieurs semaines. Avant que la structure commence à reprendre une partie de son poids propre, les étais inférieurs supportent la totalité des étages bétonnés avant leur retrait.

Le calcul prend en compte la totalité du béton, des coffrages et des charges de service existant avant cette échéance. Aucune réduction dans les charges n'est admise quand on replace des étais, mais une telle opération provoque toujours un accroissement de la charge sur le plancher qui reçoit les étais.

L'exemple (tableau 10) donne l'analyse simplifiée des charges sur les étais et sur les dalles d'une structure à 4 étages construite avec les hypothèses suivantes [20] :

- 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 ;

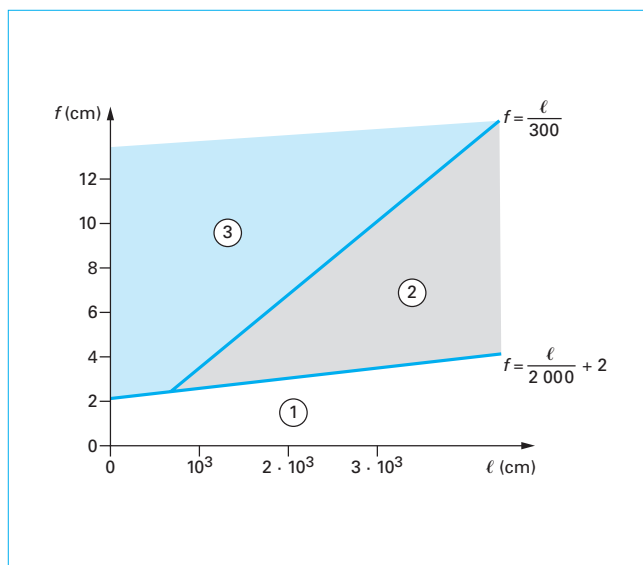


Figure 7 – Admissibilité des flèches des cintres en fonction de leur portée

- le poids total des coffrages et des étais est appliqué en tête des étais ;
- le poids total du ré-étalement est appliqué en tête de celui-ci ;
- les étais et ré-étalements sont infiniment rigides par rapport aux dalles ;
- les charges de service sont retirées avant tout décoffrage ;
- 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 $6,05 P$;
 - les charges de service $0,5 P$.

Les charges reprises par les dalles successives doivent être comparées aux caractéristiques du béton des dalles, aux instants respectifs des reprises de charges, avec prise en compte du planning des bétonnages et des cadences de retrait des étais.

1.5.8 Prévention des risques liés à la conception

La sécurité sur chantier est primordiale aux niveaux du montage et de l'emploi des coffrages et repose sur [23] :

- le respect des règlements nationaux et locaux ;
- la garantie de la sécurité des personnels travaillant sur le chantier ;
- l'assurance de la sécurité du public susceptible de passer, ou de séjourner, sur le site ou à proximité des travaux ;
- la garantie de stabilité des ouvrages provisoires.

Si les accidents de coffrages relèvent souvent d'erreurs de construction ou de défauts de surveillance sur chantier, ils peuvent aussi impliquer la conception du chantier :

- mauvaise prise en compte de la poussée du béton frais ;
- appréciation erronée des reprises de charges sur les étages sous-jacents ;
- non-prises en compte des composantes de force non verticale et 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.

**Tableau 10 – Exemple d’analyse simplifiée des charges sur étais et sur dalles
en cours de construction d’une structure à 4 étages (d’après [20])**

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							<ul style="list-style-type: none"> • 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					<ul style="list-style-type: none"> • 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					<ul style="list-style-type: none"> • Ce retrait soulage les étais.
4	Décoffrage et retrait de l'étais 1	0	1,05	0,05	1,05					<ul style="list-style-type: none"> • Les charges sont reprises par les dalles 1 et 2. • Le retrait du coffrage et des étais est à déduire de ces charges. • Chaque étau reprend la charge non reprise par la dalle supérieure.
5	Ré-étalement niveau 1	0,05	1,05	0,05	1,05					<ul style="list-style-type: none"> • Le ré-étalement supporte son propre poids.
6	Bétonnage de la dalle 3	1,65	1,05	1,65	1,05	1,6	0			<ul style="list-style-type: none"> • 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			<ul style="list-style-type: none"> • Ce retrait soulage les étais.
8	Retrait du ré-étalement niveau 1	0	1,41	0,41	1,42	0,73	0,37			<ul style="list-style-type: none"> • La charge, que reprenait le ré-étalement diminuée du poids de ce ré-étalement, est reprise équitablement par les trois dalles. • Chaque étau 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			<ul style="list-style-type: none"> • 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 étau reprend la charge non reprise par la dalle supérieurs.
10	Ré-étalement niveau 2	0	1,05	0,1	1,58	0,58	0,52			<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • Les dalles 1, 2 et 3 reprennent équitablement la nouvelle charge. • Chaque étau 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	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 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 étau 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	<ul style="list-style-type: none"> • 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 étau 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	<ul style="list-style-type: none"> • Les dalles 3 et 4 prennent la charge de leur propre poids.

Tableau 11 – Rôle des intervenants dans une opération de coffrage

Opération	Intervenant concerné
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, 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, 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

1.6 Préparation, emploi et entretien des coffrages

1.6.1 Rôle des intervenants sur chantier

Pendant l'exécution des travaux, la responsabilité de l'entrepreneur est totale 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. L'entrepreneur communiquera ses exigences particulières à ses sous-traitants : le projeteur, le fabricant, le monteur et le contrôleur. Les rôles de chaque intervenant peuvent être répartis comme indiqué dans le tableau 11.

1.6.2 Programme de coffrage

Les objectifs principaux d'un programme de coffrage, établi par le directeur ou le chef de chantier, sont la bonne 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 remploi ;
- 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 suivant les conditions climatiques ou les phases du chantier.

Le programme comporte au minimum 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.

Ces opérations sont détaillées dans le **plan assurance qualité** qui constitue, en fait, une garantie fournie par l'entrepreneur et ses sous-traitants au maître d'œuvre [22] :

- pour le maintien sur le chantier des moyens en personnels et en matériels ;
- pour la bonne utilisation des matériaux annoncés, et des méthodes de construction et de vérification définies préalablement.

1.6.3 Préparation des coffrages

Le coffrage est généralement conçu et fabriqué en amont, puis livré sur chantier. Il doit alors être réceptionné par le monteur. Ce dernier réceptionne tous les éléments constituant l'outil coffrant et l'assemble *in situ*, 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.

1.6.3.1 Préparation de la peau coffrante

La préparation des opérations de décoffrage commence bien avant les opérations de détonnage, car la première précaution consiste à préparer la peau coffrante, c'est-à-dire la surface du moule qui sera en contact direct avec le béton. Les vérifications préalables à effectuer, avant tout emploi de peau coffrante, sont chronologiquement les suivantes :

- l'intégrité de la peau (pas de déchirure, ni de trous) ;
- si la peau est fixée sur la structure coffrante, cette fixation doit être générale sur toute la surface (bon collage et bonne tension) ;
- la propreté de la peau, avant application de produits démoulants (pas de restes de laitance de béton, ni de traces grasses, de boue, de rouille ou de craie de traçage).

■ Les **problèmes d'adhérence** du béton à la peau coffrante doivent ensuite être traités. Les mécanismes d'affinité à l'interface béton-peau coffrante étant difficiles à déterminer, l'interposition d'une **couche séparatrice anti-adhérente (huile de décoffrage)** semble la solution plus pratique, mais le recours à ce procédé sur chantier impose la maîtrise des critères suivants [68] :

- une bonne connaissance du rôle de l'huile de décoffrage retenue ;
- les paramètres de choix de l'huile en fonction du cahier des charges du chantier (démoulage instantané ou différé, nature de la peau coffrante, type de béton, ...) ;

- les conditions de fonctionnement de l'huile aux interfaces prévues sur le charnier ;
- la maîtrise du mode d'application propre à l'huile, d'une part, et à la nature de la peau coffrante, d'autre part.

Les **fonctions générales demandées aux huiles de démoulage** sont de divers ordres :

- éviter tout phénomène d'adhérence entre le béton durci et la peau coffrante ;
- éviter toute altération superficielle de la peau du béton (tache ou souillure) ;
- préserver l'intégrité des peaux coffrantes si le réemploi est prévu et, dans ce cas, accroître le nombre de réemplois ;
- limiter l'encrassement des moules pour réduire les opérations de nettoyage.

■ Les **types de démoulants** se distinguent à partir de leur origine : végétale, produit de synthèse, minérale, ou produit recyclé. À cet effet, les producteurs ont adopté une classification qui intègre les critères d'information relatifs à la sécurité feu, la santé et l'environnement ([69], tableau 12).

■ Le **mode d'application des huiles** a un effet sensible sur le rendu des parements, selon que la peau coffrante est neuve ou usagée (tableau 13).

Tableau 12 – Classification Synad des agents de démoulage (d'après [69])

Appellation	Critères d'information		
	Sécurité feu	Santé	Environnement
	Point d'éclair	Évaporation de COV*	Biodégradabilité ultime
Pur végétal	> 100 °C	Nulle	Totale, sans pollution d'atmosphère
À base végétale	61 à 100 °C	Faible avec teneur en aromatiques < 1 %	Totale, avec très légère évaporation de COV
Émulsion d'huile végétale	> 100 °C	Nulle	
Pur synthèse		Très faible	Pas de biodégradabilité ultime, avec évaporation de COV
Synthèse	61 à 100 °C	Faible avec teneur en aromatiques < 1 %	
Émulsion d'huile de synthèse	Toutes possibilités	Importante avec teneur en aromatiques < 1 %	Pas de biodégradabilité ultime, avec évaporation importante de COV
Minérale neuve		Importante avec teneur en aromatiques < 1 %	
Produit recyclé		Importante avec teneur en aromatiques > 1 %	Pas de biodégradabilité ultime, avec évaporation de COV et d'aromatiques

COV : composés organiques volatiles

Tableau 13 – Influence du mode d'application de l'huile de démoulage sur l'aspect des parements

Mode	Huile	Végétale		Minérale		De synthèse	
Pulvérisation	Sur moule	Neuf	Usagé	Neuf	Usagé	Neuf	Usagé
Buse conique	Qualité aspect	Bon	Passable	Mauvais			
	Microbullage	Passable	Bon	Passable			
	Poussiérage	Très bon		Excellent			
Avec raclage	Qualité aspect	Bon	Mauvais	Passable	Mauvais	Passable	Mauvais
	Microbullage	Bon	Bon		Passable		
	Poussiérage	Excellent	Très bon	Excellent			
Buse plate	Qualité aspect	Passable	Mauvais		Très mauvais	Mauvais	Très mauvais
	Microbullage	Mauvais					
	Poussiérage	Très bon		Excellent			

Tableau 14 – Charges de service de chantier

Nature de la charge	Modélisation
Masse répartie d'une équipe de bétonnage	<ul style="list-style-type: none"> • Charge 5 kN/m² sur une surface de 3 m × 3 m, disposée de la manière la plus pénalisante. • Charge de 0,75 kN/m² sur le reste de la surface horizontale à bétonner (tous les coefficients ψ correspondants étant égaux à 1).
Charge ponctuelle : stockage des matériaux	1,5 kN/m ² (sur une surface maximale de 1 m × 1 m)
Charge ponctuelle : poids d'un homme placé dans les conditions les plus pénalisantes	90 daN (selon norme NF P 93-350)
Poids du béton frais	24,5 kN/m ³ (selon norme NF P 93-350)

Tableau 15 – Paramètres v et q en fonction des zones de la carte des vents

Zones	Valeurs normales		Valeurs extrêmes	
	v	q	v	q
	km/h	Pa	km/h	Pa
1	103,0	500	136,9	875
2	112,7	600	149,1	1 050
3	126,0	750	166,6	1 310
4	137,9	900	182,5	1 575

■ Pour le **choix du type d'huile**, généralement fait au niveau chantier, il convient de retenir que les huiles végétales conduisent à de bons résultats et offrent une bonne protection vis-à-vis de l'encrassement des peaux coffrantes, mais elles facilitent le poussièrement sur les parois des moules après décoffrage. Il sera donc nécessaire de prévoir une protection de ces peaux lors du stockage, et un nettoyage avant réemploi.

Avant tout emploi, il convient de ré-homogénéiser les huiles de démoulage. De plus, il convient de noter que la pulvérisation, suivi du raclage du film d'huile végétale, permet l'obtention d'un film homogène, mais que le raclage d'un film d'huile minérale endommage ce dernier. Cependant, certaines huiles végétales voient augmenter sensiblement leur viscosité avec une baisse de températures, et nécessitent donc alors des précautions d'emploi.

Les huiles à base minérale ont une faible compatibilité avec l'environnement et **peuvent provoquer des désagréments auprès des opérateurs**. Mais, de façon générale, l'application d'un produit de démoulage par pulvérisation nécessite le port de masque et de lunettes. La protection du corps et le port de gants sont également recommandés.

1.6.3.2 Stabilité des banches et ouvrages provisoires

La rigidité et la stabilité du coffrage, vis-à-vis des contraintes mécaniques, doivent assurer les dimensions prescrites de la partie d'ouvrage concernée. Certaines actions, comme la poussée du béton frais, les actions du vent, ou la stabilité des appuis sont, en général, prévisibles. D'autres actions, comme l'ouverture des coffrages en cours de bétonnage (serrage de l'outil coffrant défectueux), les chocs d'origine externe, les surcharges ponctuelles (personnel et matériels) sur des coffrages mal assurés constituent les efforts accidentels, donc imprévisibles, et pour lesquels la seule solution repose sur une meilleure organisation et un savoir-faire d'entreprise.

À titre indicatif, les charges de service les plus courantes, avec l'hypothèse d'une hauteur de chute de béton inférieure à 1 m et d'absence de choc (benne à béton, par exemple), sont reprises au tableau 14.

1.6.3.3 Stabilité sous l'action du vent

L'effet du vent sur les coffrages est surtout sensible avant le bétonnage. La stabilité des coffrages vides constitue un risque important pour la sécurité des personnes, pendant cette période. Les éléments de calcul présentés ci-après sont tirés de la fiche Memoar « stabilité des coffrages », éditée par le Setra ([72], voir figure 8).

L'action du vent dépend de la configuration de l'obstacle et comprend des surpressions et des dépressions s'exerçant sur les différentes surfaces du coffrage. La traînée, ou projection de la résultante de l'action du vent sur la direction du vent, est exprimée par la formule :

$$T = C_t S q$$

avec S (m²) surface de la projection du contour apparent de l'élément sur le plan perpendiculaire à la direction du vent, les éventuelles nervures saillantes prises en compte, et la surface des vides déduite,
 C_t coefficient de traînée,
 q (daN/m²) pression dynamique calculée à partir de la masse volumique de l'air ρ (kg/m³), et la vitesse du vent (m/s) par la formule :

$$q = \rho \frac{v^2}{16,3}$$

Par **exemple** $q = 46$ daN/m²

avec $\rho = 1,332$ kg/m³ pour un air saturé à 0 °C, sous 780 mm de Hg et $v = 23,6$ m/s. Voir les valeurs de v et q données au tableau 15.

Le coefficient global de traînée à prendre en compte pour la détermination de la stabilité d'une banche courante doit être équivalent à $C_t = 1,75$. Cette valeur s'entend hors majoration de site « ponctuel », c'est-à-dire les positions relatives que peut occuper une banche sur le plan de travail, comme par exemple une banche placée entre deux voiles parallèles déjà réalisés et orthogonalement à ceux-ci.

Bien que les pressions indiquées pour la prise en compte du vent dans les ponts, en cours de construction, ne soient pas applicables à la stabilité des coffrages, celles-ci ne s'appliquant qu'au calcul des ponts proprement dits, il y a lieu de tenir compte, sur la structure, de l'effet de cette pression appliquée aux coffrages, lorsque ceux-ci présentent une surface nette supérieure à celle de la structure qu'ils enveloppent.

Les équipements des banches et, particulièrement les plates-formes, doivent être conçus de façon à offrir une résistance au vent la plus réduite possible : lisses tubulaires, platelages ajourés, etc.

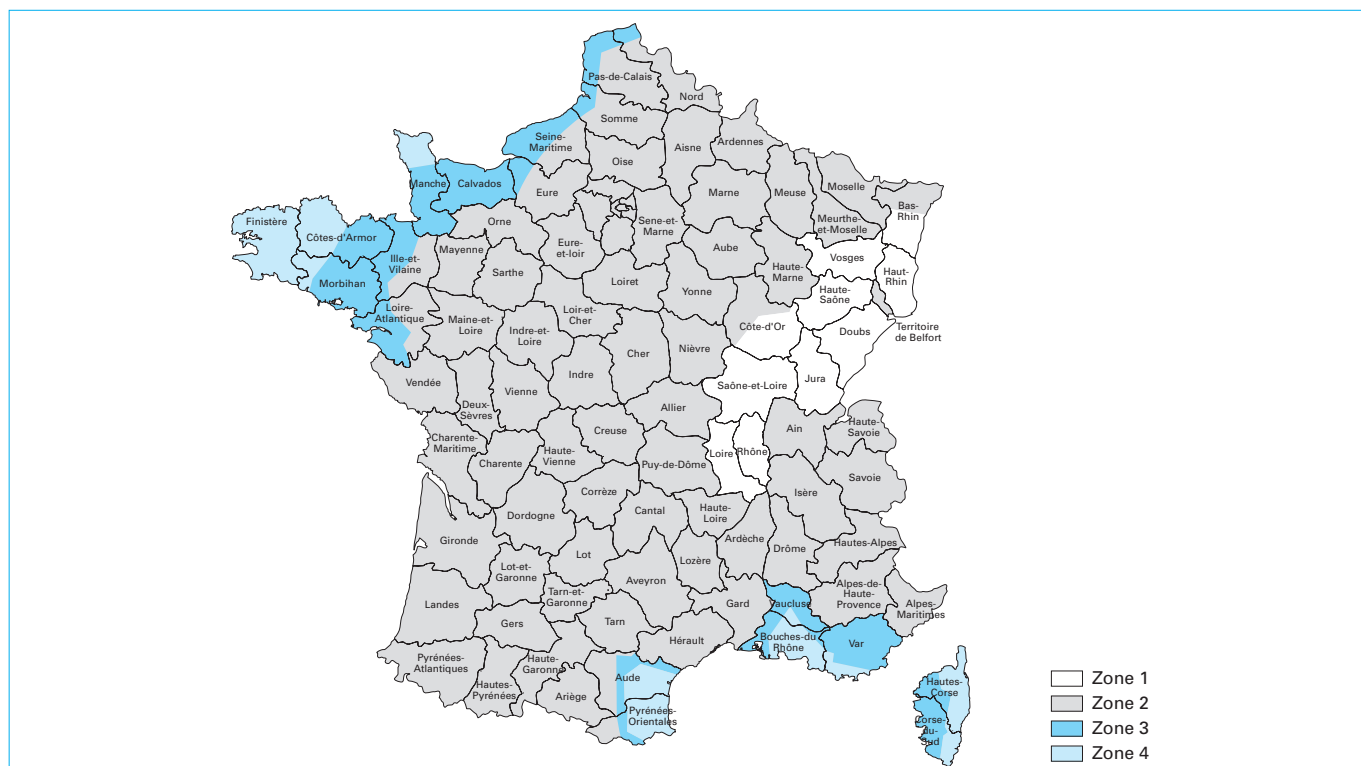


Figure 8 – Carte des zones de vents en France métropolitaine (DTU P06-002)

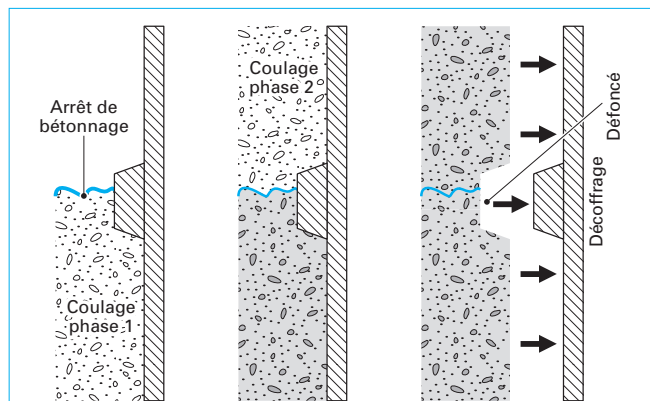


Figure 9 – Arrêt de bétonnage avec joint marqué

1.6.3.4 Joints de construction

Pour l'exécution des joints de construction, il est nécessaire de prévoir (figure 9) :

- des règles trapézoïdales pour réaliser les défonce sans arrachement du béton au décoffrage ;
- des baguettes au droit du joint pour obtenir l'alignement au niveau des reprises (rainures par exemple) ;
- interposer des baguettes pour chanfreiner les angles ;
- des joints d'étanchéité pour éviter toute fuite de laitance ou de mortier ;
- de veiller au serrage efficace des outils coffrants sur les parties d'ouvrages déjà exécutées ;
- d'assurer une protection des attentes pour éviter les formations et coulures de rouille ;
- et de coffrer au droit des arrêts de bétonnage.

Lorsque les armatures en attente sont en acier HA, le pliage n'est pas autorisé (sauf justification) et deux solutions de masquage sont envisageables :

- masque par surface pleine (tôle, panneau de bois ou contreplaqué) avec ouvertures pour le passage des armatures et joints, de façon à rendre possibles toutes les opérations de coffrage et décoffrage ;
- masque par grille en composite ou métal déployé avec raidisseurs. Ces grilles doivent être retirées avec soin juste après la fin de prise.

1.6.3.5 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.

1.6.3.6 Vérifications avant bétonnage

La vérification de la préparation avant le bétonnage incombe au chargé des ouvrages provisoires (ou coffrages) et porte essentiellement sur les points suivants :

- 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 sont prévues de façon à éviter les épaufures ou ecornures au décoffrage ;
- les inserts sont positionnés de façon à rester intacts et fixes aux bétonnage et 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.

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.

1.6.4 Cas des armatures coffrantes

Ces armatures coffrantes font l'objet d'un brevet. Le produit, constitué d'un outil coffrant solidaire des armatures, est préfabriqué en usine à la demande pour garantir son adaptabilité aux conditions du chantier. Les cages préfabriquées sont livrées en panneaux de hauteur d'étagé et leur mise en œuvre ne nécessite pas d'engin de levage.

Les nappes de treillis de la cage d'armature sont disposées de chaque côté du voile à réaliser et reliées par des crochets en acier tressés autour des aciers HA principaux et disposés dans des plans sécants. Le tissage ainsi réalisé assure un fretage optimal, indépendant de la qualité des soudures.

La peau rigide filtrante a pour fonction principale la réduction de la pression hydrostatique de coulage. Elle comporte des cales en plastique pour garantir l'enrobage minimal réglementaire des aciers HA.

Les peaux filtrantes sont réalisées en métal galvanisé, pour les ouvrages courants en atmosphère sèche, ou en composite, dans le cas de risque de corrosion. Le problème de réemploi ne se pose pas puisque les peaux restent solidaires du béton durci.

1.6.5 Nettoyage et entretien des peaux coffrantes

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.

1.6.5.1 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.

1.6.5.2 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.

1.6.5.3 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.

1.6.5.4 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).

1.6.5.5 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.

1.6.5.6 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.

1.6.5.7 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.

1.6.6 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, le stockage du coffrage est assuré 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, en prenant soin d'assurer sa stabilité (vent notamment) ;
- 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 16).

Certaines peaux coffrantes en composite nécessitent des précautions spéciales pour le stockage des systèmes coffrants (tableau 17).

Tableau 16 – Précautions spécifiques de stockage des coffrages avec une peau coffrante courante

Peau coffrante	Précautions spécifiques
Métal	Stockage avec produit de protection superficielle
	Stockage à l'abri de l'humidité
	Ne pas appuyer la peau coffrante contre une arête vive ou un point dur
	Éviter tout choc dur sur la peau coffrante
	En cas d'impossibilité de s'affranchir de la présence de poussières pendant le stockage, prévoir un nettoyage général avant réemploi
	Le coffrage stocké doit être calé et arrimé pour éliminer tous risques de chutes sur le sol, ou sur un autre élément quelconque
	Le stockage doit être assuré pour éviter tous risques de chutes d'éléments lourds ou de matériaux sur la peau coffrante
	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)
Bois brut ou traité Contreplaqué ordinaire	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 au coulage
	Ne pas appliquer de cire avant stockage, tout contact créant une marque indélébile
	Éviter tout choc d'outils métalliques ou d'autres pièces lourdes sur la peau coffrante
	Tout contact de la peau coffrante avec un quelconque élément entraîne des traces indélébiles sur le parement en béton
	Limiter les risques de condensation dans le cas où la peau coffrante est protégée par une bâche imperméable
Contreplaqué bakérisé	Ne pas appuyer la peau coffrante contre une arête vive ou un point dur
	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 la peau du béton au coulage
	Tout choc d'outils métalliques ou de toutes autres pièces lourdes sur la peau coffrante nécessite le remplacement de celle-ci dans son intégralité

Tableau 17 – Précautions spécifiques de stockage des coffrages avec une peau coffrante spéciale

Peau coffrante	Précautions spécifiques
Matrice en polystyrène	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 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

1.6.7 Prévention des risques sur chantier

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.

■ **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.

■ **Pendant le bétonnage**, les causes d'anomalie sont également multiples et nécessitent une vigilance accrue :

- 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 (bennes, camions, ...) ;
- des déversements locaux et imprévus de béton ;
- une vibration intensive et incontrôlée.

La **surveillance du comportement de l'outil coffrant** pendant le bétonnage relève de 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.

■ **Après le bétonnage**, les risques sont en moins grand nombre, mais tout aussi redoutables :

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

2. Armatures dans le béton

La réalisation de structure en béton armé est justifiée par la nécessité de :

- reprendre les efforts de traction non supportables par le béton seul ;
- limiter la fissuration ;
- assurer la liaison entre parties d'ouvrage ;
- garantir une certaine sécurité.

Assurer ces fonctions à l'ouvrage neuf implique naturellement de les conserver pendant la durée de vie de l'ouvrage. Il convient donc de prévoir, dès la conception, les conditions de protection de ces armatures noyées dans le béton. Les principaux risques d'altération de ces fonctions peuvent provenir du béton lui-même, ou de son environnement :

- des réactions alcalis granulats (dues aux constituants du béton) ;

- des réactions sulfatiques (dues aux constituants du béton) ;
- de la carbonatation ;
- de l'attaque par les chlorures contenus dans le béton ;
- de la pénétration des chlorures (eau de mer, sels de déverglaçage) ;
- des attaques chimiques (sols naturels ou stockage de produits agressifs).

Pour assurer la prévention contre les risques multiples de corrosion, il convient donc d'utiliser des bétons les plus compacts possibles et exempts de risques de réaction de gonflement (alcali-réaction, ou réaction sulfatique), d'une part, et de veiller à assurer des épaisseurs minimales d'enrobage des armatures en acier, d'autre part.

2.1 Préparation des armatures

Les aciers pour béton armé utilisés pour des besoins structuraux doivent être conformes aux caractéristiques essentielles spécifiées par la norme NF EN 10080, et le rester de façon significative après redressage, coupe, façonnage, assemblage ou soudage, et adjonction de dispositifs spéciaux. De plus, toutes les armatures coupées, façonnées ou assemblées doivent répondre aux spécifications de la norme NFA 35-027. Les armatures de même apparence géométrique, mais différentes par leurs caractéristiques, ne doivent pas être utilisées sur un même ouvrage. Il convient donc de prévoir en amont la réception des matériaux et produits de base avec identification et vérification de la conformité aux normes.

Par temps froids le façonnage des armatures doit être arrêté (température $< -5^{\circ}\text{C}$) ou soumis à des précautions particulières (température comprise entre -5 et $+5^{\circ}\text{C}$). Une fois fabriquées, les conditions de transport et de mise en place ne doivent pas engendrer de déformation, souillures, altérations de surfaces ou rupture.

Les vérifications à effectuer avant bétonnage doivent comprendre :

- conformité des aciers constitutifs ;
- conformité des pièces assemblées aux plans (forme et dimension, quantité d'éléments constitutifs) ;
- absence d'anomalies visuelles sur les parties dressées et les assemblages soudés ;
- rigidité de l'ensemble façonné ;
- calage dans le coffrage avec respect des enrobages prévus.

2.2 Enrobage minimal des armatures

Un enrobage minimal des aciers doit être assuré pour garantir la transmission des forces d'adhérence, la protection de l'acier contre la corrosion, et la résistance convenable au feu. L'enrobage est mesuré par l'écart existant entre la surface de l'armature la plus proche de la surface du béton et cette dernière [eurocode 2 - norme NF EN 1992-1-1].

2.2.1 Cas de la fabrication sur site

L'enrobage nominal est défini par l'enrobage minimal (C_{\min}), augmenté des tolérances d'exécution (ΔC_{dev}) :

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

L'enrobage minimal C_{\min} est précisé par l'eurocode 2 comme la valeur maximale d'un des trois paramètres suivants :

- 10 mm ;
- ou l'enrobage minimal $C_{\min,b}$ vis-à-vis des exigences d'adhérence ;
- ou l'enrobage déterminé par la quantité $C_{\min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}$,

avec $C_{\min,b}$ fixé par l'eurocode 2 (NF EN 1992-1-1- et NF EN 1992-1-1/NA) comme égal au diamètre de la barre pour une armature individuelle et au diamètre équivalent Φn pour un paquet avec :

$$\Phi n = \Phi n_b^{1/2} \leq 55 \text{ mm}$$

avec $C_{\min,dur}$ enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'exposition (norme NF EN 206-1 paragraphe 4),
 $\Delta C_{dur,y}$ marge de sécurité propre à chaque pays,
 $\Delta C_{dur,st}$ réduction d'enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable,
 $\Delta C_{dur,add}$ réduction d'enrobage minimal, si application d'un revêtement de protection.

Pour les bâtiments et ouvrages courants en béton armé, l'enrobage minimal $C_{\min,dur}$ requis vis-à-vis de la durabilité, est déterminé en fonction des classes d'exposition de la norme NF EN 206-1 et des classes structurales suivant les prescriptions du tableau 18.

Dans le cas de précontrainte, le tableau précédent est sensiblement plus contraignant (tableau 19).

Pour les classes d'exposition XF, l'enrobage est déterminé par référence à une classe XC, ou XD si les dispositions propres au béton pour ces classes XF sont respectées. La norme NF EN 1992-1-1/NA fixe les règles de correspondance (tableau 20).

Les recommandations de modifications de classe structurale prévues par la norme précédente sont récapitulées dans le tableau 21.

Pour les tolérances d'exécution, la norme NF EN 1992-1-1 fixe des plages recommandées pour le paramètre ΔC_{dev} , récapitulées dans le tableau 22.

Tableau 18 – Valeurs de $C_{\min,dur}$ pour béton armé en fonction des classes structurales et des classes d'expositions

Classes structurales	Classes d'exposition suivant NF EN 206-1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XD2	XD3/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4*	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

* La classe structurale à retenir pour les bâtiments et ouvrages de génie civil courants (durée de service de 50 ans) est S4.

Tableau 19 – Valeurs de $C_{\min,dur}$ pour béton précontraint en fonction des classes structurales et des classes d'expositions

Classes structurales	Classes d'exposition suivant NF EN 206-1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XXS1	XD3/XS2	XD3/XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4*	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

Tableau 20 – Classes de référence à retenir pour les classes XF en fonction du type de salage (hors produits industriels du béton)

Type de salage	Classes d'exposition			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Peu fréquent	XC4	Sans objet	XC4 (sans air entraîné) XD1 (avec air entraîné)	Sans objet
Fréquent	Sans objet	XD1 XD3 pour éléments très exposés	Sans objet	XD2 XD3 pour éléments très exposés
Très fréquent	Sans objet			XD3

Tableau 21 – Modulation de la classe structurale recommandée

Classes structurales		Classes d'exposition suivant NF EN 206-1						
		X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/ XA1	XD2/XS2/ XA2	XD3/XS3/ XA3
Durée de service	100 ans	Majoration de deux classes structurales						
	≤ 25 ans	Minoration d'une classe structurale						

Tableau 21 – Modulation de la classe structurale recommandée (suite)

Classes structurales	Classes d'exposition suivant NF EN 206-1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/ XA1	XD2/XS2/ XA2	XD3/XS3/ XA3
Classe de béton	≥ C30/37 et < C50/60		≥ C30/37 et < C55/67	≥ C35/45 et < C60/75	≥ C40/50 et < C60/75		≥ C45/55 et < C70/85
	Minoration d'une classe structurale						
	> C50/60		> C55/67	> C60/75		> C70/85	
	Minoration de deux classes structurales						
Emploi de ciment CEM I, sans cendres volantes		Avec béton C35/45		Avec béton C40/50			
		Minoration d'une classe structurale					
Enrobage compact	Minoration possible d'une classe structurale						

Tableau 22 – Recommandations pour fixer la marge due aux tolérances d'exécution

Conditions de surveillance de chantier	ΔC_{dev}	
	Minimal	Maximal
Système d'assurance qualité sur l'enrobage avant coulage	5 mm	10 mm
Si possibilité de mesure précise avec rejet des non-conformités (préfabrication par exemple)	0 mm	
Système d'assurance qualité complet, de la conception à l'exécution		

2.2.2 Cas de la préfabrication en usine

La norme NF EN 13369 Compil précise l'enrobage minimal des armatures en acier vis-à-vis de la protection contre la corrosion dans les produits préfabriqués en béton. Les spécifications d'enro-

bage minimal – en harmonie avec les prescriptions de la norme NF EN 206-1 – sont détaillées pour des conditions courantes, d'une part (tableaux **23** et **24**), et pour des conditions alternatives, d'autre part (tableau **25**).

Tableau 23 – Classes de référence à retenir pour les classes XF en fonction du type de salage (hors produits industriels du béton)

Type de salage	Classes d'exposition			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Peu fréquent	XC3	Sans objet	XC2	Sans objet
Fréquent	Sans objet	XD1 XD3 pour éléments très exposés	Sans objet	XD1 XD3 pour éléments très exposés
Très fréquent	Sans objet			XD3

Tableau 24 – Enrobage minimal pour produits industriels du béton en conditions courantes (mm)

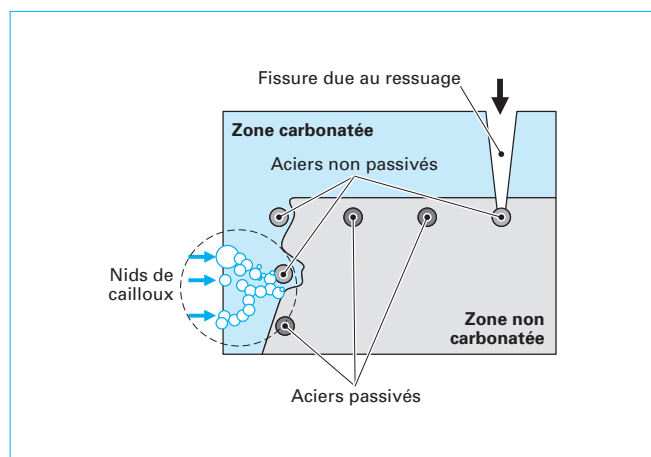
Classe de béton de référence C_0	Classes d'exposition NF EN 206-1	Armatures de béton armé dans les dalles		Autres armatures de béton armé		Armatures de précontrainte par pré-tension dans les dalles		Autres armatures de précontrainte par pré-tension	
		$\geq C_0$	$< C_0$	$\geq C_0$	$< C_0$	$\geq C_0$	$< C_0$	$\geq C_0$	$< C_0$
C30/37	X0	10							
	XC1	10			15			20	
C35/45	XC2/XC3	10	15	20		25		30	
C40/50	XC4	15	20	25		30		35	
	XD1/XS1	20	25	30		35		40	
	XD2/XS2	25	30	35		40		45	
C45/55	XD3/XS3	30	35	40		45		50	

Tableau 25 – Enrobage minimal pour produits industriels du béton avec conditions alternatives (mm)

Armatures	Conditions alternatives	Classes d'exposition NF EN 206-1							
		X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3	
De béton armé dans les dalles	Cas 1	10	10	10	10	15	20	25	
	Cas 2					10	15	20	
Autres cas de béton armé	Cas 1				15	20	25	30	
	Cas 2				10	15	20	25	
De précontrainte par pré-tension dans les dalles	Cas 1			15	20	25	30	35	
	Cas 2			10	15	20	25	30	
Autres armatures de précontrainte par pré-tension	Cas 1		15	20	25	30	35	40	
	Cas 2		10	15	20	25	30	35	
Conditions alternatives de cas 1				Conditions alternatives de cas 2					
<ul style="list-style-type: none">• Emploi d'aciers auto-résistants• Protection anti-corrosion des aciers• Emploi de béton C40/50 avec une absorption d'eau < 5 %				Emploi de béton C50/60 avec une absorption d'eau < 4 %					

Tableau 26 – Facteurs sensibles aggravant la carbonatation du béton

Origines		Facteurs
Béton	Matériau	<ul style="list-style-type: none"> • Nature inadaptée du ciment • Dosage insuffisant en ciment (figure 11) • Excès d'air entraîné • Porosité du béton
	Structure	<ul style="list-style-type: none"> • Manque de compacité dû à un défaut de serrage dans la zone d'enrobage • Défauts de texture superficielle : nids de cailloux, huilage excessif, tassure • Ressuage sur dalle ou semelle avec ouvertures de fissures • Défaut d'épaisseur d'enrobage • Fissuration importante
Milieu ambiant	Conditions naturelles	<ul style="list-style-type: none"> • Humidité de l'air • Températures élevées
	Conditions environnementales	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosphères industrielles • Gaz d'échappement provoquant l'acidification des pluies

**Figure 10 – Influence de la carbonatation sur la dépassivation des armatures****■ Conditions courantes**

Les conditions dites « dans les dalles » sont à utiliser lorsqu'une seule face du produit industriel est exposée aux agents externes.

■ Conditions alternatives

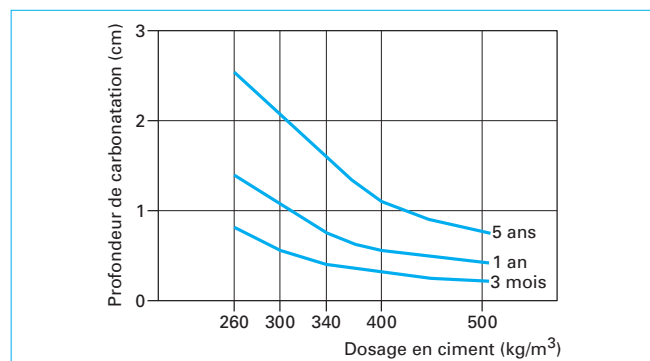
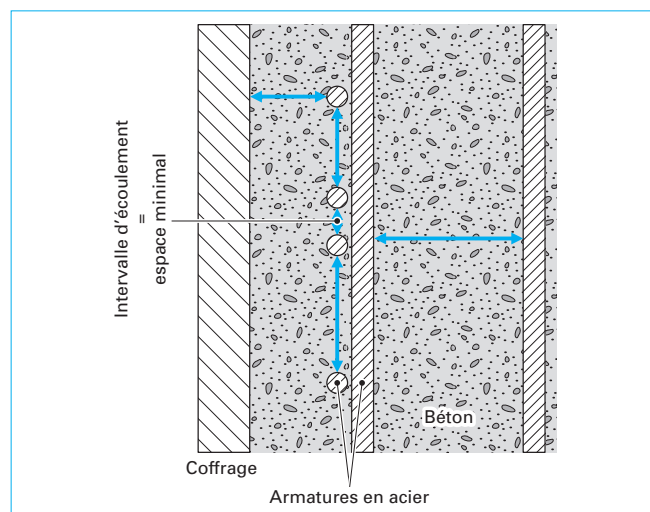
Comme pour les ouvrages coulés sur site, certaines conditions alternatives sont envisageables pour les produits préfabriqués en usine.

2.3 Prévention des risques liés à la carbonatation

À titre de rappel, la chaux libérée par les silicates de calcium du ciment apporte une basicité suffisante pour protéger les armatures en acier présentes dans le béton. La pénétration de gaz carbonique dans la matrice cimentaire va engendrer une carbonatation qui aura pour effet de faire chuter la basicité du milieu (évolution du pH voisin de 12-13 vers un pH de 9) insuffisante pour assurer la passivation des armatures en acier (figure 10).

Tableau 27 – Teneurs maximales tolérées dans le béton armé (NF EN 206-1 NA)

Armatures dans le béton	Teneurs maximales en Cl^-	
	Classe	Valeurs (%)
Armatures en acier de béton armé et pièces métalliques noyées avec emploi de ciment CEM III	CI 0,65	0,65
Armatures en acier de béton armé et pièces métalliques noyées	CI 0,40	0,4
Armatures de précontrainte en acier	CI 0,20	0,2

**Figure 11 – Influence moyenne du dosage ciment sur l'évolution de la profondeur de carbonatation****Figure 12 – Définition de l'intervalle minimal d'écoulement**

L'air étant vecteur de ce gaz carbonique, cette carbonatation décroît normalement en s'enfonçant dans le béton, et ce d'autant que la pénétration du gaz carbonique se trouve elle-même freinée par la formation des composés carbonatés. Une autre façon de limiter cette pénétration consiste à travailler avec des bétons compacts en surface et, pour ce faire, de privilégier des enrobages plus importants. Si la progression du front de carbonatation est influencée par le béton, elle l'est également par le milieu ambiant. Les principaux facteurs sont ceux du tableau 26 et figure 11.

2.4 Prévention contre l'action des chlorures

Les chlorures présents dans le béton, ou migrant par capillarité à l'intérieur de la structure en béton, attaquent par phénomène électrochimique la couche passive des armatures en acier et provoquent ainsi leur corrosion. La norme NF EN 206-1 fixe les taux maximaux

de chlorures (tableau 27) apportés par les constituants du béton. Ces teneurs maximales spécifiées sont rapportées à la masse de liant équivalent. La teneur en chlorure d'un béton est calculée à partir des teneurs maximales en chlorures de tous les constituants.

La prévention contre la migration des chlorures apportés par l'exposition passe par la limitation maximale de la porosité dans la couche d'enrobage superficielle, donc par un bon choix :

- de la teneur en eau du béton, avec interdiction de tout ajout d'eau après fabrication ;
- de moyens de coulage suffisants pour assurer de le remplissage correct des moules ;
- d'un programme de vibration évitant des sites insuffisamment serrés, aussi bien en surface, que dans la masse, comprenant les implantation des vibreurs externes et/ou des aiguilles vibrantes (site et altitude), et des temps de vibration pour chaque poste.

En cas de difficulté pour obtenir une surface compacte, il convient d'avoir recours à l'application d'un produit superficiel de protection. Mais le recours à cette solution ultime nécessitera un entretien permanent de la couche protectrice.

2.5 Intervalle d'écoulement des bétons auto-plaçants

Pour que le béton auto-plaçant remplisse correctement le moule, il faut lui assurer la libre circulation de tous ses composants sur tous les sites.

Les passages les plus concernés sont les zones superficielles d'enrobage et entre les différentes armatures ou inserts. L'intervalle d'écoulement est défini comme le passage le plus étroit entre ces obstacles. Cet intervalle d'écoulement est utilisé dans la classification des bétons auto-plaçants (figure 12).

2.6 Précautions avant bétonnage

Avant bétonnage, les armatures ne doivent avoir, ni plaques de rouille, ni calamine non adhérentes, ni souillures de graisse, de terre ou de boue. Elles doivent être fixées entre elles, et calées par rapport aux peaux coffrantes, de façon telle qu'elles restent immobiles pendant le coulage et la vibration. L'épaisseur minimale d'enrobage est scrupuleusement maintenue et, notamment, dans le cas éventuel d'engravures. Si attentes longues, il est recommandé de protéger les armatures en attente contre les intempéries pour éviter leur oxydation ou souillure.

La nature des cales et leur positionnement doivent rester compatibles avec le bon comportement de l'ouvrage (DTU 21 – norme NF P18-201), notamment vis-à-vis de la corrosion des armatures et de la protection anti-feu. Leur calibre assure directement l'épaisseur d'enrobage requise et tout empilement de cales reste proscrit. Plusieurs solutions peuvent être retenues pour éviter les accidents dus aux armatures en attente :

- modification de la nature ou de la forme des armatures ;
- ceinturage des attentes en partie supérieure par un cadre fixé ;
- rehaussement du niveau de recouvrement des armatures verticales ;
- mise en place des panneaux d'armatures dont l'acier de répartition est proche des extrémités en attente ;
- isolation des postes de travail et de circulations dans ces zones dangereuses.