LA PRATIQUE DES ESSAIS DESTRUCTIFS : L'ESSAI DE FLEXION

B. REDJEL
Docteur en Mécanique Appliquée et Matériaux
Maitre de Conférence IGC - Université de Annaba
S. BENMEDAKHENE
Chercheur à l'Université de Téchnologie de Compiegne Génie Mécanique

Résumé

En raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur coût moins élévé, les essais de flexion sont souvent utilisés pour la caractérisation des matériaux fragiles qui se prètent mal aux essais de traction directe.

Au cours de la flexion, les fibres ou les couches de la matière à travers la section, sont diversement sollicitées. Cependant, ces essais basés sur la théorie élastique des poutres sont en fait difficiles à analyser, surtout pour les matériaux qui présentent une non linéarité marquée. après la phase élastique. Des coefficients correcteurs sont souvent affectés aux résultats des mesures de la contrainte à la rupture afin de les rendre plus significatifs et de les rapprocher de celles mesurées par un essai de traction directe.

Des normes relatives à chaque matériau fixent les méthodes expertimentales, ce qui généralise la pratique de ces essais et permet la caractérisation des matériaux étudiés.

Mots clés : contrainte · rupture · essai · traction · flexion · éprouvette.

1 INTRODUCTION

Les essais mécaniques à la rupture sur des éprouvettes normalisées demeurent nécessaires, surtout pour des études préliminaires comportant des essais comparatifs. Il est alors nécessaire de définir les conditions de validité de ces essais.

Le comportement mécanique des matériaux dépend d'une part des composants et de la structure de la matière et d'autre part du mode de sollicitation de cette dérnière. L'essai de traction reste de loin l'essai le plus fiable et le plus utilisé pour la caractérisation des matériaux. Cependant, il présente l'inconvénient de nécessiter un usinage et une préparation particulière des éprouvettes (collage de talons métalliques, élargissement de la section de l'éprouvette au niveau des mors d'attache de la machine etc...), ainsi que l'alignement des axes de la charge et de l'éprouvette qui doivent être confondus.

L'essai de flexion par contre utilise des éprouvettes brutes, simples et il est rapide à mettre en œuvre. Cet essai permet de reproduire le type de sollicitation en traction, le plus fréquent : la flexion. Celle-ci qui est en fait une combinaison de sollicitations de traction, de compression et parfois même de cisaillement, est la sollicitation la plus répandue dans les structures de constructions et les pièces de machines, d'où l'importance de cet essai. Cette sollicitation basée sur la théorie élastiques des poutres utilise comme modèle la poutre (cas du béton) ou le barreau prismatique (cas de l'acier, polymère, composites etc...) de section rectangulaire ou carrée reposant sur deux appuis et supportant une charge qui devrait donner une distribution linéaire (triangulaire) des contraintes. La contrainte de rupture mesurée ainsi, devrait théoriquement être égale à celle obtenue par un essai de traction directe et elle est souvent appelée module de rupture [1].

Cependant plusieurs recherches ont montrées qu'il existe souvent un écart entre les valeurs des contraintes à la rupture, mesurées par ces deux types d'essais [2, 3, 4, 5, 6]. Cette divergence a été observée non seulement pour les matériaux fragiles tels que les bétons ou les céramiques qui présentent un comportement linéaire en traction, et pour lesquels ce phénomène est souvent attribué à un effet de taille et de volume, mais surtout pour les matériaux présentant un

comprtement élasto-plastique ou élasto-pseudoplastique matérialisé par une partie non linéaire de la courbe contrainte-déformation après la phase élastique [2, 7]. Dans ce cas, la divergence est attribuée à la répartition non-linéaire des contraintes et des déformations à travers la section de l'éprouvette ainsi qu'à la distribution non uniforme des défauts à coeur et à la surface de l'échantillon comme dans le cas de certains composites [6]. Il a été montré que les défauts volumiques qui influent sur les résultats de l'essai de traction directe n'appartiennent pas à la même famille statistique que les défauts surfaciques, qui eux gouvernent la rupture des éprouvettes soumises à la flexion [2, 4, 6].

A cause de tous ces phénomènes, la contrainte à la rupture mesurée par l'essai de flexion est souvent deux à trois fois superieure à celle mesurée par l'essai de traction directe. Ceci pose le problème de la validité des résultats des essais de flexion. Plusieurs recherches quantitatives contribuent actuellement à modéliser ces phénomènes notament celles basées sur les statistiques et les modèles de Weibull [2, 3, 4, 8]. Une autre approche consiste à utiliser des coefficients empiriques correcteurs tel que le coefficient 0.6 donné par G. Dreux pour affecter la valeur de la contrainte à la rupture en flexion calculée à partir des formules classiques de la résistance des matériaux dans le cas des bétons [9].

De nombreux travaux contribuent actuellement à appréhender de manière plus précise la caractérisation des matériaux par l'essai de flexion et dont les résultats les plus récents sont :

- la détermination de la contrainte à la rupture de traction ou module de rupture en utilisant l'essai de flexion et en affectant les résultats de mesure de coefficients correcteurs obtenus à l'aide de certains modèles statistiques sur des matériaux composites et des polymères [3, 4, 6, 10] ou de coefficients experimentaux tel que celui proposé par G.Dreux pour le cas des ciments et des bétons [9].
- l'effet de cisaillement transversal dans la rupture des matériaux composites [11, 12].
- le module de Young mesuré par un essai de flexion est identique à celui mesuré par un essai de traction directe [2, 3, 7].

Grace à une interprétation originale des résultats, cet essai permet d'avoir accés à des grandeurs physiques tels que la résistance au cisaillement, la résistance à la traction, les modules de Young et de Coulomb et même l'énergie de rupture.

Cet article se propose de donner un aperçu sur le principe de cet essai ainsi que sur les grandeurs mécaniques mesurées en faisant un synthèse des diverses normes utilisées pour caractériser différentes matériaux.

2 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

2.1 Principe de l'essai

Les deux essais de flexion les plus utilisés sont l'essai de flexion trois points ou flexion simple, caractérisé par un moment flechissant variable le long de l'éprouvette et un cisaillement constant, et l'essai de flexion quatre points ou flexion pure avec un moment constant dans les sections entre appuis et un cisaillement nul (Figure1).

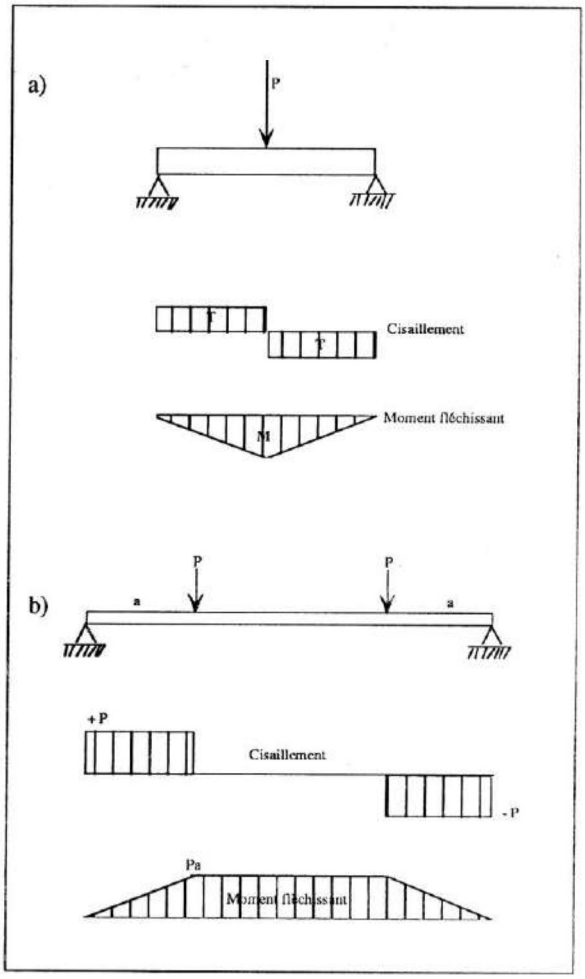


Figure 1 : Essai de flexion

a) flexion simple (flexion 3 points)
b) flexion pure (flexion 4 points).

Ces deux essais donnent en général des résultats semblables. Aussi, la flexion trois points est elle la plus souvent utilisée à cause de la simplicité du montage d'experimentation. Pour les bétons, il existe également une machine dite "Appareil de Feret" plus connue sous le nom de "Simrupt" [19] dans laquelle le prisme est placé verticalement et qui permet de mesurer la résistance à la traction par flexion (figure 2).

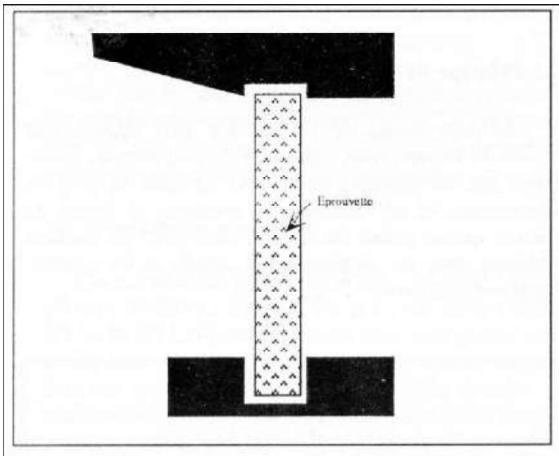


Figure 2 : Appareil Simrupt pour mesurer la résistance du béton en traction par flexion .

L'essai de flexion consiste à déformer une éprouvette rectangulaire reposant sur deux appuis [2, 13]. On enregistre alors la courbe effort-flèche ou contraintes-déformations. Les normes ISO 178-1972 (F) relative aux matières plastiques rigides [14], EN 63 relative aux matières plastiques renforcées au verre textile [15] et P 18-407 relative au béton [9] decrivent l'appareillage utilisé.

Concernant la flexion quatre points [19], le montage couramment utilisé consiste à transmettre les charges par l'intermediaire d'une poutre de charge reposant sur deux galets sur la partie superieure de l'éprouvette (Figure 3). N'importe quelle position peut être adoptée pour l'application des charges pour autant que ces charges soient à égale distance des supports. Des contraintes locales à proximités des points de charge existent toujours, mais elles disparaissent à une courte distance égale en général à la hauteur de l'éprouvette. Pour cela, la partie centrale doit être suffisament longue (un minimum de quatre fois la hauteur) pour laisser subsister une portion appreciable exempte des contraintes locales (norme ASTM C 78) [13].

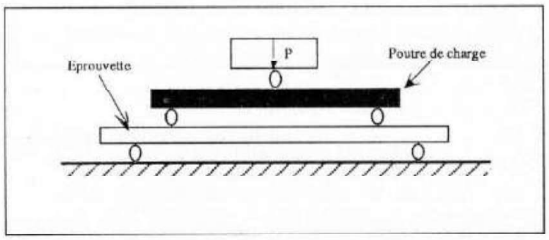


Figure 3 : Montage pour un essai de flexion pure.

2.2 Eprouvettes utilisées

En règle générale, les éprouvettes utilisées en flexion trois points et flexion quatre points sont identiques. Leur forme est prismatique et leur dimensionnement est regit par des normes spécifiques à chaque matériau. Toutes ces normes obeissent à un certain nombre de principes dont les plus importants sont :

1) La longueur L et l'épaisseur h de l'éprouvette doivent être dans un rapport fixe :

   Lmin = 20.h (ISO 178 relative aux matières plastiques rigides) [14].
   Lmin = (16 + 1).h (EN 63 relative aux matières plastiques renforcées au verre textile) [15].
   Lmin = 4.h (NFP 18-401 pour les bétons) [9].

Il est à noter que pour les bétons, le côté de la section carré des éprouvettes est fonction de la dimension maximale des granulats. Ainsi, les côtés utilisés sont : 7, 10, 14 et 20 cm. Mais en général, les éprouvettes couramment employés sont des éprouvettes de dimensions 10 x 10 x 40 cm ou 10 x 10 x 50 cm [16]. Pour les ciments, les prismes utilisés sont de dimensions 4 x 4 x 16 cm ou 4 x 4 x 20 cm [16].

Concernant les matières plastiques, la dimension de l'épaisseur depend en général de l'épaisseur des plaques moulées.

2) La largeur de l'éprouvette peut être quelconque et sa valeur est comprise entre 10 et 25 cm pour les produits siderurgiques [13]. Pour des matériaux ayant des fibres grossières, la largeur doit être comprise entre 20 et 50 cm spécifique à la norme ISO 178 [14].

La préparation et les dimensions des éprouvettes peuvent être définies selon la spécification de chaque matériau [14]. Notons que quelquefois, les dimensions de l'éprouvette influent sur les résultats de l'essai [9, 13, 14].

Pour les matériaux anisotropes, les éprouvettes doivent être prélevées de telle sorte que les contraintes de flexion subies au cours de l'essai soient appliquées dans le sens qu'elles soient amenées à subir dans la pratique.

Si au cours de l'essai les éprouvettes sont rompues à l'extérieur du tiers central de la longueur entre appuis, elles doivent être écartées et remplacées.

Dans le cas où le matériau se comporte différement dans les deux directions principales, l'essai doit être fait suivant ces deux directions. Si lors de son utilisation, le matériau est sollicité dans une autre direction, il est donc nécessaire que l'essai se fasse suivant cette dernière. Les éprouvettes doivent être conditionnées comme l'indique la spécification du matériau. Un minimum de cinq éprouvettes doit être soumis à l'essai.

2.3 Mesures des déformations

Les observations expérimentales de l'essai de flexion comportent habituellement, les charges et les flèches ou les déformations mesurées à l'aide d'un dispositif analogue à celui de la figure 4, ou d'une façon

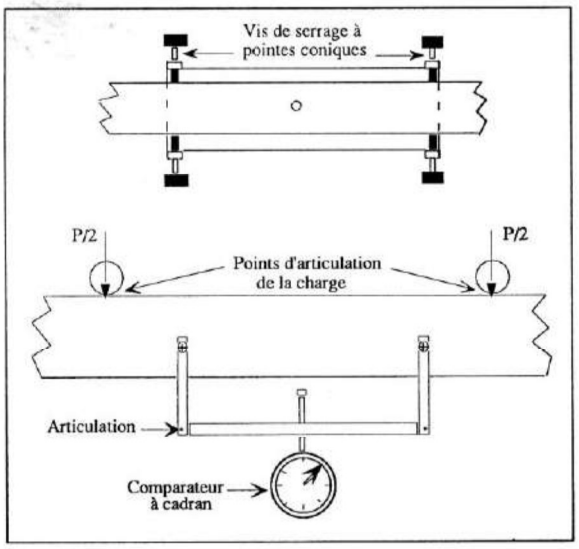


Figure 4 : Dispositif de mesure de la flèche.

plus commode à l'aide d'un extensomètre qui permet de détecter les écarts sur la linéarité de la relation moment-déformation et de donner une bonne indication de la limite de proportionnalité. Pour cela il faut apporter un grand soin à l'experimentation.

Les trois types d'extensomètres d'usage le plus courant sont l'extensomètre mécanique (Figure 5), l'extensomètre optique (Figure 6) et l'extensomètre électrique ou jauge (Figure 7). Ce dernier est le plus pratique et le plus utilisé en recherche pour la précision et la sensibilité qu'il offre.

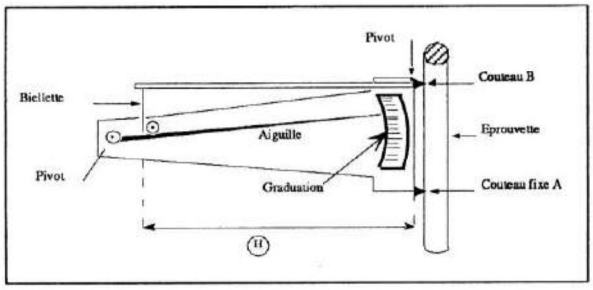


Figure 5 : Extensomètre mécanique.

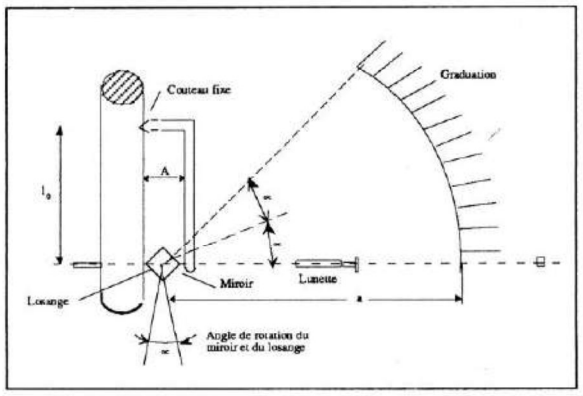


Figure 6 : Extensomètre optique.

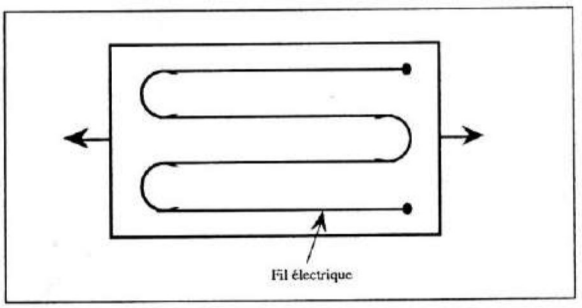


Figure 7 : Jauge électrique.

La méthode consiste à remplacer la mesure directe de l'allongement par une mesure de variation de resistance éléctrique qui en est une conséquence.

La jauge de déformation est constituée par un fil conducteur replié en accordéon et collé entre deux feuilles fines isolantes. La jauge est parfaitement collée sur la pièce dans le sens de l'allongement à mesurer. Le fil qui constitue la jauge s'allonge aussi comme la pièce. En fait, on remplace la mesure de la variation de la longueur par une mesure de la résistance éléctrique du fil constituant la jauge. La relation qui définit la résistance d'un fil est donnée par :

$$R = \rho \, . \, L/S$$

L, S, ρ et R sont respectivement la longueur et la section du fil éléctrique, la résistivité du matériau constituant le fil et la résistance éléctrique du fil.

Pour des variations relatives de résistance, on obtient :

$$\Delta R/R = (\Delta\rho/\rho) + (\Delta L/L) - (\Delta S/S)$$

La variation de la resistivité peut être négligée. La variation relative de la section $\Delta S/S$ peut s'exprimer en fonction de la variation relative du diamètre par la relation suivante :

$$\Delta S/S = 2 . \Delta d/d$$

Entre $\Delta L/L$ et $\Delta d/d$, il existe une relation de proportionnalité telle que :

$$\Delta d/d = - \gamma . \Delta L/L$$

γ représente le coefficient de Poisson.

Ainsi la variation de la résistance électrique peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$\Delta R/R = (\Delta L/L) \, . \, (1 + 2\gamma) = K . \Delta L/L$$

Cette relation montre que l'on peut remplacer la mesure de la variation de longueur par la mesure de la variation de la résistance éléctrique. K est une constante caractérisant la jauge. Sa valeur est donnée par le fabricant. La mesure de $\Delta R/R$ peut se faire à l'aide d'un appareillage nécessitant un pont de Wheatston (Figure 8).

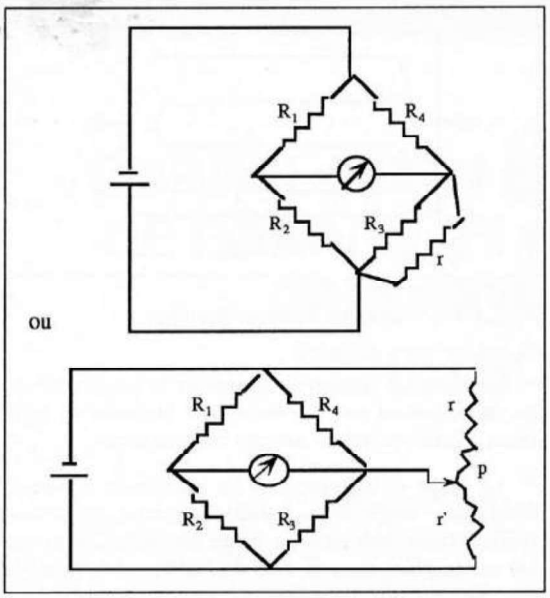


Figure 8 : Pont de Wheatston.

Avant la charge de l'éprouvette, r n'étant pas connectée l'équilibre du pont se traduit par :

$$R_1 = R_2 R_4 / R_3$$

Après la charge de l'éprouvette, r étant connectée l'équilibre du pont se traduit par :

$$R'_1 = R_2 R_4 / R'_3$$

avec :

$$1/R'_3 = 1/R_3 + 1/r$$

R_1 : jauge collée dont on veut connaître la variation.
R_2 : jauge témoin identique à R_1 mais chargée et pour laquelle les influences extérieures sont identiques, ce qui a pour effet de neutraliser les variations de température.
R_3 : résistance variable connue pour équilibrer le pont.
R_4 : résistance constante identique à R_3 initiale.
r : résistance montée en parallèle avec R3 et que l'on fait varier de façon à augmenter la sensibilité de l'appareil.

On peut alors exprimer $\Delta R_1 = R'_1 - R_1$

$$\Delta R_1 = R_2 . R_4/r$$

soit :

$$\Delta R1/R1 = R3/r$$

Actuellement l'adjonction de r est remplacée par un dispositif éléctronique permettant d'amplifier le déséquilibre du pont.

3 CALCUL ET EXPRESSION DES RESULTATS

Dans un essai de flexion deux types de diagrammes peuvent être prelevés : contrainte-déformation et charge-flèche (figure 9).

Ces diagrammes montrent en général une phase

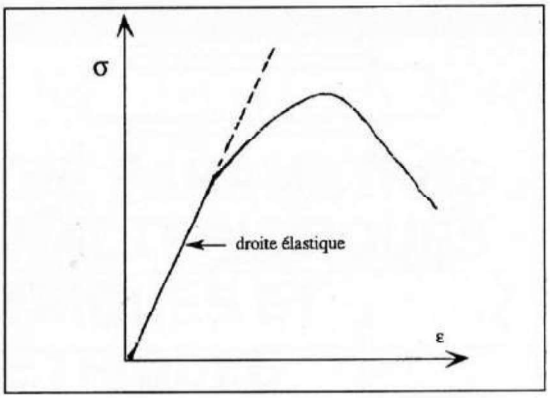


Figure 9 : Exemple de diagramme contrainte-déformation.

linéaire élastique puis s'écartent progressivement de la linéarité caractérisant une phase plastique ou une phase d'endommagement et de microfissuration pour certains matériaux précédant la rupture finale. A partir de ces diagrammes, différentes caractéristiques mécaniques du matériau peuvent être mesurées dont les principales sont :

σ_r - Contrainte à la rupture : appelée aussi module de rupture, elle est donnée théoriquement par la formule classique de la résistance des matériaux :

$$\sigma_r = M.v / I$$

M, v, et I représentent respectivement, le moment fléchissant à la rupture, la demi hauteur de la section fléchie et le moment d'inertie.

Cette formule basée sur la loi de Hooke suppose une distribution linéaire et triangulaire des contraintes à travers la section de l'éprouvette comme l'indique la figure 10. Dans ce cas :

$$\sigma_r = A'B'$$

Cependant cette formule reflète mal le comportement réel de certains matériaux et surtout ceux qui présentent une phase de non linéarité ou une zone d'endommagement avant la rupture finale. Dans ce cas la formule n'est plus applicable et le diagramme réel

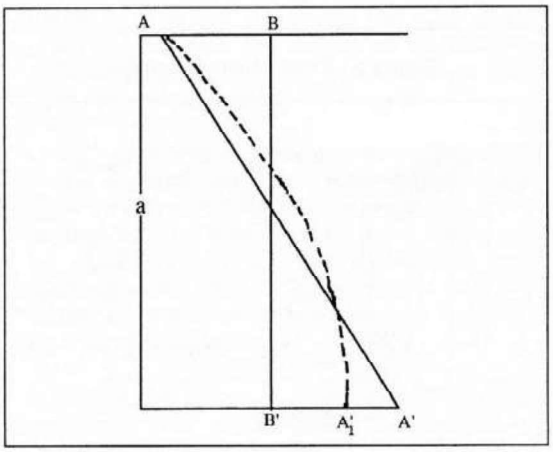


Figure 10 : Diagramme des contraintes dans une éprouvette de béton flechie.

est vraissemblablement de la forme B'A'1 comme illustré sur la figure 10 [9, 17].

Si le comportement du matériau est identique en traction et en compression, l'axe neutre passe toujours par l'axe de l'éprouvette (Figure 11a), sinon l'axe neutre observera un deplacement vers la partie résistante, en général la zone comprimée (Figure 11b).

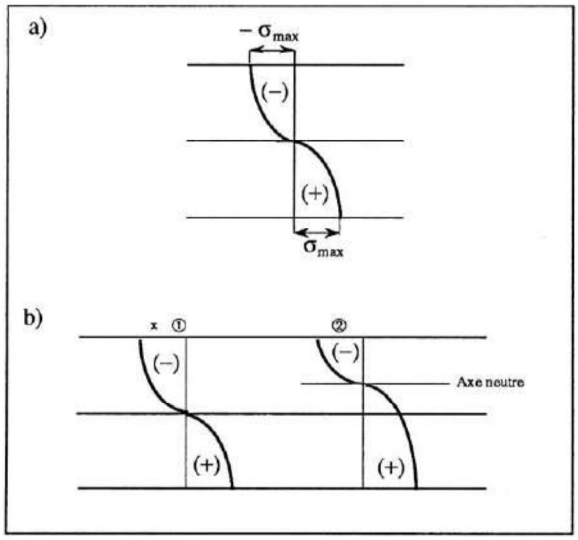


Figure 11 : a) Répartition non linéaire des contraintes identiques en traction et en compression.

b) Répartition des contraintes
1/ axe neutre au centre
2/ axe neutre déplacé (répartition réelle).

Ce phénomène est l'une des causes qui font que la contrainte mesurée par l'essai de flexion est souvent supérieure à celle donnée par un essai de traction directe [2, 3, 4, 5, 6]. Les divergences sont souvent assez importantes comme le montre la figure 12 [4, 5, 6, 7, 10]. Différentes recherches basées sur des modèles statistiques ou autres tendent à rapprocher la valeur de la contrainte mesurée par l'essai de flexion de celle donnée par l'essai de traction directe. Mais ceci n'est toujours pas évident en raison des origines multiples des initiateurs de rupture qui n'appartiennent pas aux mêmes familles statistiques ainsi que des intéractions entre les différentes populations de défauts existants dans la matière. Ce qui augmente la difficulté de modélisation de la rupture. Un modèle statistique plus developpé prenant en considération independemment l'ensemble des mécanismes regissant la rupture des matériaux permettrait sans doute d'établir une approche plus exacte sur la détermination des contraintes à la rupture de traction déduites de l'essai de flexion sur les matériaux.

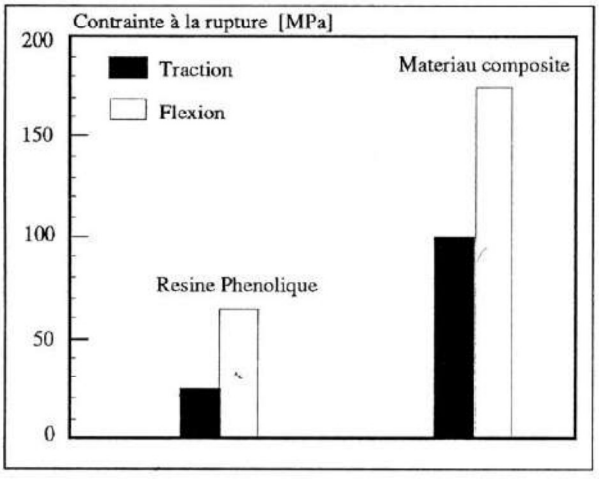


Figure 12 : Histogramme des contraintes à la rupture de certains matériaux testés en flexion 3 points et en traction (d'après [6]).

Ceci devrait être précédé par des études beaucoup plus détaillées sur les mécanismes de déformation et de rupture en considérant tous les facteurs influents sur ces derniers.

Pour le cas des bétons, G. Dreux [9] indique que la contrainte calculée par la formule de l'élasticité doit être affectée d'un coefficient multiplicateur égal à 0,6. Ainsi, sur la figure 10, on aura $B'A'_1 = 0{,}6\ B'A'$ en supposant une sorte de microfissuration précédant la rupture. La comparaison des résultats d'essais jumelés obtenus par flexion et par traction directe sur les bétons et les ciments en tenant compte du coefficient 0.6, parait satisfaisante.

Toutefois la valeur de ce coefficient est une fonction croissante de la section de l'éprouvette, se rapprochant de 1 lorsque la section augmente [17]. De plus, à section constante le changement de dimensions du granulat fait également varier ce coefficient [18]. Cette variation va probablement conduire les recherches, à normaliser la donnée brute de la contrainte, l'interpretation étant alors fonction des conditions particulières de l'essai. Ce coefficient n'a donc qu'une signification tout à fait approximative et conventionnelle.

E- Module de Young : le module de Young ou d'élasticité peut être relevé directement en considérant la pente de la partie élastique linéaire du diagramme contrainte-deformation. Des études montrent que cette mesure est bonne et correspond à celle donnée par un essai de traction directe [2]. Dans le cas du diagramme charge-flèche, le module de Young est déterminé à partir de la portion linéaire élastique du diagramme par la formule suivante en utilisant au moins cinq valeurs de la flèche et de la charge :

$$E = (L^3 / 2bh^3).\ \Delta F / \Delta Y$$

L : distance entre appuis
b : largeur de l'éprouvette
h : épaisseur de l'éprouvette
Δ F : variation de la charge sur la partie rectiligne du diagramme
Δ Y : variation de la flèche correspondante à la variation de la charge.

4 CONCLUSION

A l'inverse de l'essai de traction directe, l'essai de flexion qui est relativement économique et simple à exécuter pour la caractérisation des matériaux, peut être utilisé comme un essai de contrôle continu en laboratoire ou en chantier. A condition de suivre scrupuleusement certaines règles, il est tout à fait possible d'obtenir grace à cet essai mécanique et conventionnel, des données satisfaisantes pour juger la qualité d'un matériau destiné à l'éxploitation. Des progrés sensibles restent également à accomplir pour améliorer la qualité de cet essai et exploiter judicieusement ses résultats en tenant compte des apports de la recherche. Celle-ci devrait tendre à l'aide d'études statistiques à rapprocher les valeurs des contraintes à la rupture mesurées par cet essai de celles données par un essai de traction directe.

BIBLIOGRAPHIE

[1] V. Feodossiev : "*Résistance des matériaux*". Editions MIR-Moscou 1971, 2ème edition. Traduit du russe par Edouard Gloukhian.

[2] B. Redjel : "*Mécanique et mécanisme de rupture dans les matériaux composites SMC*". Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Division Polymères et Composites, Génie Mécanique, 30 Juin 1987.

[3] S. Bennedakhene : "*Relation entre les résultats d'essai de flexion et de traction sur les matériaux*". Mémoire de Licence en Génie Civil de l'Université de Annaba, Juin 1991.

[4] J.M Whitney & M. Knight : "T*he relationship between tensil strength and flexure strength in fiber reinforced composites*". Experimental méchanics, June 1980, pp. 211-216.

[5] G. Bernnhart : "*Relation entre les résultats d'essai de flexion et d'essai de traction pour des composites à matrice rigide*". 4ème journées nationales sur les composites (JNC4), Paris 11-13 Septembre 1984, pp. 75-90.

[6] B. Redjel & F.X De Charentenay : "A*pplication des statistiques de Weibull à la caractérisation des résines phénoliques et des matériaux composites SMC*". Matériaux et Techniques N° 10, Octobre 1987, pp. 421-424.

[7] B. Redjel & F.X de Charentenay : "C*omportement mécanique des matériaux composites SMC*". Matériaux et Techniques, N° 5/6, Mai-Juin 1987, pp. 221-428.

[8] C. Zweben : "*The effect of stress nonuniformity and size on the strengthof composite materials*". Comp. Tech Review, Vol. 3Mars-décembre 1981, pp. 23-26.

[9] G. Dreux : "*Nouveau guide du béton*". Edition Eyrolles, Paris 1976.

[10] R.E Bullock : "*Strength ratio of composite materials in flexure and tension*". J. Comp. Mat, Vol. 8 Appril 1974, pp. 200-206.

[11] Q. Morin & A. Sixou : "*Détermination des modules d'élasticité et de cisaillement de matériaux composites par essais de flexion trois points*". D.C.A.N (France), Composites n°3, Mai-Juin 1987, pp 99-100.

[12] B. Echalier, P. Bluet, F. Lefebvre & M. Glemet : "*Evaluation du test de flexion trois points sur composites à matrice thermoplastique*". Composites N°3, Mai 1986, pp. 157-153.

[13] C.W Richards : "*Sciences des matériaux de l'ingénieur*". Stanford University, traduit par G. Lemer, Editions Dunod, Paris 1965.

[14] Norme internationale ISO 178-1972 (F) : "*Matières plastiques*" : détermination des caractéristiques de flexion des matières plastiques rigides.

[15] J. Weiss & C. Bord "*Les matériaux composites*". Tome II : calculs, essais et contrôles et conception -Editions de l'Usine Nouvelle, Paris 1983.

[16] B. Redjel : "*Essais et expérimentation*" : Cours de post-graduation Matériaux -1990/91 Département Matériaux, Institut de Génie Civil, Université de Annaba.

[17] F. Gorisse : "*Les essais mécaniques dans le béton hydraulique*". Paris, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp 379-388, 1982.

[18] B. L'hermitte, M. Mamimman, J. Simmonet "*Recherches nouvelles concernant la technologie du béton*", Annales ITBTP, Septembre 1973.

[19] B. Redjel, M. Yahiaoui : "*La mesure de la résitance du béton à la traction*". Algérie EQUIPEMENT N°14, page 28-35 Avril 1992.