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 du complément national de la norme NF EN 13791 « Évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton » et notamment de ses chapitres 7 « Évaluation de la résistance caractéristique à la compression sur site par l'essai sur carottes » et 8 « Évaluation de la résistance caractéristique à la compression sur site par des méthodes indirectes ».

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 tableau 1 de la norme NF EN 13791/CN. Cela signifie que le béton dans la structure a généralement une résistance moindre que celle mesurée sur une éprouvette moulée.

A 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

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

L'objectif est d'identifier les différents types de béton qui ont pu être utilisés pour construire l'ouvrage. 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.

Rappel des définitions de la norme NF EN 13791/CN :

– « Zone d'essai : un ou plusieurs éléments structuraux en béton dont on sait ou suppose qu'ils proviennent de la même population. Une zone d'essai contient plusieurs aires d'essai ».
– « Aire d'essai : aire limitée qui est sélectionnée pour les mesurages et qui sert à estimer un seul résultat d'essai, lequel doit permettre l'évaluation de la résistance à la compression sur site ».

On essayera 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.

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE

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.

Les carottages seront 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 aciers passifs et des câbles de précontrainte doit être effectué.

ÉTAPE 3 AUSCULTATION

La norme NF EN 13791/CN propose différentes méthodes, directe ou indirectes, pour déterminer la résistance caractéristique en compression.

Évaluation basée sur des essais de compression sur carottes

Comme l'indique le complément national de la norme NF EN 13791, 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 (se reporter aux normes NF EN 12504-1 et NF EN 12390-1 et se conformer à la fiche d'auscultation A1-1).

Le diamètre minimal de la carotte exigé par la norme est de 3 fois le diamètre du plus gros granulat. Il est souhaitable, si le ferraillage 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 10 cm.

L'élancement recommandé est de 2. Il existe dans le complément national à la norme des graphiques qui donnent des coefficients de correction de la résistance en fonction de la géométrie des éprouvettes pouvant être utilisés pour des éprouvettes de diamètres ou d'élancements différents.

Nous donnons également ci-dessous une formule qui permet de passer d'un diamètre à un autre et d'un élancement à un autre, formule qui est valable pour des bétons courants (< C50/60) :

$$\frac{Rc_{\Phi/h}}{Rc_{16/32}} = 0{,}64 + \frac{1}{\frac{h}{\Phi} + \frac{\Phi}{20}}$$

avec Rc = résistance en compression

Φ = diamètre de l'éprouvette (en cm)

h = hauteur de l'éprouvette (en cm)

Pour une zone d'essai particulière, l'estimation de la résistance caractéristique à la compression de la zone, $f_{ck,\,is}$ diffèrera suivant le nombre de carottes qu'il est possible de prélever.

– **Si au moins 15 carottes peuvent être prélevées de façon à disposer d'un nombre d'échantillons statistiquement représentatif de la zone,** $f_{ck,\,is}$ sera estimée à l'aide des formules données par l'approche A de la norme NF EN 13791/CN.

$f_{ck,\,is}$ est égale à la valeur la plus faible des deux quantités suivantes :

$$f_{ck,\,is} = f_{m(n),\,is} - k_2\, s$$

$$f_{ck,\,is} = f_{is\ plus\ faible} + 4$$

avec $f_{m(n),\,is}$ la résistance moyenne des n éprouvettes

$f_{is\ plus\ faible}$ la résistance la plus faible des n éprouvettes

s l'estimation de l'écart type des valeurs de résistance des n éprouvettes, avec une valeur au minimum de 2 MPa

$k_2 = 1{,}48$

– **Si cela n'est pas possible** (risque d'endommager un élément de structure, coût disproportionné des carottages, esthétique à préserver, etc.), alors on limitera à un nombre de carottes compris entre 3 et 14 et on appliquera les formules données par l'approche B de la norme NF EN 13791/CN pour estimer $f_{ck,\,is}$.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Note : La norme précise qu'il est fortement déconseillé de descendre en dessous de 3 carottes. En effet, compte-tenu de la possible dispersion des résultats d'essai et de la présence d'éventuels défauts rendant inexploitables certaines carottes, il est recommandé de prélever plus de 3 carottes, de façon à ce que le calcul de la résistance à la compression moyenne puisse bien être fait sur au moins trois valeurs.

$f_{ck,\,is}$ est égale à la valeur la plus faible des deux quantités suivantes :

$$f_{ck,\,is} = f_{m(n),\,is} - k$$

$$f_{ck,\,is} = f_{is,\,plus\ faible} + 4$$

avec $f_{m(n),\,is}$ la résistance moyenne des n éprouvettes

$f_{is,\,plus\ faible}$ la résistance la plus faible des n éprouvettes

k fourni par le tableau ci-dessous en fonction du nombre d'essais :

n	k
de 10 à 14	5
de 7 à 9	6
de 3 à 6	7

On prendra soin de retirer tout résultat de mesure d'essai en compression qui paraîtrait aberrant, c'est-à-dire un résultat considérablement éloigné des autres résultats et qui s'expliquerait par la présence d'un défaut jugé anormal par rapport à l'homogénéité du béton de la structure (dommage causé par le forage, présence d'une armature métallique, fissure préexistante, cavité, nid de cailloux, etc.).

Les formules données pour le calcul de la résistance à partir d'un nombre de carottes compris entre 3 et 14 sont volontairement plus conservatrices que les formules données pour un nombre de carottes supérieur à 15.

En pratique, sur un ouvrage existant, il est rare, au risque de porter atteinte à la résistance de la structure, de pouvoir multiplier le nombre de prélèvements. Le nombre de carottes à réaliser doit être apprécié en fonction de la taille de la zone d'essai et des parties d'ouvrage correspondantes et du besoin de précision attendue sur la connaissance des caractéristiques physiques et mécaniques du béton.

Évaluation basée sur des méthodes d'auscultation indirectes

S'il s'avère impossible de se baser sur des essais de compression sur éprouvettes 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 trois méthodes indirectes qui sont la mesure de l'indice de rebondissement (mesures au scléromètre), la mesure de la vitesse de propagation du son (auscultation sonique des bétons) et la mesure de la force d'arrachement. 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 à 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. 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.*

La norme NF EN 13791/CN prévoit deux variantes pour établir la relation entre méthodes indirectes et méthodes directes :

– une variante 1 où la corrélation se fait directement avec des essais de compression sur carottes ;
– une variante 2 où l'étalonnage se fait sur la base d'une relation déterminée à partir d'un nombre limité de carottes et d'une courbe de base donnée dans la norme.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

À l'image du complément national à la norme NF EN 13791, nous recommandons d'appliquer la variante 1 qui est scientifiquement la plus valide.

Variante 1

La corrélation repose sur au moins 18 couples de résultats (essai sur carotte, essai indirect) reparties sur différentes zones d'essai, afin de couvrir la plage de résistances attendues. L'ajustement de la courbe se fait par analyse de régression, et la relation est déterminée comme étant le fractile 10 % inférieur de la résistance.

À partir du moment où cette relation a été établie, il est alors possible de l'appliquer à toutes les zones de l'ouvrage pour estimer la résistance du béton *in situ* en pratiquant uniquement des mesures indirectes, mais la norme demande que l'on pratique au moins 15 aires de mesures non destructives par zone d'essai. La norme fournit alors les formules pour calculer la résistance caractéristique à la compression d'une zone, $f_{ck,is}$.

Comme précédemment, $f_{ck,is}$ est égale à la valeur la plus faible des deux quantités suivantes :

$$f_{ck,\,is} = f_{m(n),\,is} - 1{,}48\ s$$

$$f_{ck,\,is} = f_{is,\,plus\ faible} + 4$$

avec $f_{m(n),\,is}$ la résistance moyenne des n aires de mesures évaluées à partir des méthodes non destructives et de la relation établie

$f_{is\ plus\ faible}$ la résistance la plus faible des n aires de mesures évaluée à partir des méthodes non destructives et de la relation établie

s l'estimation de l'écart type des valeurs de résistance des n aires de mesures, avec une valeur maximale de 2 MPa

Dans l'application de cette variante, et même si la norme l'autorise, nous déconseillons de combiner les méthodes indirectes.

Variante 2

Dans le cas où il serait impossible pour des raisons techniques de prélever 18 carottes pour établir la corrélation mentionnée en variante 1, il est alors possible d'appliquer la variante 2 en utilisant une relation pré-établie (dénommée courbe de base) et en l'étalonnant néanmoins avec un minimum de 9 carottes prélevées pour essai de compression. Nous renvoyons le lecteur à la norme pour la description du processus d'étalonnage qui doit être suivi.

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 Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton – complément national.

Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'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

