

Béton hydraulique – Mise en œuvre

Bétonnages spéciaux

par **Jean-Marie GEOFFRAY**

Cete de Lyon. Laboratoire régional de Clermont-Ferrand

| | |
|--|----------------------|
| 1. Bétons projetés | C 2 230v2 – 2 |
| 1.1 Projection par voie sèche | 2 |
| 1.2 Projection par voie humide..... | 3 |
| 1.3 Critères de formulation des bétons projetés..... | 3 |
| 1.4 Avantages et inconvénients des divers procédés | 3 |
| 1.5 Préparation des supports à réparer | 4 |
| 1.6 Projection du béton..... | 4 |
| 1.7 Prévention des risques pendant la projection..... | 4 |
| 1.8 Contrôle des bétons projetés | 4 |
| 2. Bétonnage par temps froid | 4 |
| 2.1 Comportement au gel du béton frais | 4 |
| 2.2 Prévision de la durée d'attente avant décoffrage..... | 4 |
| 2.3 Effets du froid sur chantier | 7 |
| 2.4 Mesures à prendre sur site | 8 |
| 3. Bétonnage par temps chaud | 8 |
| 3.1 Effets sur l'ouvrabilité du béton frais | 8 |
| 3.2 Accélération de la prise..... | 8 |
| 3.3 Accélération du durcissement | 8 |
| 3.4 Recommandations particulières à la conception | 9 |
| 3.5 Recommandations particulières sur site | 9 |
| 4. Bétonnage en grande masse | 9 |
| 5. Mise en place des bétons sous l'eau | 10 |
| 5.1 Béton immergé traditionnel..... | 10 |
| 5.2 Béton extrudé derrière un bouclier..... | 10 |
| 5.3 Béton avec addition d'un agent de viscosité | 10 |
| 5.4 Bétonnage avec armatures coffrantes | 10 |
| 6. Essorage du béton par le vide (<i>vacuum concrete</i>) | 11 |
| 6.1 Principes de l'essorage | 11 |
| 6.2 Choix des matériels..... | 11 |
| 6.3 Amélioration des caractéristiques du béton | 12 |
| Pour en savoir plus..... | Doc. C 2 231 |

Ce quatrième volet traite des bétonnages réalisés dans des conditions spéciales et répondant à des cahiers des charges particuliers :

- les **bétons mis en place par projection sur chantiers neufs** (galeries de tunnels ou renforcement de parois rocheuses), ou sur chantiers de réparation (bâtiments, ouvrages d'art ou galeries techniques) ;
- les **bétons courants mis en œuvre dans des conditions climatiques sévères** (chaud ou froid) ;
- les **bétons coulés en grande masse** (parties d'ouvrage ou barrage) ;
- les **bétons mis en place dans l'eau** ;
- et la technique particulière de **béton amélioré par essorage sous vide**.

1. Bétons projetés

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur un support sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé. Il est employé dans les structures lorsque le moulage du béton devient une opération impossible ou trop délicate et, notamment, dans les cas suivants :

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

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

- **voie sèche**, avec ou sans prémouillage (figure 1) ;
- **voie humide**, avec flux dense (figure 2) ou dilué (figure 3).

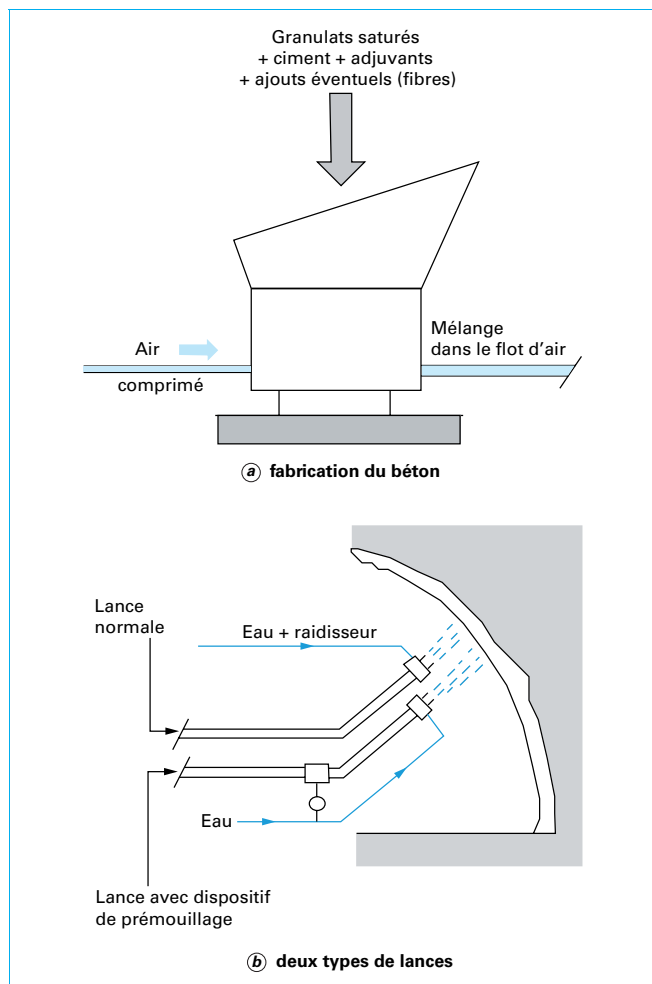


Figure 1 – Principe de la projection par voie sèche

1.1 Projection par voie sèche

■ Elle est surtout utilisée pour des chantiers :

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

■ La **fabrication** du béton est spécifique à la technique : le ciment, les granulats, les ajouts (fibres par exemple) et adjuvants éventuels (accélérateur de prise par exemple) sont dosés au stade du pré-mélange ([41] et figure 1a). Les granulats utilisés doivent présenter une teneur en eau libre la plus faible possible, tout en veillant à assurer leur saturation. Cette précaution permet de s'affranchir de certains blocages dans le transport par pompage et limite les émissions de poussières. L'ensemble, malaxé sans eau ajoutée, est envoyé dans une trémie munie d'une grille d'entrée à barreaux dans le cas d'emploi de fibres. Le matériau tombe alors dans les alvéoles d'un rotor vertical, puis est acheminé vers la conduite de refoulement où deux flux d'air comprimé chassent le matériau à travers elle.

■ La lance de **projection** est fixée à l'extrémité de cette conduite ; l'eau est admise à la lance avec un débit réglé (figure 1b).

• Dans le **cas de prémouillage**, une distribution annulaire de l'eau est ajoutée entre 1 et 3 m en amont de la lance. Le prémouillage permet souvent d'obtenir une amélioration de l'homogénéité du mélange et une réduction des poussières sur le site de projection, augmentant ainsi la visibilité du projeteur.

• Dans le **cas d'emploi de raidisseur** du mélange (silicates, par exemple), le doseur est installé en amont du mélangeur si l'adjuvant est en poudre et, dans le cas où ce dernier est liquide, le doseur est branché sur le circuit de l'eau de mouillage au niveau de la lance.

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

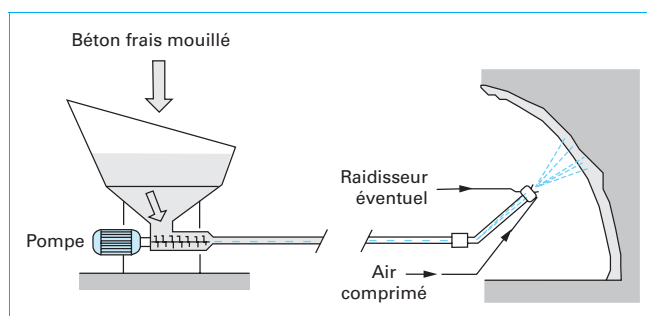


Figure 2 – Principe de la projection par voie mouillée à flux dense

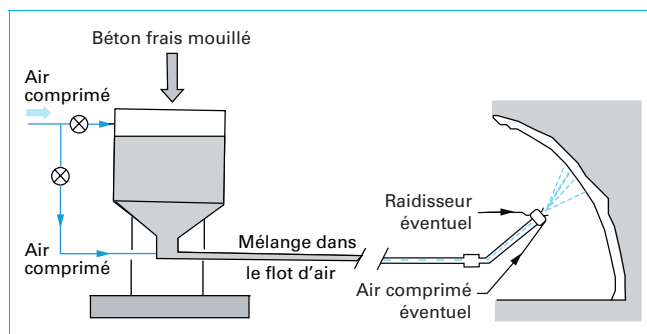


Figure 3 – Principe de la projection par voie mouillée à flux dilué

1.2 Projection par voie humide

■ La projection par voie humide (ou mouillée) est **plutôt réservée pour les chantiers à haut rendement** ou pour les galeries étroites où des problèmes de sécurité (émission de poussières à la projection) doivent être pris en compte. Dans ce cas, la fabrication du béton est identique à celle d'un béton traditionnel destiné à être pompé.

■ Dans le **cas de projection par flux dense** (figure 2), le béton est réceptionné dans une trémie de déversement, puis pompé à travers la conduite jusqu'à la lance de projection. Au niveau de cette lance, l'arrivée d'air comprimé accélère le mouvement du mélange pour la projection. Le raidisseur éventuel est introduit au niveau de la lance.

■ Dans le **cas de flux dilué**, le béton est introduit dans une machine à transport pneumatique d'où il est chassé par air comprimé dans la conduite vers la lance (figure 3). La lance est équipée pour recevoir les ajouts d'adjuvants, tels que les accélérateurs ou les raidisseurs, et une injection d'air comprimé nécessaire à la projection.

1.3 Critères de formulation des bétons projetés

L'Association française des travaux en souterrains (AFTES) a émis des recommandations sur les matériaux et les compositions des bétons pour les différentes techniques [41] :

- les gravillons ne doivent pas avoir un diamètre maximal supérieur à 10 mm car, au-delà, les éléments font totalement partie des pertes par rebond lors de la projection ;
- l'utilisation de granulats plats (coefficient d'aplatissement < 25 % pour les gravillons) est déconseillée ;
- les teneurs en eau des granulats doivent rester faibles et homogènes (< 7 %), mais supérieures à leurs absorptions capillaires respectives.

La projection par voie humide n'implique pas de restrictions supplémentaires à celles requises pour les bétons pompés.

Le rapport sable S (éléments inférieurs à 4 mm) sur l'ensemble des granulats (sable S + gravillons G) doit respecter les prescriptions suivantes :

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

Les ciments sont choisis en fonction de l'environnement de l'ouvrage et en conformité avec la norme NF P 15-301. Les dosages conseillés à la fabrication (tableau 1) dépendent de la destination

des bétons projetés et des teneurs en ciment souhaitées pour le béton en place.

En projection par voie sèche, les adjuvants utilisés sont généralement des accélérateurs de prise.

En voie humide, plusieurs types d'adjuvants peuvent être incorporés. Suivant les conditions, il peut s'agir de plastifiants, de fluidifiants, parfois de retardateurs (transports de longue distance entre la centrale de fabrication et le chantier) et de raidisseurs en sortie de lances de projection. Tous les adjuvants utilisés doivent rester compatibles entre eux dans les conditions propres à chaque chantier.

Dans **certains cas particuliers de réparation, voire de renforcement**, l'incorporation de fibres métalliques ou plastiques apporte au béton projeté des performances accrues en résistance en traction, déformation en flexion, résistance aux chocs, abrasivité et retrait. À cet effet, il convient de s'assurer de l'innocuité des adjuvants sur les fibres.

1.4 Avantages et inconvénients des divers procédés

Chaque méthode présente, bien entendu, des avantages et des inconvénients récapitulés dans le tableau 2.

Tableau 1 – Dosage en ciment à la fabrication des bétons projetés en fonction de leur destination et de la teneur en ciment requise dans le béton en place

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

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

Tableau 2 – Avantages et inconvénients des divers procédés

| | Projection par voie sèche | Projection par voie humide |
|----------------------|--|--|
| Avantages | <ul style="list-style-type: none"> • Compacité élevée • Bonne adhérence au support • Performances mécaniques élevées | <ul style="list-style-type: none"> • Teneur en eau maîtrisée • Proportion en raidisseur maîtrisée • Pertes par rebond assez limitées |
| Inconvénients | <ul style="list-style-type: none"> • Mélange difficile à homogénéiser • Mauvaise maîtrise de la teneur en eau du béton • Pertes par rebonds élevées • Forte production de poussières sans précaution particulière • Projection vers le bas déconseillée car elle entraîne des manques de bétons et des nids de cailloux • Abrasion forte des conduites | <ul style="list-style-type: none"> • Distance horizontale de transport plus faible que par voie sèche : <ul style="list-style-type: none"> – maximum 100 m à flux dilué ; – maximum 150 m à flux dense. • Performances mécaniques moins élevées • Adhérence au support moins bonne que par voie sèche • Enrobage aléatoire derrière les armatures fixées au support • Pénétration plus limitée en rejointoiement |

1.5 Préparation des supports à réparer

Avant toute projection, le support à réparer doit être préparé.

■ **Pour les ouvrages en béton**, il faut tout d'abord remédier aux causes des désordres et éliminer tous les matériaux dégradés en veillant à maintenir la stabilité de la structure existante.

Les surfaces à traiter sont ensuite nettoyées par soufflage par l'intermédiaire d'un jet de fluide ou de sable, puis humidifiées légèrement avant projection.

■ **Pour les joints de maçonneries**, les joints superficiellement altérés (moins de 3 cm à partir de la surface) peuvent être laissés tels quels, les autres sont repiqués jusqu'au matériau sain, sans épaufrer les arêtes, ni compromettre la stabilité de la zone traitée.

■ **Pour les parements de maçonneries**, après élimination de la végétation, les parties friables des moellons et des joints sont repiquées, puis l'ensemble reçoit un sablage adapté à la friabilité des matériaux.

Les venues d'eau sont colmatées après implantation de systèmes de drainage. Ensuite, le parement est humidifié avant projection.

1.6 Projection du béton

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

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

L'épaisseur maximale d'une couche doit rester inférieure à 10 cm dans tous les cas. À la fin de la projection, il est nécessaire d'appliquer une cure pour éviter toute dessiccation de surface. Les méthodes à employer sont identiques à celles utilisées pour les bétons traditionnels.

1.7 Prévention des risques pendant la projection

L'Association pour la qualité de projections des mortiers et bétons a produit un ensemble très complet de recommandations pour la prévention, l'hygiène et la sécurité lors de la projection [2]. Les principaux risques pour les personnels sont listés au tableau 3.

Pour tout ce qui concerne les risques liés à l'emploi des produits, il est conseillé au lecteur de se reporter au fascicule de documentation précité [70].

1.8 Contrôle des bétons projetés

■ Pour le **contrôle des bétons projetés**, trois paramètres doivent être pris en compte :

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

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

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

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

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

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

2. Bétonnage par temps froid

2.1 Comportement au gel du béton frais

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

Aux températures négatives, les préjudices causés sur bétons frais et jeunes ne sont pas récupérables du fait que l'eau du béton, en gelant, désorganise ou détruit la structure de l'instant du béton, avec une réduction définitive des performances mécaniques et une forte augmentation de la perméabilité [31].

La répétition de cycles de gels et de dégels sur un béton jeune encore humide amoindrit ses performances mécaniques du fait de l'évaporation de l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment ; l'emploi d'un produit de cure efficace permet de limiter en partie ces inconvénients. Enfin, le retrait thermique du béton sous l'effet du froid et, surtout, la formation de gradients thermiques entre le cœur et la peau de la partie d'ouvrage augmentent les risques de fissuration.

2.2 Prévision de la durée d'attente avant décoffrage

■ Les forts gradients thermiques responsables de la fissuration risquent surtout de se produire dès que le béton n'est plus protégé par le coffrage. Pour cette raison, il est souhaitable que le béton ait acquis une **résistance minimale à la compression d'au moins 5 MPa** avant d'être soumis à un premier gel. En cas de gelées fortes ou modérées, un calorifugeage des coffrages est à prévoir, et les durées de maintien sous coffrages doivent être allongées comme indiqué dans le tableau 4.

■ **Exemple** : un besoin de 8 j de coffrage à 20 °C deviendra 8 x 6,7, soit 53 j à - 5 °C.

Tableau 3 – Recommandations pour la correction et la prévention des risques liés à la projection

| Origine du risque | | Conséquences | Moyens d'actions correctives ou préventives |
|---------------------------|--|---|--|
| Poste machine – matériel | Pièces en mouvement | <ul style="list-style-type: none"> Blessures des membres | <ul style="list-style-type: none"> N'utiliser que du matériel avec pièces en mouvement protégées Prévoir des dispositifs d'arrêt d'urgence |
| | Déplacement du matériel | <ul style="list-style-type: none"> Chute ou écrasement | <ul style="list-style-type: none"> Prévoir des circulations séparées des fluides, des matériels et du personnel Dégager et baliser l'aire d'évolution |
| | Alimentation d'air comprimé | <ul style="list-style-type: none"> Coup de fouet de la tuyauterie Projection de pièces | <ul style="list-style-type: none"> Prévoir un amarrage correct de la conduite Vérifier l'état de la conduite et notamment des raccords |
| | Alimentation électrique | <ul style="list-style-type: none"> Électrisation Incendie | <ul style="list-style-type: none"> N'utiliser que du matériel adapté au milieu (indice de protection) Disposer des moyens réglementaires d'extinction du feu et de systèmes d'alarme |
| Poste machine – matériaux | Stockage et manutention des matériaux | <ul style="list-style-type: none"> Erreurs de matières stockées | <ul style="list-style-type: none"> Connaître les fiches de données de sécurité Veiller au bon stockage séparé des constituants |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Risques cutanés et oculaires liés aux adjuvants, mortiers ou bétons | <ul style="list-style-type: none"> Utilisation de formulation matériau adaptée au matériel Prévoir la ventilation des postes Port des vêtements et équipements de protection Prévoir douche et rince œil à proximité des lieux d'emploi (adjuvants, mortier, béton, fibres...) |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Écrasement des membres | <ul style="list-style-type: none"> Utiliser des dispositifs d'alimentation directe de la machine à projeter Utiliser des conditionnements de poids inférieur à 25 kg Respect des consignes gestes et postures |
| | Dégagement de poussières et gravois | <ul style="list-style-type: none"> Risques respiratoires, oculaires et cutanés Chute sur site de projection | <ul style="list-style-type: none"> Organiser la collecte et l'évacuation avant chaque intervention |
| Poste de projection | Échafaudages et plate-forme élévatrice | <ul style="list-style-type: none"> Chute de matériaux projetés | <ul style="list-style-type: none"> Utiliser une plate-forme de largeur adaptée à la distance de projection Évacuer régulièrement les rebonds |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Effondrement de plate-forme | |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Chute de personnel | <ul style="list-style-type: none"> Utiliser un matériel conforme à la réglementation |
| | Lance de projection | <ul style="list-style-type: none"> Effort physique, fatigue | <ul style="list-style-type: none"> Préférer un automatisme de projection avec un dispositif de commande à proximité du porte lance |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Expulsion de la buse | <ul style="list-style-type: none"> Respecter la bonne tenue de la lance et les procédures d'emploi du matériel et du matériau Vérifier la maniabilité du matériau |
| | Produits secs | <ul style="list-style-type: none"> Risques respiratoires, cutanés et oculaires | <ul style="list-style-type: none"> Utiliser un matériau pré-humidifié + précautions prévues au « poste stockage et manutention des matériaux » |
| | Produits mouillés | <ul style="list-style-type: none"> Pollution accidentelle de la zone | <ul style="list-style-type: none"> Évacuer les effluents |

Tableau 3 – Recommandations pour la correction et la prévention des risques liés à la projection (suite)

| Origine du risque | | Conséquences | Moyens d'actions correctives ou préventives |
|-----------------------|--|---|--|
| Conduite de transfert | Éclatement | • Chocs, projections et pollution | <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des conduites et accessoires adaptés aux pressions de service et en état • Protéger la conduite contre les écrasements et chocs d'arrachement. • Utiliser un matériau homogène |
| | Défauts aux coudes et raccords | • Fuite, coup de fouet, pollution accidentelle | • Vérifier l'état des éléments et leur montage. Remplacer les éléments défectueux |
| | Électricité statique | • Décharges électriques | • Mise à la terre de la conduite |
| | Bouchons | • Chute du porteur par effet de recul, expulsion de l'embout de lance | <ul style="list-style-type: none"> • Purger la conduite avant et après chaque projection • Adapter le débit du matériau au diamètre de la conduite • Éviter tout retour d'accélérateur de prise et de l'eau dans la conduite |
| | Manutention et intervention sur conduite en pression | • Chocs et blessures graves | <ul style="list-style-type: none"> • Purger la conduite avant intervention • Évacuer la zone d'intervention • Localiser le bouchon et démonter la conduite en aval du bouchon • Nettoyer la conduite dans le sens de circulation du matériau |
| Co-activités | Interaction entre machine et poste de projection | • Éloignement entre les postes | • Disposer de moyens de communication appropriés (décret du 8 janvier 1965) |

Tableau 4 – Coefficient de correction pour le maintien sous coffrages par basses températures

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

(1) Tant que la température reste inférieure ou égale à – 10 °C, maintenir le béton sous coffrage calorifugé, puis appliquer les corrections dès que la température s'élève.

■ Le bétonnage par temps froid nécessite la **recherche de solutions résultant de compromis** entre les facteurs techniques (précautions particulières) et économiques ([32], [33]) avec prise en compte du nombre de composants identiques à fabriquer, de la durée des opérations concernées par les basses températures, des autres caractéristiques exigées, des méthodes de fabrication, de mise en œuvre et de coffrage (tableau 5).

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

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

$$\theta = \frac{0,22(C\theta_c + G\theta_g + S\theta_s) + E_a\theta_{ea} + GW_g\theta_g + SW_s\theta_s}{0,22(C + G + S) + E_a + GW_g + SW_s} \quad (1)$$

Les divers coefficients de l'équation (1) correspondent aux caractéristiques du tableau 6.

On considère sur chantier que le bétonnage est un bétonnage par temps froid dès que la température descend en dessous de 5 °C. Cette notion est interprétée de différentes façons puisque :

- certains estiment que la température doit rester inférieure à cette limite pendant plusieurs jours consécutifs ;
- d'autres pendant au moins 24 heures ;
- le DTU 21 (norme NF P 18-201) se contente de parler de basses températures sans précision ;
- la norme NF EN 206-1 ne retient que la notion de température du béton à la livraison (ne doit pas être inférieure à 5 °C) ;
- le fascicule 65 du CCTG pour les marchés publics de travaux prévoit des précautions particulières pour des températures comprises entre + 5 et – 5 °C.

Par ailleurs, les DTU 21 et fascicule 65 du CCTG stipulent que des précautions (chauffage, protection,...) peuvent permettre le bétonnage par basse température, en précisant cependant que, si une partie du béton gelé n'a pas fait sa prise après le dégel, ou n'a pas obtenu une résistance suffisante (5 MPa pour une dalle par exemple), elle doit être démolie.

Tableau 5 – Précautions pour bétonner par temps froid

| Température ambiante (en °C) | Effets | Précautions |
|------------------------------|---|---|
| $0 < \theta < +5$ | <ul style="list-style-type: none"> Retard de prise Durcissement ralenti | <ul style="list-style-type: none"> Emploi de ciment CEM I 52,5 ou 52,5 R Dosage minimal en ciment $> 350 \text{ kg/m}^3$ de béton E/C $< 0,50$ Emploi de béton chaud Possibilité d'emploi d'accélérateur de prise Protéger les surfaces non coffrées |
| $-5 < \theta < 0$ | <ul style="list-style-type: none"> Prise arrêtée Durcissement arrêté | <ul style="list-style-type: none"> Dégel des granulats et des coffrages Traitement thermique actif du béton Utilisation d'eau chaude à la fabrication Utilisation de granulats chauds Fabrication de béton chaud Ciment CEM I 52,5 ou 52,5 R Dosage minimal en ciment $> 400 \text{ kg/m}^3$ de béton E/C $< 0,45$ Emploi d'accélérateur de prise avec entraîneur d'air Coffrages calorifugés |
| $-10 < \theta < -5$ | Forte gelée | <ul style="list-style-type: none"> Dégel des granulats et des coffrages Utilisation d'eau très chaude à la fabrication ($> 50^\circ\text{C}$) Traitement thermique actif du béton Utilisation de granulats chauds Fabrication de béton chaud Ciment CEM I 52,5 ou 52,5 R Dosage minimal en ciment $> 400 \text{ kg/m}^3$ de béton E/C $< 0,45$ Emploi de réducteur d'eau Emploi d'accélérateur de prise avec entraîneur d'air Coffrages calorifugés Forte protection thermique des surfaces non coffrées |
| $-15 < \theta < -10$ | Froid intense | <ul style="list-style-type: none"> Précautions ci-dessus Arrêt de bétonnage, sauf pour les ouvrages massifs |

Tableau 6 – Énumération des variables de l'équation (1) destinée au calcul de température du béton

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

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

2.3 Effets du froid sur chantier

Indépendamment de l'action sur le matériau lui-même, le froid intense peut modifier considérablement le déroulement du chantier :

- logistique d'approvisionnement et de coulage ralentie ;
- le personnel doit se protéger et ne peut pas assurer les mêmes rendements.

Pour ces raisons, il est souvent préférable d'arrêter le chantier à partir de 0°C .

Au niveau du matériau lui-même, le **temps de prise augmente considérablement avec sa baisse de température** (figure 4).

Cette évolution permet donc de constater que, quelque soient les conditions ambiantes, il est préférable de s'attacher à la mesure de la température du béton : le travail avec un béton « chaud » (10 à 15°C) et l'emploi de coffrages calorifugés et protégés en fin du bétonnage reste donc possible. Cependant, cette possibilité est à utiliser avec précaution lorsque les températures ambiantes deviennent négatives car la résistance du béton doit avoir atteint 5 MPa avant que ne surviennent les risques de gel.

Les opérations de calorifugeage, voire de chauffage des coffrages, doivent avoir été testées préalablement au bétonnage et conduire à des résultats efficaces.

Les dommages (fissuration interne et désintégration) dus au gel sur un béton qui n'a pas atteint la résistance minimale de 5 MPa sont **généralement irréversibles, et il est nécessaire de démolir la partie affectée**.

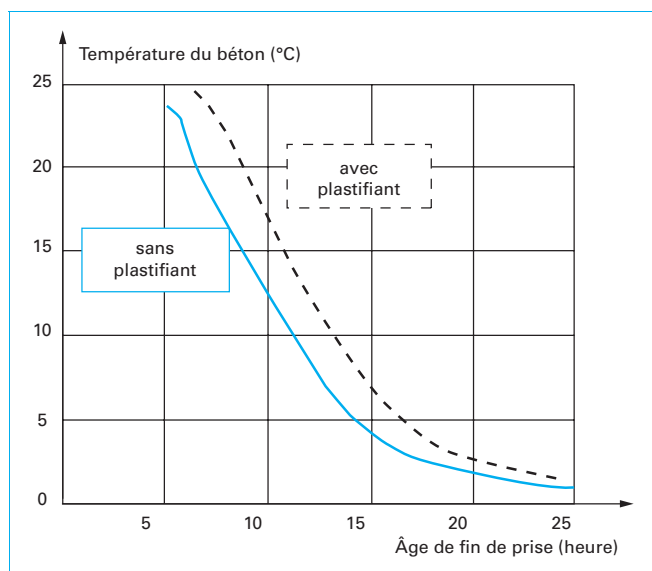


Figure 4 – Évolution du temps de fin de prise en fonction de la température du béton

2.4 Mesures à prendre sur site

Les mesures à mettre en œuvre pour faciliter le bétonnage par temps froid sont les suivantes [73] :

- accélérer le durcissement par adjuvantation (quand le marché le permet) [76] ;
- utilisation de béton chaud à la centrale de fabrication ;
- baisser la quantité d'eau de gâchage (ressource rarement possible) ;
- augmenter la durée de malaxage en centrale (ressource peu efficace) ;
- lorsque le choix est possible, retenir les centrales de fabrication les plus proches du chantier ;
- ne pas couler un béton dans des coffrages ou sur des armatures gelées ou recouvertes de neige ;
- utiliser des coffrages calorifugés, voire chauffés ;
- protéger le béton surfacé par un produit de cure ;
- protéger la surface du béton non coffré à l'aide de bâches, panneaux, ... en évitant tout contact avec cette surface ;
- adapter le temps de décoffrage (recours à la maturimétrie comme guide).

3. Bétonnage par temps chaud

Les températures élevées (> 25 °C) agissent à différents niveaux sur le béton. Elles ont d'abord un effet sur l'ouvrabilité du béton frais, puis elles agissent sur les vitesses de prise et de durcissement pour, enfin, aggraver les conséquences du retrait [34].

3.1 Effets sur l'ouvrabilité du béton frais

Toute élévation de température favorise l'évaporation de l'eau libre d'un béton frais et ce départ d'eau abaisse tout naturellement sa plasticité. Cette chute de plasticité constatée, autant par des essais statiques (affaissement ou étalement), que par des essais dynamiques (maniabilité LCL ou rhéométrie), nécessite alors un surplus d'énergie pour le coulage (cas du pompage notamment) et pour le serrage.

Pour un béton à teneur en eau efficace relativement faible, l'évaporation peut restreindre le développement des réactions d'hydratation. Dans ce dernier cas, les possibilités d'augmenter légèrement le dosage en eau ou d'ajouter un plastifiant réducteur d'eau au malaxage pourront être expérimentées préalablement en fonction :

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

Les ajouts d'eau volontaires, mais non justifiés, s'avèrent nuisibles à la qualité finale du béton et sont prohibés. Ils abaissent la teneur en ciment du béton et augmentent brutalement le rapport eau/ciment.

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

Au niveau de la fabrication, l'utilisation de granulats saturés en eau est vivement conseillée. Il y a donc intérêt à prévoir une humidification des stocks et leur conservation, si possible à l'ombre et à l'abri du vent. Il peut être intéressant de limiter les volumes transportés pour réduire les temps d'attente sur chantier et d'augmenter les moyens de l'atelier pour accélérer la mise en œuvre.

3.2 Accélération de la prise

La chaleur est un facteur prépondérant dans la cinétique des réactions déclenchant la prise du ciment en présence d'eau, et donc de celle du béton frais. Elle a pour effet immédiat de réduire rapidement la durée pendant laquelle le béton peut être mis en œuvre (coulage, vibration et talochage).

Il est généralement admis que le temps de prise est divisé par 2 lorsque la température du matériau passe de 20 à 40 °C.

Les conséquences de cet état de fait se traduiront par l'apparition de fissures de retrait plastique après le coulage, lors du début du raidissement. Ces fissures, dans la mesure où elles restent peu profondes, peuvent être refermées rapidement par un nouveau talochage de surface appelé « double talochage ». Pour lutter contre ces inconvénients, il est possible d'utiliser un adjuvant retardateur de prise conforme à la norme NF EN 934-2.

Dans le cas de très fortes chaleurs, il y aura intérêt à incorporer de l'eau très froide (température proche de 0 °C), voire de la glace pilée, dans le malaxeur, au détriment de l'eau de gâchage normale.

La formule suivante permet de calculer la température du béton à la sortie du malaxeur en fonction de celles des constituants [35] :

$$\theta = \frac{0,22(C\theta_c + G\theta_g + S\theta_s) + E_a\theta_{ea} + GW_g\theta_g + SW_s\theta_s - G_{la}(79,6 - 0,5\theta_{gla})}{0,22(C + G + S) + E_a + GW_g + SW_s + G_{la}} \quad (2)$$

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

Les autres symboles sont définis dans le paragraphe 6.2.

Il est également possible d'adapter les horaires de bétonnage suivant les variations climatiques (bétonnage pendant les heures les plus fraîches) et, dans certains cas, d'utiliser un ciment à faible chaleur d'hydratation.

3.3 Accélération du durcissement

L'incidence des fortes températures ambiantes est effective sur le durcissement du béton, puisqu'elles agissent comme un traitement thermique actif non maîtrisé, et peuvent provoquer des fissures de retrait thermique. L'apparition de gradients thermiques aggrave souvent cette situation.

3.4 Recommandations particulières à la conception

Les principales recommandations proposées par la profession [10] intègrent les conditions climatiques, les granulats, l'eau de gâchage, les liants, et les conditions de fabrication et de mise en œuvre du béton (tableau 7).

Lorsque la température ambiante dépasse 25 °C pendant plusieurs heures, des problèmes particuliers peuvent apparaître à la mise en œuvre du béton. Les ouvrages les plus sensibles sont :

- ceux qui présentent une grande surface non coffrée ;
- ceux constitués par de grandes masses unitaires (semelles épaisses,...).

3.5 Recommandations particulières sur site

■ **Au niveau de la fabrication**, chercher tout d'abord à utiliser des constituants moins chauds :

- au niveau du ciment, en travaillant avec des silos à pleine charge, et si le chantier le permet avec des ciments à plus faible chaleur d'hydratation ;
- travailler avec des gravillons légèrement humidifiés et stockés sous abri pour éviter la brutale montée en température du fait de l'ensoleillement ;
- pour les sables, ne travailler qu'avec des matériaux saturés (les teneurs en eau idéales des sables se situent vers le taux

d'absorption augmenté de 1 %) et stockés sous abri pour éviter l'évaporation et les montées en température ;

- utiliser une eau d'ajout la plus fraîche possible, en évitant d'utiliser une eau stockée en piscine (dont la température s'élève rapidement) ;
- augmenter au besoin les teneurs en adjuvants (plastifiants, superplastifiants, retardateurs) [75], et, dans certains cas où les transports sont longs, il conviendra d'atténuer les effets de l'évaporation en augmentant très légèrement l'eau d'ajout (< 5 kg/m³ de béton).

■ **Au niveau du transport** :

- préférer l'emploi de camions avec des cuves de couleur claire, voire blanche ;
- réduire au minimum les temps d'attente sur chantier et, si possible, rechercher des stationnements ombragés (cas assez rares) ;
- arroser l'extérieur des cuves des camions malaxeurs (mais en évitant toute pénétration d'eau à l'intérieur des cuves).

■ **Au niveau de la mise en œuvre** [74] :

- bétonner si possible aux heures les plus fraîches ;
- éviter l'emploi de peaux coffrantes absorbant l'eau ;
- ne jamais rajouter d'eau (effet catastrophique sur les bétons adjuvantés) ;
- juste après surfacage, appliquer un produit cure de façon homogène pour éviter toute évaporation. Cette cure peut être complétée par un dispositif de couverture (humidifié ou non) sans contact avec la surface bétonnée pour s'affranchir de l'ensoleillement direct.

4. Bétonnage en grande masse

Les ouvrages massifs tels que digues, barrages, bétons de substitution nécessitent des mises en œuvre de grandes quantités unitaires de béton. Le principal problème posé est alors d'origine thermique car le volume important de béton engendre un dégagement élevé de chaleur qui provoque à son tour une dilatation thermique de la masse, alors que la surface reste relativement plus froide (notamment après décoffrage) : un phénomène de fissuration peut donc en résulter.

Généralement, pour atténuer ces dégradations, l'ingénieur va avoir tendance :

- à réduire le dégagement de chaleur d'hydratation du ciment par abaissement de son dosage et compensation par des additions minérales ;
- à utiliser des gravillons de plus forte dimension, en veillant toutefois à éviter la ségrégabilité du béton à la mise en œuvre ;
- à évacuer les calories dégagées par le béton (circulation d'eau froide dans des canalisations disposées dans l'ouvrage) ;
- à prévoir en parement un béton plus fin et coulé en même temps que le béton de masse avec une tôle de séparation comme indiqué sur la figure 5.

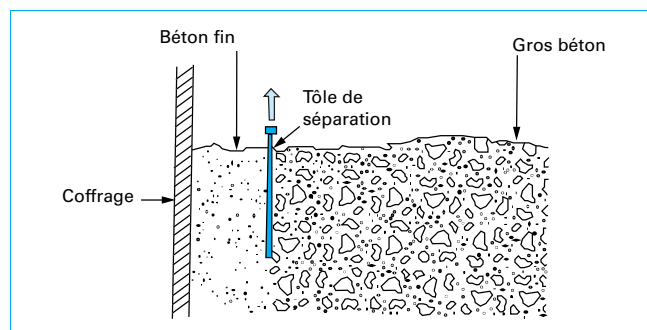


Figure 5 – Réalisations simultanées d'un parement en béton fin et du gros béton d'un ouvrage massif

| Tableau 7 – Recommandations pour bétonnage par temps chaud au stade de la conception (d'après [35]) | |
|---|--|
| Prise en compte du climat | <ul style="list-style-type: none"> • S'enquérir des caractéristiques climatiques et des variations habituelles, dans le cas de chantiers de longue durée (> 6 mois) |
| Granulats | <ul style="list-style-type: none"> • Prévoir une augmentation de fréquence des mesures de teneurs en eau des gravillons • Utiliser des granulats saturés en eau (teneur en eau totale > absorption capillaire) • Intégrer la température des granulats et leur variabilité s'ils sont secs |
| Ciments | <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation • Ne pas utiliser de ciments riches en aluminat tricalcique (C3A) • Prendre en compte la température du ciment au moment du dosage |
| Eau de gâchage | <ul style="list-style-type: none"> • Prévoir la possibilité d'emploi d'eau froide et prendre en compte sa température • Au besoin, remplacer partiellement l'eau de gâchage par des paillettes de glace (uniquement) • Ne pas augmenter le dosage en eau pour rétablir la consistance voulue |
| Fabrication et mise en œuvre | <ul style="list-style-type: none"> • Limiter la température des matériels en les peignant en blanc • Placer le malaxeur à l'ombre • Limiter l'évaporation du béton non coffré en prévoyant les bétonnages au petit jour, ou pendant la nuit • Exécuter rapidement la finition de surface et l'application de la cure • Limiter les volumes transportés de béton et réduire les temps d'attente entre porteurs |

5. Mise en place des bétons sous l'eau

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

5.1 Béton immergé traditionnel

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

■ Il est nécessaire de disposer au minimum de 425 kg d'éléments fins inférieurs à $80 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de béton en place pour assurer sa bonne tenue à l'état frais. Ce taux d'éléments fins est atteint avec le ciment, des additions minérales, ou les fines apportées par le sable (sables concassés non lavés). Les additions bénéficiant du droit d'usage de la marque NF peuvent être partiellement prises en compte avec le ciment sous l'appellation de liant équivalent.

■ Au niveau des granulats, il est conseillé d'utiliser des dosages en sable et gravillons dans des proportions telles que la fraction $< 4 \text{ mm}$, ou sable, rapportée à la fraction $> 4 \text{ mm}$, ou gravillon, soit de l'ordre de 0,9.

■ Plusieurs adjuvants peuvent être utilisés suivant les méthodes de mise en œuvre :

- les plastifiants réducteurs d'eau, pour obtenir des bétons très plastiques tout en travaillant avec des rapports eau efficace sur liant équivalents inférieurs aux valeurs spécifiées par l'annexe NAF de la norme NF EN 206-1 ;
- les superplastifiants pour obtenir des bétons fluides ou des bétons auto-plaçants avec ajout éventuel d'agents de viscosité ;
- les retardateurs de prise permettant le maintien de la plasticité du béton et de son bon écoulement lors de la formation du bulbe sous l'eau, jusqu'à remplissage complet du moule.

■ La mise en œuvre est généralement assurée avec la méthode à la goulotte proche de celle utilisée pour le coulage du béton des fondations profondes. La goulotte utilisée est constituée en partie supérieure par une trémie de remplissage, puis par un ou plusieurs tubes rigides et lisses à l'intérieur (diamètre intérieur d'environ 6 fois celui du plus gros granulats) et de faible longueur (environ 3 m), et un tube de reprise de bétonnage et d'amorçage (dispositif permettant d'évacuer l'air emprisonné sous le bouchon lors de l'amorçage).

Chaque tube plongeur peut alimenter au maximum des surfaces de bétonnage de 28 m^2 en caisson rectangulaire, ou de 14 m^2 en caisson circulaire.

■ Il est recommandé d'organiser l'approvisionnement de la centrale au chantier de façon à ne pas avoir d'arrêt, ou de garder la parfaite maîtrise des arrêts reconnus tolérables à partir d'essais de faisabilité. Avec cette méthode, seule la partie superficielle du bulbe peut subir l'action de l'eau et, ainsi, seule la partie supérieure de la pièce peut être affectée par le délavage qui pourra ensuite être recépé après durcissement du béton.

5.2 Béton extrudé derrière un bouclier

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

Le béton utilisé doit être pompable, non ségrégeable, non délavable, et présenter un bon maintien de fluidité pendant tout le bétonnage. Ces exigences conduisent à utiliser des compositions particulières de béton avec :

- un dosage en sable assez élevé (un rapport $S/S + G$ de l'ordre de 0,55) ;
- des teneurs en éléments fins comprises entre 480 et 500 kg par m^3 de béton en place ;
- l'emploi d'un superplastifiant pour obtenir une fluidification du béton avec un rapport $E/C < 0,55$;
- l'emploi éventuel d'un retardateur de prise pour assurer la robustesse de la fluidité.

5.3 Bétonnage avec addition d'un agent de viscosité

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

Il existe deux types d'hydrobétons :

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

5.4 Bétonnage avec armatures coffrantes

Dans ce cas, le bétonnage sous l'eau est assuré à partir d'un procédé breveté de système coffrant constitué de panneaux sans coffrage fermé, mais recouvert d'un grillage (en métal repoussé ou en composite). Les panneaux servant de coffrage sont préfabriqués en usine à la demande, garantissant ainsi leur adaptabilité aux conditions du chantier, puis assemblés sur chantier.

Ce système coffrant s'avère particulièrement adapté aux formes courbes de grand rayon et complexes. La grille métallique ou en composite est fixée sur les armatures de peau avec des agrafes garantissant l'épaisseur minimale d'enrobage de ces dernières. La peau rigide filtrante a pour fonction principale la réduction de la pression hydrostatique de coulage. Les peaux filtrantes sont réalisées en composite s'il existe un risque particulier de corrosion (immersion dans l'eau de mer par exemple). Cette cage d'armatures facilite grandement les phases préparatoires et élimine les opérations de décoffrage.

Le béton utilisé peut être un béton fluide ou auto-plaçant avec agent de viscosité comme dans le cas de bétonnages courants sous l'eau. Les conditions de maturation sont identiques à celle des bétonnages ordinaires sous l'eau. Voir les figures 6, 7, 8 et 9.

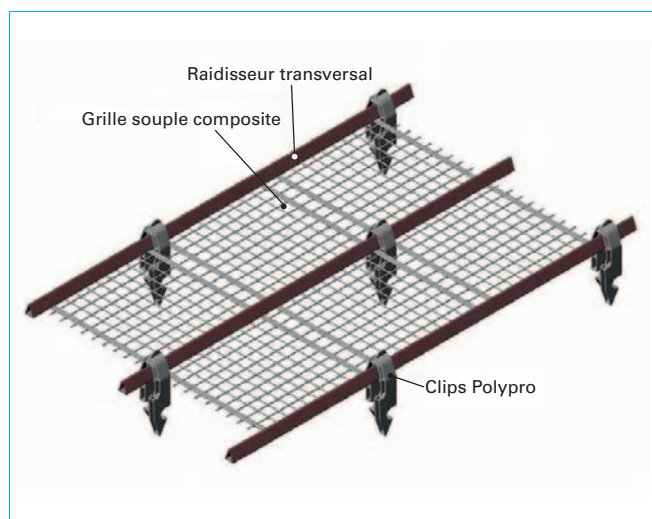


Figure 6 – Grille coffrante avec raidisseurs et clips de fixation



Figure 7 – Aspect de surface d'un élément expérimental coulé sous l'eau de mer et extrait de l'eau après 3 semaines d'immersion

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

Le but de l'essorage par le vide est de retirer l'excédent d'eau dont le béton a besoin pour être transporté, coulé et travaillé, mais qui ne participe pas aux réactions d'hydratation du ciment présent. De plus, il y a intérêt à éliminer cette eau excédentaire car elle peut générer une porosité matricielle limitant le développement des performances mécanique et de durabilité du béton.

6.1 Principes de l'essorage

L'expulsion de l'eau excédentaire provoque une dépression interne au béton de sorte que la pression atmosphérique agisse à

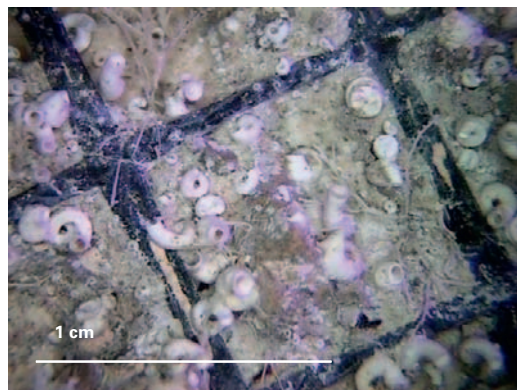


Figure 8 – Aspect de surface du béton immergé en mer avec fixation d'éléments vivants marins

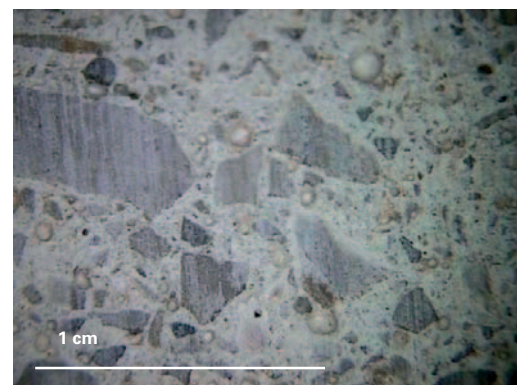


Figure 9 – Compacité du béton sur carotte extraite de l'élément immergé

la surface du béton. Cette dépression est obtenue en posant sur le béton frais un tapis d'aspiration qui est relié à une pompe à vide. La pression d'air dans l'espace intermédiaire et la partie supérieure du béton est réduite à 20 % de la pression atmosphérique, et le béton est soumis à une pression de 0,08 MPa.

Sous l'influence de la pression atmosphérique, l'eau est alors expulsée du béton. Après un essorage d'environ 30 min, le rapport eau/ciment est réduit à la valeur moyenne de 0,30 dans la partie supérieure de la dalle : le retrait du béton essoré est réduit de 50 %.

6.2 Choix des matériels

Le tapis est constitué par une chambre à air formée par la superposition d'un élément filtrant (une étamine en nylon), d'un grillage (treillis plastique ou métallique), et par une membrane étanche (sur-tapis). Le tapis est mis en contact avec le béton par sa face filtrante et l'étanchéité sur les bords de la dalle en béton est quasi assurée par ce dernier qui est complété par un ensemble de matériels :

- une pompe à vide automatique pouvant être reliée à un ou plusieurs tapis aspirants ;
- un dispositif de glissières et de règles vibrantes ;
- des truelles mécaniques, ou « hélicoptères », pour le talochage et le lissage.

6.3 Amélioration des caractéristiques du béton

L'essorage induit un accroissement des teneurs en ciment dans le béton en place et augmente les performances mécaniques. Les maintiens sous coffrage peuvent donc être réduits et les délais de construction écourtés.

La dalle est carrossable dans les 24 à 48 h après coulage, et la qualité du matériau en place est améliorée puisque les résistances finales sont accrues de 30 à 60 %.

Une diminution du retrait de l'ordre de 50 à 75 % permet une atténuation de la fissuration et un plus grand espacement des joints de dallages.

Au niveau de la surface du béton, des améliorations très sensibles de la résistance à l'usure et de la planéité sont constatées, et la surface exempte de laitance autorise la pose directe de revêtements sans préparation spéciale. L'imperméabilité et la résistance au gel et aux sels de déverglaçage sont améliorées.