

### 3.1 Essais statiques

Les essais statiques concernant le béton sont normalisés Cette partie destinée à présenter en partie ces différentes normes. Dans le cadre des essais normalisés pour le béton durci, il existe trois formes d'éprouvettes (NF EN 12390-1, 2001). La figure (3.1) décrit la forme canonique de ces dernières. Ici  $d$  représente la dimension de base de chacune de ses éprouvettes et doit être au moins trois fois et demie supérieure à la dimension maximale des granulats du béton,

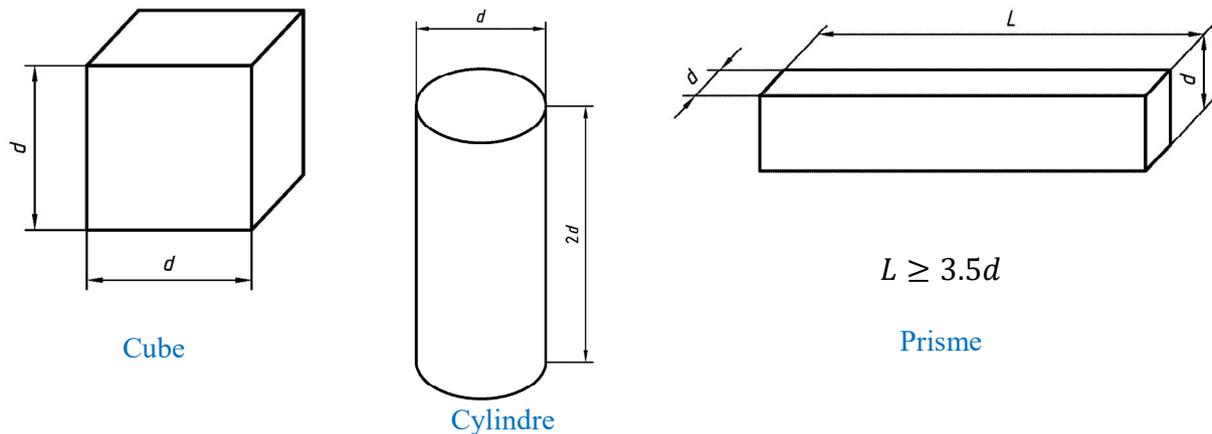


Fig3.1 Schéma des différentes éprouvettes selon la norme : NF EN 12390-1, 2001

#### 3.1.1 Essai de compression simple (NF EN 12390-3)

Cet essai caractérise la résistance mécanique en rupture en compression de l'éprouvette. La forme de l'éprouvette doit être un cube, un cylindre ou une carotte conforme aux EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 et EN 12504-1. En général, il est souvent de réaliser des tests sur des éprouvettes conformes à la norme, ayant un diamètre de 160 mm et une hauteur de 320 mm. Ces éprouvettes sont ensuite conservées à une humidité et une température constantes pendant les 28 premiers jours. Une force de compression est appliquée sur la section transversale jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe, et c'est l'effort maximal atteint qui permet de déterminer la contrainte à laquelle la rupture se produit.

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S} \quad (01)$$

$\sigma_r$ : est la résistance en compression, exprimée en MPa (N/mm<sup>2</sup>);

$F_r$ : est la charge maximale de rupture, exprimée en Newtons ;

$S$ : est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette, exprimée en mm<sup>2</sup>.

### 3.1.1.1 Mode opératoire

- **Préparation et positionnement des éprouvettes**

- Avant de placer l'éprouvette dans la machine d'essai, il est essentiel de retirer toute humidité excessive de sa surface en l'essuyant.

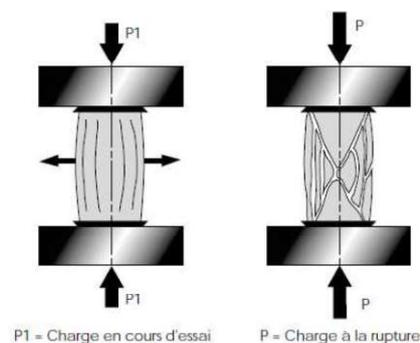
- Il est nécessaire de rectifier ou surfacer les éprouvettes, ce qui signifie que les surfaces en contact avec les instruments de chargement doivent être lissées pour garantir un parallélisme optimal de l'éprouvette. Pour des éprouvettes de 160 mm de diamètre et 320 mm de hauteur, la différence ne doit pas dépasser 1 mm sur une seule face, ce qui équivaut à un défaut angulaire inférieur à  $0,08^\circ$  [VU, 2007].

Il convient que le matériau de surfacage soit constitué de mortier, composé de trois parts en masse de ciment alumineux et d'une part en masse de sable fin (passant pour l'essentiel au travers d'un tamis métallique de  $300\ \mu\text{m}$ ). Les mortiers de surfacage à base de soufre sont composés d'un mélange à parts égales en masse de soufre et de sable fin siliceux (passant pour l'essentiel au travers d'un tamis métallique de  $250\ \mu\text{m}$  et retenu dans un tamis métallique de  $125\ \mu\text{m}$  conforme à l'ISO 3310-1). Une faible proportion, jusqu'à 2 %, de noir de carbone peut être ajoutée. Les éprouvettes surfacées au soufre doivent rester se refroidir au moins 30 mn avant l'essai d'écrasement.

- les éprouvettes sont placées de manière à ce que la charge soit appliquée perpendiculairement à la direction de coulée.

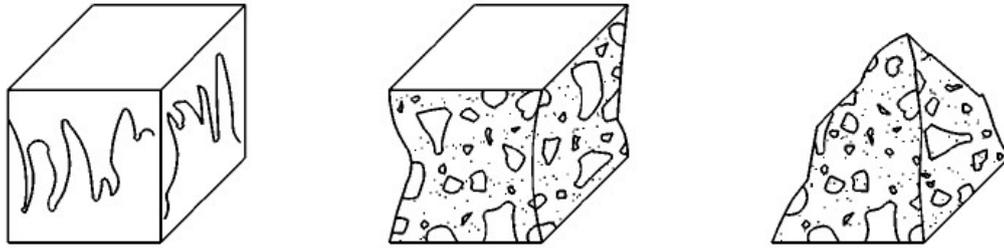
- Une vitesse constante de chargement est située dans la plage  $0,2\ \text{MPa/s}$  à  $1,0\ \text{MPa/s}$ . La charge est appliquée sans choc et l'accroître de façon continue à la vitesse constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Lors de l'essai en compression les fissures apparaissent dans l'axe du chargement, puis la rupture doit être similaire à ce qui est visible sur les figures suivantes:

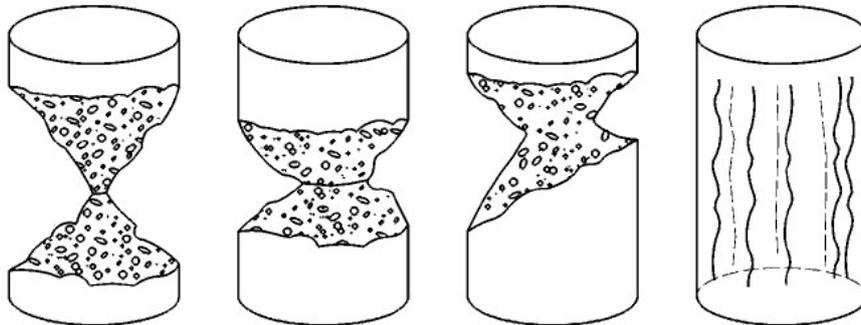


**Figure 3.2** Schémas d'un essai de compression (BEINISH, 2000)

[BEINISH, 2000] BEINISH, H. (2000). Éprouvettes en béton : leurs essais. CERIB.



**Figure 3.3** Modes de rupture correcte pour éprouvette cubique (NF EN 12390-3)



**Figure 3.4** Mode de rupture correcte d'éprouvettes cylindriques ((NF EN 12390-3)

### 3.1.2 Essai de traction simple

Il existe trois types de mesure de la résistance à la rupture par traction

#### 3.1.2.1 Essai de traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques aux précédents mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage des têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite (voir figure. 3.5 c). Pour cette raison, on procède aux essais suivants.

#### 3.1.2.2 Essai de traction par flexion (NF EN 12390-5)

L'essai de traction par flexion consiste à réaliser une flexion à trois ou quatre points afin de générer au sein de l'éprouvette des efforts de traction (voir figure .3.5 a). Les éprouvettes d'essai doivent être des éprouvettes prismatiques de section  $d_1, d_2$  et de portée  $l$ , conformes à l'EN 12390-1. Les l'éprouvettes placées au sein de l'appareil de telle manière que les faces les plus planes soient en contact avec les rouleaux. La vitesse de chargement doit être constante et comprise entre :  $\sigma = 0,04 \text{ MPa/s}$  et  $\sigma = 0,06 \text{ MPa/s}$ .

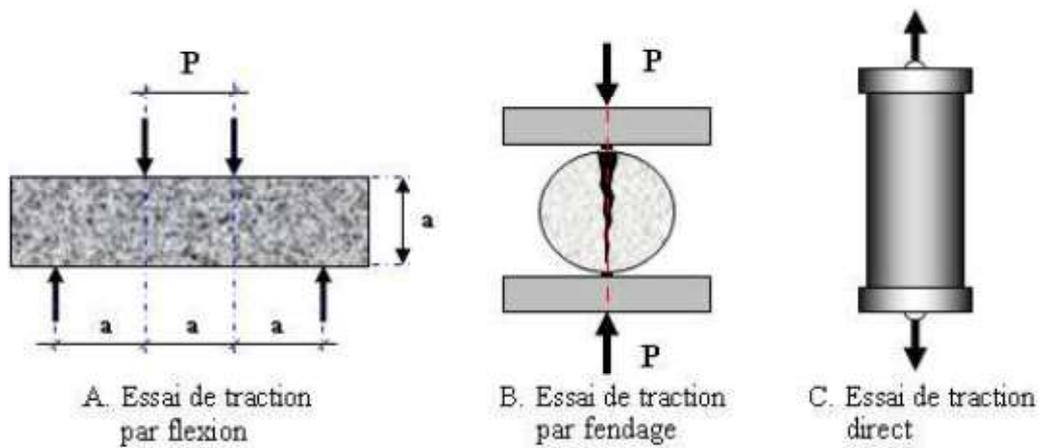


Figure 3.5 Dispositifs pour établir un essai de traction [CHAMBERT, 2009]

La résistance en traction s’obtient à l’aide de la formule suivante dans le cadre d’une flexion en 4 points :

$$\sigma_{flex} = \frac{Fl}{d_1 d_2^2} \quad (3.2)$$

Dans le cas d’une flexion trois points elle est définie par :

$$\sigma_{flex} = \frac{3}{2} \frac{Fl}{d_1 d_2^2} \quad (3.3)$$

Où:  $F$  en (N) ,  $d_1$  et  $d_2$  en (mm) et  $\sigma_{flex}$  en MPa

La figure 3.6 montre les deux géométries possibles pour l’essai de flexion, ainsi que les cotes à respecter.

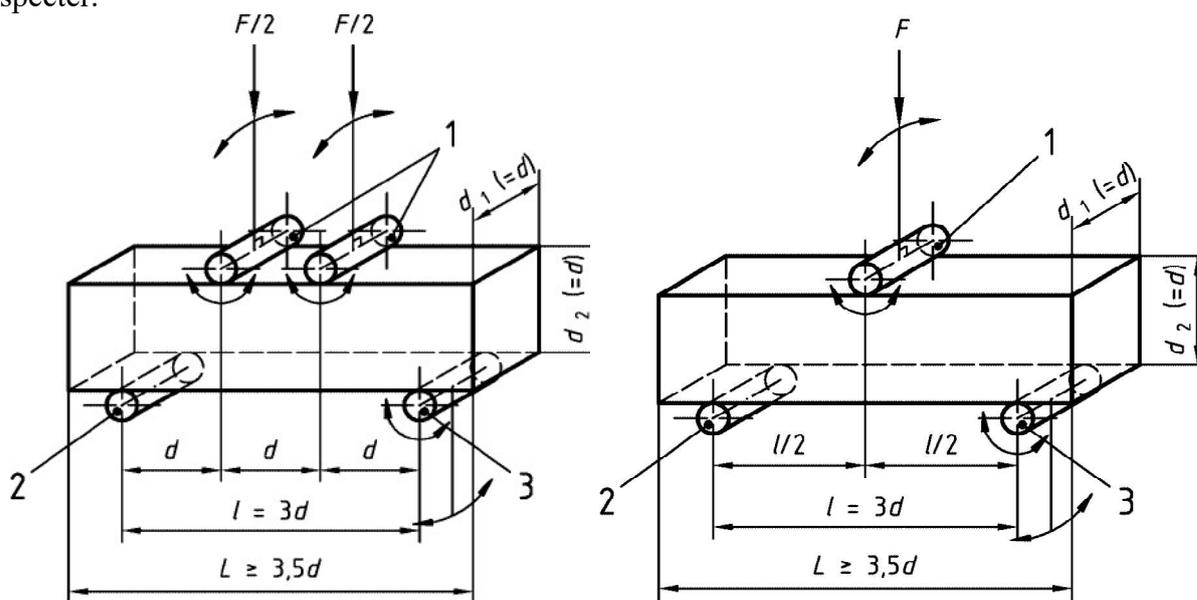
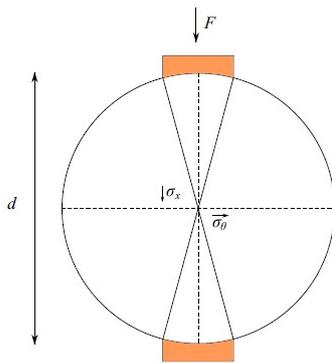


Figure 3.6 Géométries d’un essai de flexion normalisé ((NF EN 12390-5)

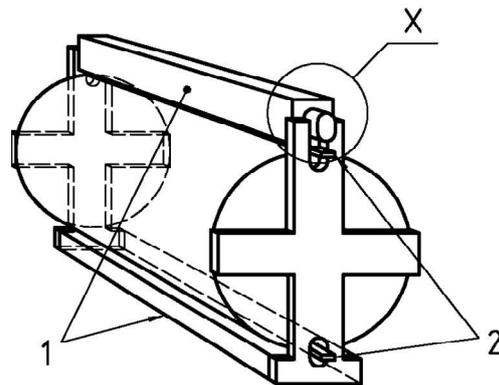
### 3.1.2.2 Essai de traction par fendage (NF EN 12390-6) (essai brésilien)

L'essai brésilien est utilisé sur les matériaux fragiles pour caractériser la limite de rupture en traction. Il consiste à comprimer un disque en deux points opposés (Voir figure 3.7, cet effort induit un effort en traction perpendiculairement au chargement. Le matériau étant fragile, la rupture se fait en traction. Pour cela on utilise des éprouvettes cylindriques telles que décrites précédemment, il est à noter que l'élançement (rapport entre la hauteur et le diamètre) peut descendre jusqu'à une valeur de un. Afin d'avoir un contact de bonne qualité entre l'éprouvette et les plateaux, il est recommandé d'utiliser un dispositif de guidage (tel que sur la figure 3.8 où l'on vient disposer des bandelettes. La vitesse de chargement de ce test est normalisée à :

$$\sigma = [0.04 \text{ à } 0.06 \text{ MPa}] \quad (3.4)$$



**Figure 3.8** Géométrie d'un disque dans le cadre d'un essai brésilien (LI and WONG, 2013)



**Figure 3.8** Dispositif nécessaire à la réalisation d'un essai de fendage (NF EN 12390-6)

La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_{rf} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (3.5)$$

où :

$\sigma_{rf}$  : est la résistance en traction par fendage, en Mégapascals ou en newtons par millimètre carré ;

$F$  : est la charge maximale, en newtons ;

$L$  : est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette, en millimètres ;

$d$  : est le diamètre nominal de l'éprouvette, en millimètres.

### 3.2 Essais dynamiques

Contrairement aux essais statiques il n'existe aucune norme sur les essais dynamiques, ce manque s'explique par la difficulté à mettre en place des essais dynamiques (mesure du chargement, mesure des déformations, grande plage de vitesses, etc .. ). Nous trouvons alors dans la littérature une multitude d'essais différents et il n'est pas évident de confronter les résultats obtenus par différents procédés. Nous évoquerons divers dispositifs d'essais utilisés dans le cadre d'essai dynamique.

#### 3.2.1 Différents types d'essais dynamiques

##### 3.2.1.1 Les barres de Hopkinson

Le dispositif des barres d'Hopkinson, connu sous le nom de "Split Hopkinson Pressure Bars" (SHPB) en anglais, est largement utilisé pour effectuer des essais dynamiques. Il a été inventé par B. Hopkinson en 1914 et amélioré par H. Kolsky en 1949. L'utilisation de ce dispositif pour l'étude du béton a été validée par Zhao et Gary en 1996.

Ce dispositif fonctionne en transmettant une onde mécanique à travers une série de barres. L'onde est générée par l'impact d'une barre dite "impacteur" sur une barre dite "entrante". Cette onde de choc est ensuite transmise à l'éprouvette.

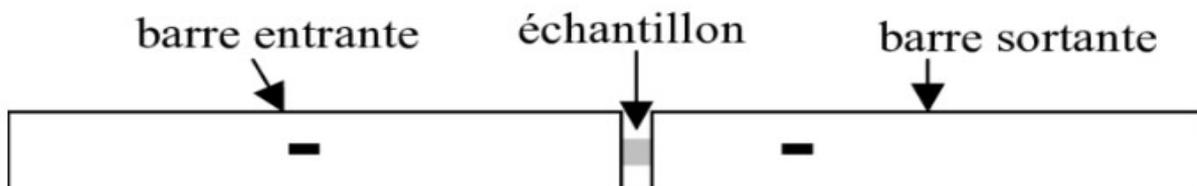


Figure 3.9 Schémas simplifié des barres de Hopkinson

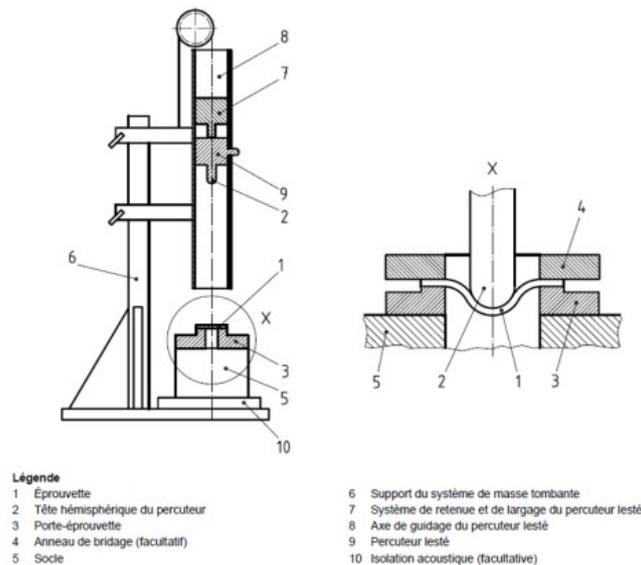
##### 3.2.1.2 Machine d'essai rapide

Les machines d'essais standards ne permettent pas d'atteindre des vitesses de déformations élevées. Par exemple la machine à disposition au laboratoire a une plage de vitesse de traverse allant de 10<sup>-3</sup> mm/min à 500 mm/min.

Les machines de traction rapide permettent d'atteindre des vitesses de traverse de l'ordre du mètre par seconde. C'est le cas de la machine hydraulique ZWICK présentée par Benjamin Erzar [ERZAR, 2010], les vitesses de déformation atteintes avec celle-ci sont comprises entre 5.10<sup>-2</sup> et 5.10<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>. L'instrumentation se fait de manière similaire au cas statique à l'aide d'une cellule de force. Néanmoins à partir d'une vitesse de traverse de 5 m/s le dispositif peut entrer en vibration ce qui rend les mesures compliquées.

##### 3.2.3 La tour de chute

est un appareil qui permet de guider la chute d'un projectile sur un corps d'épreuve. L'instrumentation ce fait à l'aide d'accéléromètres et des capteurs d'effort, disposés sur le projectile en chute. C'est de cette manière que peuvent être déterminées la vitesse et de la force d'impact. De la même manière le corps d'épreuve peut être instrumenté [CHAMBART, 2009].



**Figure 3.9** Exemple de tour de chute selon la norme NF EN ISO 6603

### 3.2.2 Essai de compression simple

Pour les essais de compression simple en dynamique, les barres de Hopkinson sont souvent utilisées. Ce montage de compression est simple à utiliser et permet d'obtenir les mesures souhaitées. En effet, nous connaissons la force et la vitesse à l'entrée et à la sortie de notre échantillon.

En notant  $l$  la longueur de l'échantillon,  $V_e$  la vitesse mesurée à l'interface d'entrée et  $V_s$  la vitesse mesurée à l'interface de sortie, nous pouvons déduire la vitesse de déformation.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_e - V_s}{l} \quad (3.6)$$

De la même manière par intégration des signaux de vitesses, nous pouvons en déduire la déformation au cours du temps :

$$\varepsilon = \frac{U_e - U_s}{l} \quad (3.7)$$

De plus nous pouvons facilement utiliser les éprouvettes décrites dans les normes statiques.

### 3.2.3 Essai de traction directe

Les essais de traction dynamique directe sont peu courants en raison des raisons suivantes : d'une part, comme pour les essais quasi-statiques, l'essai de traction directe nécessite une grande précision dans le collage des surfaces ; d'autre part, il requiert une installation puissante capable de générer une traction dynamique.

### 3.2.4 Essai de traction fendage

Plusieurs méthodes sont disponibles pour réaliser des essais de traction dynamique par fendage. L'une d'entre elles consiste à utiliser un dispositif appelé tour de chute. Dans sa thèse, Marion Chambart décrit les essais qu'elle a réalisés en utilisant la tour de chute [CHAMBART, 2009]. Ce dispositif guide la chute d'un projectile en aluminium le long d'une tour, maintenant ainsi le projectile en position. L'énergie cinétique du projectile est uniquement due à son propre poids. Deux paramètres varient dans cette série d'essais : la longueur des éprouvettes, qui sont découpées à partir d'éprouvettes standards de dimensions 320\*160 mm, et la hauteur de chute. Les quatre configurations d'essai sont répertoriées dans le tableau (3.1).


Une autre méthode pour réaliser des essais brésiliens consiste à utiliser les barres de Hopkinson selon un dispositif similaire à l'essai de compression dynamique, mais cette fois-ci en plaçant l'éprouvette dans le sens de la largeur. Dans leur étude, Zhang et Zhao soulignent un problème lié à l'utilisation du dispositif des barres de Hopkinson [ZHANG and ZHAO, 2014]. Ce problème concerne la taille de l'échantillon. En effet, lors des essais statiques, un rapport de forme (élancement) compris entre 1 et 2 est recommandé. Cependant, dans ce cas, d'une part, la section des barres limite l'élancement afin d'obtenir une répartition uniforme de la charge sur toute la hauteur, et d'autre part, l'équilibre recherché dans l'échantillon limite son diamètre. Par exemple, pour le mortier et le béton, avec un échantillon de 8 cm de diamètre, le temps de parcours des ondes est d'environ 20  $\mu$ s. Cependant, à des vitesses de déformation élevées ( $\dot{\epsilon} \approx 100s^{-1}$ ), la durée de l'essai sera plus courte que ce temps de traversée.

### 3.2.5 Essai de traction par flexion

Lors de l'essai de traction par flexion à trois points en dynamique, le dispositif des barres de Hopkinson est utilisé. Dans ce cas, la barre de sortie est remplacée par deux barres pour réaliser un essai de flexion dynamique [DELVARE et al., 2010]. Delvare et ses collègues ont observé que la fracturation se produit avant que l'information n'atteigne les appuis et les extrémités de l'échantillon. Cela leur permet de considérer le comportement de la poutre

comme s'il s'agissait d'une poutre de longueur infinie. Ainsi, ils peuvent déterminer la contrainte de traction maximale en fonction de la vitesse d'entrée.

$$\sigma_t = eE \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho S}{EI}} V_e(t) \quad (3.9)$$

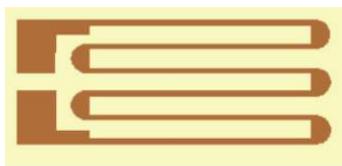
### 3.3 Mesure de déformations

#### 3.3.1 Mesure des constantes élastiques dans les expériences statiques

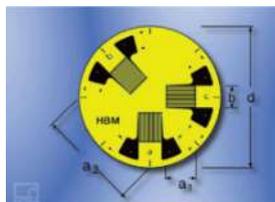
##### 3.3.1.1 Mesure de déformation par jauges

Les jauges sont formées en pliant un fil en accordéon et sont généralement fabriquées à partir d'une fine feuille métallique (quelques micromètres d'épaisseur) et d'un isolant, traité comme un circuit imprimé (par lithographie ou attaque à l'acide). La jauge de déformation (parfois appelée incorrectement jauge de contrainte) fonctionne en mesurant l'allongement ou le raccourcissement d'un fil résistif solidaire du support qui se déforme. Lorsque le champ de déformation est relativement uniforme et uniaxial, la jauge est placée dans l'orientation principale de ce champ. Lorsque le champ de déformation est surfacique (sans orientation préférentielle), il est nécessaire de placer au moins trois jauges (rosettes) pour mesurer les principales composantes de déformation et leur orientation. En appliquant une force de traction ou de compression sur le fil, celui-ci s'allonge ou se contracte, ce qui modifie sa résistance électrique. La variation de résistance est mesurée entre l'état initial et l'état sous contrainte. Le fil est disposé en spirales de manière à ce que la déformation agisse simultanément sur plusieurs tronçons du fil, amplifiant ainsi la variation de résistance électrique. La résistance d'un conducteur de section  $S$  et de longueur  $l$  est donnée par :

Une variation de longueur provoque une variation de résistance selon la formule essentielle de l'extensométrie :



Jauge



Rosette



Pont de Wheatstone



Jauge pour béton

Les jauges sont souvent fixées par collage et parfois soudées (sur du métal).

Il est essentiel de connaître le module d'élasticité du matériau en cas de déformation uniaxiale, ainsi que le coefficient de Poisson en cas de déformation surfacique. Cette détermination est relativement simple pour les métaux car le module est bien défini (entre 200 000 et 210 000 MPa). En revanche, cela devient beaucoup plus difficile pour le béton car le module varie entre 25 000 (pour du béton de qualité inférieure) et 50 000 MPa (pour du béton de haute

performance). Il est possible de répartir les jauges le long de la hauteur d'une section pour évaluer sa courbure (méthode de Navier).

Il existe une jauge spéciale appelée "Pain de sucre" utilisée pour détecter les inclusions dans le béton. Des ensembles de jauges, appelés chaînettes de jauges, sont utilisés pour mesurer les déformations dans des zones où les contraintes sont concentrées.

Le même principe des jauges peut être adapté pour détecter l'apparition et suivre la propagation d'une fissure. Cette adaptation consiste à utiliser des fils qui se rompent progressivement lors de la propagation de la fissure.

### 3.3.1.2 Mesure de déformation par Extensomètre

Les Extensomètre sont utilisés pour déterminer les caractéristiques de déformation et de déformation des échantillons de béton.. Il est principalement utilisé pour mesurer le module élastique de compression du béton sous la forme d'un cube ou d'un cylindre.



**Figure 3.10** Cage extensométrique



**Figure 3.11**  
Extensomètre universel électronique

### 3.3.2 Méthodes dynamiques de détermination des constantes élastiques

Les méthodes dynamiques de mesure des constantes élastiques des matériaux sont les plus couramment utilisées pour divers types de matériaux. Elles ont été introduites pour la première fois dans les années 1930. Ces techniques présentent l'avantage que les contraintes utilisées pour mesurer les modules sont bien inférieures à celles atteignant la limite d'élasticité. Par conséquent, elles n'entraînent pas les effets complexes de fluage. Étant donné que les contraintes sont infimes, les éprouvettes ne subissent pas de modifications sous l'effet de ces contraintes, ce qui permet de réaliser des mesures répétées sur le même échantillon. Ainsi, un seul spécimen peut être utilisé pour obtenir les modules élastiques en fonction de la

température ou de la pression. Les spécimens sont de petite taille et simples par rapport à ceux utilisés pour déterminer les constantes d'élasticité lors de tests statiques.

### 3.3.2.1 Technique d'impulsion ultrasonique

Deux types d'essais dynamiques sont couramment effectués pour mesurer les constantes élastiques. Dans un une impulsion ultrasonique est envoyé à travers le spécimen et son temps de vol mesuré. La constante élastique déterminée par cette technique dépend du type d'impulsion utilisé pour la mesure. Si une impulsion longitudinale est utilisée, alors le module de Young est défini par la masse volumique de l'éprouvette  $\rho$  et la vitesse longitudinale de l'impulsion  $V_l$ .

$$E = \rho V_l^2 \quad (3.11)$$

### 3.3.2.2 Techniques de vibration libre

Le deuxième type de test dynamique utilise des vibrations libres tiges pour déterminer les constantes élastiques. Les tiges peut avoir une section rectiligne ou circulaire. Les éprouvettes sont excitées mécaniquement, soit par une impulsion, soit en continu à travers les supports de tiges. Ensuite, la fréquence de résonance de la tige est mesurée et la densité  $\rho$  ou masse  $m$  et les dimensions de l'échantillon sont utilisées pour déterminer les constantes élastiques. Les barres peuvent être excitées de manière à favoriser la mesure de module de cisaillement ou module de Young ; les équations ont été développées pour calculer ces deux quantités. Les dérivations de ces équations sont complexes, en particulier l'équation des vibrations de flexion permanentes.

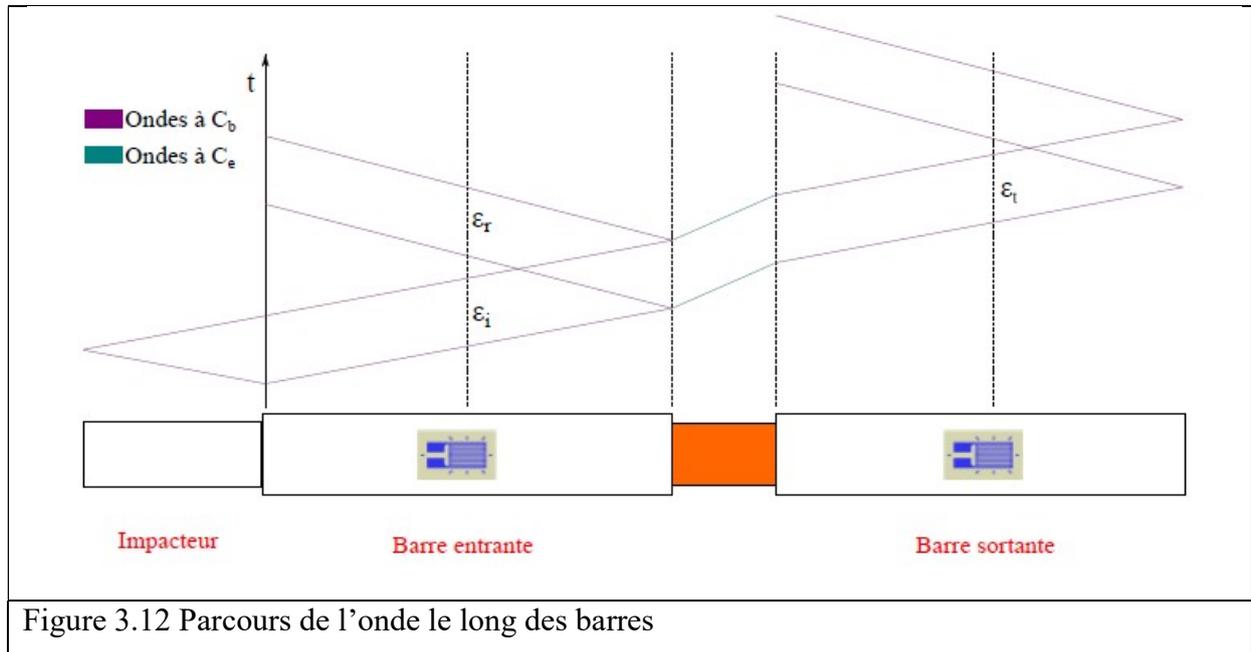
### 3.3.2.2 Les barres de Hopkinson

Ce dispositif consiste en la transmission d'une onde mécanique créée grâce à une barre dite "impacteur" frappant une barre dite "entrante". Cette onde de choc étant transmise à l'éprouvette. La célérité d'une onde au sein d'un matériau est égale à :

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

avec  $E$  le module d'Young et  $\rho$  la masse volumique du matériau.

Tant la barre d'entrée que la barre de sortie sont équipées d'un capteur de déformation permettant de suivre l'évolution de l'onde frontale. La figure 3.12



illustre le trajet de l'onde à travers le dispositif. À chaque interface, une partie de l'onde est transmise et une autre est réfléchie. Cela nous permet de localiser et de chronométrer les différentes mesures de déformation, dans le contexte d'un essai de compression.