



COLLOQUE 2012

Fonctionnement des bétons projetés fibrés

Nouvelles spécifications

Catherine LARIVE



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

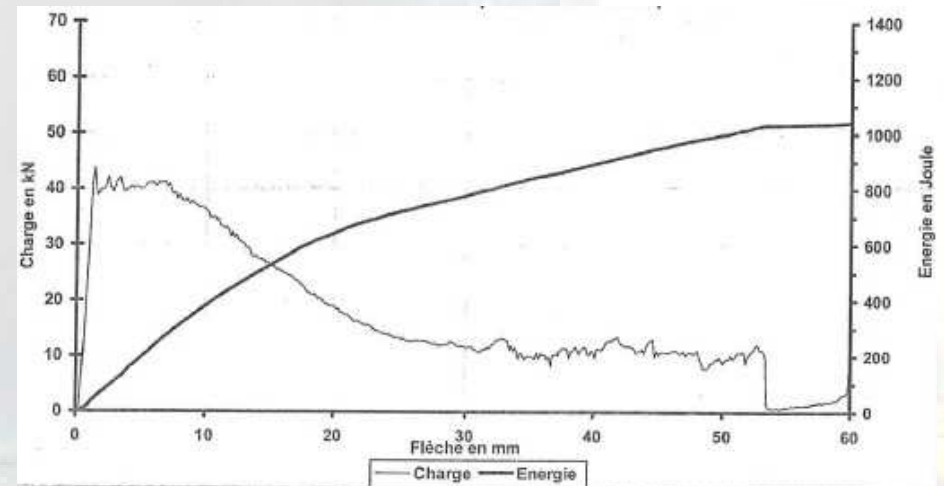
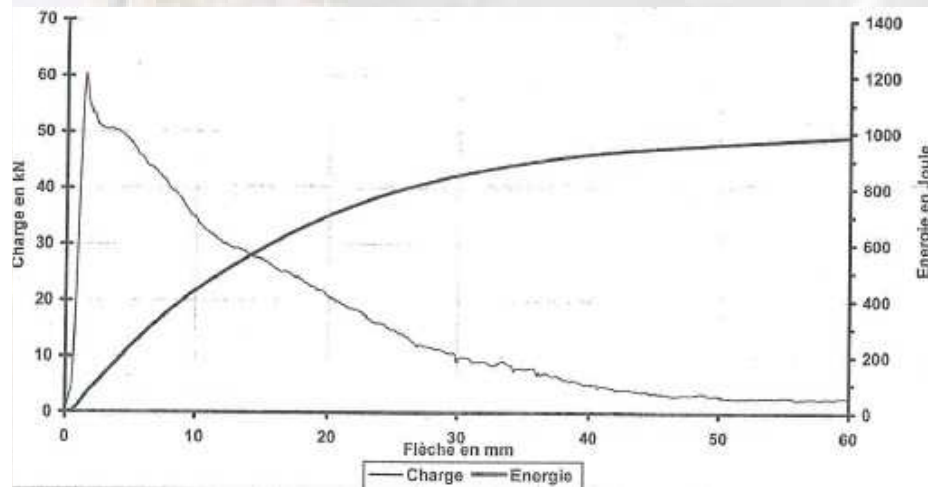
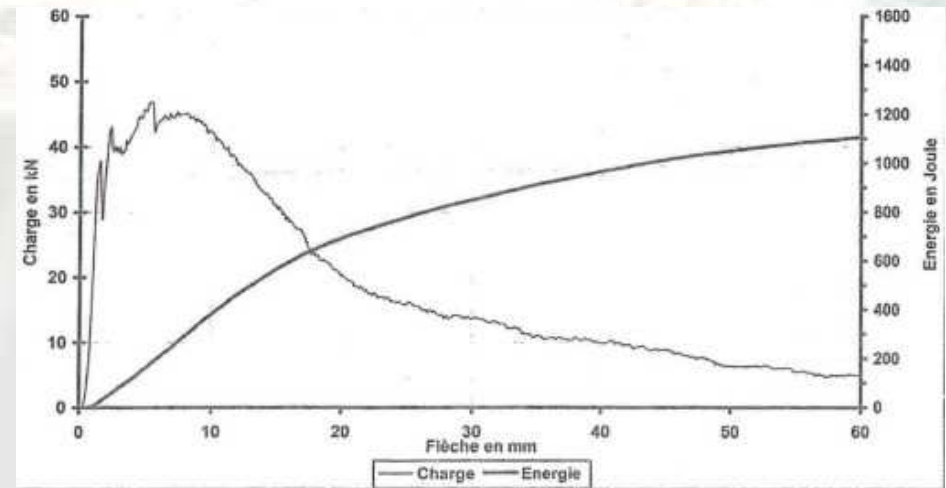
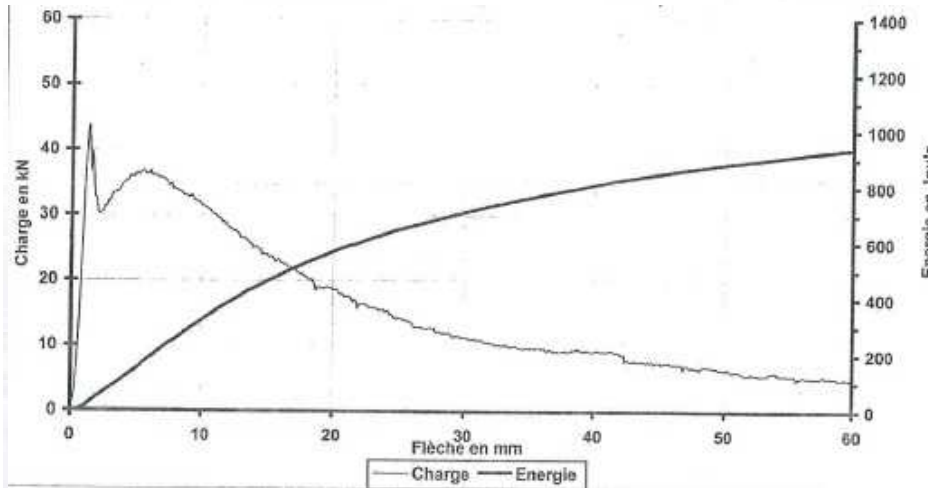


Fonctionnement du béton fibré

Le fonctionnement du béton fibré n'est pas la simple superposition des caractéristiques de la matrice béton et des fibres, il faut prendre en compte l'interaction entre les deux pour analyser le fonctionnement du matériau composite.

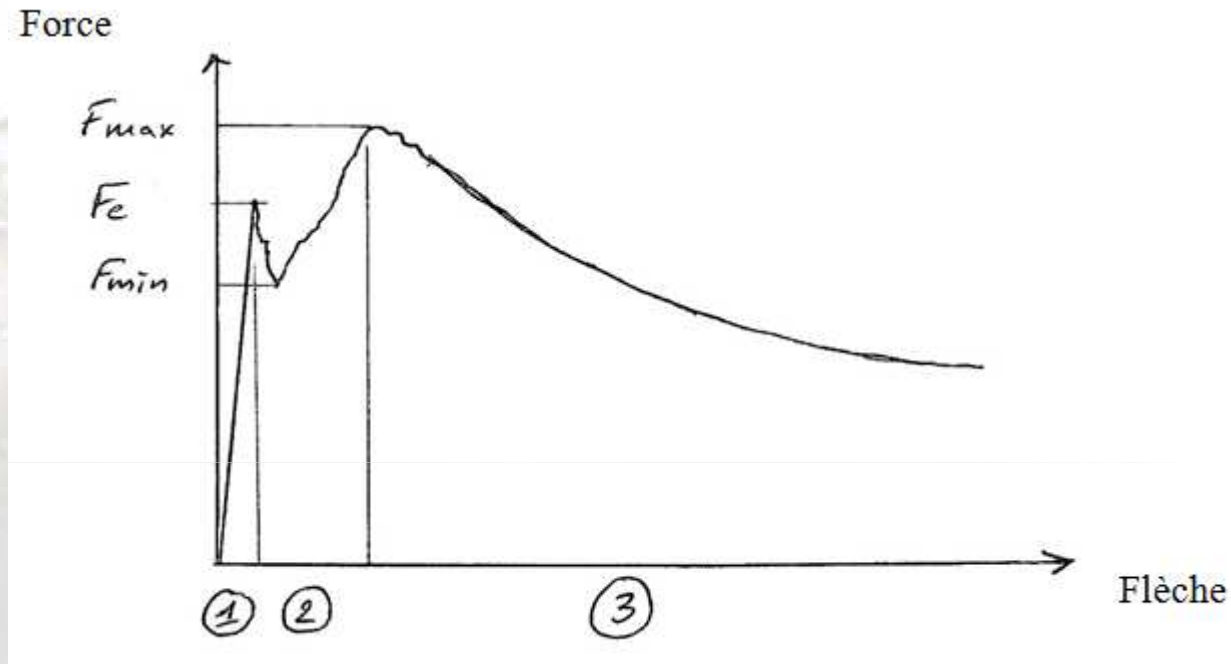
Cela signifie intégrer le transfert des charges de la matrice en béton au réseau de fibres.

Les caractéristiques des fibres seules ne permettent pas de prévoir le comportement du composite



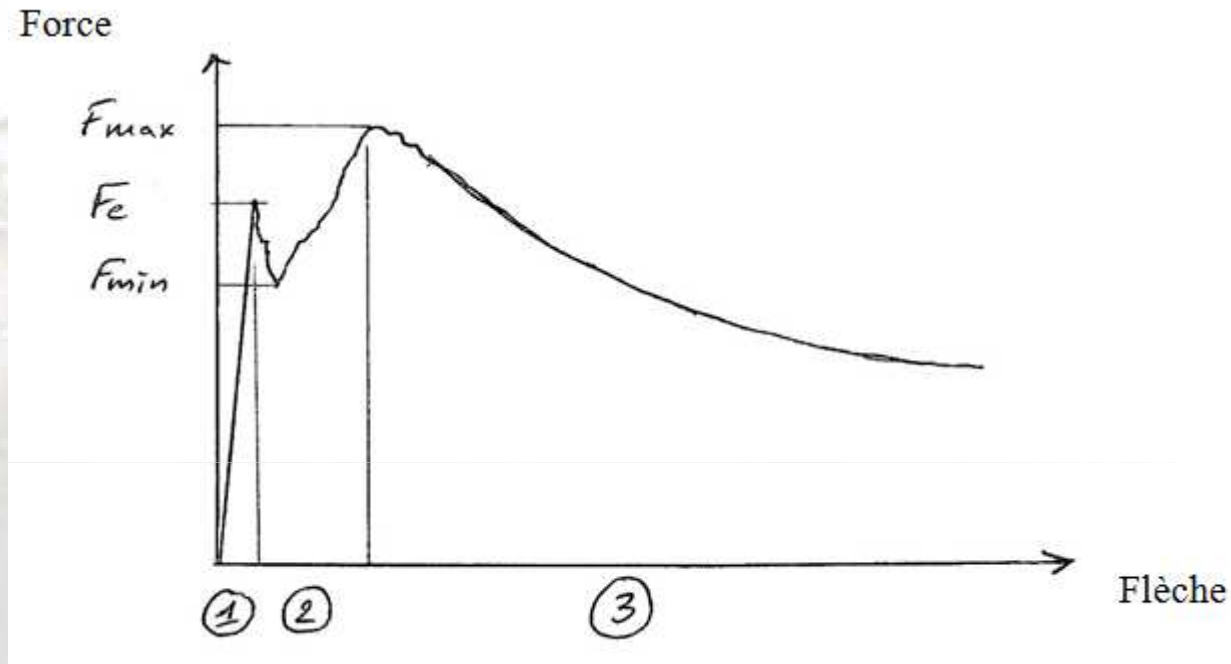
*Tous ces bétons ont la même matrice béton.
Les deux du haut ont été coulés le même jour.
Les deux du bas sont théoriquement identiques.*

Schéma-type lors des essais de poinçonnement de plaques



1. Phase de déformation élastique : adhérence sur toute la longueur de la fibre, dépendant de :
 - la compacité de la matrice béton,
 - la qualité de l'interface fibre-matrice,
 - la surface d'échange (nombre, longueur, diamètre des fibres).

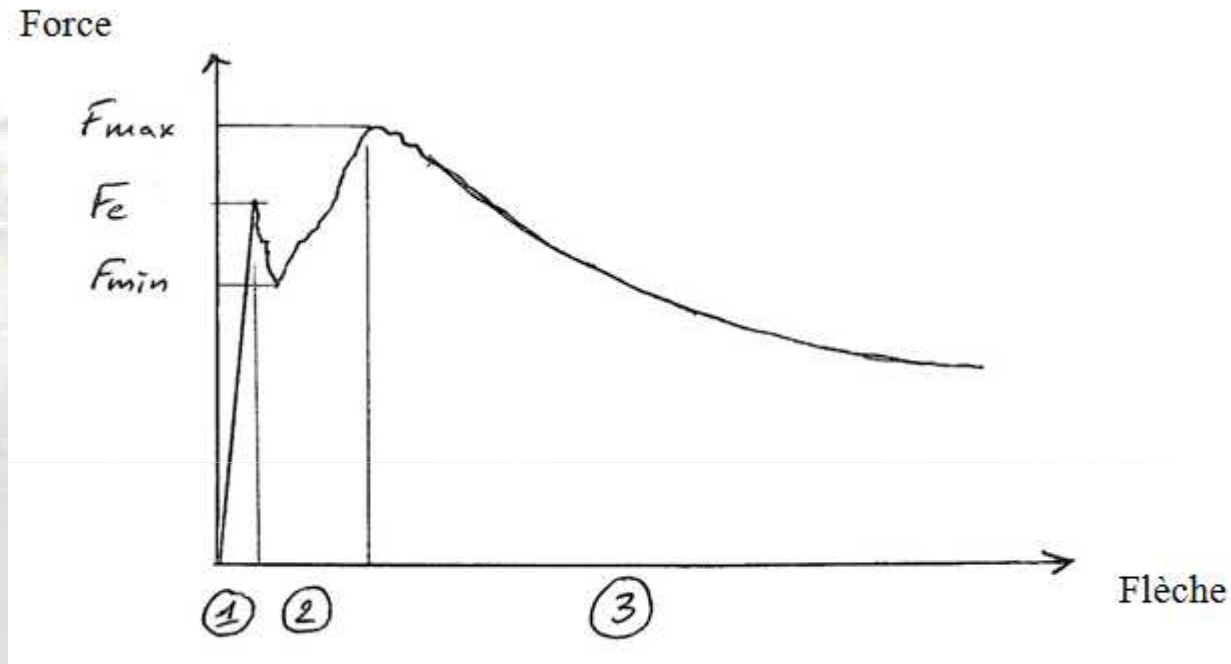
Schéma-type lors des essais de poinçonnement de plaques



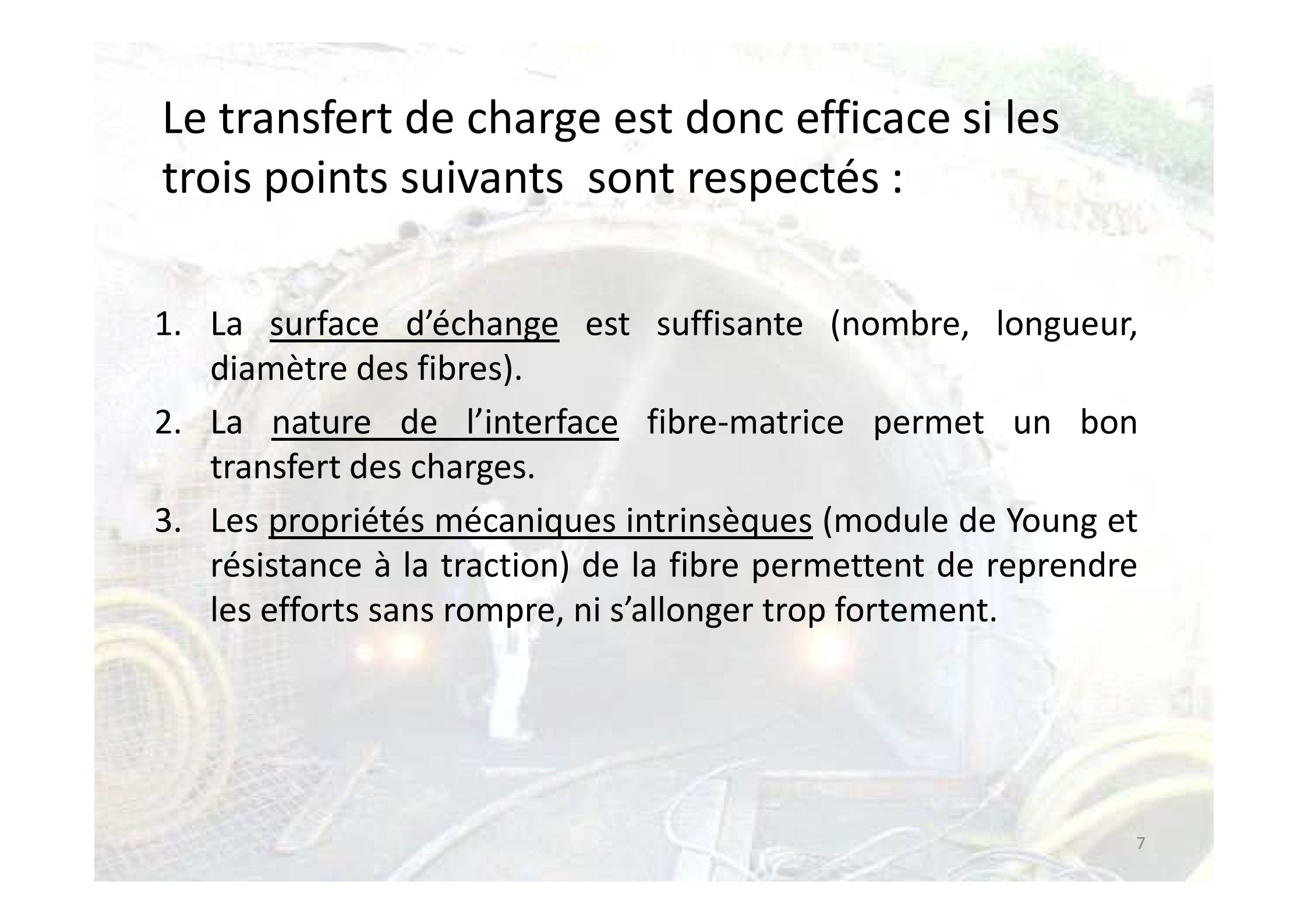
2. Mobilisation des fibres au droit des microfissures, fonction :

- du **module d'élasticité des fibres**,
- du nombre de fibres,
- du profil et de l'orientation des fibres,
- de la qualité de l'interface fibre-matrice (adhérence),
- de la compacité de la matrice béton.

Schéma-type lors des essais de poinçonnement de plaques



3. Mobilisation de l'ancrage, 'total' ou 'glissant'. Elle dépend de :
- la forme de l'ancrage,
 - le glissement possible de la fibre dans sa gaine (qualité de l'interface et orientation fibre/fissure),
 - la compacité de la matrice béton, le nombre de fibres,
 - la résistance en traction de la fibre.



Le transfert de charge est donc efficace si les trois points suivants sont respectés :

1. La surface d'échange est suffisante (nombre, longueur, diamètre des fibres).
2. La nature de l'interface fibre-matrice permet un bon transfert des charges.
3. Les propriétés mécaniques intrinsèques (module de Young et résistance à la traction) de la fibre permettent de reprendre les efforts sans rompre, ni s'allonger trop fortement.

Origine de la ductilité

Lors de la fissuration du béton, la ductilité du béton fibré provient principalement de la **friction** générée par l'extraction de la fibre dans sa gaine béton, plus que du comportement intrinsèque des fibres. L'orientation des fibres joue également un rôle important.

Un comportement optimal du béton fibré correspond à une extraction de la fibre à des valeurs de sollicitations proches de ses capacités maximales de reprise.

Deux principales familles de fibres

- Les macro-fibres synthétiques permettent d'introduire un très grand nombre de fibres tout en gardant une bonne rhéologie du béton. La quantité généralement introduite est de l'ordre de 5 à 7 kg/m³, soit un dosage volumique de 0,55 à 0,77% (densité 0,9).
- Dans le cas des fibres métalliques, la section est similaire à celles des fibres synthétiques (diamètre équivalent entre 0,5 et 1 mm). La quantité généralement introduite est de l'ordre de 25 à 40 kg/m³ ce qui correspond à un dosage volumique de 0,31 à 0,50% (densité 7,8).

Deux principales familles de fibres

- Le volume de **fibres métalliques** est donc inférieur à celui des macro-fibres synthétiques de même section mais il est compensé par des **meilleures propriétés mécaniques de la fibre** (module d'Young et résistance à la traction) et, éventuellement, un **meilleur ancrage mécanique** (pour les fibres munies d'extrémités à crochets par exemple).
- Au final, l'applicateur a le choix entre **deux solutions** qui peuvent fournir un comportement de rupture ductile au béton : l'emploi de fibres métalliques aux caractéristiques mécaniques supérieures, munies de dispositifs assurant un bon ancrage mécanique ou bien l'emploi de **macro-fibres synthétiques** aux caractéristiques mécaniques inférieures mais **présentes en plus grand nombre**.

Deux principales familles de fibres

- Les deux solutions étant envisageables, il est important de savoir quels peuvent être leurs domaines d'applications.

| | | |
|-------|--|----|
| 3. | PROBLEMATIQUES GENERALES | 18 |
| 3.1. | Composition du béton fibré | 18 |
| 3.2. | Fabrication du béton fibré..... | 18 |
| 3.3. | Pompabilité du béton fibré..... | 18 |
| 3.4. | Usure des machines..... | 19 |
| 3.5. | Risque de percement de la géomembrane d'étanchéité | 19 |
| 3.6. | Comportement différé (fluage)..... | 21 |
| 3.7. | Effet de la température | 22 |
| 3.8. | Comportement sous grandes déformations | 22 |
| 3.9. | Corrosion des fibres | 22 |
| 3.10. | Prévention et sécurité | 23 |
| 3.11. | Résistance au feu des structures..... | 23 |
| 3.12. | Développement durable..... | 23 |

Le groupe de travail s'est d'abord penché sur le cas des soutènements provisoires des tunnels.

Le 1^{er} critère présenté ici est donc la caractérisation de la **ductilité** du béton fibré.

Essais permettant de caractériser la ductilité

Extrait de la norme NF EN 14487-1 (Annexe A) :

« Les différentes façons de spécifier la ductilité du béton projeté renforcé par des fibres en termes de résistance résiduelle et de capacité d'absorption d'énergie ne sont pas directement comparables.

La résistance résiduelle doit être spécifiée lorsque les caractéristiques du béton sont utilisées dans le modèle de conception structurelle.

La valeur d'absorption d'énergie mesurée sur une dalle peut être spécifiée lorsque, en cas de boulonnage dans le rocher, l'accent est mis sur l'énergie devant être absorbée durant la déformation du rocher ».

Capacité d'absorption d'énergie selon la norme NF EN 14488-5

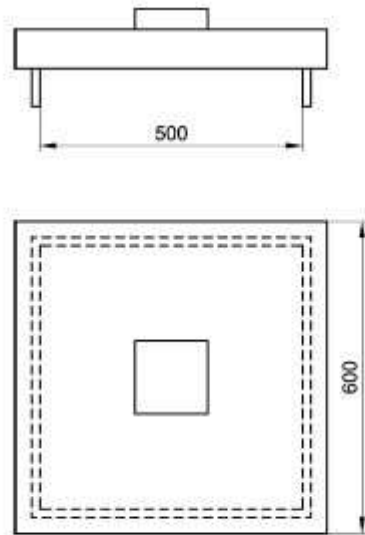


Figure 1 — Configuration de la mise en charge de l'éprouvette

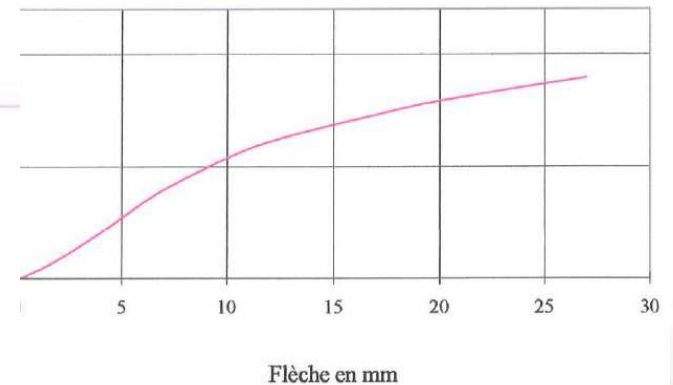
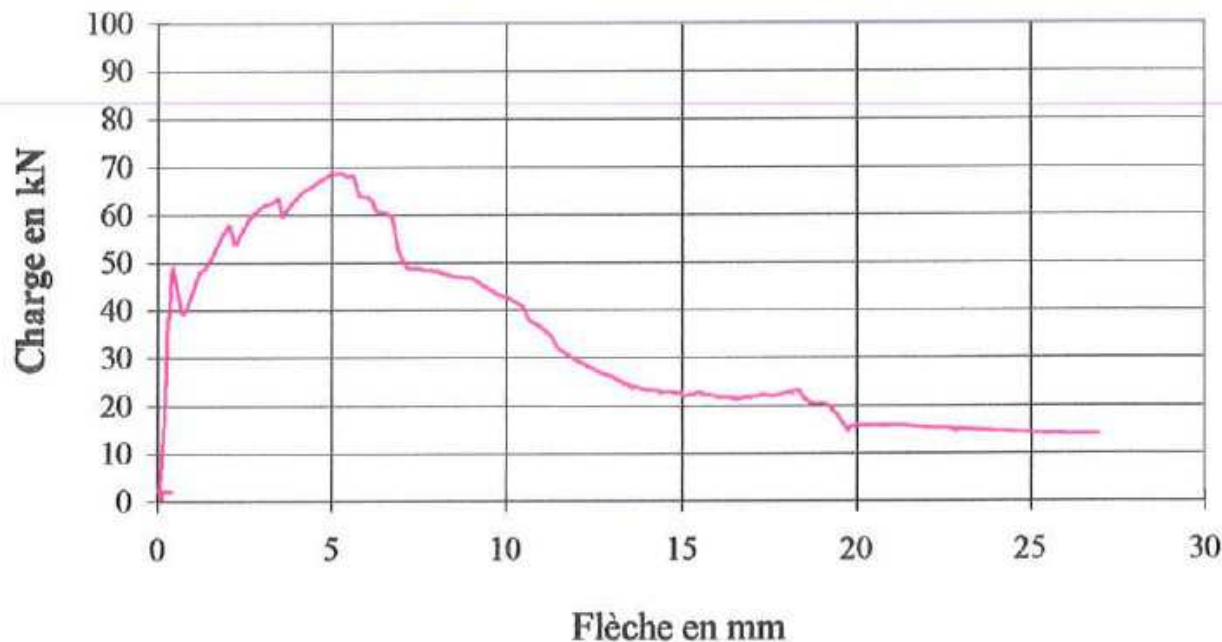


dimensions 600 mm × 600 mm et retournée à une épaisseur de $100 \begin{smallmatrix} +5 \\ 0 \end{smallmatrix}$ mm

La charge doit être appliquée sur la face projetée.
La vitesse de déplacement doit être constante de $(1 \pm 0,1)$ mm/min.

Capacité d'absorption d'énergie selon la norme NF EN 14488-5

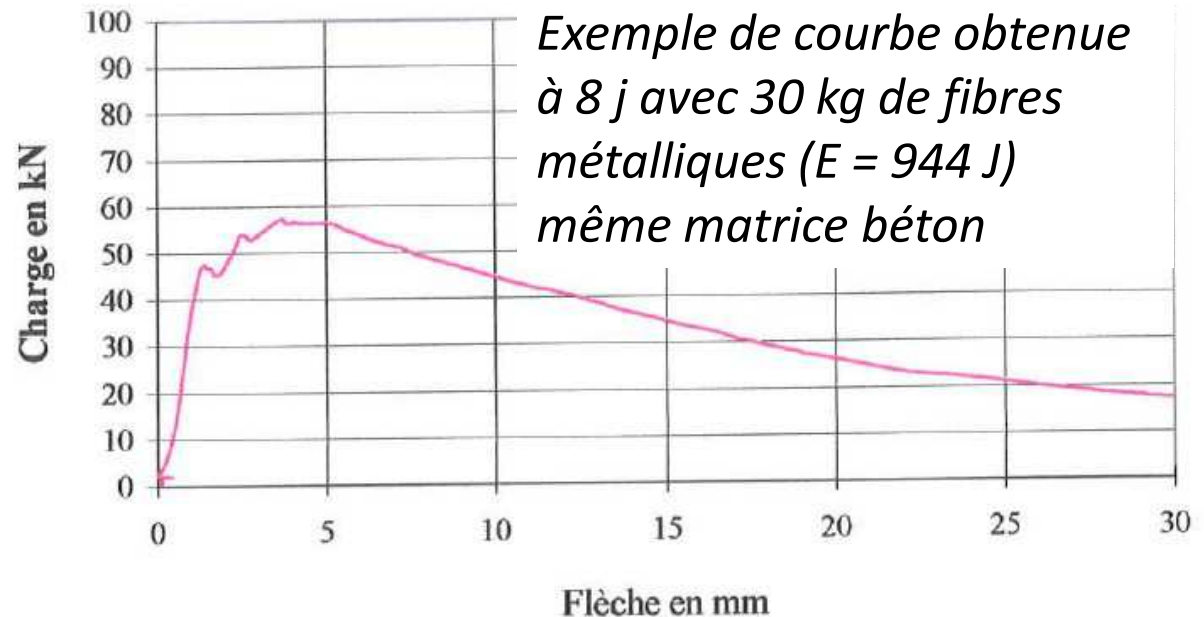
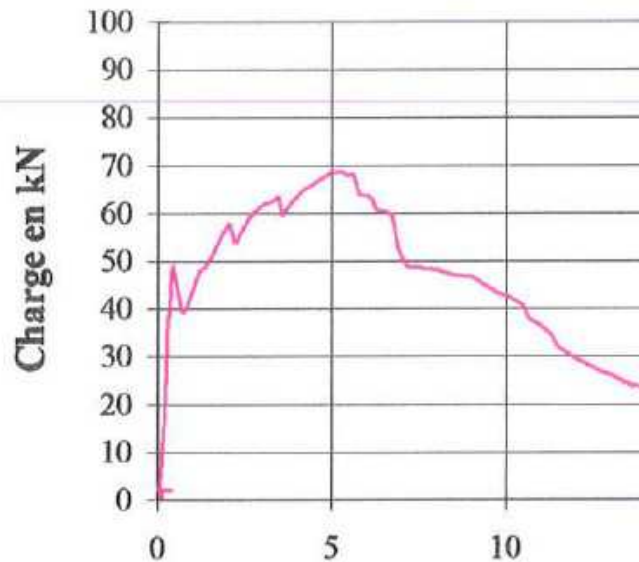
C'est un essai développé initialement par la SNCF, puis normalisé au niveau européen en 2006, qui permet de comparer les bétons projetés renforcés de fibres et de treillis soudés ainsi que différents types et dosages de fibres, « à condition que le mode de rupture soit le même », précise la norme EN 14487-1.



*Exemple de courbe obtenue
à 28 j avec un treillis soudé
($E = 792 J$)*

Capacité d'absorption d'énergie selon la norme NF EN 14488-5

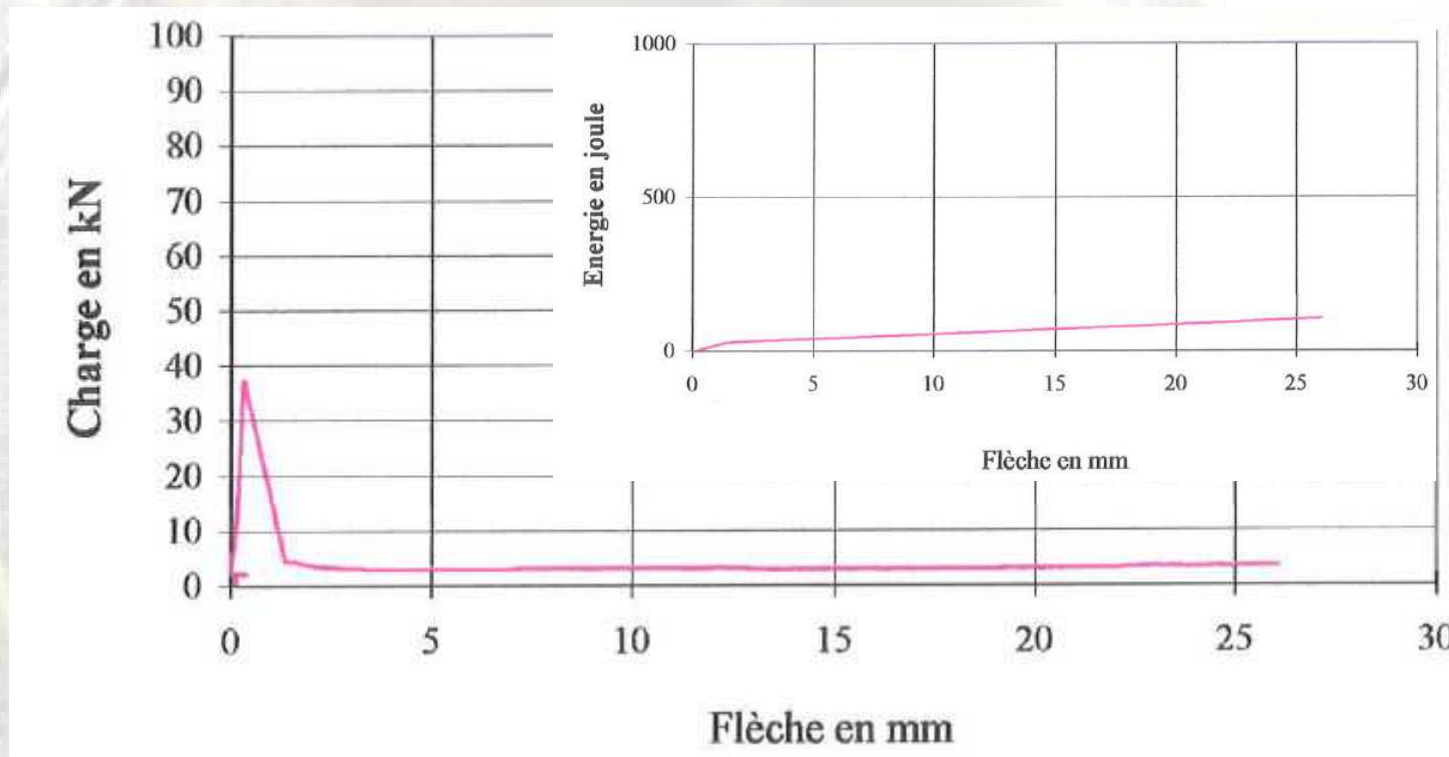
C'est un essai développé initialement par la SNCF, qui permet de comparer les bétons projetés renforcés de fibres et de treillis soudés ainsi que différents types et dosages de fibres, « à condition que le mode de rupture soit le même », précise la norme EN 14487-1.



Capacité d'absorption d'énergie selon la norme **NF EN 14488-5**

béton non fibré – rupture différente !

Toujours avec la même matrice

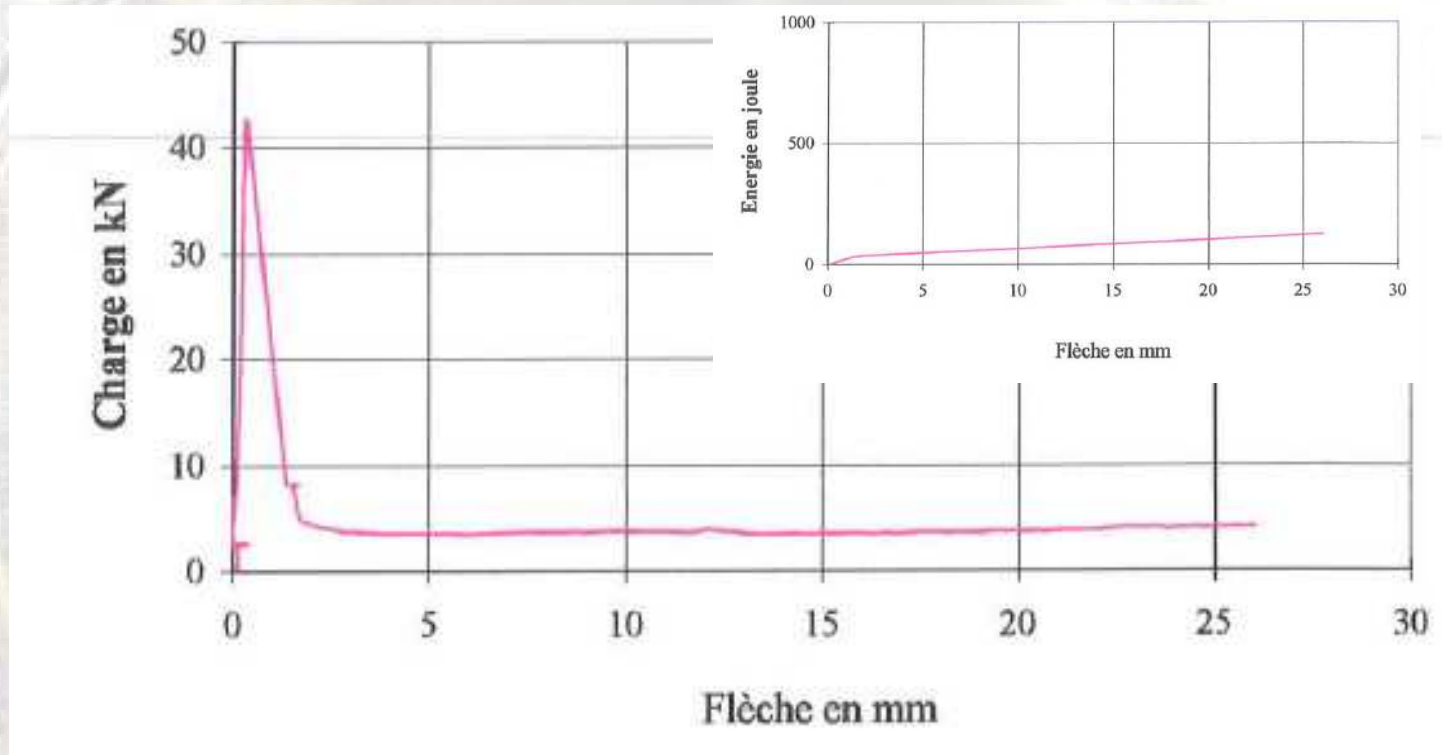


103 J à 7 jours ($F_{max} = 37,5$ kN)...

Capacité d'absorption d'énergie selon la norme **NF EN 14488-5**

béton non fibré – rupture différente !

Toujours avec la même matrice

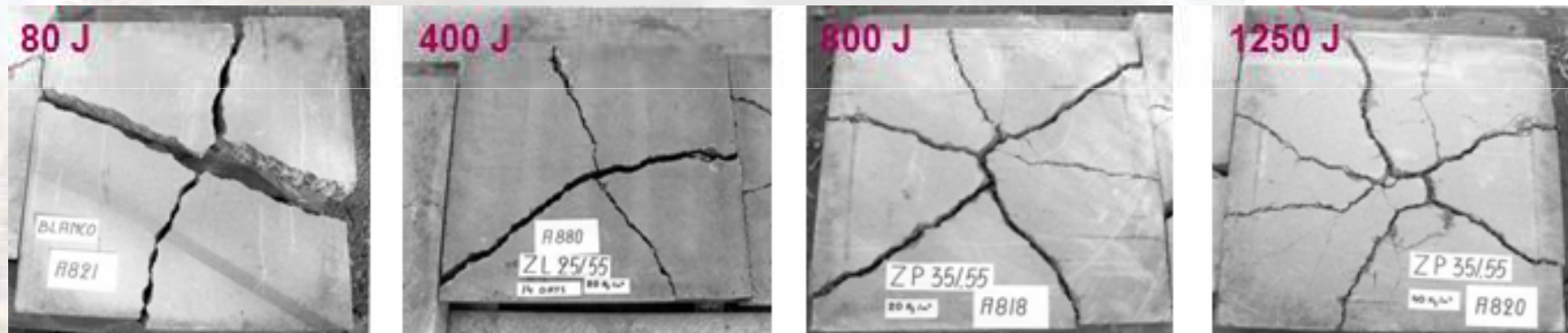


103 J à 7 jours ($F_{max} = 37,5$ kN)...

122 J à 28 jours ($F_{max} = 42,8$ kN)...

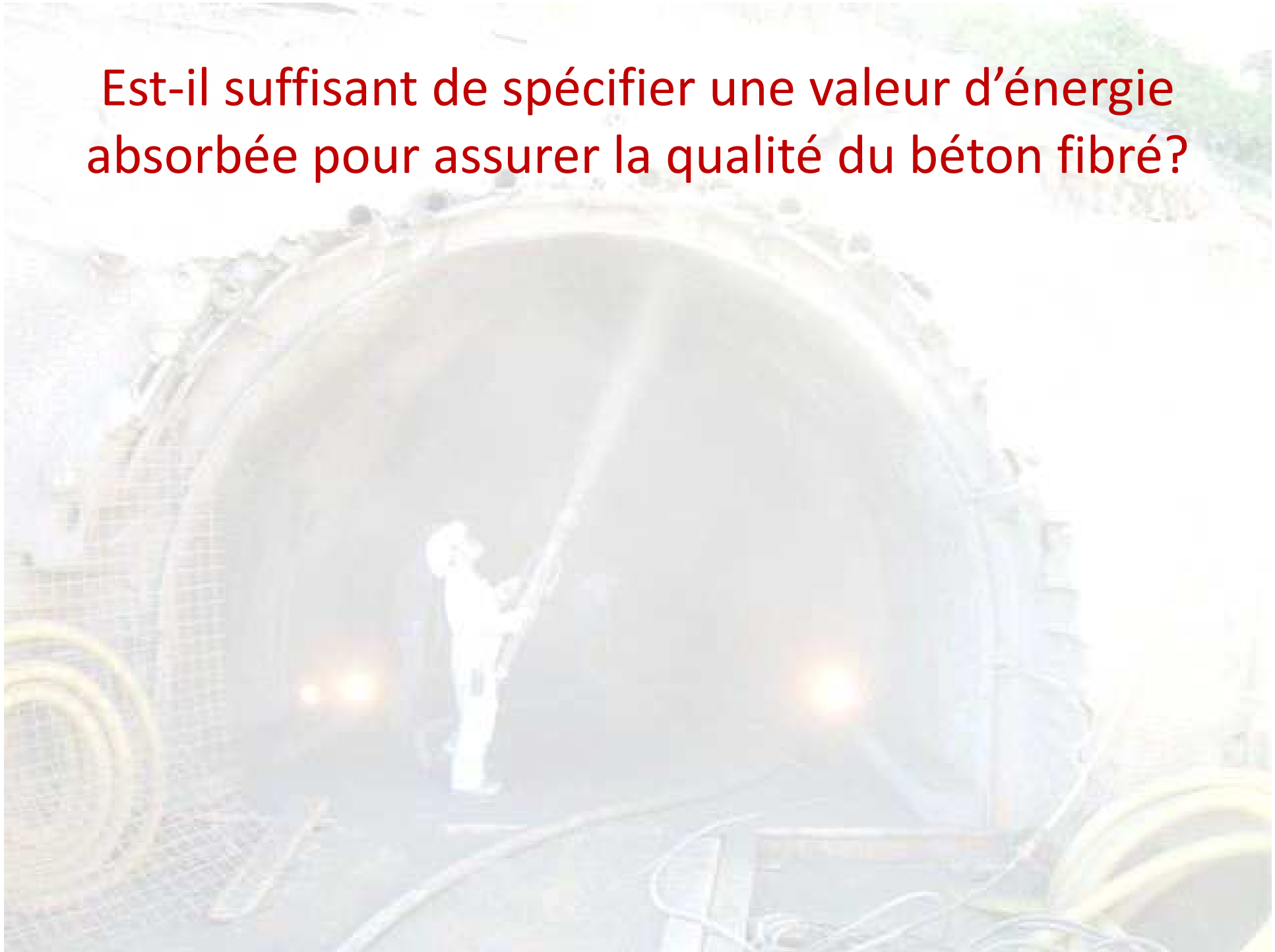
Capacité d'absorption d'énergie selon la norme NF EN 14488-5

Cet essai permet de vérifier la multi-fissuration du matériau fibré (fissures plus nombreuses et moins larges qu'avec un béton non fibré).



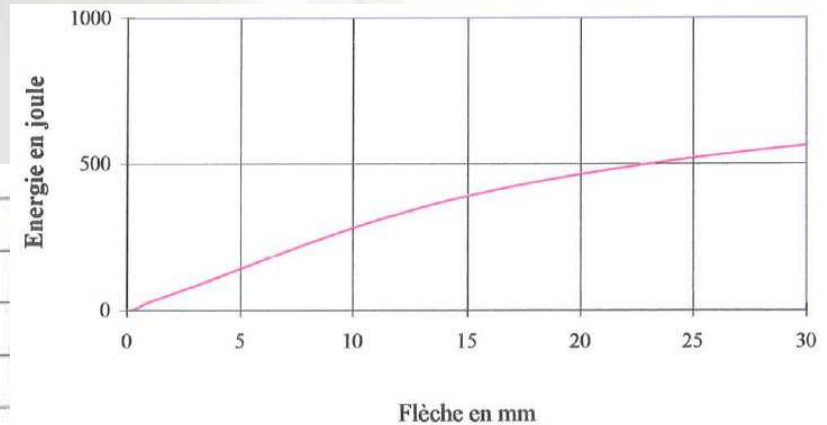
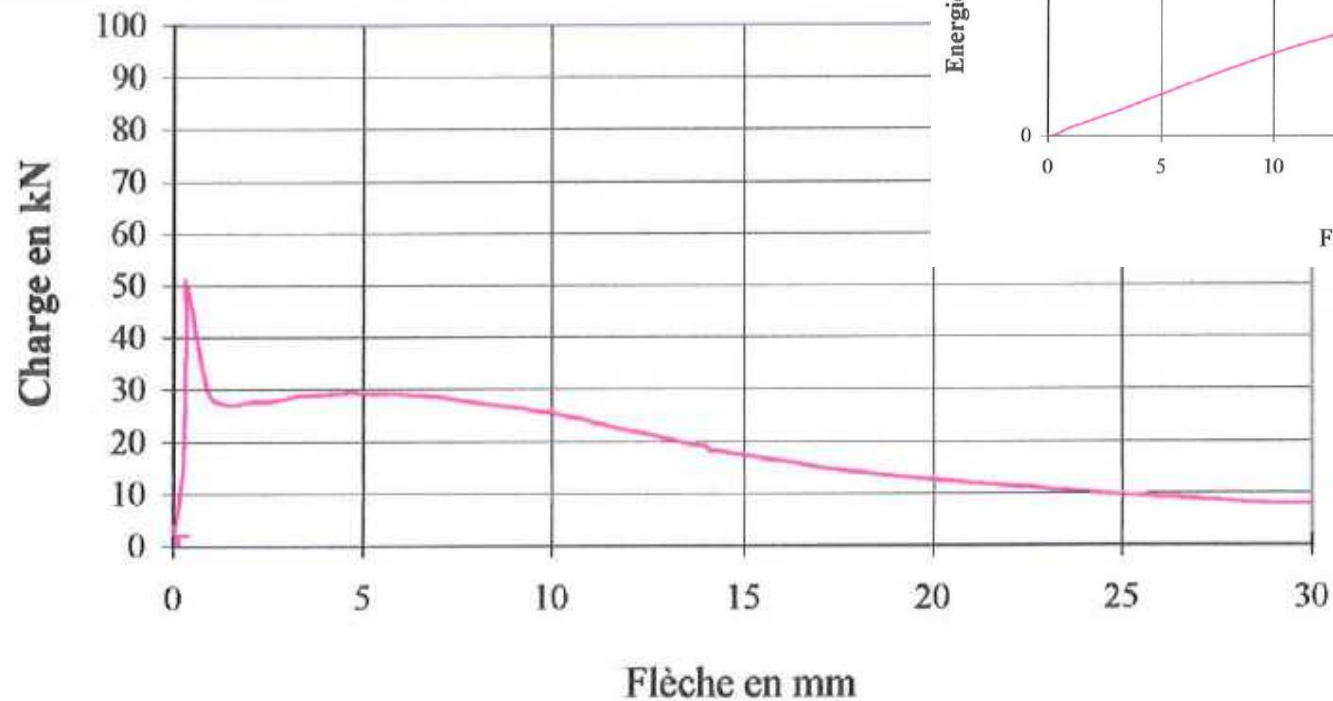
A noter : on peut parfois obtenir des valeurs élevées d'énergie avec un nombre de fissures plus réduit.

Est-il suffisant de spécifier une valeur d'énergie absorbée pour assurer la qualité du béton fibré?

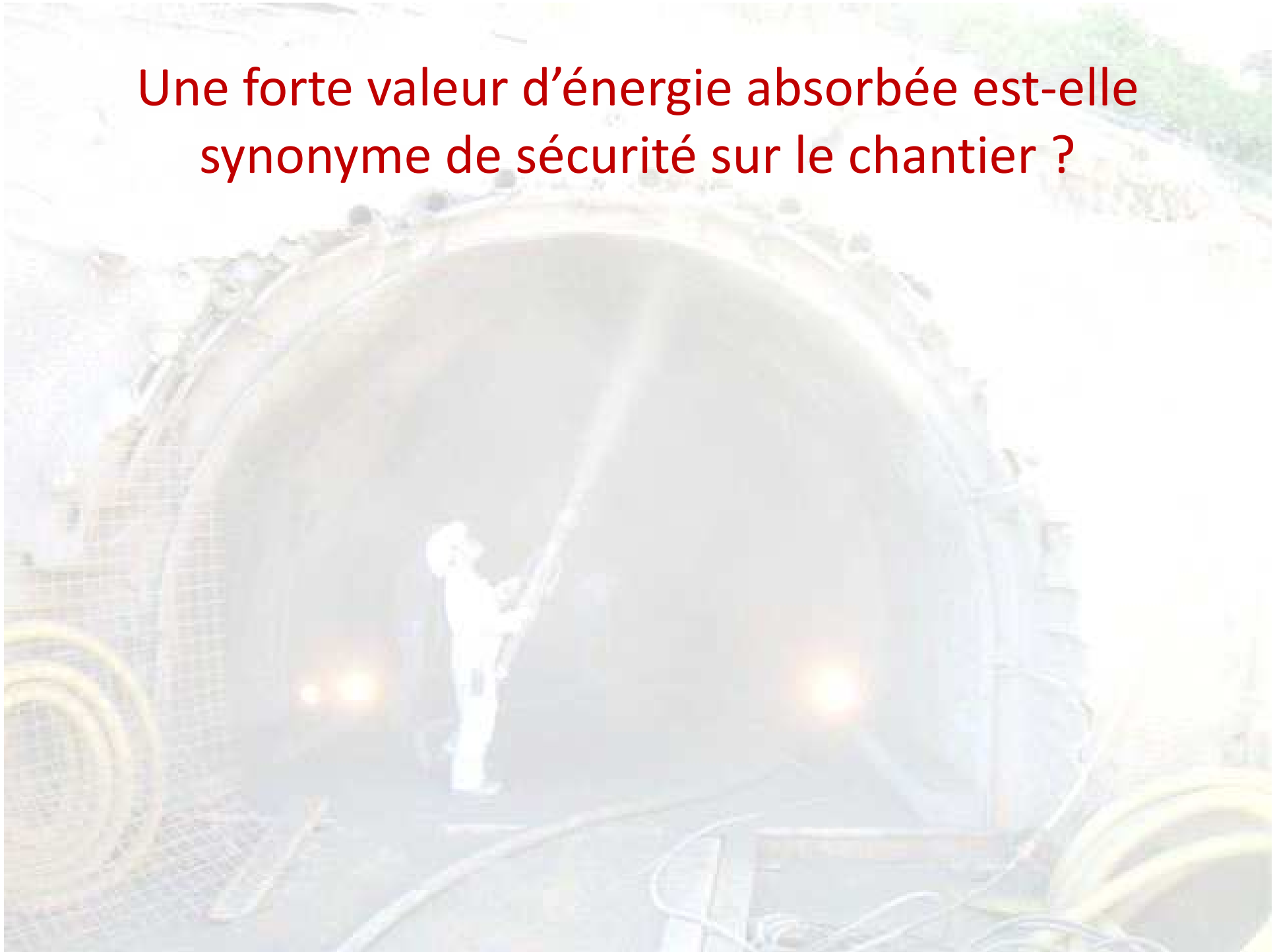


Est-il suffisant de spécifier une valeur d'énergie absorbée pour assurer la qualité du béton fibré?

On peut avoir des bétons qui satisfont le critères d'énergie classique de 500 J minimum mais qu'on souhaite tout de même éviter.

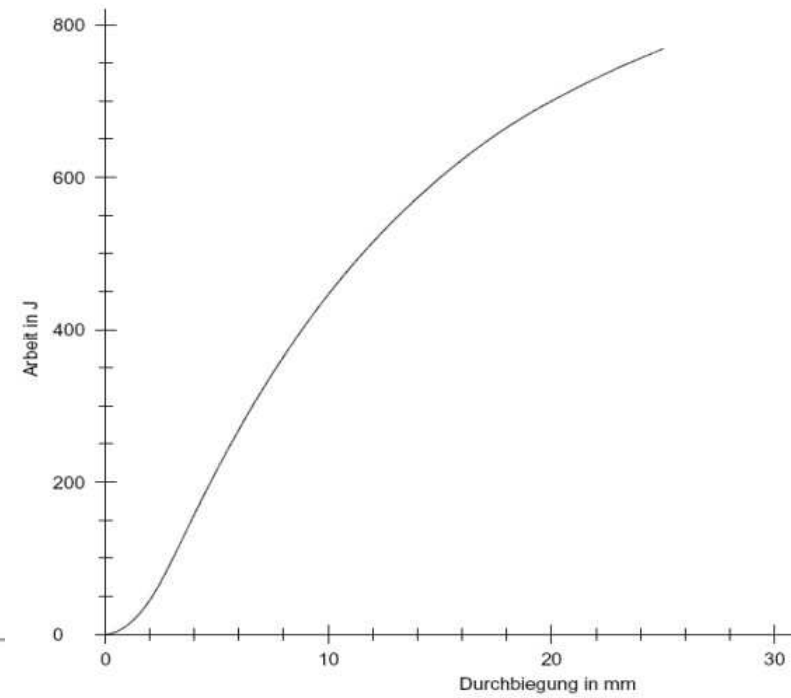
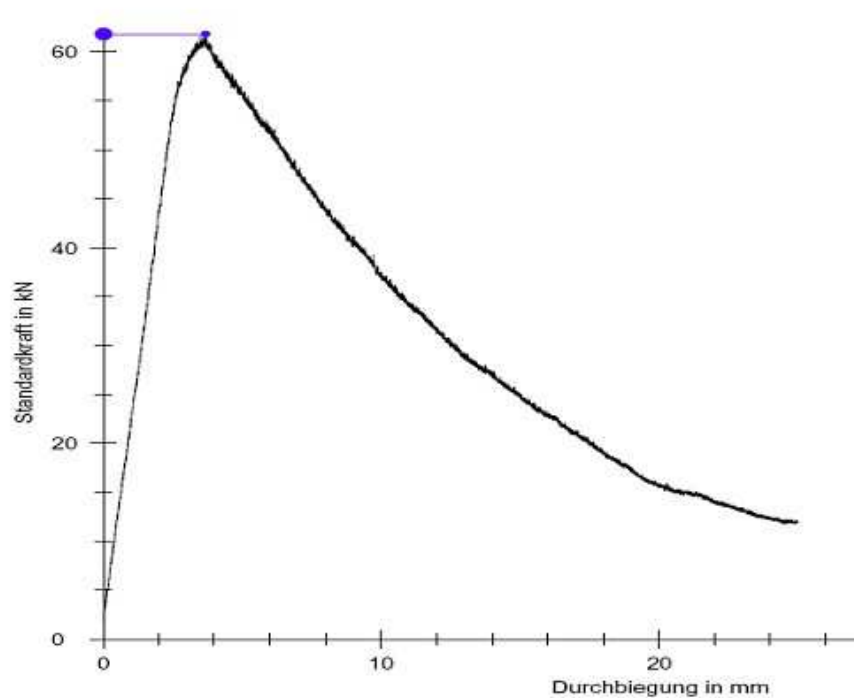


Une forte valeur d'énergie absorbée est-elle
synonyme de sécurité sur le chantier ?



Une forte valeur d'énergie absorbée est-elle synonyme de sécurité sur le chantier ?

Si la matrice béton est très résistante, l'énergie peut être élevée malgré une chute rapide de la force après la phase élastique.



Pour mieux évaluer la qualité des bétons projetés, l'ASQUAPRO propose de nouvelles spécifications

L'essai de base reste l'essai d'absorption d'énergie NF EN 14488-5

- Fabriquer 4 dalles et non 3 par essais pour s'assurer d'avoir des moyennes sur au moins 3 valeurs.
- Respecter strictement l'épaisseur des dalles (100 mm, +5, -0).

Pour cela, le contrôle externe, ou à défaut le responsable du contrôle interne, doit être présent lors de la réalisation des caisses.

Si l'épaisseur dépasse 10,5 cm, les dalles sont refusées.

Fabrication des caisses

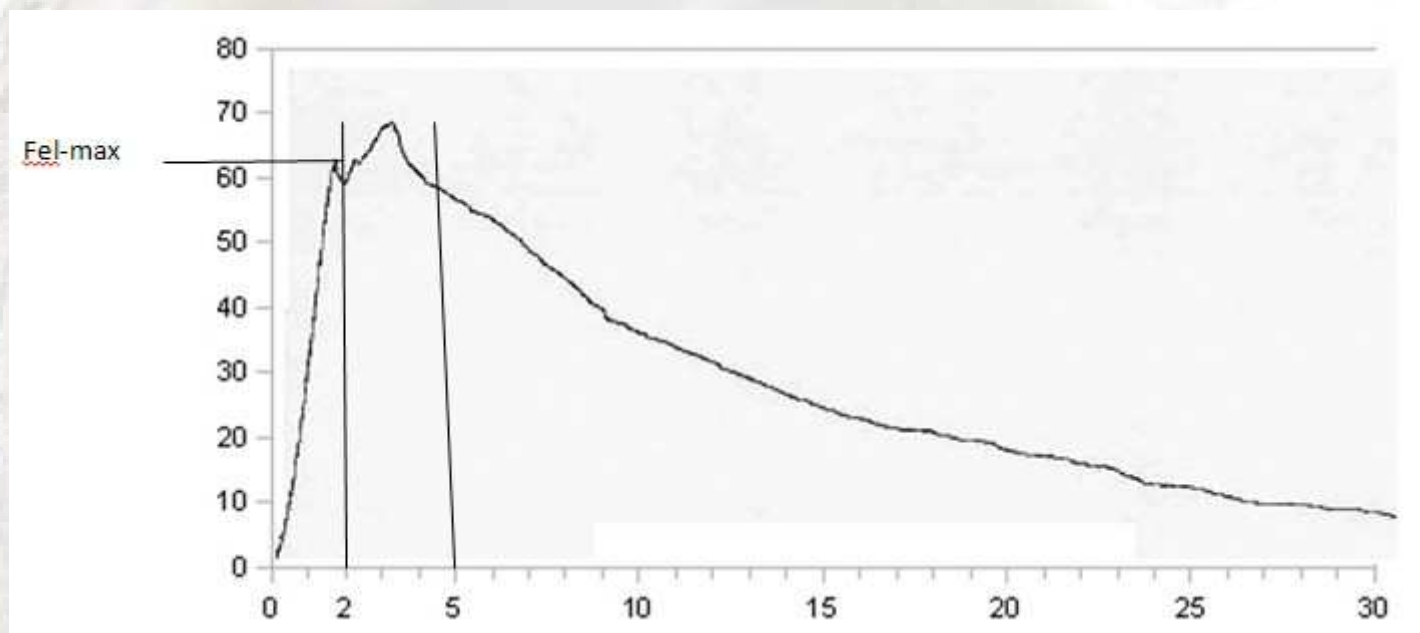


Pour mieux évaluer la qualité des bétons projetés, l'ASQUAPRO propose de nouvelles spécifications

- Les dalles doivent rester entières après l'essai.
- Les rapports d'essais doivent comporter, outre les courbes charge-flèche et les courbes d'énergie, les **photos** des faces supérieures et inférieures de chaque dalle après essai, après une éventuelle pulvérisation d'eau pour mieux mettre en évidence la multi-fissuration.

Pour mieux évaluer la qualité des bétons projetés, l'ASQUAPRO propose de nouvelles spécifications

Pour chaque courbe charge-flèche obtenue suivant l'essai NF EN 14488-5 :

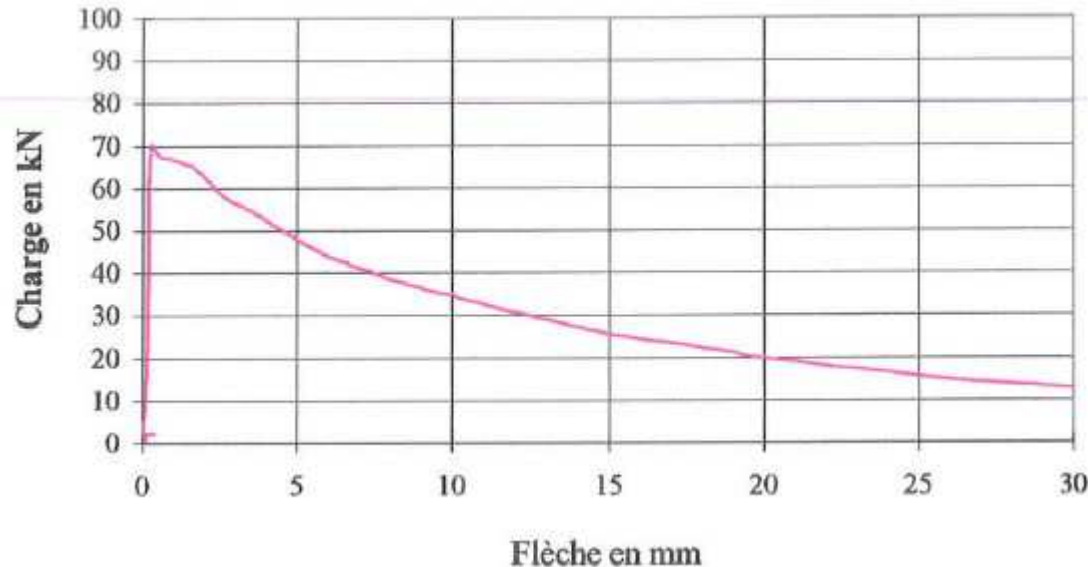


F_{el-max} doit être obtenue pour une flèche inférieure à 2 mm

$F_{post\ fiss}$ mini entre 0 et 5mm $\geq 0,7 F_{el-max}$

Pourquoi ces valeurs ?

- Un retour d'expérience sur plus d'un an d'essai
- Des valeurs peut-être un peu trop exigeantes, à confronter aux résultats de chantier et à valider définitivement.



Exemple de béton ne satisfaisant pas au critère (VS)

Essai à 28 jours

CALCUL DES FORCES ET DES ENERGIES

| Déplacement (mm) | Force (kN) | Energie (joule) |
|--------------------|--------------|-------------------|
| 5 | 47.9 | 287 |
| 15 | 25.6 | 638 |
| 25 | 17 | 815 |

Epaisseur de la dalle (en cm) : 10.0

Affaire : Gare de triage

Type de Béton: BP RIG

Centrale: T-MIX

Référence: Caisse 5

Force maximum (en kN) : 70.7



Place aux questions