

VIBRATION DES BÉTONS

Recommandations professionnelles

Document élaboré sous l'égide de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), de l'Union de la Maçonnerie et du Gros Œuvre (UMGO-FFB), du Syndicat des Entreprises Générales de France (EGF) et de l'Université Gustave Eiffel (UGE), précédemment Institut Français des Sciences et Technologies, des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR).

Membres et rédacteurs du groupe de travail :
Sandrine Chanut – Eiffage Génie Civil
François Cussigh – VINCI Construction France
Jérôme Dupoirier – Eiffage Construction
Lionel Linger – VINCI Construction Grands Projets
Nicolas Roussel – Université Gustave Eiffel (précédemment IFSTTAR)
Syndicat des Entreprises Générales de France (EGF)
Union de la Maçonnerie et du Gros Œuvre (UMGO-FFB)

Sommaire

1	Introduction	1
2	Domaine d'application	1
3	Possibilité de bétonnage correct	2
4	Essais à l'état frais	5
	Classes d'affaissement	5
	Classes de viscosité	6
5	Efficacité de la vibration	6
	Notations et paramètres d'entrée ...	6
	Correction de la fréquence	7
	Limites de puissance de l'aiguille	7
	Prédiction du diamètre d'action	8
6	Règles pratiques	8
	Mise en œuvre à l'aiguille vibrante...	8
	Temps de vibration	10
7	Réalisation de l'essai au cône inversé (norme XP P 18-469)	10
8	Bibliographie	12

1 Introduction

→ Dans le domaine de la construction, le béton constitue le matériau le plus consommé. Si les bétons ordinaires représentent encore aujourd'hui une grande partie des matériaux employés sur chantier, force est de constater que la gamme des bétons s'est considérablement élargie avec ce que l'on appelle communément « **les bétons modernes** », qui ont profité des développements de la chimie des adjuvants (plastifiants et superplastifiants) et l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaires, fumées de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau, métakaolin).

→ Ainsi, **les formules de béton qui sont mises en œuvre sur chantier ont évolué** depuis une cinquantaine d'années : elles sont passées des bétons pour lesquels le squelette granulaire pilotait le comportement à l'état frais à des bétons avec des volumes de pâtes plus importants et dont la rhéologie n'est plus gouvernée par ce squelette.

→ **La mise en œuvre de ces bétons inclut une étape de vibration** (sauf pour les bétons auto-plaçants) afin de finaliser le remplissage des coffrages et d'atteindre les performances attendues en termes de durabilité. Cette vibration interne (ou pervibration) s'effectue dans la majeure partie des cas à l'aide d'une aiguille vibrante. D'un point de vue macroscopique, cette dernière liquéfie localement le matériau, favorise son écoulement à travers les armatures métalliques et aide son compactage.

→ Les recommandations techniques utilisées actuellement concernant cette vibra-

tion se basent sur des études réalisées au cours de la première moitié du siècle dernier [1] [2] et ne peuvent tenir compte des évolutions récentes du comportement des bétons à l'état frais. En effet, plusieurs cas sont apparus récemment *in situ* montrant les limites d'application des recommandations traditionnelles.

→ L'amélioration des connaissances sur la rhéologie des matériaux cimentaires, les interactions entre particules et la simulation des écoulements a permis à Guillaume Grampeix [3] de s'intéresser à ce sujet dans le cadre de ses travaux de thèse réalisés à l'IFSTTAR (aujourd'hui Université Gustave Eiffel) et financés conjointement par la FFB et la FNTP. Ces travaux ont contribué à une meilleure compréhension.

→ **C'est dans ce contexte que ces recommandations professionnelles sont publiées, permettant d'apporter un regard neuf sur une partie importante de la mise en œuvre du béton qu'est la pervibration.**

→ Le présent document rappelle dans un premier temps les conditions de bétonnage correct. Ensuite les essais à l'état frais permettent de mettre en avant la différence de comportement rhéologique au travers des classes d'affaissement Si et de viscosité Vi. Enfin, des règles pratiques sont proposées concernant la détermination du diamètre d'action de l'aiguille (fonction de la classe d'affaissement et de viscosité) et le temps de vibration.

[1], [2], [3] : voir bibliographie page 12

2 Domaine d'application

Les présentes recommandations professionnelles s'appliquent aux **bétons de classes d'affaissement S3 et S4** au sens de

la norme NF EN 206/CN, mis en œuvre par vibration interne au moyen d'une aiguille vibrante.

3 Possibilité de bétonnage correct

→ Le préalable à toute opération de bétonnage consiste à réunir les **bonnes conditions de mise en œuvre du béton**.

→ À cet effet, il est important de savoir ménager, notamment dans des ouvrages à forte densité d'armatures ou au coffrage complexe, des cheminées aidant à la descente du béton et des aiguilles vibrantes.

→ La descente du béton dans le coffrage peut être facilitée par la mise en œuvre de tubes plongeurs, pouvant être de section rectangulaire en cas de pièces de faible épaisseur, ou grâce à des manches souples. Le but étant de limiter les risques de ségrégation liés à une hauteur de chute excessive du béton dans le coffrage.

→ Ces cheminées peuvent impacter les cages d'armatures, qui doivent alors faire l'objet d'adaptations par le bureau d'études Structure, et également les mannequins ou réservations de grandes dimensions dans lesquels des cheminées traversantes peuvent être aménagées.

→ Ces dispositions permettent notamment d'éviter que les aiguilles vibrantes soient utilisées pour faire « avancer » le béton dans le coffrage et limitent les contacts aiguille vibrante/cage d'armatures.

→ Il faut également veiller à ce que le béton puisse cheminer entre toutes les barres, notamment pour deux raisons :

- un bon enrobage des barres est indispensable à une adhérence béton/acier de qualité garantissant alors un fonctionnement mécanique correct,
- un blocage localisé pourra créer un défaut de parement nuisible à l'esthétique mais également à la durabilité.

→ Les textes relatifs au calcul des structures en béton armé citent des dispositions constructives utiles au bon enrobage des

aciers et au bon remplissage des coffrages. Celles-ci visent essentiellement à respecter des distances minimales entre barres afin de permettre une bonne adhérence béton/acier.

→ **La norme NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2 partie 1-1)** précise au paragraphe 8.2 « Espacement des armatures de béton armé » et au paragraphe 8.9 « Paquets de barres » les dispositions suivantes :

- il convient d'adopter une distance libre (horizontalement et verticalement) entre barres parallèles ou entre lits horizontaux de barres parallèles supérieure ou égale à la plus grande des valeurs suivantes : 1 fois le diamètre de la barre, D_{\max} augmenté de 5 mm ou 20 mm (figure 1) ;

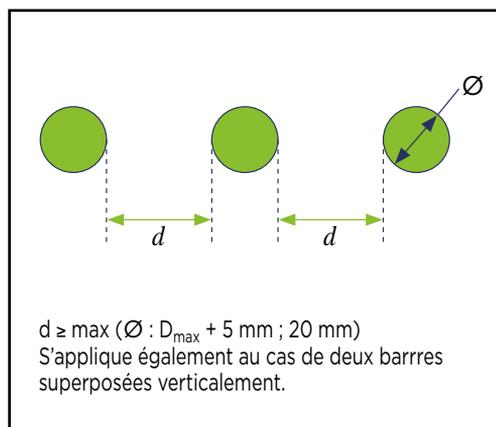


Fig. 1 • Cas des barres isolées.

- cette règle s'applique également aux paquets de barres pour lesquels le diamètre de barre est remplacé par le diamètre équivalent $\varnothing_n = \varnothing \sqrt{n_b}$ avec $n_b \leq 4$ dans le cas des barres verticales comprimées et des barres à l'intérieur d'une jonction par recouvrement, et $n_b \leq 3$ dans tous les autres cas (figure 2) ;
- pour les cas particuliers de recouvrements de paquets de barres, se reporter au paragraphe 8.9.3 de la norme NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2 partie 1-1) ;

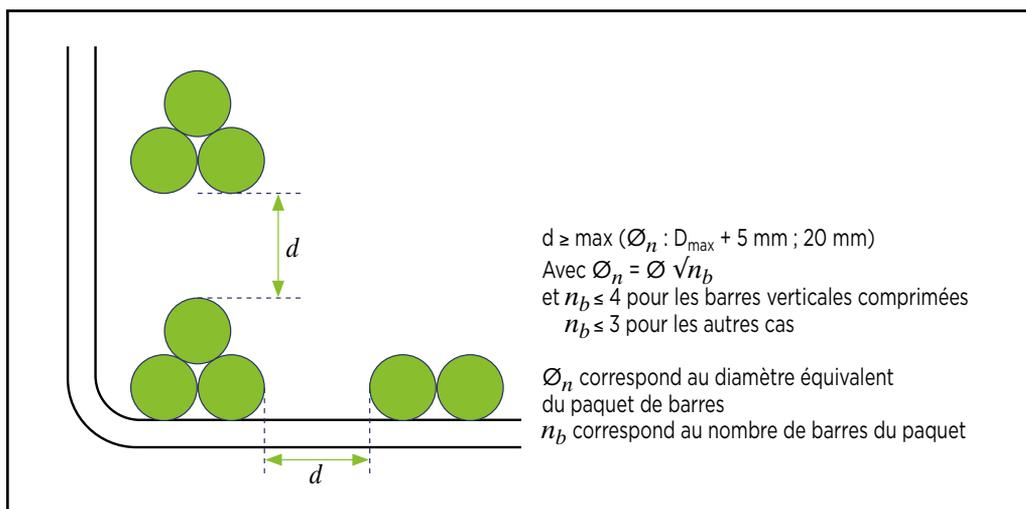


Fig. 2 • Cas des paquets de barres (hors zones de recouvrements).

- lorsque les barres sont placées en lits horizontaux distincts, il convient de superposer les barres de chaque lit en files verticales en ménageant entre ces files un espace suffisant pour permettre le passage des aiguilles vibrantes et assurer un bon compactage du béton ;
- l'enrobage des armatures individuelles est au moins égal au diamètre de la barre, celui des paquets de barres est au moins égal à \varnothing_n . Ce critère est uniquement basé sur un principe de bon remplissage pour une bonne adhérence. L'enrobage nominal relatif à la durabilité de la structure est

quant à lui indiqué dans la section 4 de la norme NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2 partie 1-1).

➔ **En complément**, il est recommandé de respecter la règle suivante qui concerne les mailles formées par des armatures orthogonales. Cette règle s'exprime sous forme de critère de rayon moyen minimum qui doit être supérieur à $D_{\max}/1,4$ en cas de gravillons roulés ou $D_{\max}/1,2$ pour des granulats concassés. Le rayon moyen étant égal au rapport de l'aire sur le périmètre du vide intérieur de la maille (figure 3).

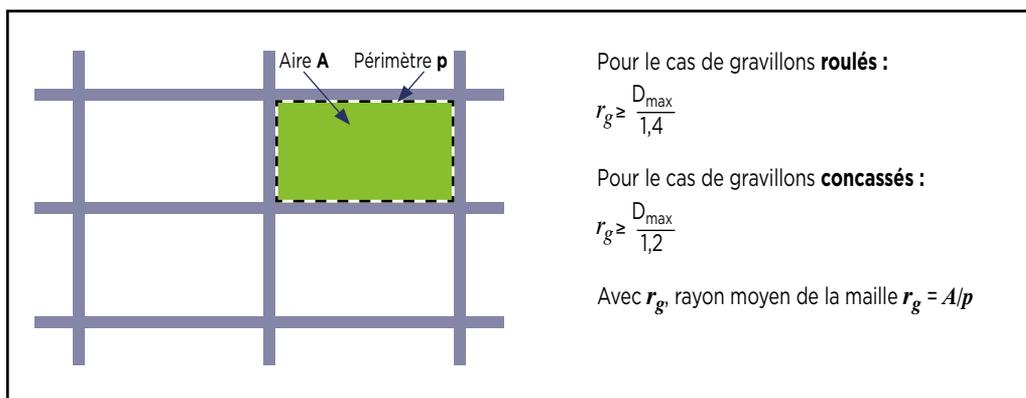


Fig. 3 • Règle du critère de rayon moyen.

Remarque : cette règle figurait au paragraphe A.7.2 des règles BAEL

➔ Pour rappel, les normes NF EN 12620 et NF P 18-545 autorisent jusqu'à 2 % de refus au tamis 1,4 D_{max} , avec 100 % de passant à 2 D_{max} . Les bétons de $D_{max} = 22,4$ mm peuvent donc potentiellement contenir quelques granulats de dimension correspondant au tamis de 44,8 mm. Une diminution du D_{max} peut alors s'avérer utile dans certains cas de ferrillages très denses.

➔ De manière générale, un dessin à grande échelle des zones les plus denses est toujours appréciable pour envisager les dispositions adéquates.

➔ De son côté, le NF DTU 21 précise quelques règles utiles au bon enrobage des armatures de planchers et voiles sans lesquelles il est impossible de garantir un bétonnage de qualité, notamment dans les planchers. Le paragraphe 9.3 du NF DTU 21 P1-1 « Incorpora-

tions dans les dalles et murs » stipule que les canalisations, gaines, fourreaux, etc., incorporés au béton coulé en place, doivent satisfaire, tous corps d'état confondus, les spécifications suivantes (figure 4) :

- être situés entre les nappes d'armatures, de chacune des deux faces ;
- permettre un enrobage par le béton au moins égal au diamètre de la plus grosse gaine, avec un minimum de 50 mm ;
- présenter, sauf localement, une distance horizontale entre elles au moins égale à leur diamètre, avec un minimum de 50 mm ;
- au droit des croisements ou empilages localisés, ne pas occuper plus de la demi-épaisseur du béton coulé en place et permettre un bétonnage correct des zones de concentration ponctuelle de zones de concentration ponctuelle de gaines au voisinage des raccords dans les boîtiers.

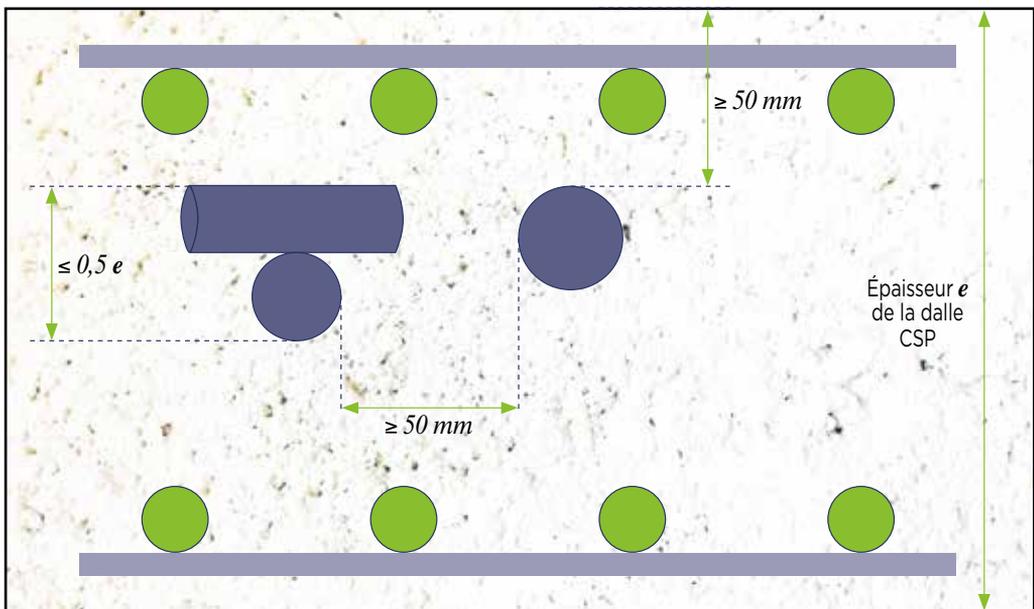


Fig. 4 • Dispositions concernant les incorporations dans les dalles béton.

4 Essais à l'état frais

→ Les bétons frais sont des fluides à seuil dont le comportement peut être décrit par un modèle de Bingham (figure 5). Ils sont ainsi caractérisés par un seuil d'écoulement (τ_0) et une viscosité plastique (μ_p). Ces deux paramètres conditionnent leur réponse à une vibration. Dans la pratique, ces deux para-

mètres peuvent être respectivement identifiés à l'aide d'un essai d'affaissement au cône d'Abrams et d'un essai d'écoulement au cône inversé. Les résultats de ces essais donnent accès à la classe d'affaissement Si (S1, S2, S3 ou S4) et à la classe de viscosité Vi (V1, V2, V3 ou V4).

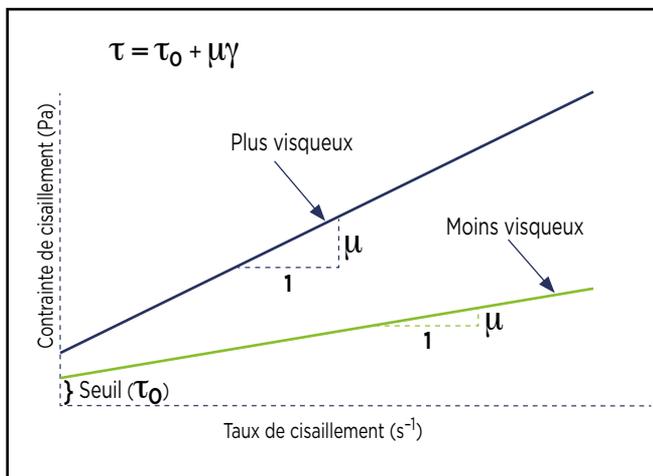


Fig. 5 • Comportement rhéologique d'un fluide de Bingham.

Classes d'affaissement

→ Pour les bétons vibrés, l'essai classiquement utilisé pour mesurer la consistance d'un béton est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Il s'effectue selon la norme NF EN 12350-2.

→ La norme NF EN 206/CN définit quant à elle les classes d'affaissement (tableau 1).

→ Pour rappel, les recommandations présentées dans le cadre de ce document ne s'appliquent qu'aux **bétons de classes d'affaissement S3 et S4**.

classe	affaissement (mm)
S1	10 à 40
S2	50 à 90
S3	100 à 150
S4	160 à 210

Tableau 1 • Classes d'affaissement

Classes de viscosité

→ La détermination de la classe de viscosité V_i s'effectue selon le mode opératoire donné au paragraphe 7 du présent document.

→ **Quatre classes de viscosité** sont définies en fonction du temps mesuré (tableau 2).

temps de vidange au cône inversé (en s)	observation	classe de viscosité
inférieur à 3	faible viscosité	V1
de 3 à 6	viscosité standard	V2
de 6 à 9	viscosité forte	V3
supérieur à 10	viscosité très forte	V4

Tableau 2 • Classes de viscosité tirées de l'essai d'écoulement au cône inversé.

→ Les bétons ordinaires faiblement adjuvantés relèvent usuellement de la classe de viscosité V1. Les bétons fortement adjuvantés tels que les bétons à hautes perfor-

mances (BHP) ou les bétons à faible impact environnemental peuvent relever de classes de viscosité plus élevées (V2 à V4) suivant leur formulation.

5 Efficacité de la vibration

→ Cette partie vise à prédire le diamètre d'action d'une aiguille vibrante plongée dans un béton en fonction des paramètres de l'aiguille et de la consistance du béton. Ces valeurs ne prennent pas en compte une éventuelle transmission de la vibration par les

parois du coffrage qui peuvent mener à une augmentation de ce diamètre d'action. Elles constituent ainsi une limite basse de la valeur d'écartement des points de pénétration des aiguilles dans le matériau.

Notations et paramètres d'entrée

→ Une aiguille vibrante (mécanique, pneumatique ou électrique) est caractérisée par :

- son amplitude de vibration **a** en mm ;
- son diamètre **DO** en mm ;
- sa fréquence en Hz ;
- et sa force centrifuge en N.

Remarque : la majorité des aiguilles utilisées sur chantier sont des aiguilles électriques.

→ Ces données sont en général disponibles sur les fiches techniques des aiguilles vibrantes.

Exemple : l'aiguille VHN59 de OLI dispose d'une amplitude **a** de 2,3 mm et d'un diamètre **DO** de 59 mm. Elle vibre à une fréquence de 200 Hz et sa force centrifuge est de 4560 N.

→ Le seuil et la viscosité du béton sont identifiés sous forme de classes :

- à la classe de consistance **Si** (S1, S2, S3 ou S4) ;
- à la classe de viscosité **Vi** (V1, V2, V3 ou V4).

Correction de la fréquence

→ Les recommandations fournissent des prédictions de diamètre d'action pour des aiguilles dont la fréquence de vibration est de 200 Hz (correspondant à la fréquence habituelle). Pour des aiguilles dont la fréquence est différente, les facteurs de cor-

rection présentés dans le tableau 3 peuvent être appliqués. Le diamètre d'action et la force centrifuge requise pour atteindre le rayon d'action attendu baissent ainsi avec la fréquence.

fréquence	100	125	150	175	200	225	250	275	300
facteur de correction sur le diamètre d'action	0,71	0,79	0,87	0,94	1	1,06	1,12	1,17	1,22
facteur de correction sur la force centrifuge requise	0,50	0,63	0,75	0,88	1	1,13	1,25	1,38	1,50

Tableau 3 • Facteurs de correction sur le diamètre d'action et sur la force centrifuge requise minimale en fonction de la fréquence de vibration de l'aiguille.

Limites de puissance de l'aiguille

→ Pour des bétons visqueux, la puissance d'une aiguille peut être insuffisante pour obtenir le rayon d'action attendu. Pour que ce rayon d'action atteigne la valeur prédite par ces recommandations, il est nécessaire que l'aiguille dispose d'une force centrifuge minimale.

→ Cette valeur dépend de l'amplitude de vibration **a** de l'aiguille et de la classe de viscosité **Vi** du béton vibré (tableau 4) et correspond à la **fréquence de vibration de 200 Hz**.

a (mm)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
V4	1,5 kN	2,8 kN	4,2 kN	5,6 kN	7,1 kN	8,5 kN	9,9 kN	11 kN	13 kN	14 kN
V3	0,9 kN	1,9 kN	2,8 kN	3,8 kN	4,7 kN	5,7 kN	6,6 kN	7,5 kN	8,5 kN	9,4 kN
V2	0,7 kN	1,3 kN	2,0 kN	2,6 kN	3,3 kN	4,0 kN	4,6 kN	5,3 kN	5,9 kN	6,6 kN
V1	0,4 kN	0,8 kN	1,1 kN	1,5 kN	1,9 kN	2,3 kN	2,7 kN	3,1 kN	3,4 kN	3,8 kN

Tableau 4 • Valeur requise minimale de la force centrifuge de l'aiguille permettant d'atteindre le rayon d'action attendu.

Exemple : l'aiguille VX-Booster 58 de Paclite dispose d'une amplitude **a** de 1,85 mm et sa force centrifuge est de 5585 N. Elle est cou-

verte par ces recommandations quelle que soit la classe de viscosité du béton vibré.

Prédiction du diamètre d'action

→ Le diamètre d'action d'une aiguille dépend du ratio **a/DO**, de la classe de viscosité **Vi** et de la classe d'affaissement **Si** (tableau 5).

a/DO	2 %	2 %	3 %	3 %	4 %	4 %	5 %	5 %	6 %	6 %
V4	11	19	14	24	16	27	18	30	20	33
V3	9	16	11	19	13	22	15	25	16	27
V2	8	13	10	16	11	19	12	21	14	23
V1	6	10	7	12	8	14	9	16	10	17
	S3	S4								

Tableau 5 • Prédiction du rapport entre diamètre d'action et diamètre de l'aiguille en fonction du rapport a/DO, de Si et Vi.

Exemple : l'aiguille IREN 45 de Wacker Neuson dispose d'une amplitude **a** de 2,1 mm et d'un diamètre **DO** de 45 mm. Le ratio a/DO est de 4,7 %. Plongée dans un béton de classe

de consistance **S4** et de classe de viscosité **V1**, son diamètre d'action devrait être de l'ordre de 15 fois son diamètre soit environ 70 cm.

6 Règles pratiques

Mise en œuvre à l'aiguille vibrante

→ Le choix du diamètre de l'aiguille vibrante DO est conditionné par son diamètre d'action (cf. paragraphe 5), la géométrie de la pièce, et les conditions de mise en œuvre ;

Remarque : dans le cas d'un voile d'épaisseur 20 cm, l'utilisation d'une aiguille de diamètre 60 mm aura pour conséquence une survibration liée à la transmission par la peau coffrante.

→ Une fois le choix de la bonne aiguille vibrante effectué, il convient de respecter certaines règles de mise en œuvre concernant la vibration.

→ **L'espacement des points de vibration** doit être régulier et tenir compte du diamètre d'action.

→ **Pour le coulage des éléments verticaux**, la hauteur de chute du béton doit être limitée afin d'éviter les problèmes de ségrégation (classiquement ceux-ci peuvent se produire, selon le type de béton, à partir d'une hauteur de chute de l'ordre de 1 m). Le coulage se fait par couches (passes) d'épaisseur comprise entre 30 et 50 cm (figure 6). Chaque couche est vibrée en introduisant l'aiguille dans la couche inférieure sur 10 à 20 cm.

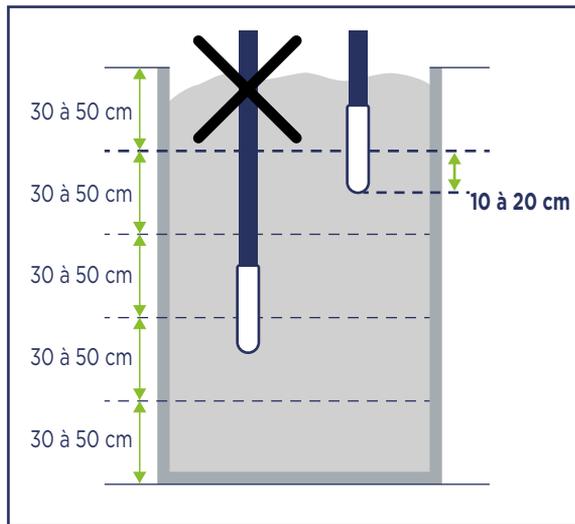


Fig. 6 • Vibration par couches.

→ Afin d'éviter les risques d'apparitions de fantômes d'armatures, il faut éviter au maximum de mettre en contact direct l'aiguille avec les armatures ou le coffrage. Il convient également de ne pas utiliser l'aiguille pour déplacer le béton ce qui entraîne de la ségrégation.

→ **Dans le cas particulier d'une vibration autour d'une fenêtre**, il faut vibrer d'un seul côté jusqu'à apparition du béton de l'autre côté pour un remplissage correct en sous face (figure 7). Cette règle ne s'applique pas dans le cas d'une porte, pour laquelle il faut vibrer des deux côtés de l'ouverture.

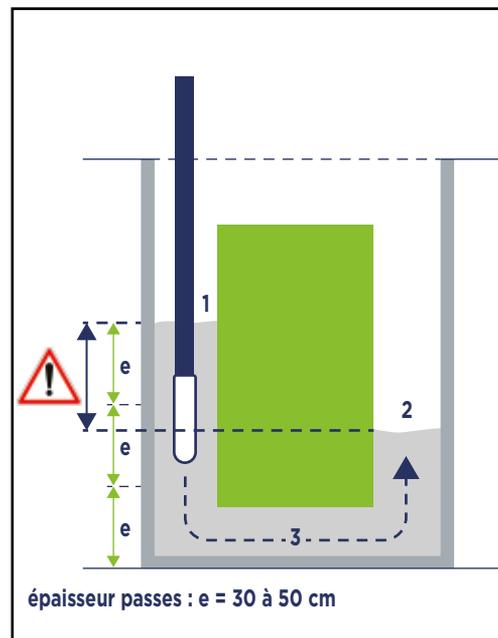
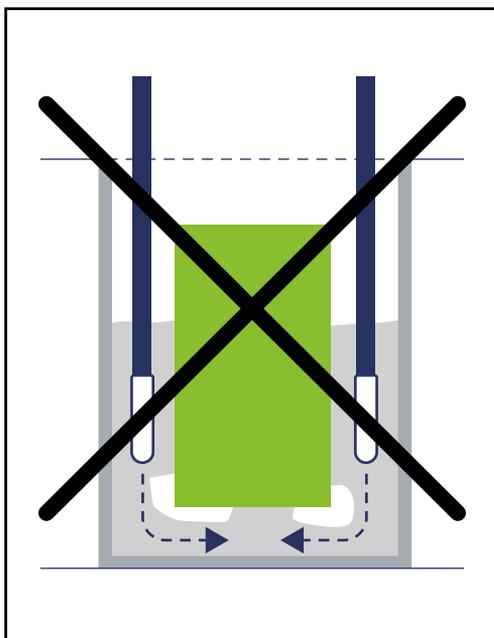


Fig. 7 • Recommandations pour la vibration autour d'une fenêtre.

Temps de vibration

→ Le temps de vibration des bétons peut être déterminé en fonction de la consistance :

- pour un béton de classe d'affaïssement **S3**, le serrage est effectué à l'aide d'une aiguille vibrante pendant un temps d'au moins 10 secondes par couche ;
- pour un béton de classe d'affaïssement **S4**, le serrage est effectué à l'aide d'une aiguille vibrante pendant un temps d'au moins 5 secondes par couche.

→ Pour les ouvrages verticaux, il est conseillé de prolonger le temps de vibration de la dernière couche pour compenser l'absence de compaction par effet gravitaire.

→ La survibration, c'est-à-dire le fait de vibrer trop longtemps, peut avoir un effet néfaste sur le rendu final du béton. Il convient alors de maintenir une durée de vibration constante en introduisant l'aiguille de manière verticale dans la masse et en la ressortant d'autant plus lentement que le béton est ferme (le trou laissé par l'aiguille doit se refermer lors de la remontée).

7

Réalisation de l'essai au cône inversé

(norme XP P 18-469)

→ Le présent mode opératoire spécifie la méthode de détermination de la durée d'écoulement au cône inversé. Le béton frais est mis en place dans le cône d'Abrams retourné (base supérieure vers le bas) reposant sur une surface plane. Lorsque le cône est soulevé à la verticale avec une vitesse régulière, le temps d'écoulement du béton t_A à travers le cône est mesuré et consigné comme la durée d'écoulement au cône Abrams. **Il permet d'évaluer la classe de viscosité V_i d'un béton** par la mesure d'un temps d'écoulement.

→ Il est applicable aux bétons vibrés de classes de consistance S3, S4 et dont le D_{max} ne dépasse pas 22,4 mm.

→ Les différentes étapes de réalisation de cet essai sont résumées ci-dessous (figure 8) :

- humidifier le cône, éliminer l'eau superficielle excédentaire et placer le cône grande section vers le haut sur le plateau ou la surface de base horizontale ;

- maintenir le cône en place pendant le remplissage ;

- remplir le cône en une seule couche à la main écope en répartissant le béton de manière uniforme ;

- à l'aide de la tige de piquage, appliquer 25 coups répartis uniformément sur la surface de la couche, sur environ la moitié de la hauteur du cône ;

- retirer l'excès de béton à la surface supérieure du cône ;

- araser la surface du béton à l'aide de la tige de piquage ;

- dans un délai de 30 secondes après l'arasement, soulever le cône par les pattes de fixation ou d'appui en 2 à 5 secondes, par une remontée verticale régulière, sans imprimer au béton un mouvement latéral ou de torsion, jusqu'à une hauteur de 30 cm environ ;

- le chronomètre est déclenché dès que le cône n'est plus en contact avec la surface plane. La mesure est réalisée jusqu'au moment où l'on peut apercevoir un jour à travers le cône d'Abrams.

➔ **L'écoulement du béton doit être continu.** Si cela n'est pas le cas (blocage ou écoulement par à-coups), l'essai doit être répété et l'information doit être consignée dans le rapport d'essai.

➔ Si deux essais consécutifs montrent un écoulement discontinu, l'essai n'est pas approprié.



Fig. 8 • Réalisation de l'essai au cône inversé.



Bibliographie

- [1] **R. L'Hermite**, « *Idées actuelles sur la technologie du béton* », Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (ITBTP) éd., 1955.
- [2] **R. L'Hermite**, « *Essai de théorie sur la vibration du béton* », Travaux, vol. 122, pp. 199-207, 1944.
- [3] **G. Grampeix**, « *Vibration des bétons* », thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, 2013.



Innover pour un monde durable
ENTREPRISES GÉNÉRALES DE FRANCE BTP

contact :

EGF (Entreprises générales de France)
9 rue La Pérouse
75784 Paris Cedex 16
tél : 01 40 69 52 77
www.egfbtp.com