

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON *IN SITU*

CONTEXTE

La présente méthodologie d'évaluation de la résistance en compression du béton sur site est fortement inspirée de la norme NF EN 13791/CN de 2021 « Évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton » et notamment de ses chapitres 6 « Essais sur carottes et détermination de la résistance à la compression sur site », 7 « Évaluation initiale de l'ensemble de données », et 8 « Estimation de la résistance à la compression en vue de l'évaluation d'une structure existante ».

Le cas de l'évaluation de la classe de résistance à la compression d'un béton en cas de doute à la construction (béton non conforme) abordé à l'article 9 de la norme européenne, n'est pas traité dans cette procédure.

La résistance caractéristique « de calcul » est obtenue en divisant la résistance caractéristique à la compression « déterminée sur site » par un coefficient de 0,85 conformément au paragraphe NA.8 de la norme NF EN 13791/CN. Cela s'explique par le fait que le béton dans la structure a généralement une résistance moindre que celle mesurée conventionnellement sur éprouvettes moulées à la construction et prise en compte dans les calculs de dimensionnement.

À titre d'exemple, on peut avoir besoin de connaître la résistance à la compression du béton lorsque l'on réalise l'évaluation structurale (recalcul) d'un ouvrage en vue de projeter une réparation ou un renforcement, notamment par précontrainte additionnelle, ou pour connaître la résistance résiduelle d'une structure dont le béton présente une pathologie comme une réaction de gonflement interne.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

<p>ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE</p>	<p>L'objectif est d'identifier les différents types et livraisons de béton qui ont pu être utilisés pour construire l'ouvrage ainsi que son mode de construction. Cela permet de découper l'ouvrage en zones d'essai ayant a priori la même formulation de béton, ou tout au moins une certaine homogénéité de résistance. Une zone d'essai intègre plusieurs aires d'essai.</p> <p>Rappel des définitions de la norme NF EN 13791/CN :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aire d'essai : « aire limitée qui est sélectionnée pour les mesurages et qui sert généralement à estimer un seul résultat d'essai, lequel doit permettre l'évaluation de la résistance à la compression sur site ». Une aire d'essai correspond à au moins une carotte, ou à la médiane de 9 mesures au scléromètre, ou à une mesure de vitesse du son ; - « Zone d'essai : un ou plusieurs éléments structuraux ou éléments préfabriqués en béton similaires dont il est connu ou supposé qu'ils sont constitués d'un béton ayant les mêmes constituants et la même classe de résistance à la compression ou équivalents au volume défini associé aux essais d'identification pour la résistance à la compression ». <p>On essaiera d'identifier, grâce aux bons de livraison, les différentes centrales ayant fourni les bétons et les dates de livraison ; cela permettra d'affiner le zonage précédemment défini.</p> <p>À titre d'illustration, une zone d'essai peut correspondre à un poteau, un voile, une dalle, un ensemble de poteaux, un ensemble de voiles, un ensemble de poteaux et de dalles à condition que ces ensembles comprennent des éléments coulés sur la même journée avec les mêmes caractéristiques de béton (lorsque ces données sont accessibles).</p>
<p>ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE (OU PRÉ-DIAGNOSTIC) ET DÉFINITION DES ZONES ET AIRES D'ESSAI</p>	<p>En fonction des résultats de l'étape 1 et des constatations effectuées lors de l'inspection détaillée (existence de reprises de bétonnage, parements de couleur uniforme indiquant l'utilisation d'un même béton, joints de coffrage délimitant des zones d'aspects différents, joints de voussoirs, etc.), on affinera le zonage précédemment défini afin de décider du nombre de carottes à prélever et d'implanter les carottages, ou d'implanter les aires d'essai où seront faites les mesures non destructives. Le nombre d'aires d'essai par zone d'essai dépend du volume de béton considéré, de l'objectif des essais et du niveau de confiance requis pour l'estimation.</p> <p>Si le choix d'utiliser uniquement des carottes (en référence à l'article 8.1 de la norme) est effectué, le nombre minimal de résultats d'essai valides pour estimer la résistance caractéristique à la compression sur site d'une zone d'essai est de huit, à condition que le diamètre des carottes soit supérieur ou égal à 75 mm, mais il est recommandé de carotter au moins dix aires d'essai pour tenir compte d'éventuelles valeurs aberrantes.</p>



ÉTAPE 2
INSPECTION DÉTAILLÉE
(OU PRÉ-DIAGNOSTIC) ET
DÉFINITION DES ZONES ET
AIRES D'ESSAI

Si le choix d'utiliser des essais indirects dans une zone d'essai de moins de 30 m³ (en référence à l'article 8.3 de la norme) est effectué, le nombre minimal de résultats d'essai valides obtenus sur des carottes de diamètre ≥ 75 mm à utiliser est de trois, mais il est recommandé de carotter au moins quatre aires d'essai pour tenir compte d'une éventuelle valeur aberrante.

Dans tous les cas, les carottages devront être effectués dans des zones où ils ne posent pas de problème structurel, par exemple au niveau de l'axe neutre. Un repérage préalable de la position des armatures passives et des câbles de précontrainte devra être effectué.

La norme NF EN 13791/CN propose trois méthodes différentes d'évaluation de la résistance caractéristique en compression, selon que cette évaluation est basée uniquement sur des carottes, sur une corrélation entre des mesures non destructives et quelques carottes, ou sur l'utilisation de mesures non destructives dans une zone d'essai de moins de 30 m³ pour choisir l'aire (ou les aires) d'essai dans laquelle (lesquelles) on fera des carottages.

Évaluation basée sur des essais de compression sur carottes (Article 8.1)

Comme l'indique la norme NF EN 13791/CN, il est fortement recommandé d'évaluer la résistance en compression du béton *in situ* par des essais de compression sur carottes.

Il est rappelé que la qualité du prélèvement par carottage est très importante pour ne pas endommager les carottes et être garant du respect de la géométrie requise pour l'essai de compression. Les carottes doivent être prélevées, examinées et préparées conformément à la NF EN 12504-1 (voir également [la fiche d'auscultation A1-1](#)) puis soumises à l'essai conformément à la NF EN 12390-3.

Si la norme NF EN 13791/CN spécifie de prélever des carottes de diamètre ≥ 75 mm et découpées à une longueur telle qu'après préparation le rapport longueur/diamètre (élancement) soit compris entre 2 et 1, elle autorise de prélever des carottes de diamètre Φ compris entre 50 et 150 mm, et de longueur h et donne des coefficients de correction K_1 pour se ramener à des carottes de diamètre 150 mm et K_2 pour se ramener à un élancement de 2. La relation de correction est la suivante :

$$f_{c, is} = f_{c, 300:150, carotte} = K_1 K_2 f_{c, h: \Phi, carotte}$$

avec :

$$K_1 = 108,748 / (-0,0003 \Phi^2 + 0,244 \Phi + 78,898) \text{ pour une résistance } \leq 40 \text{ MPa}$$

$$K_1 = 106,358 / (-0,0004 \Phi^2 + 0,2266 \Phi + 81,368) \text{ pour une résistance } > 40 \text{ MPa et } \leq 80 \text{ MPa}$$

$$K_2 = 0,18 E + 0,64 \quad \text{où } E \text{ est l'élancement de la carotte.}$$

Dans une aire d'essai, la norme demande de prélever au moins 3 carottes de diamètre compris entre 50 et 75 mm ou au moins 1 carotte de diamètre ≥ 75 mm pour obtenir un résultat ; elle mentionne aussi dans une note que la dimension des granulats a une incidence significative sur la résistance mesurée lorsque le rapport entre le diamètre de la carotte et la dimension maximale des granulats est inférieur à environ 3. Il est néanmoins souhaitable, si le ferrailage et la dimension de la pièce le permettent, de prélever des carottes ayant un diamètre égal à 5 fois le diamètre du plus gros granulat, ce qui conduit dans la plupart des cas à prélever des carottes de diamètre égal à environ 100 mm.

Dans une zone d'essai, le prélèvement de carottes dépend de la taille de la zone :

- pour une zone « non petite » au sens de la norme : prélever au moins 8 carottes de diamètre ≥ 75 mm ou au moins 12 carottes de diamètre ≥ 50 mm et < 75 mm ;
- dans une petite zone d'essai comprenant un à trois éléments de structure et ayant un volume total inférieur ou égal à environ 10 m³ : prélever au moins 3 carottes de diamètre ≥ 75 mm, y compris au moins une carotte dans chaque élément.

L'interprétation des essais de compression se fait selon la taille de la zone d'essai :

a) pour une zone « non petite » (au sens de la norme)

Il convient d'évaluer si cette zone « non petite » représente une seule classe de résistance du béton ; si les résultats d'essai démontrent que la zone d'essai peut présenter deux résistances à la compression, il faut :

- soit diviser l'ensemble de données en deux zones d'essai, en respectant les exigences minimales pour une zone d'essai ;
- soit diviser les données en deux ensembles et déterminer si la résistance moyenne est différente en utilisant, par exemple, le test de Student.

La ou les zones d'essai étant confirmées, il faut ensuite évaluer s'il y a une ou plusieurs valeurs de résistance jugées aberrantes avec le test de Grubbs à 1 % ou 5 %. S'il existe des valeurs aberrantes, leur élimination ou leur conservation dépend du jugement de l'ingénieur.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Puis on évalue la résistance caractéristique *in-situ* ($f_{ck, is}$) par zone d'essai à partir de la plus faible de ces 2 valeurs :

$$f_{ck, is} = f_{c,m(n)is} - k_n S \quad (1)$$

où S représente l'écart type de l'échantillon et est au moins égal à $0,08 f_{c,m(n)is}$ et où k_n est fourni par le tableau suivant :

n	8	10	12	16	20	30	∞
k_n	2,00	1,92	1,87	1,81	1,76	1,73	1,64

et $f_{ck, is} = f_{c, is, la plus faible} + M \quad (2)$

où M est une marge donnée par le tableau suivant :

Valeur de $f_{c, is, la plus faible}$ MPa	Marge MPa
≥ 20	4
≥ 16 et < 20	3
≥ 12 et < 16	2
< 12	1

b) pour une petite zone

Il convient de prendre la plus faible valeur de trois carottes ou plus (à condition que la dispersion des résultats d'essai ne soit pas supérieure à 15 % de la valeur moyenne) comme étant la résistance caractéristique à la compression sur site ($f_{ck, is}$).

Si la dispersion des résultats est supérieure à 15 %, il faut rechercher davantage d'informations sur cette petite zone d'essai...

c) pour une petite zone

In fine, la résistance caractéristique du béton à prendre en compte pour le calcul est donnée par la relation suivante :

$$f_{ck} = f_{ck, is} / 0,85$$

Évaluation basée sur une corrélation entre essais indirects et carottes (Article 8.2)

S'il s'avère impossible de se baser sur des essais de compression sur carottes prélevées pour évaluer la résistance en compression du béton dans la structure, alors il est possible d'appliquer des méthodes d'auscultation non destructives, encore appelées dans le cadre de la norme NF EN 13791/CN « essais indirects » (par opposition aux essais directs de compression sous presse), à condition de procéder à un étalonnage des méthodes indirectes avec des essais de compression sur carottes.

Cela signifie qu'il est hors de question d'appliquer les formules de passage données par les fabricants de matériel sans un étalonnage par des essais sur carottes prélevées dans la structure ; sinon il faut considérer ces valeurs de résistance comme très approximatives.

La norme autorise deux méthodes indirectes qui sont la mesure de l'indice de rebondissement (mesures au scléromètre suivant la norme NF EN 12504-2; voir également [la fiche d'auscultation B1-1](#)) et la mesure de la vitesse de propagation du son (auscultation sonique des bétons suivant la norme NF EN 12504-4; voir également [la fiche d'auscultation B1-2](#)).

Note : comme indiqué par le complément national à la norme NF EN 13791, l'essai d'arrachement est à proscrire pour l'évaluation d'une résistance *in situ*.

En effet, dans le cadre de structures existantes, la mesure de la force d'arrachement nécessite de forer avec un outil spécial le béton de façon à y rentrer un insert puis de venir tirer sur cet insert. Cette opération qui est trop dépendante de la mise en œuvre, fournit des résultats peu fiables et peu représentatifs de la résistance du béton au cœur de l'ouvrage.

Idéalement, il convient de réaliser l'auscultation par essais indirects avant de procéder au carottage. Il est recommandé d'utiliser les données de cette analyse pour choisir les positions de carottage. Les carottes doivent être prélevées au niveau des aires où des valeurs d'essai indirect sont disponibles. Conformément à la norme, la corrélation doit être fondée sur au moins 8 couples de résultats d'essai ; pour y parvenir, il est recommandé d'en obtenir 10 pour tenir compte d'éventuelles valeurs aberrantes. De plus, il convient que les aires d'essai des carottes couvrent toute l'étendue des valeurs de l'essai indirect y compris les valeurs extrêmes.

Les résultats des essais de compression sur carottes sont corrigés par les coefficients K_1 et K_2 (cf ci-avant). On cherche ensuite à détecter les valeurs atypiques par une analyse des résidus normalisés et le cas échéant on élimine les valeurs jugées atypiques et donc non valides.

À partir des valeurs des couples de résultats d'essai, on détermine la droite de régression linéaire la mieux ajustée à ces valeurs, et on juge si elle est raisonnable pour le béton évalué en fonction de son âge, de son type, etc. Puis, à l'aide de l'équation de régression linéaire établie, toutes les valeurs d'essai indirect valides sont converties en valeurs équivalentes de résistance à la compression ($f_{c, is, reg}$) par l'équation de régression, même au niveau des aires d'essai pour lesquelles existent des résultats réels d'essai sur carottes. Lors de la détermination des valeurs $f_{c, is, reg}$ de l'équation de régression, cette dernière ne doit pas être extrapolée de plus de 4 MPa aux deux extrémités de la relation établie.

Puis, l'interprétation des résultats d'essais se fait selon le type de zone d'essai :

a) Pour une zone d'essai non spécifique (cas le plus courant)

Dans les cas les plus courants, où on s'intéresse à une zone d'essais représentant plusieurs éléments de structure considérés homogènes, on évalue la résistance moyenne et l'écart-type global de la résistance à la compression sur site pour la zone d'essai en appliquant les formules 5 à 9 de la norme. L'écart type global intègre l'écart-type lié à la dispersion des données d'essai de résistance sur carottes autour de la courbe de régression ajustée et l'écart-type lié à la dispersion de l'ensemble des résistances estimées autour de leur valeur moyenne.

Puis on évalue la résistance caractéristique *in-situ* ($f_{ck, is}$) selon les formules 1 et 2 présentées ci-avant en remplaçant dans la formule 1 « n » par « $n_{eff} + 1$ » où n_{eff} représente le nombre effectif de degrés de liberté associé à l'écart-type global.

In fine, la résistance caractéristique du béton à prendre en compte pour le calcul est donnée par la relation suivante :

$$f_{ck} = f_{ck, is} / 0,85$$

b) Pour une zone d'essai spécifique

Lorsqu'on s'intéresse à une zone d'essais spécifique (présentant par exemple des pathologies particulières ou des malfaçons), il n'est pas sécuritaire d'utiliser la relation moyenne pour estimer la résistance à la compression sur site au niveau d'une aire d'essai de la zone spécifique, car il existe une probabilité de 50 % que la résistance réelle soit inférieure à la résistance estimée ; la résistance à la compression sur site est donc déterminée à partir des valeurs de résultats d'essais indirects converties en valeurs sur la courbe limite inférieure de l'intervalle de prédiction pour un degré de signification α de 5 % (test de Student unilatéral), en appliquant la formule 10 de la norme. Cette formule 10 fournit une résistance estimée à la compression qui n'est pas la résistance caractéristique à la compression de la zone d'essai.

La norme précise également que, si un résultat d'essai sur carottes de diamètre ≥ 75 mm est disponible, alors on peut utiliser cette valeur.

Évaluation basée sur des essais indirects pour prélever au moins 3 carottes dans une zone d'essai de moins de 30 m³ (Article 8.3)

Ce type d'évaluation peut être appliqué à une zone d'essai ne comprenant pas plus de 30 m³ de béton afin d'estimer la résistance à la compression sur site en utilisant des méthodes indirectes sans étalonnage, lorsque la résistance à la compression du béton fourni ne pose pas de problème particulier.

Dans la zone d'essai de moins de 30 m³, on identifie les aires de plus faibles résistances en compression à partir de résultats d'essais indirects (par mesure de la vitesse de propagation du son ou par des essais au scléromètre). Puis on prélève au moins 3 carottes de diamètre ≥ 75 mm (ou un nombre supérieur de carottes de plus faible diamètre selon le tableau 4 de la norme) au voisinage de l'aire (ou des aires) d'essai ayant les valeurs indirectes les plus faibles, et on les soumet à des essais de compression en appliquant les coefficients de correction K_1 et K_2 (cf. ci avant).

On considère que la résistance caractéristique *in situ* est obtenue à partir de la moyenne des 3 carottes (ou plus), à condition que la dispersion des résultats d'essai soit inférieure à 15 % de la valeur moyenne. Lorsque cette dispersion est supérieure à 15 % de la valeur moyenne, si une étude fournit un motif justifié de rejet de l'un des résultats d'essai sur carottes, la résistance à la compression sur site ($f_{ck, is}$) retenue est la moyenne des valeurs valides restantes.

In fine, la résistance caractéristique du béton à prendre en compte pour le calcul est donnée par la relation suivante :

$$f_{ck} = f_{ck, is} / 0,85$$

RÉFÉRENTIEL

Documents normatifs :

NF EN 12390-1 : Essais sur béton durci – Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules.

NF EN 12390-3 : Essais sur béton durci – Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.

NF EN 12504-1 : Essais pour béton dans les structures – Partie 1 : carottes – prélèvement, examen et essais en compression.

NF EN 12504-2 : Essais pour béton dans les structures – Partie 2 : essais non destructifs – détermination de l'indice de rebondissement.

NF EN 12504-4 : Essais pour béton dans les structures – Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son.

NF EN 13791/CN : Évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton – complément national.

FD P18-471 : Guide pour l'application de la norme NF EN 13791/CN et contexte des spécifications.

Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art (cahier interactif UGE-Cerema « Auscultation des ouvrages d'art) :

[A1-1 Carottage de béton](#)

[B1-1 Mesures au scléromètre](#)

[B1-2 Auscultation sonique des bétons](#)

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel résume la méthodologie du diagnostic en visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour déterminer la résistance caractéristique à la compression du béton sur site.

D1-7 : ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON *IN SITU*

