

Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature

Xavier JOURDAIN - Hélène HORSIN MOLINARO
François SOLEILHET

Edité le 12/11/2018

Cette ressource est issue d'une séance de travaux pratiques de génie civil réalisée en formation SAPHIRE, première année commune des trois départements des Sciences de l'Ingénieur de l'ENS Paris-Saclay. L'objectif est de caractériser par divers essais destructifs le béton fabriqué, et l'acier utilisé dans la ressource « Fabrication d'une poutre en béton armé ».

Lors de la réalisation d'une poutre en béton armé quatre semaines plus tôt (voir ressource « Fabrication d'une poutre en béton armé ») six éprouvettes de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm ont été préparées (figure 1). Elles sont destinées aux essais de caractérisation mécanique du béton. La ressource « Cassage d'une poutre en béton armé » met en œuvre un essai de flexion 4 points sur la poutre réalisée. La formulation du béton a été élaborée selon la démarche exposée dans la ressource « Formulation d'un béton ordinaire ».



Figure 1 : Les six éprouvettes de béton après durcissement et une des éprouvettes juste démoulée



Figure 2 : Trois éprouvettes surfacées pour les essais de compression

Des essais et mesures sont effectués afin de caractériser mécaniquement le béton réalisé un mois auparavant (voir ressource « Fabrication d'une poutre en béton armé »). Trois des éprouvettes vont subir un essai de compression, ces éprouvettes sont surfacées afin de présenter des surfaces d'appui les plus lisses possibles (figure 2) ; la résistance de ces éprouvettes sera également estimée à l'aide d'un scléromètre (essai non destructif). Les trois autres éprouvettes vont être soumises à un essai de fendage permettant de caractériser la résistance à la traction du béton. À ces essais sur le béton, va s'ajouter un essai de traction sur l'acier composant la cage d'armature de la poutre. Ainsi tous les composants de la poutre en béton armé sont caractérisés mécaniquement avant de procéder à un essai de flexion 4 points sur la poutre elle-même.

Cette ressource détaille la mise en place et les résultats des essais pour la caractérisation mécanique du béton et de l'acier des armatures : essai de fendage, essai de compression, mesure au scléromètre, essai de traction pour l'acier.

1 - Essai de fendage (NF-EN-12390-6)

Un essai de fendage est réalisé sur trois éprouvettes cylindriques. Cet essai permet de déterminer expérimentalement la résistance en traction du béton.

1.1 - Description de l'essai

L'essai de fendage est un essai de traction indirect consistant à comprimer radialement l'éprouvette (figure 3), créant alors, par effet Poisson¹, des contraintes de traction horizontales au sein du matériau. Cet essai fonctionne à condition que l'effet Poisson provoque la rupture du matériau avant les contraintes de compression. On considère en général que la résistance à la traction du matériau doit être plus de trois fois inférieure à sa résistance en compression pour que cet essai permette d'estimer la résistance en traction. C'est le cas pour les bétons ordinaires où le rapport est généralement d'environ dix.

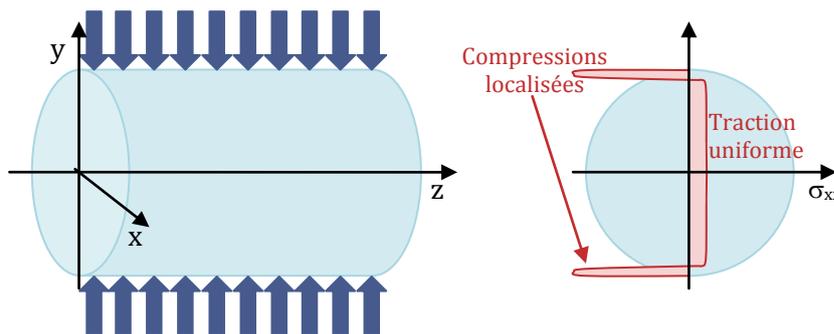


Figure 3 : Chargement de l'éprouvettes et allure des contraintes σ_{xx} dans la section verticale lors de l'essai de traction indirecte appelé essais de fendage.

Environ 80 % de la section de l'éprouvette est soumise à des contraintes de traction (figure 3). La fissure de l'éprouvette s'initie au centre de celle-ci dans le plan d'application des efforts. On obtient ainsi un faciès de rupture plan, hormis aux zones d'application du chargement, où l'on observe des irrégularités en raison de zones de compression localisées. Ces zones se situent au niveau des interfaces éprouvette/presse : elles subissent donc directement les contraintes de compression appliquées par la machine.

À partir de la charge maximale moyenne à la rupture $F_{rupt,moy}$, la résistance moyenne à la traction du béton f_{ctm} peut être calculée à l'aide de la formule suivante déduite d'un résultat analytique :

$$f_{ctm} = \frac{2.F_{rupt,moy}}{\pi.D.L} \quad (1)$$

1.2 - Déroulé de l'essai

La machine hydraulique qui génère l'effort de compression est équipée de support en V (figure 4) permettant de centrer l'éprouvette. Des baguettes en bois léger sont installées au fond du V et sur le dessus de l'éprouvette afin d'éviter les concentrations de contraintes dues aux imperfections de l'éprouvette.

À noter qu'il est nécessaire, avant la réalisation de l'essai, de s'assurer que l'éprouvette soit parfaitement centrée. En effet, si le chargement est excentré, l'essai peut donner des résultats aberrants et non exploitables. On pourra en complément vérifier après rupture que les deux parties de l'éprouvette fendue sont bien symétriques, et de mêmes dimensions.

¹ Du nom de Siméon Denis Poisson (1781-1840), mathématicien et physicien français

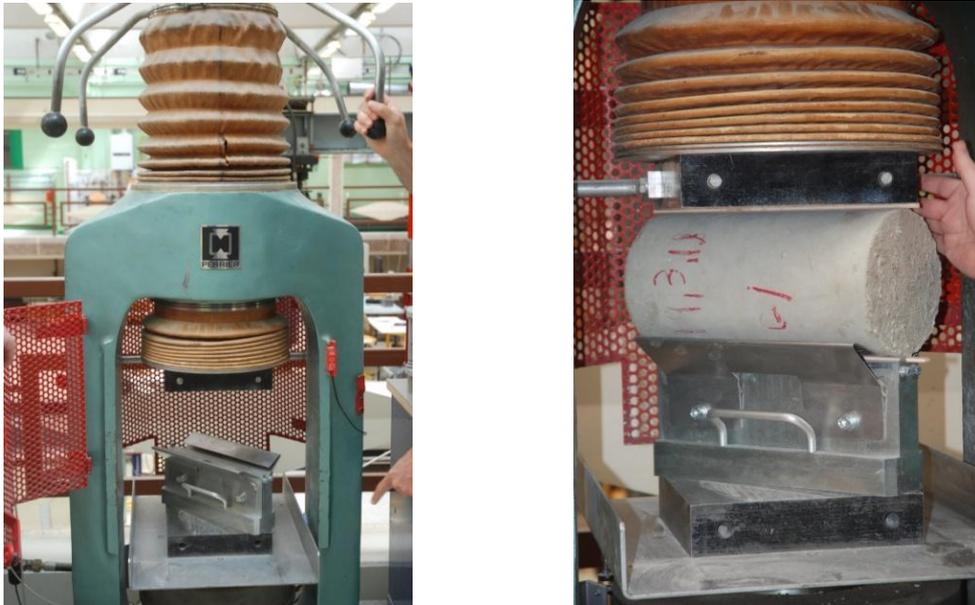


Figure 4 : Équipement de la machine pour l'essai de fendage et positionnement de l'éprouvette

La machine est chargée et l'essai se déroule jusqu'à rupture (figure 5).



Figure 5 : Essai de fendage et éprouvette fendue

1.3 - Résultats de l'essai

Trois essais sont réalisés sur trois éprouvettes cylindriques :

Eprouvette	1	2	3
F_{rupt} [kN]	255	241	272

Figure 6 : Charge maximale à la rupture des trois essais

On obtient alors $F_{rupt,moy} = 256$ kN

Soit $f_{ctm,fend} = 3,2$ MPa

1.4 - Allure du faciès de rupture

Dans les sections de rupture des trois éprouvettes, on observe différents types de dommages (figure 6) :

- rupture de granulats ;
- rupture de la pâte de ciment ;
- granulats déchaussés à l'interface entre la pâte de ciment et les granulats (notamment les plus gros).

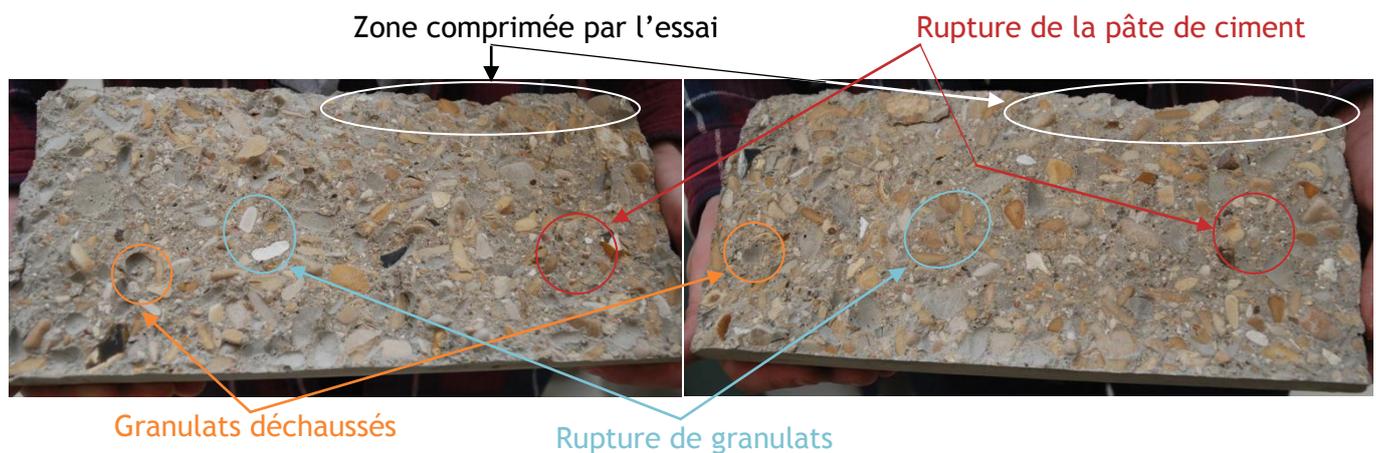


Figure 6 : Faciès des ruptures lors de l'essai de fendage.

On observe également que l'intérieur de la section de l'éprouvette est encore humide, au-delà de 1 cm d'épaisseur. Le béton, âgé d'environ 28 jours au moment de l'essai, n'a donc pas terminé son hydratation, ni son séchage. Le séchage complet d'un béton est un processus diffusif très lent, environ vingt-cinq années sont nécessaires pour obtenir l'équilibre hydrique d'une éprouvette de ce type dans un milieu possédant une humidité relative de 35 %.

Néanmoins, cette propriété donne au béton des caractéristiques intéressantes. En effet, lors de la prise, on estime que pour un béton ordinaire environ 15 % du ciment utilisé n'est pas hydraté. Ce pourcentage augmente pour les bétons hautes performances. Ce ciment sera progressivement hydraté au cours du temps, grâce aux transferts hydriques au sein du matériau. Ce phénomène apporte au béton sa propriété d'auto-cicatrisation. L'ouverture d'une fissure peut en effet permettre à de l'eau de pénétrer et d'hydrater progressivement le ciment encore anhydre.

2 - Mesure de la résistance du matériau au scléromètre (NF-EN-12504-2)

Des essais non destructifs permettant d'estimer la résistance sont réalisés sur une éprouvette à l'aide d'un scléromètre². L'avantage des essais non destructifs est, comme leur nom l'indique, de pouvoir être utilisés dans les études préliminaires à la réhabilitation d'un bâtiment par exemple sans avoir besoin de carotter la structure. L'intérêt de l'utiliser dans ce TP est de pouvoir comparer les résultats de ce cet essai non destructif aux essais destructifs qui vont être conduits ultérieurement (voir ressource « *Cassage d'une poutre en béton armé* ») et montrer ainsi l'aspect qualitatif de cet essai et les précautions nécessaires à son utilisation

Le béton est un matériau poreux et non homogène. Il est donc nécessaire de réaliser plusieurs mesures sur un minimum une trentaine de tests, en différents points sur la surface latérale d'une des éprouvettes cylindriques. Les mesures sont réalisées sur la paroi latérale, éprouvette posée sur sa base.

² Du grec scléros (σκληρός) signifiant dur

2.1 - Description du dispositif

Le scléromètre projette une bille sur la surface à tester à l'aide d'une énergie test (2207 J) et relève la hauteur de rebond R de la bille ; la mesure se reporte sur le scléromètre dans sa partie graduée (figure 7). L'énergie cinétique de rebond initiale est donnée dans le scléromètre comme une mesure permettant d'estimer la rigidité du béton afin d'en déduire sa résistance.

À partir de cette mesure, il est ainsi possible d'estimer la résistance en compression $f_{ck,cube}$ du béton (résistance en compression d'une éprouvette cubique de 100 mm de côté) à partir d'abaques expérimentaux (figure 9).



Figure 7 : Essai de dureté à l'aide du scléromètre

Après plusieurs essais sur toute la surface latérale de l'éprouvette (figure 8), l'estimation de $f_{ck,cube}$ se base sur la valeur moyenne du rebond, R_{moy} . À partir de $f_{ck,cube}$, et en fonction de la position du scléromètre lors de la mesure (horizontale comme ici, verticale tête en haut ou en bas) on remonte à la valeur équivalente f_{ck} pour une éprouvette cylindrique de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm (figure 9).

2.2 - Résultats des essais

Les mesures du rebond R ont donné la densité de population suivante (figure 8) :

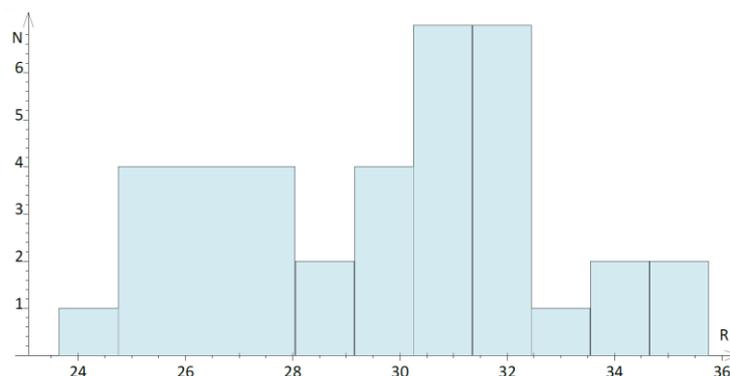


Figure 8 : Densité de population des mesures du rebond R réalisées au scléromètre

La valeur moyenne du rebond est calculée : $R_{moy} = 31$. Les mesures sont réalisées scléromètre horizontal, la courbe de l'abaque à considérer pour la lecture de $f_{ck,cube}$ (figure 9) est donc la courbe centrale : $f_{ck,cube} = 25$ MPa.

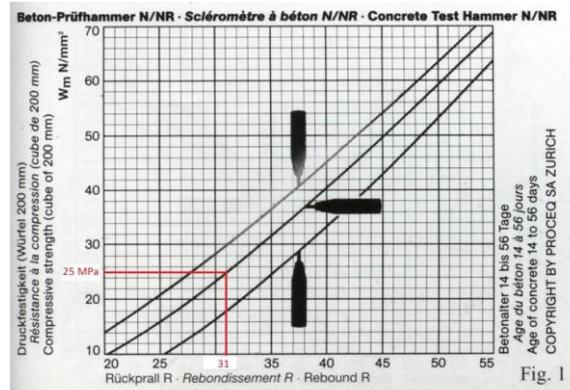


Figure 9 : Détermination de $f_{ck,cube}$ à partir du rebond moyen R_{moy}

La résistance en compression caractéristique d'une éprouvette cylindrique est déterminée d'après le tableau figure 10 : $f_{ck} = 20$ MPa.

	Classe de résistance du béton								
f_{ck} [Mpa]	12	13	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$ [Mpa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60
f_{cm} [Mpa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58
f_{ctm} [Mpa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1

Figure 10 : Résistances caractéristiques du béton.

La résistance moyenne f_{cm} peut être estimée par : $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa (2)

Soit $f_{cm, scléro} = 28$ MPa

3 - Essai de compression (NF-EN-12390-3 et NF-EN-12390-13)

Un essai de compression est réalisé sur trois des éprouvettes cylindriques afin de déterminer la résistance en compression moyenne f_{cm} du matériau, ainsi que son module d'élasticité longitudinal, ou module d'Young³ moyen E_{cm} .

3.1 - Description de l'essai

Cet essai consiste à appliquer une contrainte de compression sur les éprouvettes cylindriques posées verticalement (figure 11). Les éprouvettes sont au préalable surfacées (figure 2) afin que le contact avec les plateaux de la presse engendre le moins de frottements possible. L'objectif est d'appliquer une contrainte homogène dans toute la section durant l'essai. Le risque de voir apparaître des concentrations de contraintes, pouvant causer une rupture prématurée de l'éprouvette, est ainsi limité. Le surfacage permet ainsi d'assurer la reproductivité et la fiabilité de l'essai et surtout de diminuer l'effet de fretage. Cet effet est dû à la diminution de l'effet de Poisson due aux frottements entre les plateaux de la presse et l'éprouvette. Les parties en contact se retrouvent ainsi en tri-compression, or une éprouvette en béton résistera mieux à une sollicitation en tri-compression qu'en compression uniaxiale. L'objectif étant ici d'estimer la résistance à la compression uniaxiale, il faut logiquement essayer de diminuer au maximum ce biais.

³ Du nom de Thomas Young (1773-1829), physicien britannique

Les mesures au cours de l'essai de compression sont assurées par les trois capteurs de déformation de la cage extensométrique (figure 11) développée au sein du Département Génie Civil dans les années 70. L'éprouvette est installée dans la cage encore munie de d'entretoises assemblant provisoirement les deux anneaux de la cage. Les entretoises permettent de garantir la distance initiale entre les plans passant par les pointeaux. Le déplacement relatif entre ces plans est mesuré avec trois capteurs de déplacement permettant de calculer la déformation moyenne sur la hauteur de mesure. La cage et l'éprouvette sont centrées à l'aide de pointeaux.

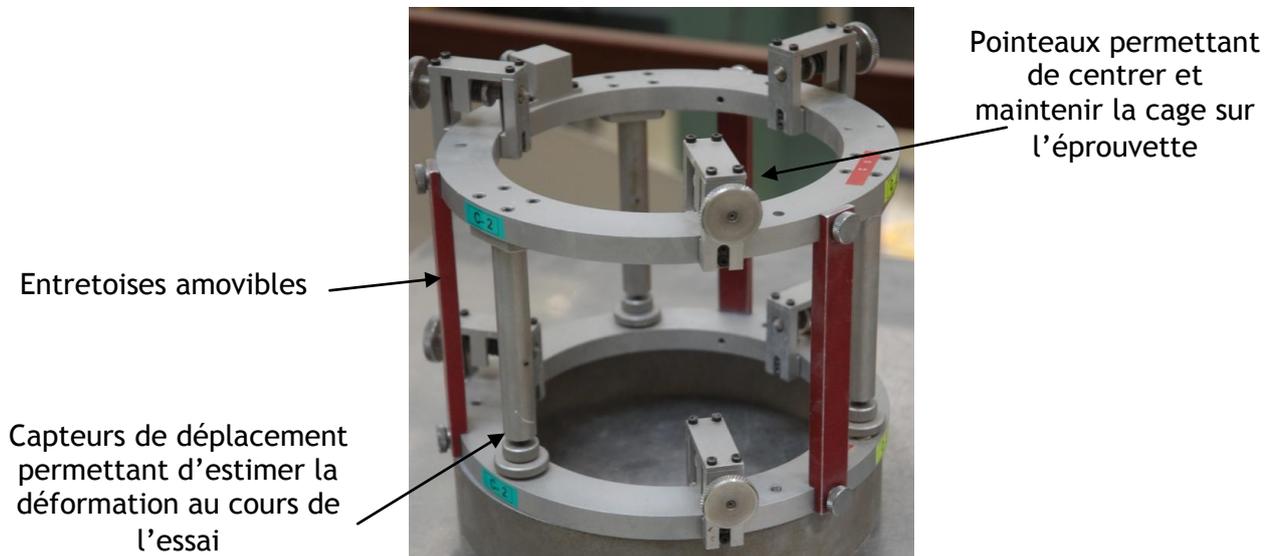


Figure 11 : Cage extensométrique

L'ensemble éprouvette et cage est alors installé sur le plateau de la machine de compression, parfaitement centré à l'aide d'un dispositif puis les capteurs sont câblés et enfin les entretoises sont ôtées (figure 12). L'essai peut alors commencer.



Figure 12 : (a) Installation éprouvette et cage sur la machine, (b) centrage et (c) démontage des entretoises

L'essai est piloté en effort et reste dans le domaine élastique du béton, l'éprouvette ne sera pas détruite. L'identification du module d'Young du matériau se base sur le domaine élastique, où l'évolution des contraintes est linéaire par rapport aux déformations et obéit à la loi de Hooke⁴ :

$$\sigma(\varepsilon) = E_c \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Afin de s'assurer d'être dans le domaine de validité de la loi de Hooke, le module E_c est calculé sur l'intervalle de contraintes limité par : $\sigma \in [0 ; 0,3 \cdot \sigma_{\max}]$.

À l'aide de capteurs de déplacement permettent de calculer la déformation longitudinale moyenne, l'évolution de l'effort appliqué par la presse sur le matériau en fonction de sa déformation longitudinale, est mesurée. Le diagramme contraintes/déformations $\sigma(\varepsilon) = f(\varepsilon)$ du béton peut ainsi être tracé.

Une fois le module élastique estimé, soit la cage est laissée afin de tracer le diagramme jusqu'à rupture (possible uniquement avec des bétons ordinaires) soit la cage est retirée afin de pouvoir mener l'essai jusqu'à rupture. C'est le cas notamment pour les bétons hautes performances qui vont exploser et risquerait d'endommager la cage extensométrique.

L'essai terminé, les entretoises sont remises en place et l'ensemble éprouvette et cage extrait de la machine (figure 13). Le retrait des pointeaux de la cage extensométrique permet de sortir l'éprouvette endommagée.

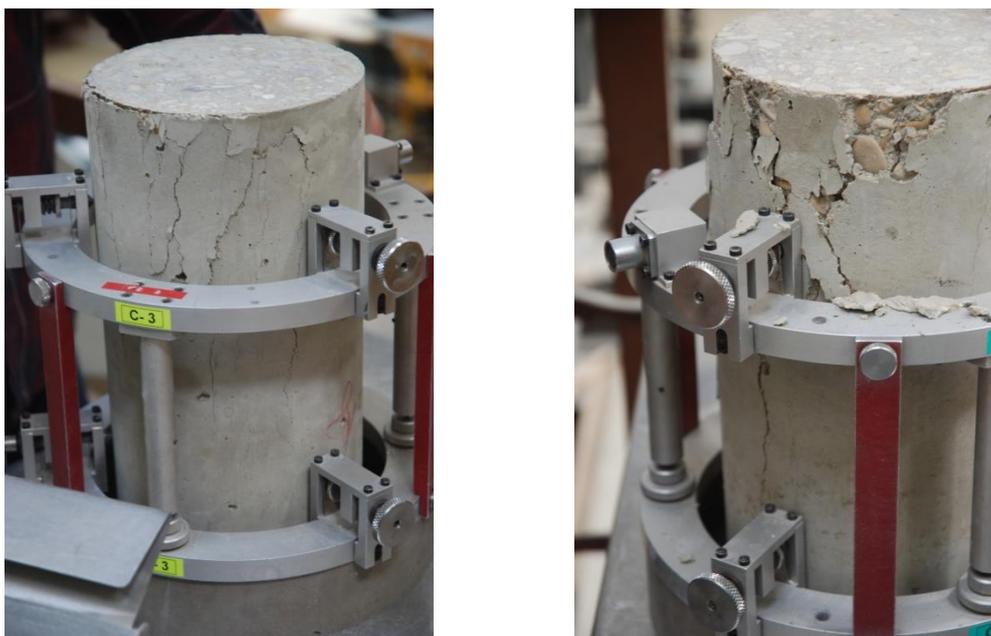


Figure 13 : Éprouvettes après essais encore équipées de la cage extensométrique

3.2 - Résultats de l'essai

Trois essais de compression sont réalisés sur trois éprouvettes cylindriques :

Éprouvette	1	2	3
E_c [GPa]	40	42	41
f_c [MPa]	29	34	31

On obtient alors : $E_{cm} = 41$ GPa et $f_{cm,comp} = 31$ MPa

⁴ Du nom de Robert Hooke (1635-1703), scientifique britannique

L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation dans le domaine élastique aux cours de ces essais est tracée figure 14.

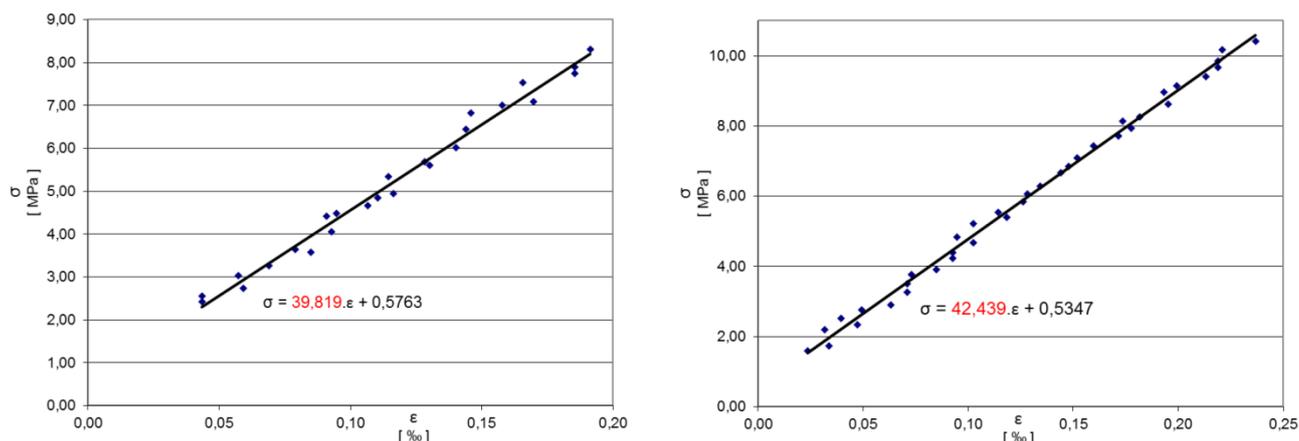


Figure 14 : Évolutions de la contrainte en fonction de la déformation dans le domaine élastique lors de deux essais.

3.3 - Allure du faciès de rupture

Durant la mise en charge de l'éprouvette, de nombreuses fissures apparaissent sur sa surface latérale (figure 15). Ces fissures sont dues aux contraintes de tractions développées par effet poisson. En effet, le béton possède une résistance en traction très inférieure à sa résistance en compression. Les déformations radiales, pourtant moins importantes que les déformations longitudinales, génèrent donc des contraintes de traction qui entraînent l'apparition des premières fissures. Il est important de noter que si le matériau était parfaitement homogène, et s'il n'y avait aucun frottement aux interfaces plateau/éprouvette, il y aurait théoriquement des déformations dues à l'effet Poisson mais aucune contrainte de traction ! Concrètement, localement les déformations dues à l'effet Poisson vont générer des contraintes de traction au niveau des interfaces granulats/pâte de ciment où les microfissures sont s'amorcer. Lors du chargement, ces fissures se propagent, amenant progressivement à la ruine la matière. La rupture de l'éprouvette en compression est donc indirectement due à des contraintes de traction.



Figure 15 : Fissures des surfaces latérales des éprouvettes après essais de compression

Au cours de l'essai les éprouvettes se déforment en « tonneau » s'élargissant à mi-hauteur, ce phénomène est dû à un effet de frottement. En effet, les déformations aux bases de l'éprouvette sont gênées en raison des frottements avec les plateaux de la presse. Les déformations radiales sont donc maximales à mi-hauteur de l'éprouvette cylindrique, où la ruine du matériau sera plus importante. S'il n'y avait aucune adhérence entre l'éprouvette et les plateaux de la presse, on observerait alors une rupture dans le sens longitudinal (figure 16). Si l'essai est mené suffisamment loin pour provoquer la ruine de l'éprouvette, on observe alors des cônes de fissuration et une rupture conique des deux morceaux de l'éprouvette (figures 16 et 17).

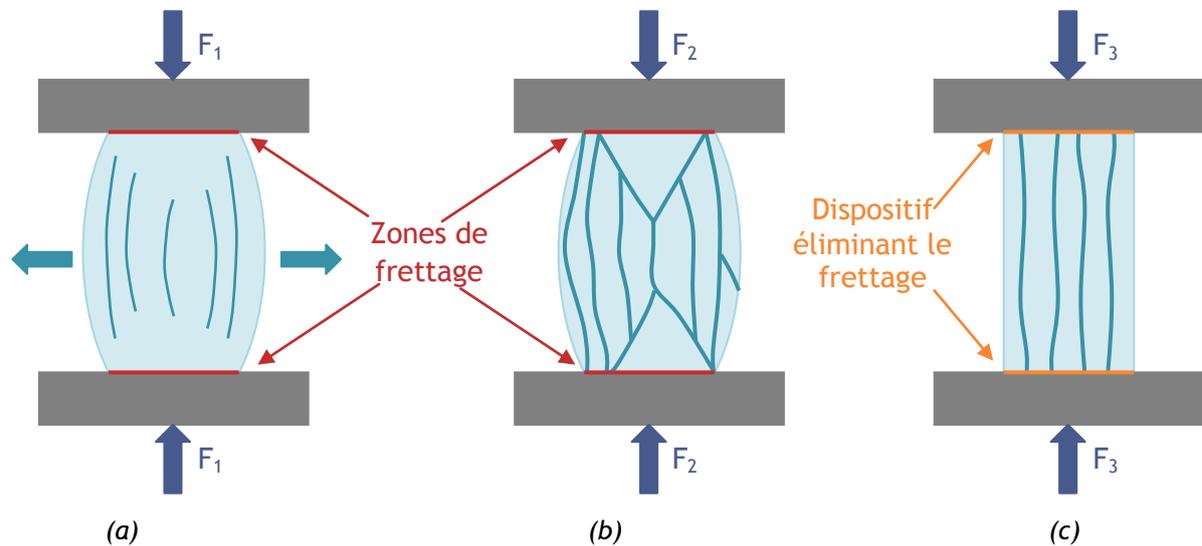


Figure 16 : Allure du faciès de rupture des éprouvettes cylindriques :
 (a) avec frottement apparition des premières fissures,
 (b) avec frottement apparition des cônes de fissuration,
 (c) avec un dispositif éliminant le frottement, fissurations verticales



Figure 17 : Cône de fissuration et rupture conique de l'éprouvette

À noter que ce faciès de rupture est également différent lorsque l'on ajoute des fibres à la pâte de ciment (fibres de verre, métalliques,...). En effet, les fibres vont reprendre les efforts de traction causés par la déformation radiale, et ralentir l'apparition de fissures. La rupture s'effectue alors dans le sens longitudinal de l'éprouvette.

On comprend alors ici pourquoi un béton paraît avoir une résistance supérieure lorsque l'essai est effectué sur une éprouvette cubique (essai standard dans les pays anglo-saxons) par rapport à un

essai effectué sur une éprouvette cylindrique ayant un élancement de deux (rapport géométrique entre la hauteur et le diamètre).

4 – Comparaison des résultats

4.1 - Comparaison des mesures issues des essais de fendage et de compression

Selon l'Eurocode 2, la résistance en traction d'un béton peut être estimée à partir de sa résistance en compression à partir de la relation suivante :

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

Les essais en compression ayant donné une valeur $f_{cm, comp} = 31$ MPa, alors $f_{ck} = 23$ MPa (équation 2), soit une valeur de la résistance à la traction : $f_{ctm, comp} = 2,4$ MPa.

La valeur moyenne de résistance à la traction issue des essais de fendage est $f_{ctm, fend} = 3,2$ MPa, donc avec des résultats, on trouve $f_{ctm, comp} < f_{ctm, fend}$, ce qui correspond à un écart relatif d'environ 33 %.

Dans le cas de la résistance à la traction f_{ctm} une différence assez importante est observée entre la valeur obtenue à l'aide de l'essai de fendage, et celle déduite de l'essai en compression et de la relation (4). Malgré cela, les deux valeurs de résistance à la traction sont du même ordre de grandeur ; les résultats de l'essai de fendage semblent donc cohérents, bien que la traction soit appliquée de manière indirecte.

En général, la valeur de la résistance à la traction d'un béton est estimée proche de 10 % de sa résistance en compression. Ce ratio ici calculé vaut 10,30% ($\frac{f_{ctm}}{f_{cm}} = \frac{3,2}{31} = 0,103$).

Les expérimentations prouvent la validité de cette estimation dans le cas d'un béton ordinaire.

4.2 - Comparaison des mesures issues des essais au scléromètre et de compression

La valeur de la résistance en compression du béton issue des essais au scléromètre est $f_{cm, scléro} = 28$ MPa ; les essais en compression directe ayant donné une valeur $f_{cm, comp} = 31$ MPa contre 28 MPa. Les deux essais donnent donc des valeurs similaires, l'écart relatif observé étant inférieur à 10 %.

Le scléromètre représente une bonne alternative à l'essai en compression, dans le cas où l'on cherche à déterminer rapidement les caractéristiques d'un matériau in situ. Le scléromètre, essai non destructif, peut être très utile dans les cas de rénovation, où les caractéristiques des matériaux existants sont bien souvent méconnues, et où la réalisation de carottages est délicate, car pouvant entraîner des instabilités structurelles. L'essai en compression reste cependant indispensable si l'on cherche à caractériser précisément la résistance à la rupture d'un matériau, ainsi que son module d'élasticité.

5 - Essai de traction sur barre d'acier haute adhérence

Trois essais de traction uniaxiale sur des barres d'acier haute adhérence dits *HA* de diamètre nominal 8 mm sont réalisés. Ces essais permettent de déterminer le module d'Young E_s et la limite d'élasticité f_y de l'acier utilisé pour réaliser la cage d'armature de la poutre en béton armé réalisée (voir ressource « *Fabrication d'une poutre en béton armé* »).

5.1 - Description du dispositif

Pour mettre en œuvre ces essais, les barres HA 8 sont placées entre les mors d'une machine de traction (figure 18) qui va les solliciter jusqu'à leurs ruptures. Durant ces essais, un extensomètre est placé sur la barre d'acier, les déformations sont relevées ainsi que l'effort appliqué sur la barre d'acier.

La contrainte conventionnelle dans la barre d'acier est calculée en divisant l'effort appliqué par la section de la barre supposée constante (hypothèse que la variation de la section liée à l'effet Poisson est négligeable) : $\sigma = \frac{F}{S}$

Les courbes contrainte/déformation $\sigma = f(\varepsilon)$ donnent la valeur du module d'Young E_s , pente de la courbe pendant la phase élastique du matériau, ainsi que la valeur de la limite élastique f_{ym} , correspondant à la contrainte maximale exercée lors de la phase élastique.



Figure 18 : Une des barres équipée de l'extensomètre lors de l'essai de traction

5.2 - Résultats de l'essai

Quatre phases se distinguent sur les courbes contrainte/déformation (figure 19) :

- la phase élastique qui permet de déterminer les caractéristiques élastiques de l'acier ;
- la phase plastique sans écrouissage pendant laquelle la courbe forme un palier ;
- la phase plastique avec écrouissage ;
- la rupture caractérisée par la diminution brutale de la contrainte conventionnelle.

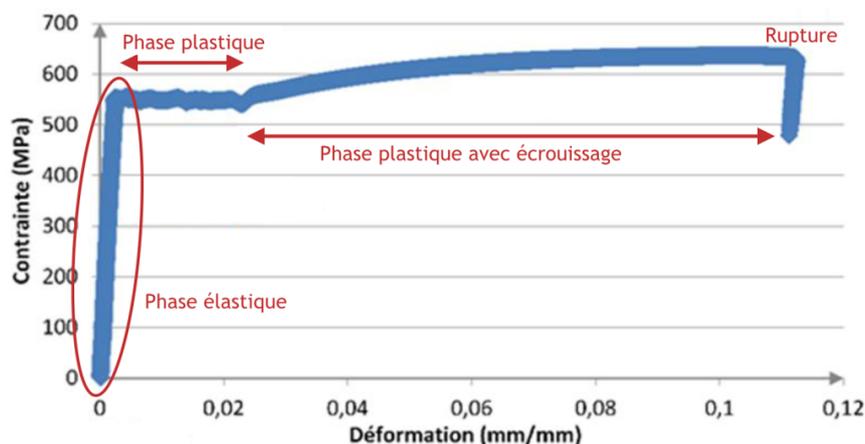


Figure 19 : Évolution de la contrainte dans l'acier en fonction de la déformation

La phase plastique avec écoulement est importante chez les aciers constituant les armatures du béton armé. Au cours de cet essai, les barres s'allongent de plus de 10 %, puis la striction survient et les barres rompent très rapidement (figure 20).



Figure 20 : Barres après rupture lors de l'essai de traction

Module d'Young : En effectuant une régression linéaire sur la courbe de contrainte/déformation en phase élastique, la pente de la courbe linéaire est obtenue, correspondant au module d'Young de l'acier.

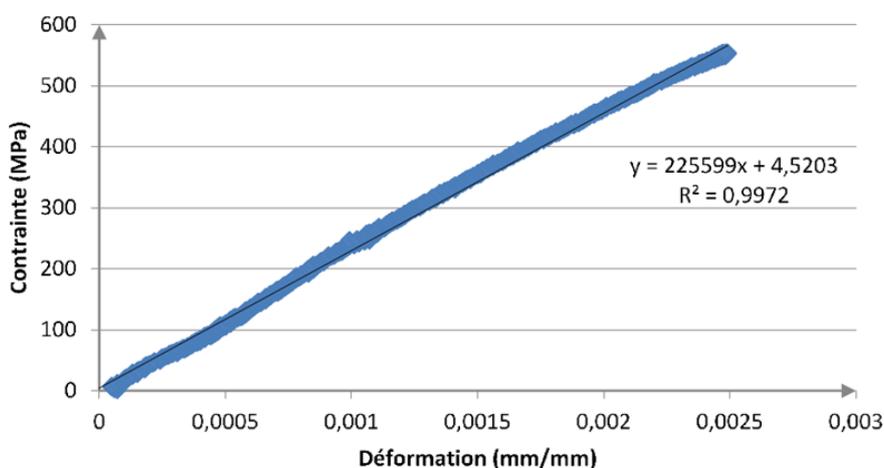


Figure 21 : Évolution de la contrainte en fonction de la déformation en phase élastique

Les essais ont été faits sur trois éprouvettes :

Eprouvette	1	2	3
E_s [GPa]	237	226	248

Figure 22 : Détermination du module d'Young lors des trois essais de traction

On obtient alors $E_{s,moy} = 237$ GPa

Limite élastique : La limite d'élasticité f_y correspond à la contrainte maximale atteinte pendant la phase élastique ; la limite d'élasticité moyenne $f_{y,moy}$ des trois éprouvettes d'acier a été déterminée.

Eprouvette	1	2	3
f_y [MPa]	556	562	565

Figure 23 : Limite d'élasticité lors des trois essais de traction

On obtient alors $f_{y,moy} = 561$ MPa

5.3 - Observation

Les aciers utilisés pour la fabrication de la poutre sont des aciers de haute adhérence B500. Dans l'Eurocode 2 (NF-EN-1992-1-1), il est préconisé d'utiliser un module d'élasticité 210 GPa et une limite élastique de 500 MPa pour ce type d'acier.

Le module d'Young obtenu lors des essais de traction uniaxiale est ainsi légèrement supérieure à la valeur constructeur de 13 %, le matériau est donc un peu plus rigide que prévu. La limite d'élasticité des éprouvettes est bien comprise dans l'intervalle prévu par les normes : elle est supérieure à la valeur caractéristique des aciers d'armature utilisés habituellement en France dans les constructions en béton armé (500 MPa).

6 – Conclusion

Le béton est un matériau peu coûteux et pouvant être mis en place pour coulage à froid directement in situ. Ces avantages économiques et pratiques ne peuvent occulter ses inconvénients pour l'expérimentateur et le concepteur : il est difficile à caractériser, et présente une résistance en traction relativement faible (comparé au matériau bois et surtout acier). De plus, ses propriétés sont très variables, et dépendent de nombreux paramètres (type de granulats, conditions de fabrication, temps de vibration, dosages, ...). A contrario, l'acier est plus facile à caractériser, et présente une meilleure résistance mais il est plus onéreux et ne permet pas de réaliser des structures soulées en place à 'échelle d'un ouvrage de génie-civil.

Selon les années plusieurs formulations de béton ont été imposées pour les dosages des quatre constituants (sable, granulats, ciment et eau) avec adjuvant ou non. Le comportement des bétons a été observé et comparé selon leurs dosages.

Dosage	E [L.m ⁻³]	C [kg.m ⁻³]	G [kg.m ⁻³]	S [kg.m ⁻³]	Adjuvant [kg.m ⁻³]	ρ_{total} [kg.m ⁻³]
Formulation 1	240	400	965	797	-	2402
Formulation 2	210	350	965	797	-	2322
Formulation 3	158	350	965	797	3,5	2273
Formulation 4	180	400	965	797	4,0	2346
Formulation 5	240	400	965	797	-	2402
Formulation 6	210	350	965	797	-	2322

Figure 24 : Les différentes formulations de béton comparées

La résistance en compression des différentes formulations de béton est comparée figure 25. On remarque que la résistance augmente avec l'augmentation du rapport pondéral C/E. L'adjuvant a un rôle prépondérant.

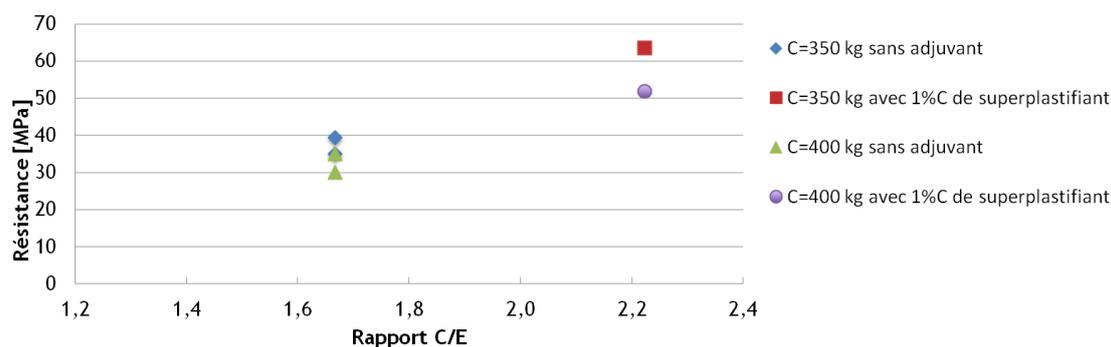


Figure 25 : Variation de la résistance en compression en fonction du rapport C/E

Le béton est un matériau dont la reproductibilité peut difficilement être assurée avec certitude.