

Construire des Ouvrages d'Art en Béton

Les contrôles en cours de chantier

Bruno BOULET (CETE Lyon/DLC)



SOMMAIRE

- *Levée du point d'arrêt avant bétonnage*
 - *Réception sur site et contrôle du béton*
 - *Contrôle des opérations de bétonnage*
 - *Contrôle des opérations de décoffrage*
 - *Réception des parements*
-

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Les opérations de bétonnage comportent les phases suivantes

- ✓ Coulage du béton
- ✓ Vibration du béton
- ✓ Finition du béton (y compris préparation des surfaces de reprise de bétonnage)
- ✓ Cure du béton

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Vérifier la bonne conduite du coulage du béton

- ✓ Cadence de rotation et temps d'attente des toupies (fin de mise en œuvre du béton limitée à 1h30 après sa fabrication à 20°C en l'absence de dispositions particulières)
- ✓ Absence de ruissellement de béton sur coffrage, de pollution des armatures ou de déformation des armatures passives (enrobage) et des conduits de précontrainte
- ✓ Hauteur de déversement du béton < 1,50 m
- ✓ Hauteur de couche de béton < 50 cm



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Cas du coulage à la benne à manche

- ✓ Vérifier que la manche est suffisamment longue et qu'en pratique la hauteur de chute du béton dans le coffrage $< 1,00$ m (empreinte et tâche sur la peau)



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Cas du coulage de fondations profondes par tube plongeur

- ✓ Vérifier que le diamètre du tube plongeur permet le bon écoulement du béton ($\phi_{\text{int}} > 6 D_{\text{max}}$, ϕ_{ext} tel que distance entre le tube et les armatures $> 4 D_{\text{max}}$)
- ✓ Vérifier que le tube repose au fond du forage avant amorçage et coulage (risque de délavage du béton)
- ✓ Au début du coulage, vérifier que le bouchon piston en tête de tube freine bien la colonne de béton et assure un bon amorçage (qui consiste en un remplissage complet du tube et chasse correct en fond de pieu)

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Cas du coulage de fondations profondes par tube plongeur

- ✓ En cours de coulage et au moment des remontées du tube plongeur, vérifier qu'il n'y a pas de désamorçage



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Cas du coulage à la pompe

- ✓ Vérifier la distance maximale de pompage pour éviter les surpressions et la formation de bouchons (cas usuel : 300 m horizontalement, une dénivellation vers le haut de 1 m \approx 5 m horizontalement, un coude à 90° \approx 10 m horizontalement)
- ✓ Vérifier le diamètre minimum des conduits pour éviter les surpressions et la formation de bouchons ($\phi_{\text{int}} > 4 D_{\text{max}}$, diamètre minimum courant 80 mm)



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Cas du coulage à la pompe

- ✓ Vérifier l'absence de rajouts d'eau même en cas de difficultés de pompage (ce qui augmenterait la ségréabilité du béton et le risque de blocage)



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Quelques précisions sur le pompage



Nombreux atouts

- ✓ **Rapidité de mise en œuvre du béton** (facteur limitant est la fourniture de béton, le matériel restant en place; cadence 60m³/h à la pompe contre 12m³/h à la benne) en permettant la libération de la grue
- ✓ **Accessibilité aux coffrages** (flèches allant de 20 à 50 m de portée)
- ✓ **Qualité du bétonnage avec une homogénéité à l'état frais du béton** (rhéologie plus constante pour éviter les problèmes de bouchon avec des caractéristiques initiales du béton peu modifiées durant son transport dans la tuyauterie de la pompe) et avec une homogénéité des parements (délais de recouvrement limités entre rouleaux de coulage)
- ✓ **Meilleure visibilité du coulage** par le pompiste que par le grutier

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Quelques précisions sur le pompage

Pour être pompable un béton doit avoir certaines qualités (homogénéité, non ségrégeable et donc peu de ressuage) et être pompé avec un matériel et un mode opératoire adaptés.

Sinon risque de formation de bouchons :

- ✓ Bouchon au démarrage
- ✓ Bouchon en cours de pompage
- ✓ Bouchon en phase de redémarrage

L'amorçage doit se faire avec une barbotine (eau+ciment avec $E/C=0,5$ à $0,8$) avant de mettre le béton dans la tuyauterie (lubrification).

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Quelques précisions sur le pompage

En règle générale, les bétons sont pompables lorsque:

- ✓ Le dosage en fines est suffisant (de l'ordre de 380 kg minimum d'éléments inférieurs à 80 μ m)
- ✓ Un module de finesse des sables compris entre 2,2 et 2,5
- ✓ Un G/S pas trop élevé (tous les BAP sont pompables)
- ✓ Préférer les granulats roulés aux granulats concassés
- ✓ Un diamètre maximal des granulats ne dépassant pas le quart du diamètre des tuyauteries,
- ✓ Une adjuvantation adaptée afin de maîtriser le ressuage et la durée pratique d'utilisation.

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Cas de la mise en oeuvre des BAP

**A la benne avec
tube plongeur**



**A la pompe avec
tube plongeur**



**A la pompe avec
injection en bas de coffrage**



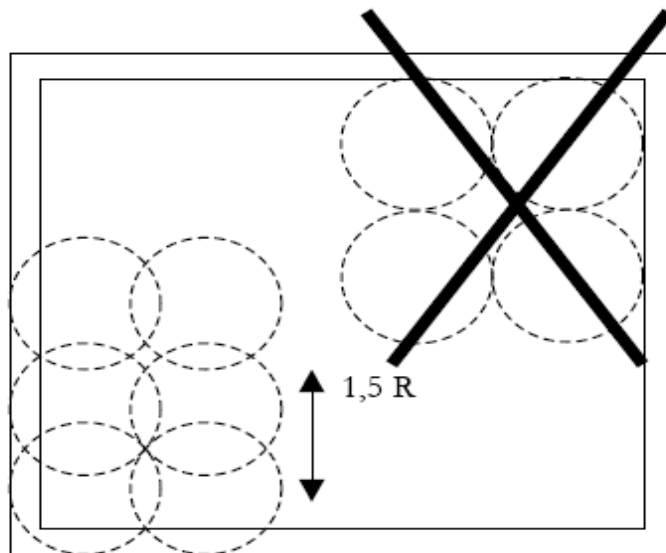
Ne pas faire chuter le béton

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

- Vérifier la bonne conduite de la vibration du béton (hors BAP)
- ✓ Vérifier la bonne répartition des points de vibration interne avec un choix approprié de diamètre d de vibreur (aiguille)



Vue en plan

L'espacement (Δ) entre 2 points de vibration interne
 $\approx 1,5 \times$ rayon d'action du vibreur (R)
 ≈ 7 à $8 \times$ diamètre du vibreur (d)

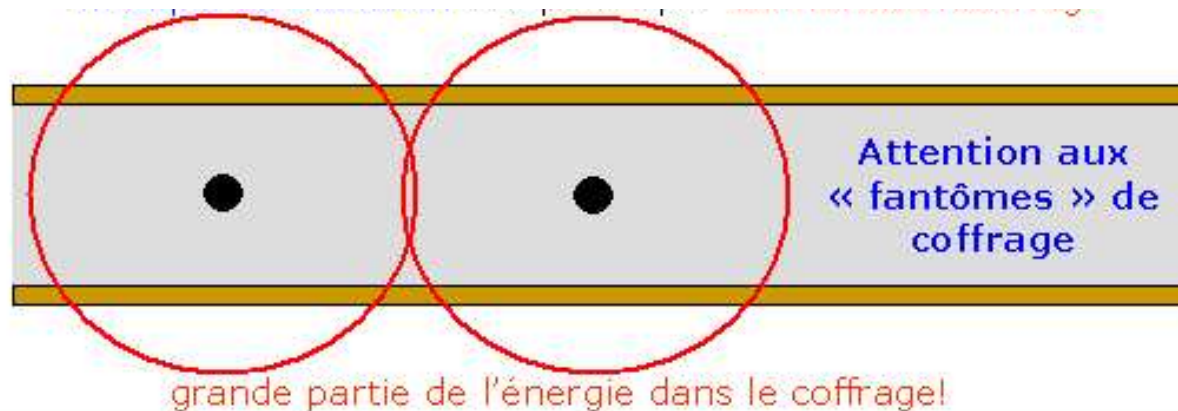
La distance minimale entre les points de vibration successifs doit permettre, compte-tenu du rayon d'action R du vibreur, de vibrer toutes les zones de béton.

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Choix approprié du diamètre d du vibreur (aiguille)

- si l'aiguille est trop petite, il faudra avoir un espacement plus serré, donc perte de temps (éléments horizontaux).
- si l'aiguille est trop grosse, une grande partie de l'énergie passe dans le coffrage (pertes!) et la vibration du coffrage peut créer des défauts de parement (éléments verticaux).

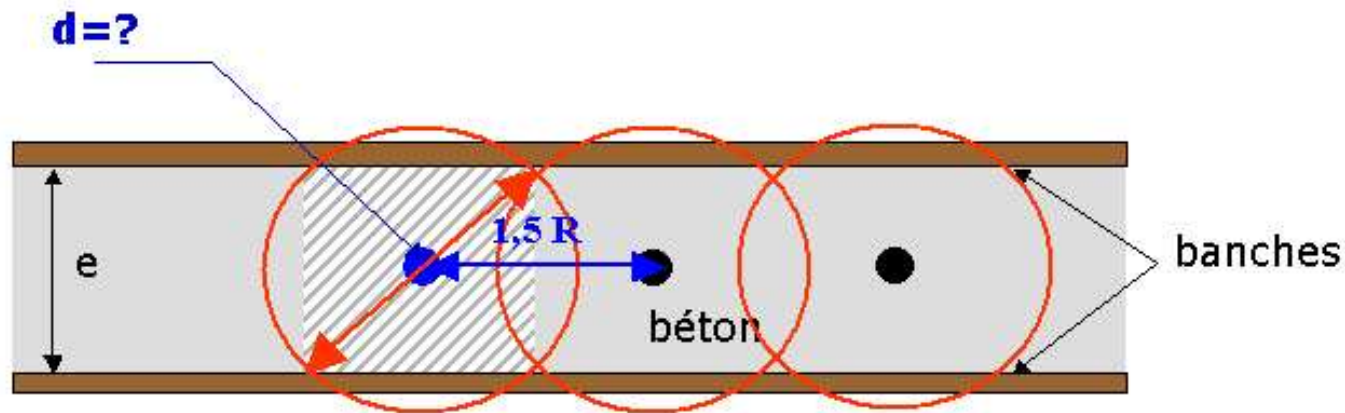


Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Choix approprié du diamètre d du vibreur (aiguille)

Cas d'un voile d'épaisseur e



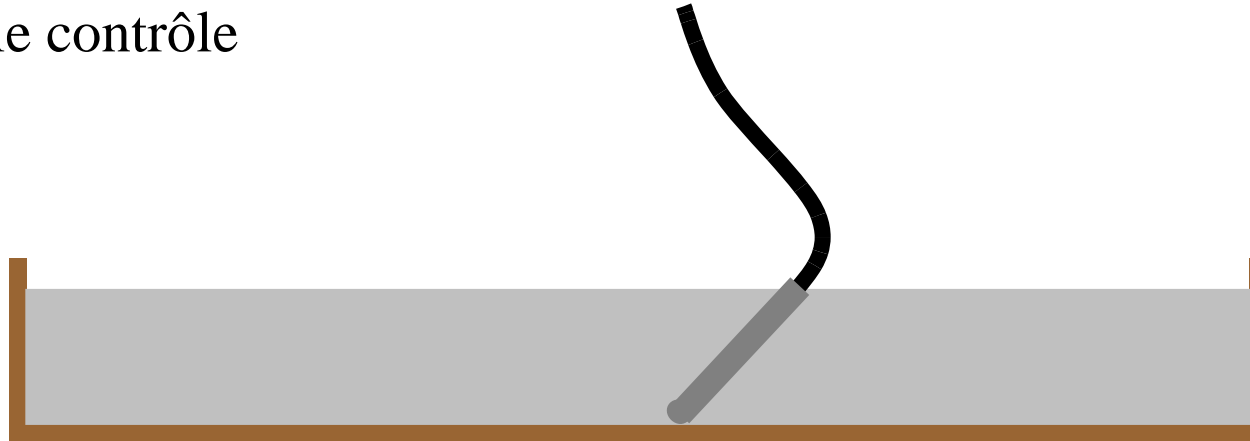
$$d = R/5 \approx 0,15 e$$

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Vérifier la bonne conduite de la vibration du béton

- ✓ Vérifier le respect de l'épaisseur des couches de béton
 - l'épaisseur ne doit pas excéder 40 à 50 cm en général
 - un repère visuel sur le flexible du vibreur facilite le contrôle



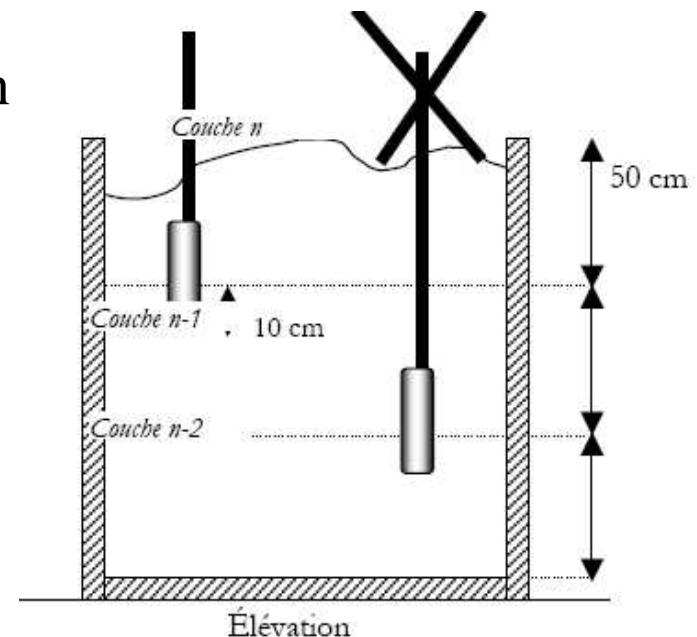
Rq : la longueur du corps vibrant de l'aiguille peut être légèrement supérieure à l'épaisseur de béton à vibrer, à condition d'incliner l'aiguille (45° maxi)

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Vérifier la bonne conduite de la vibration du béton

- ✓ Vérifier le bon mariage entre les couches de béton
 - le vibreur interne doit pénétrer dans la couche précédemment coulée sur au moins 10 cm afin d'assurer l'adhérence des 2 couches mais ne doit pas descendre dans la couche inférieure (risque de post-vibration du béton en phase de durcissement)
 - un repère visuel sur le flexible du vibreur facilite le contrôle



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Vérifier la bonne conduite de la vibration du béton

- ✓ Contrôler la durée de vibration
 - la vibration doit être arrêtée dès que :
 - le béton ne se tasse plus
 - il n'y a plus de remontée de bulle d'air
 - la laitance apparaît en surface (surface qui commence à briller)
 - le bruit du vibreur se stabilise
 - sinon risque de ségrégation (cf. photo)

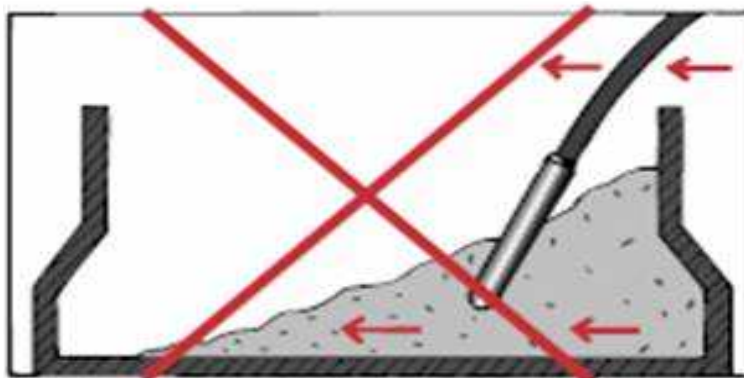


Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Vérifier la bonne conduite de la vibration du béton

- ✓ Vérifier la manipulation correcte du vibreur interne
 - L'aiguille doit être plongée rapidement à la verticale mais remontée lentement pour laisser le béton se refermer
 - L'aiguille ou la règle ne doit pas être utilisée pour pousser le béton



- L'aiguille n'entre pas en contact avec les armatures ou le coffrage (risque d'apparition de fantômes d'armatures, risque de ségrégation et de ressuage, traces)

Contrôles en cours de chantier

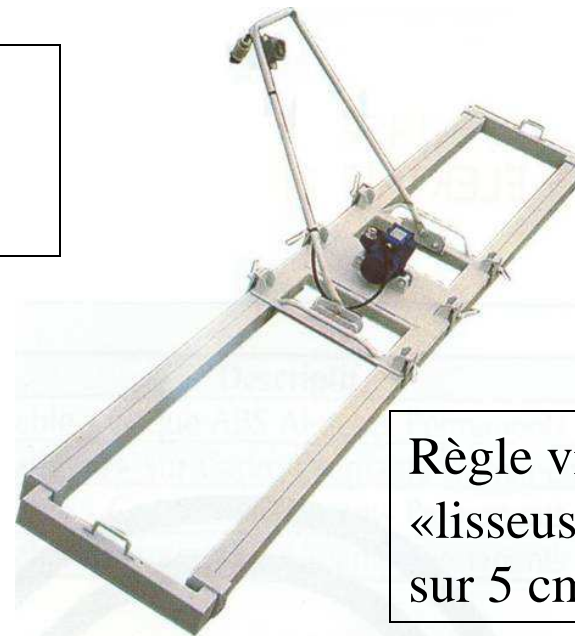
Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Vérifier la bonne conduite de la vibration du béton

- ✓ Si recours à une règle vibrante, elle doit reposer sur des guides fixés sur le lit supérieur d'armatures et espacés de la largeur de la règle



Règle vibrante
Efficace sur 12 à
15 cm!



Règle vibrante
«lisseuse» efficace
sur 5 cm!

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Matériels de vibration

- **Vibrateurs internes : aiguilles vibrantes**
 - pneumatiques (Ø 25 à 150mm),
 - électriques à moteur incorporé (Ø 25 à 90mm),
 - mécanique (Ø 25 à 70mm).



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Matériels de vibration

□ Vibrateurs externes

- pneumatiques,
- électriques.
 - à utiliser suivant des modes opératoires précis



□ Vibrateurs de surface

- règles vibrantes de surface 'lisseuses'
 - ne dispensent pas d'une vibration dans la masse



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Vérifier ensuite la finition des surfaces non coffrées du béton qui peut être :

- ✓ Surface réglée manuellement (règle, taloche)
- ✓ Surface lissée mécaniquement (hélicoptère, lisseuse)
- ✓ Cas particulier de l'extrados de tablier (support d'étanchéité)
- ✓ Surface de reprise de bétonnage
 - Vibration soignée et finition grossière
 - Préparation de la surface de reprise avec exécution de stries
 - Elimination de la laitance permettant de faire apparaître les granulats sans les déchausser
 - Protection éventuelle des armatures en attente (milieu agressif)



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Vérifier enfin la bonne mise en œuvre de la cure des surfaces non coffrées

- ✓ Dès la fin du surfaçage (après hélicoptère le cas échéant) et quelles que soient les conditions climatiques (y compris pour les BAP)
- ✓ Dans le cas de l'utilisation d'un produit de cure, contrôler les quantités appliquées (nombre de passe, grammage au m²)
- ✓ Dans le cas d'un arrosage à l'eau (hors temps de gel), vérifier qu'il n'altère pas la surface du béton (délavage), que toutes les surfaces sont effectivement arrosées sans interruption, que la différence de température entre l'eau et la surface du béton doit être $< 10^{\circ}\text{C}$ (choc thermique)
- ✓ Vérifier le respect de la durée de cure

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Durée de la cure
(fascicule 65 art 84.6.3)

Optimisation possible par étude maturométrique :
maturation du béton de peau minimale :
 $35 \% R_{c28_{moyen}}$

Température à la surface du béton (t) en °C (1)	Délai minimal de cure			
	Développement de la résistance, r, du béton (2) j : jours, h : heures			
	Rapide $r \geq 0,50$	Moyen $0,50 > r \geq 0,30$	Lent $0,30 > r \geq 0,15$	Très lent $r < 0,15$
$t \geq 25$	14 h	1,5 j	2 j	2 j
$25 > t \geq 15$	1 j	2,5 j	4 j	5 j
$15 > t \geq 10$	1,5 j	4 j	7 j	9 j
$10 > t \geq 5$ (3)	2 j	5 j	10 j	15 j

(1) Il s'agit de la température mesurée à la surface du béton et non pas à l'extérieur du coffrage. En pratique, en l'absence de mesure directe de température à la surface du béton, on retiendra la température ambiante moyenne sur la durée de la cure. Cette température moyenne peut être estimée à partir de la moyenne des températures journalières mesurées à midi sous abri.

(2) Le développement de la résistance, r, du béton est le rapport de la résistance moyenne à 2 jours à la résistance moyenne à 28 jours, déterminée par des essais préalables ou basé sur l'expérience d'un béton de composition comparable.

(3) Le décompte de la durée de cure est suspendu lorsque la température de la surface du béton est inférieure à 5°C.

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Principe de la cure

- ✓ ensemble de précautions qui permettent de protéger le béton fluide dès la fin de sa mise en place jusqu'au moment où il atteint une résistance suffisante
- ✓ la cure a pour objet de protéger le béton de surface et proche de la surface afin que son évolution soit similaire à celle du béton à coeur

Pourquoi « curer » le béton ?

- ✓ pour limiter le retrait plastique
- ✓ pour le protéger contre une dessiccation prématurée en surface
- ✓ pour éviter un ralentissement de l'hydratation (par manque d'eau)

Et donc garantir sa durabilité potentielle.

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Les facteurs aggravants en cas de mauvaise réalisation de la cure

- ✓ Dessiccation forte
 - humidité relative de l'air faible
 - température de l'air élevée
 - vent (même faible)
 - température du béton élevée
 - un rapport E/C faible
- ✓ Pièces fines à surfaces exposées dès la mise en oeuvre
- ✓ Prise lente du béton
 - type de ciment
 - utilisation de constituants secondaires (laitiers de haut fourneau, cendres volantes)
 - adjuvants ayant un effet retardateur de prise

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Pathologies liées à l'absence de cure

- ✓ des effets visibles
 - le risque de fissuration du béton de surface dû au retrait plastique
 - une surface résistant mal à l'abrasion et sur laquelle les revêtements adhèrent mal (poudroisement de surface, farinage)
- ✓ un effet non visible
 - une porosité plus élevée du béton de peau et donc une réduction des performances du béton d'enrobage des armatures (durabilité)



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Phénomène de ressuage

- ✓ Le ressuage est la remontée d'eau sous l'effet du tassement gravitaire du béton avant prise
- ✓ On pourrait penser que le ressuage naturel protège le béton de la dessiccation
- ✓ Mais il conduit à un excès d'eau en surface nuisible à la qualité du béton de surface
- ✓ Et il est toujours accompagné d'un tassement plus ou moins marqué qui peut poser des problèmes importants en réalisation (fissures au droit des armatures)

Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Méthodes de cure

- ✓ Cure par aspersion d'eau



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Méthodes de cure

- ✓ Utilisation d'un géotextile humidifié



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage

Contrôle intérieur

Méthodes de cure

- ✓ Utilisation d'une feuille de polyane



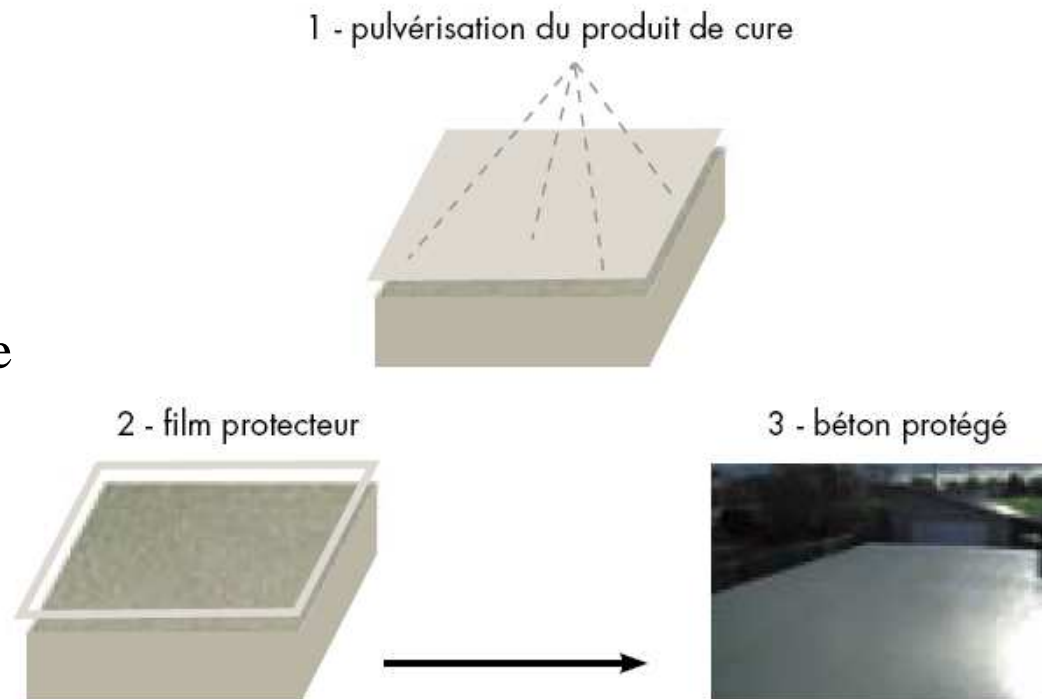
Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Méthodes de cure

- ✓ Utilisation d'un produit de cure certifié NF-produit de cure

Un produit de cure est généralement composé d'un solvant organique ou d'eau (émulsion) appelé véhicule, d'un liant (résine ou polymère en général) et, éventuellement, de charges minérales.

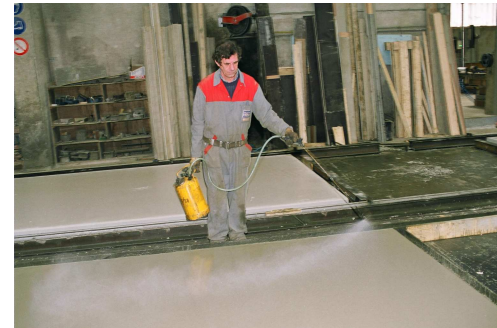


Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage **Contrôle intérieur**

Méthodes de cure

- ✓ Utilisation d'un produit de cure certifié NF-produit de cure
 - L'utilisation de produits aqueux est recommandée pour des questions environnementales et de santé
 - On vérifie plus facilement la bonne répartition avec un produit coloré
 - Anticiper la compatibilité du produit de cure avec le revêtement éventuel (étanchéité d'un tablier de pont) ; sinon élimination par action mécanique (sablage, ponçage, lavage à l'eau)



Contrôles en cours de chantier

Contrôles des opérations de bétonnage Contrôle intérieur

Méthodes de cure

- ✓ Maintien des coffrages pour les surfaces verticales



MERCI DE VOTRE ATTENTION

