

Chapitre 3 : Notions de rhéologie

I. Introduction :

La rhéologie, mot inventé en 1929 par Bingham, est généralement définie comme « l'étude de la déformation de la matière ».

En se rapportant aux racines grecques du mot, le verbe « rhéin » signifie s'écouler et le mot « lógos » peut être traduit par étude ; c'est donc la science qui étudie l'écoulement et les déformations de la matière et plus généralement la viscosité, l'élasticité et la plasticité des matériaux sous l'action de contraintes. D'une façon générale, le but principal de la rhéologie est d'étudier la réponse différente que chaque fluide oppose aux sollicitations mécaniques qu'il subit.

Pour le béton, la rhéologie désigne généralement l'étude de l'ouvrabilité de ce matériau c'est-à-dire à l'état frais où il est considéré comme un fluide.

Les principaux paramètres rhéologiques dans le domaine du béton sont: la contrainte de cisaillement « τ », le seuil de cisaillement « τ_0 », la vitesse de cisaillement « $\dot{\gamma}$ », le seuil au repos ou seuil de rigidité : « τ_{0r} » et la viscosité plastique et apparente « μ ».

L'obtention de la contrainte de cisaillement τ et de la vitesse de cisaillement ou taux de déformation $\dot{\gamma}$ dans ces géométries permet d'établir des rhéogrammes ou courbes d'écoulement. Ces dernières relient généralement les contraintes de cisaillement aux vitesses de cisaillement et permettent de déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement du matériau.

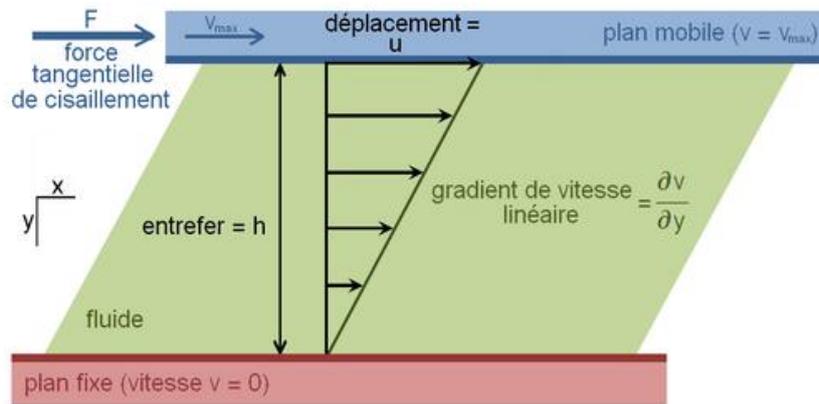
II. La contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement τ est la variation de la force de cisaillement par rapport à la surface cisailée, comme définie par l'équation:

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

III. Le taux de cisaillement :

Lorsque le fluide s'écoule en régime laminaire, la répartition des vitesses dans l'entrefer suit une loi linéaire entre deux plans parallèles, dont l'un se déplace à une vitesse constante et l'autre est stationnaire. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans.



Le déplacement (γ) entre les deux plans est défini comme la déformation :

$$\gamma = \frac{dx}{dy}$$

Le taux de cisaillement ou la vitesse de déformation ($\dot{\gamma}$) [1/s] est définie comme la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent définie comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \frac{d}{dy} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dy}$$

IV. La viscosité :

Une déformation macroscopique d'un fluide nécessite lors du déplacement de ses éléments de vaincre des résistances internes locales. Ces résistances internes, appelées aussi dissipations visqueuses, sont engendrées par le mouvement du liquide interstitiel dans la porosité d'un système granulaire, par frottement. Ces dissipations d'énergie sont traduites par la viscosité apparente de la suspension. En clair, la viscosité est une grandeur qui traduit la résistance au cisaillement ou encore la mesure du frottement du fluide. Plus la viscosité d'un fluide s'amplifie, plus sa capacité à s'opposer au mouvement est grande.

Pour un fluide idéal ou Newtonien, la viscosité dynamique (μ) [Pa.s] se définit comme le coefficient de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement (τ) qui est appliquée à une couche fluide et le gradient de vitesse ($\dot{\gamma}$) perpendiculaire au plan de cisaillement.

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

Dans ce cas, la viscosité est une caractéristique du matériau, indépendante de la vitesse de cisaillement. Elle représente la résistance que le matériau oppose à l'augmentation de la vitesse de cisaillement.

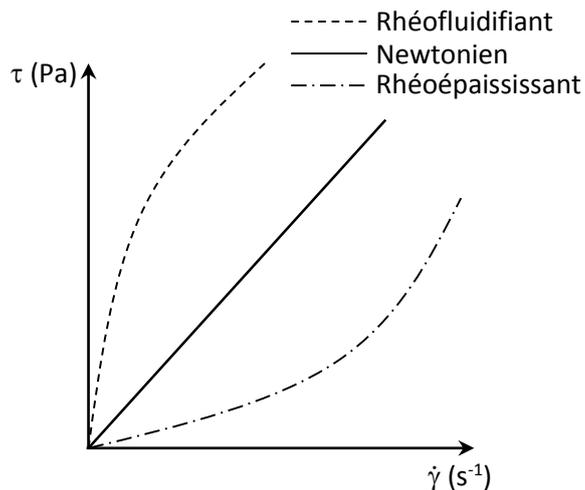
Lorsque l'écoulement d'une substance est non linéaire, la viscosité évolue avec la vitesse de cisaillement. C'est le cas de l'écoulement rhéofluidifiant (pseudo-plastique), pour lequel la viscosité apparente diminue lorsque la vitesse de cisaillement augmente, et de l'écoulement rhéoépaississant (dilatant), où au contraire, la viscosité apparente augmente avec la vitesse de cisaillement.

Ces deux types de fluide sont décrits par la loi de puissance suivante :

$$\tau = k \dot{\gamma}^n$$

Où k : facteur de consistance, n : l'index de consistance,

La distinction entre le comportement rhéofluidifiant et rhéoépaississant se fait par l'index de consistance « n ». Pour $n < 1$, le comportement est rhéofluidifiant, par contre pour $n > 1$, le comportement est de type rhéoépaississant. Si $n = 1$, le comportement linéaire obtenu est newtonien.



Comportement parfaitement visqueux

(la courbe d'écoulement passe par l'origine)

On distingue aussi la viscosité cinématique ν [m^2/s] qui s'obtient en divisant la viscosité dynamique par la masse volumique :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.6)$$

D'une façon générale, l'augmentation de la viscosité améliore la stabilité du mélange et réduit significativement la ségrégation dynamique.

VI. Le seuil de cisaillement

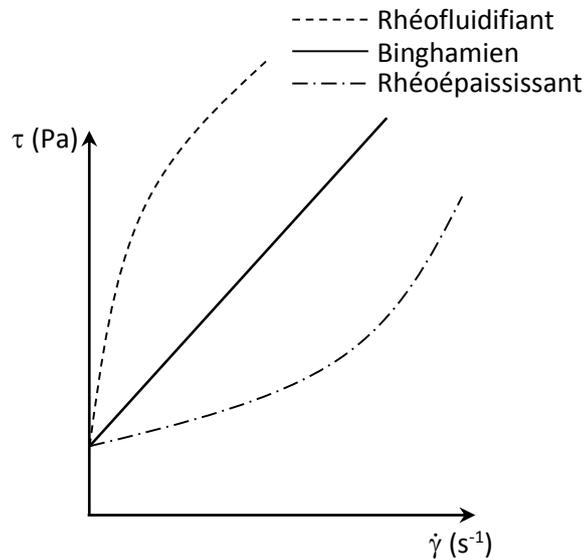
Dans la littérature, plusieurs appellations peuvent être utilisés pour désigner le seuil de cisaillement parmi lesquelles : le seuil de cisaillement, le seuil de plasticité, le seuil de rigidité, la contrainte seuil ou encore le point de fluage.

Le seuil de cisaillement (τ_0) [Pa] est la contrainte de cisaillement minimale nécessaire pour initier l'écoulement d'un matériau ou le stopper. En dessous du seuil de cisaillement, le matériau se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). Par contre, dès que la contrainte de cisaillement dépasse le seuil d'écoulement, le matériau se comporte comme un fluide visqueux et s'écoule macroscopiquement d'une façon irréversible. Ceci peut être exprimé en ajoutant (τ_0) au modèle newtonien ce qui donne le modèle de Bingham ou en ajoutant (τ_0) à la loi de puissance exprimant ainsi le modèle de Herschel Bulkley.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1.7)$$

Ou

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (1.8)$$



Comportement viscoplastique (la courbe d'écoulement ne passe pas par l'origine)

Le seuil de cisaillement est une manifestation soit des interactions particulières électrostatiques du type Van der Waals entre grains colloïdaux de tailles de l'ordre du micromètre, soit du frottement solide entre grains de tailles de l'ordre du millimètre .

Il existe deux notions de seuil d'écoulement ayant des notions physiques très différentes:

- Le seuil de cisaillement statique « τ_s » ou seuil de mise en écoulement correspond à la contrainte de cisaillement minimale nécessaire pour déclencher l'écoulement du matériau qui caractérise le passage de l'état solide à l'état viscoplastique. La mesure du seuil de cisaillement statique est faite sur une suspension totalement structurée et donc vierge de toute sollicitation par application d'une contrainte croissante jusqu'à la valeur déclenchant l'écoulement du matériau. Le seuil de cisaillement est déterminé par l'équation :

$$\tau_0 = \frac{2M_0}{\pi D^3} \left(\frac{h}{D} + \frac{1}{6} \right)^{-1}$$

Où h et D représentent respectivement la hauteur et le diamètre de la vane, M_0 : le couple exercé.

- Le seuil de cisaillement dynamique « τ_0 » est la contrainte minimale pour stopper l'écoulement. Sa valeur est obtenue par extrapolation de la partie linéaire de la courbe d'écoulement pour une vitesse de cisaillement nulle.

La méthode de mesure consiste à déstructurer complètement la suspension testée en appliquant un gradient de vitesse suffisamment élevé, d'établir ensuite la courbe d'écoulement en faisant varier le gradient de vitesse, et de déduire la valeur de la contrainte à une valeur nulle du gradient de vitesse, à partir de l'équation du modèle.

La valeur du seuil de cisaillement statique est supérieure à celle du seuil de cisaillement dynamique à cause de l'état de déstructuration de la matière cisailée. Ces deux paramètres sont reliés par la relation suivante :

$$\tau_s = \tau_0 + \tau_{ad}$$

Où τ_{ad} est la résistance additionnelle causée par la variation de l'empilement des particules. La différence entre ces deux seuils d'écoulement dépend considérablement du béton confectionné.

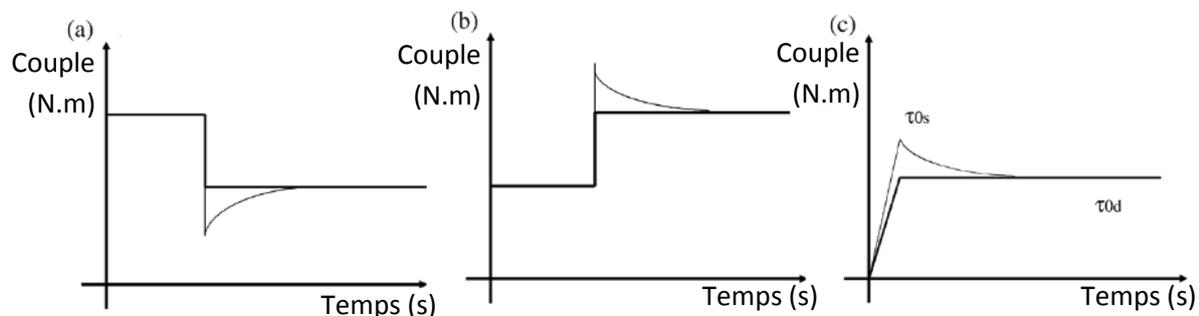
Sur le plan technique, le seuil statique intervient dans les problèmes de coulage multicouches dans les dalles et de redémarrage de la pompe après un arrêt prolongé. Il permet aussi de réduire les pressions latérales et la ségrégation statique des BAP dans les coffrages de grande hauteur. Par contre, le seuil dynamique peut être à l'origine de l'arrêt de l'écoulement dans les coffrages.

VII. La thixotropie :

Tant que l'état d'écoulement est maintenu en équilibre, le comportement du béton frais peut être décrit par le modèle de Bingham ou d'Hershel Bulkley. Cependant, entre deux états d'équilibre successifs, il y a un régime intermédiaire, pendant lequel les modèles cités ne sont pas suffisants pour décrire le comportement observé du béton à cause du phénomène de thixotropie.

La thixotropie est une variation réversible de la viscosité lorsqu'un fluide est soumis à une sollicitation. La viscosité des fluides diminue d'abord avec le temps lorsqu'une contrainte constante leur est appliquée. Cependant, dès que la contrainte appliquée est annulée, la viscosité du matériau augmente de nouveau jusqu'à atteindre sa valeur d'origine au bout d'un certain temps. Ce comportement s'interprète par des changements de structures internes du fluide voir une destruction progressive de cette microstructure. La modification résulte alors de la compétition entre les forces hydrodynamiques (qui détruisent la microstructure) et les forces de cohésion et le mouvement brownien (qui reforment la microstructure) .

Cette thixotropie se manifeste toujours par un retard dans la réponse, et qui peut être corrélé avec la contrainte de cisaillement appliquée et l'historicité récente de l'écoulement du matériau.



Exemples des comportements d'écoulement transitoire.

(a) diminution de la vitesse de rotation; (b) augmentation de la vitesse de rotation ;
 (c) augmentation de la vitesse de rotation après une période de repos (Roussel, 2006).

