

I.1 DEFINITIONS

I.1.1 Propriétés d'un coulis hydraulique :

De manière générale, un coulis peut être caractérisé par quatre propriétés essentielles :

- le pouvoir de pénétration.
- la stabilité.
- les caractéristiques mécaniques.
- la durabilité.

Dans le domaine particulier de la réparation des monuments historiques, il convient de prendre en compte les conséquences esthétiques entraînées par l'utilisation de coulis.

I.1.1.1 Pouvoir de pénétration

La première condition que doit satisfaire un coulis d'injection porte tout naturellement sur son aptitude à pénétrer dans le milieu à injecter. Deux paramètres prépondérants vont influencer la pénétrabilité d'un coulis :

- la granularité de sa phase solide.
- ses caractéristiques rhéologiques (fluidité).

Pour qu'une suspension granulaire plus ou moins concentrée, comme l'est un coulis hydraulique puisse être injectée, il est en effet tout d'abord indispensable que la granularité de sa phase solide soit compatible avec les dimensions minimales des fissures ou des cavités de la structure à réparer.

Les caractéristiques d'injectabilité sont également fortement conditionnées par les propriétés rhéologiques du coulis. La fluidité doit en particulier être telle que l'injection puisse être réalisée sous faible pression de telle sorte que l'on ne dégrade pas davantage la structure à réparer.

I.1.1.2 Stabilité

La stabilité traduit l'aptitude d'un coulis à garder son homogénéité pendant la durée de l'injection et jusqu'à la fin de la prise.

Lorsque l'on remplit un récipient avec un coulis les grains de la phase solide, plus dense que l'eau ont tendance à sédimenter. Outre cet effet de la pesanteur, les particules solides sont également soumises à des forces d'origines diverses. Notons en particulier les forces de frottement et les forces d'origine électrostatiques. Cet ensemble de sollicitations va entraîner le coulis vers l'un des trois états d'équilibre schématisés par la figure 1.1.

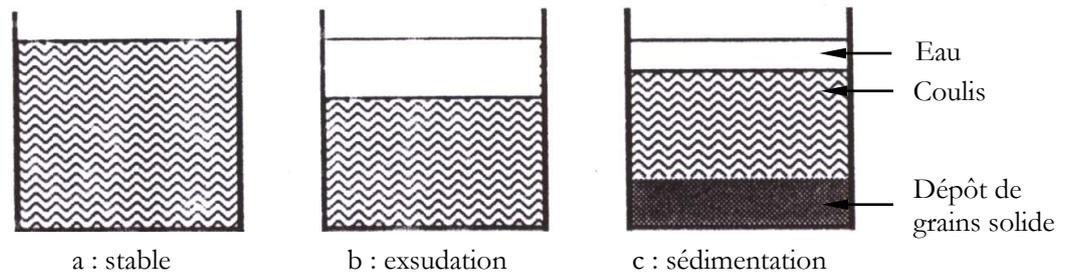


Figure 1.1 : Etats d'équilibre d'un coulis

Dans le cas de la figure (a), le coulis reste homogène. Nous dirons alors qu'il est parfaitement stable. Dans le cas (b), le contenu du récipient est composé de deux phases distinctes. La suspension, restée homogène, est ici surmontée d'une couche d'eau exsudée. Cette couche représente la quantité d'eau qui n'a pu être retenue par la suspension. Cette eau excédentaire ne peut avoir que des conséquences négatives sur le maintien de l'homogénéité du coulis en cours d'utilisation. Une formulation de coulis ne sera ainsi considérée comme stable que si la quantité d'eau exsudée reste inférieure à une valeur limite. Cette valeur limite dépend du domaine d'application de l'injection. A titre d'exemple, les normes françaises NF P-18 359 portant sur les coulis d'injection pour précontrainte prévoient que la quantité d'eau ressuée ne doit pas représenter plus de 2% du volume total du coulis. Dans le cas des monuments en maçonnerie, l'injection est réalisée dans un milieu constitué de matériau dont la porosité peut être importante, cette porosité entraîne l'absorption d'une quantité non négligeable de l'eau du coulis. Ces observations vont conduire à considérer comme tolérable une valeur du taux d'exsudation de l'ordre de 5% [A.E. Miltiadou., 1990]

Dans le cas schématisé par la figure (c), la suspension n'est pas homogène. Nous pouvons constater ici dans le fond du récipient un dépôt constitué par les grains les plus lourds de la phase solide. Cette sédimentation, survenant le plus souvent de manière relativement rapide, n'est pas acceptable pour un coulis d'injection.

Un coulis est ainsi généralement dit stable s'il présente une exsudation faible et une absence de sédimentation.

1.1.1.3 Injectabilité

Un coulis hydraulique est dit « injectable » dans des fissures ou des cavités s'il possède un pouvoir de pénétration satisfaisant et s'il est stable.

1.1.1.4 Caractéristiques mécaniques

L'objectif essentiel d'une injection de coulis est le plus souvent la restauration, voir l'amélioration de la capacité d'une structure à résister aux sollicitations qu'elle reçoit. L'aptitude du coulis à renforcer les caractéristiques mécaniques du milieu traité constitue ainsi un point particulièrement important. Elle sera conditionnée par les caractéristiques mécaniques intrinsèques du coulis et par ses propriétés d'adhérence au milieu injecté.

1.1.1.5 Durabilité

L'évolution à terme des produits injectés et leur résistance aux milieux agressifs conditionne la pérennité de la réparation effectuée. On conçoit facilement que cette propriété doit être étudiée avec un soin tout particulier dans les cas où la restauration porte sur des monuments historiques.

I.2 COMPOSITION ET NATURE DES COULIS HYDRAULIQUES

I.2.1 Description des principaux constituants

Généralement, on appelle coulis hydraulique les suspensions de ciment dans l'eau. Les propriétés de ces coulis peuvent être modifiées par l'adjonction d'éléments divers et d'adjuvants. Nous allons, ci-dessous, décrire de manière schématique la nature et le rôle de ces différents constituants.

I.2.1.1 Ciments

Le ciment est le constituant de base. Par ses propriétés liantes, c'est lui qui donnera au coulis sa résistance et par conséquent son aptitude à réparer une structure dégradée.

Les ciments sont généralement constitués par du clinker broyé (ciment Portland) ou par un mélange de clinker et des constituants secondaires comme des laitiers de haut-fourneau, des pouzzolanes ou des cendres volantes. Les clinkers se composent essentiellement de silicate tricalcique (C_3S), de silicate bicalcique (C_2S), d'aluminate tricalcique (C_3A) et d'alumino-ferrite (C_4AF). La norme française NF P15301 définit différentes catégories de ciment, une catégorie étant caractérisée par les résistances mécaniques atteintes à des échéances déterminées.

Dans les catégories, nous pouvons en particulier distinguer :

- les ciments Portland artificiels contenant au moins 97% de clinker notés CPA,
- les ciments Portland à constituants secondaires contenant plus de 65% de clinker notés CPJ,
- les ciments à forte teneur en laitier (moins de 20% de clinker, plus de 80% de laitier) notés CLK.

Les classes de résistance sont définies dans une fourchette faisant intervenir la résistance à la compression minimale et maximale à 28 jours. Les dénominations 35, 45, 55 font ainsi référence au milieu de la fourchette ± 10 à 28 jours exprimée en MPa.

Le type de ciment utilisé pour un coulis d'injection est choisi en fonction de plusieurs critères parmi lesquels nous pouvons citer :

- la granularité,
- la résistance aux milieux agressifs éventuellement rencontrés sur le site à réparer.
- les caractéristiques mécaniques espérées.
- l'aptitude à la prise sous faible concentration.

I.2.1.2 Additions diverses

Des éléments de nature diverse peuvent être utilisés en addition du ciment pour constituer la phase solide d'un coulis hydraulique. Réduction des coûts et amélioration des caractéristiques des coulis constituent les deux principales motivations pour l'utilisation de tels éléments additifs. Parmi les plus employés, nous pouvons citer :

- Les pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux qui ne possèdent pas en eux même de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [Lea F.M., 1956]. Cette réaction pouzzolanique confère donc à ces matériaux un rôle actif entraînant un certain nombre de conséquences favorables sur le comportement des coulis. D'un point de vue mécanique, si le remplacement d'une partie du ciment par un matériau pouzzolanique réduit les résistances à court terme, on note par contre généralement une augmentation des résistances à long terme, [Kalogeras A.N. et col., 1958], [Fticos Ch., 1977], [Massazza, 1980], [Furlan V. et col., 1982]. Par ailleurs, l'absorption de la chaux libérée par l'hydratation du ciment donne au matériau durci une meilleure résistance à l'action des eaux pures et des eaux agressives [Nicolaidès N., 1958], [Venuat M., 1984]. Les coulis hydrauliques constitués par une association ciment-

pouzzolanes pourront ainsi avoir de meilleures propriétés de durabilité que les coulis de ciment pur [Bowen M., 1981].

Les pouzzolanes peuvent également avoir un effet bénéfique sur le comportement des coulis à l'état liquide. Leur réactivité étant d'autant plus importante qu'elles sont finement divisées [Kalogeris A.N. et col., 1958]. Cette finesse va entraîner une augmentation de la cohésion du coulis par conséquent une amélioration de sa stabilité.

- Les fumées de silice

Les fumées de silice sont des sous-produits de l'industrie du silicium et de ses alliages récupérés dans les fumées produites par les fours électriques de fabrication de ces alliages. Leur composition dépend de la nature de l'alliage produit et de son procédé d'élaboration. Elle est cependant caractérisée par une forte teneur en dioxyde de silicium (SiO_2) généralement comprise entre 85 et 98% [Sellevold E.J., 1987].

Ce matériau est également caractérisé par l'extrême finesse de ses particules (diamètre moyen = $0,2 \mu\text{m}$) dont la forme est presque parfaitement sphérique.

Les surfaces spécifiques mesurées par la méthode B.E.T. s'échelonnent entre 13 et $30 \text{ m}^2/\text{g}$ [Malhotra V.M. et col., 1987]. La masse spécifique est celle de la silice amorphe soit environ $2,2 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Outre leur réactivité pouzzolanique très élevée, ces matériaux doivent également leurs performances à leurs particularités granulaires.

Quelques auteurs [Aitcin P.C. et col., 1984], [Domone P.L. et col., 1986], [Ranisch E.H. et col., 1989] ont également étudié les effets d'une addition de fumée de silice sur les caractéristiques des coulis d'injection. Ils montrent en particulier l'effet bénéfique de cet ajout sur la stabilité des coulis et sur les résistances mécaniques obtenues. Paillère et col. [1986] montrent les perspectives offertes par ce matériau pour améliorer l'injectabilité des coulis hydrauliques dans les fines fissures.

1.2.1.3 La chaux aérienne

La chaux possède des propriétés qu'il peut être intéressant de prendre en compte pour certaines applications particulières. Sa finesse (surface spécifique Blaine comprise entre $0,8$ et $1,2 \text{ m}^2/\text{g}$) peut en particulier être mise à profit pour diminuer l'exsudation et la sédimentation des coulis de ciment [Duriez M. et col., 1961], [Vénuat M., 1976].

Par ailleurs, dans le cas de réparation de monuments historiques, sa couleur blanchâtre permet l'obtention de coulis dont la teinte peut être adaptée aux contraintes esthétiques imposées. La contrainte de compatibilité aux mortiers anciens (dont le liant est composé principalement de chaux) est également écartée.

1.2.1.4 Adjuvants

Les adjuvants sont utilisés (dans le cas des coulis hydrauliques) pour améliorer les caractéristiques d'injectabilité. Leur choix sera ainsi essentiellement conditionné par leur aptitude à :

- défloculer les fines particules de la phase solide du coulis,
- améliorer les caractéristiques rhéologiques du coulis (fluidité).

Parmi les adjuvants classiques actuels, ceux communément appelés « fluidifiants » ou « super plastifiants » semblent correspondre le mieux à ces exigences [Malhotra V.M., 1979], [Paillère A.M., 1984].

Les fluidifiants du commerce sont élaborés à partir de résines de synthèse à masses moléculaires élevées. Celles ci peuvent dans la plupart des cas se ranger dans l'une des deux catégories suivantes :

- mélamine sulfonée formaldéhyde,
- naphthalène sulfoné formaldéhyde.

1.2.1.5 L'eau

Ce composant nécessaire à la fabrication des coulis doit être propre, sans impuretés (eau potable) ou autres produits nuisibles aux effets des liants. L'eau de mer, ou l'eau pure et celle contenant des matières chimiques ou organiques sont à exclure.

1.2.2 Nature de la suspension d'un coulis de ciment

Un coulis hydraulique se présente sous la forme d'une suspension.

Les grains présents dans l'eau sont tout d'abord soumis aux actions d'origine mécaniques que sont les forces de pesanteur et les frottements liquides ou solides. Si ces forces mécaniques étaient seules à agir, les grains tomberaient sous l'effet de la pesanteur pour former au fond d'un récipient contenant le coulis un sédiment surmonté d'une épaisse couche d'eau, or il n'en est rien. Les coulis hydrauliques peuvent être stables malgré des teneurs en eau élevées. Cette stabilité nous indique qu'il n'est pas possible de considérer les grains comme neutres et qu'il faut ajouter aux efforts mécaniques les actions d'origine électrique. Cet ensemble de forces d'attraction et de répulsion s'exerçant entre les particules ou entre celles-ci et les ions présents dans le liquide va entraîner un état d'équilibre de la suspension [Bombled J.P., 1974], [Legrand C., 1982].

Notre objet n'est pas ici d'effectuer le bilan complet des forces en présence. Il est néanmoins important de rappeler l'origine des forces électrostatiques jouant un rôle essentiel dans le comportement des coulis hydrauliques.

Obtenus par broyage, les grains de ciment anhydres présentent une surface désorganisée chargée électriquement. On constate généralement que les grains de silicate (C_3S , C_2S) entrant de manière prépondérante dans la composition des ciments sont davantage chargés négativement que positivement. Dès que le ciment et l'eau sont mélangés, les produits les plus solubles passent très rapidement en solution. Ainsi, la phase aqueuse est pratiquement saturée en ions Ca^{++} , Na^+ , K^+ , SO_4^- , OH^- . Compte tenu du fait que la surface du grain est électriquement chargée, il se forme autour de celui-ci une couche d'ions cherchant à assurer la neutralité de la surface. Cette couche est appelée « couche diffuse de Gouy-Chapmann ». La densité ionique varie de manière exponentielle lorsqu'on s'éloigne de la particule pour tendre asymptotiquement vers la densité moyenne dans le liquide. La particule et le liquide environnant peuvent ainsi être assimilés à un condensateur dont le potentiel est souvent appelé potentiel ζ . Les ions entourant le grain forment un réseau enfermant des molécules de liquide. Une certaine quantité d'eau sera ainsi liée aux grains. L'existence de cette couche d'eau « liée » influence naturellement les propriétés physiques du liquide.

Outre les forces de pesanteur aux quelles ils sont soumis, les grains de ciment feront ainsi également l'objet de forces de répulsion et d'attraction d'origine électrostatique. Les forces de répulsion peuvent s'expliquer par le fait que lorsqu'on rapproche deux grains de même nature une force tendant à les éloigner apparaît, les couches diffuses qui les entourent commencent à s'interpénétrer.

Il peut également exister entre deux grains des attractions coulombiennes directes. Nous avons déjà indiqué que les grains de ciment étaient à l'état anhydre chargés électriquement. Plongés dans l'eau, les ions de la couche diffuse ont tendance à neutraliser cette charge.

Néanmoins, compte tenu des très fortes aspérités des grains, l'empilage des ions compensateurs est relativement instable. Il reste donc, et ce plutôt dans les parties anguleuses, des zones non saturées pouvant être attirées par des charges de signe opposées situées sur les faces planes des grains. Nous aurons alors des associations de type pointe-face se substituant à la couche d'eau

liée. Les grains sont ainsi naturellement enclins à se grouper en chaînes par attraction électrostatique.

Il résulte de cet ensemble de forces que l'état normal d'une suspension de grains de ciment est l'état « floclulé » (figure 1.2)

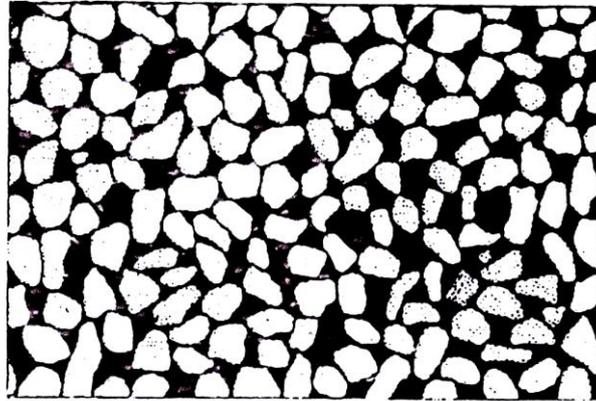


Figure 1.2 : Représentation schématique de la structure floclulante de la pâte de ciment [Legrand C., 1982].

Cette floclulation peut avoir un caractère défavorable vis-à-vis des caractéristiques d'injectabilité des coulis. Le rôle de certains additifs tels que les fluidifiants consiste ainsi à atténuer les effets de cette floclulation en augmentant les forces de répulsion entre les grains. Les fluidifiants sont en effet généralement composés de molécules à caractère anionique ayant la propriété de se fixer sur les plages positives des grains de ciment. Bien que ces dernières soient moins importantes que les plages négatives, la dimension très grande de ces anions (10 à 60 Å) devant les ions minéraux à la surface du grain provoque une dilatation importante des couches diffuses et accroît ainsi les forces de répulsion. Ces adjuvants auront ainsi tendance à disperser les grains dans la suspension.

La floclulation est essentiellement une caractéristique des particules de silicate (C_3S , C_2S). Le comportement des aluminates également contenus dans le ciment est différent. Quand les grains d'aluminate tricalcique sont plongés dans l'eau, il y a dissolution des deux constituants alumine et chaux et formation d'hydroxydes électropositifs. Tous les grains d'aluminates étant de même signe vont ainsi repousser et former un ensemble dispersé.

Les figures 1.3 et 1.4 présentées par Bombléd illustrent la différence de comportement des grains de silicate et d'aluminate.

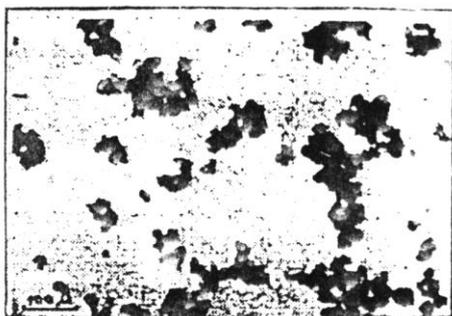


Figure 1.3 : Suspension de C_3S dans l'eau pure [Bombléd J.P., 1974].



Figure 1.4 : Suspension de C_3A dans l'eau pure [Bombléd J.P., 1974].

I.3 INJECTABILITE DES COULIS HYDRAULIQUES

Ainsi que nous l'avons indiqué, le pouvoir de pénétration d'un coulis est influencé de manière déterminante par deux paramètres essentiels : ses caractéristiques rhéologiques « fluidité » et la granularité de sa phase solide.

Ce paragraphe tente de résumer les principaux résultats publiés dans ce domaine et qui ont servi de support à notre travail.

I.3.1 Comportement rhéologique des coulis de ciment

L'importance du comportement rhéologique des suspensions de ciment est illustrée par l'abondance de la littérature consacrée à ce thème. Il convient malgré tout de noter que l'essentiel de ces publications porte sur les pâtes de ciment utilisées dans la confection des bétons et se différencie généralement des coulis hydrauliques d'injection par des concentrations plus élevées.

Compte tenu de l'ampleur et de la complexité de ce sujet, nous n'aurons pas ici la prétention de présenter une synthèse bibliographique exhaustive. Après avoir brièvement rappelé quelques définitions de rhéologie, nous tenterons cependant de mettre en évidence dans ce paragraphe l'influence des paramètres jouant un rôle sur le comportement rhéologique des coulis.

I.3.1.1 Lois de comportement [Legrand C., 1982]

D'un point de vue rhéologique, les coulis hydrauliques peuvent être assimilés à des fluides visqueux ou viscoplastiques. Leur aptitude à l'écoulement est ainsi généralement caractérisée par la courbe représentant l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction de la vitesse de déformation de cisaillement $\dot{\epsilon}$. Legrand [Legrand C., 1982] schématise les différents types de modèles de comportement rhéologique auxquels obéissent le plus souvent les suspensions de ciment par la figure 1.5.

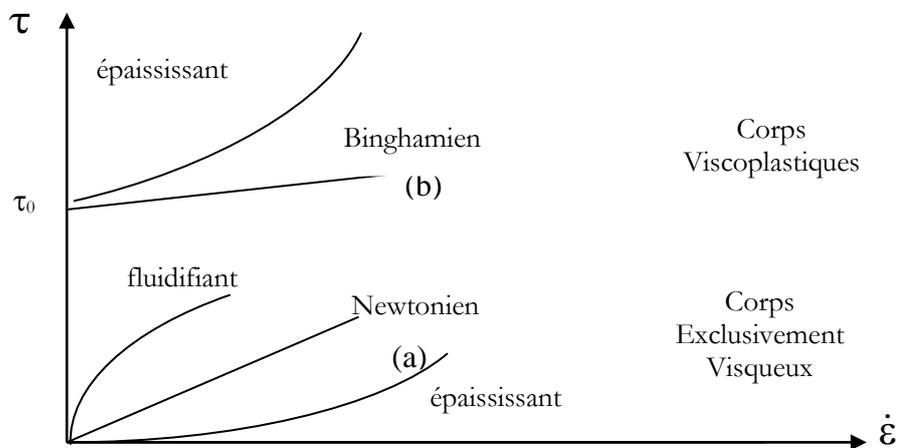


Figure 1.5 : Comportement visqueux et viscoplastique [Legrand C., 1982]

Le comportement rhéologique est dit exclusivement visqueux si l'écoulement se produit dès qu'il y a une contrainte de cisaillement non nulle. Lorsque le modèle rhéologique est une droite, le corps est dit Newtonien (courbe a, fig. 1.5).

Nous avons dans ce cas :

$$\tau = \eta \dot{\epsilon} \quad (1.1)$$

avec η : coefficient de viscosité.

Le comportement est dit viscoplastique si l'écoulement ne se produit que lorsque la contrainte dépasse une certaine valeur appelée « seuil de cisaillement ». Lorsque le modèle rhéologique est une droite, le comportement est dit « binghamien » (courbe b, fig. 1.5). La relation de comportement s'écrit dans ce cas :

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\epsilon} \quad (1.2)$$

avec τ_0 : seuil de cisaillement
 η : coefficient de viscosité plastique.

Cette relation, et par voie de conséquence les deux paramètres τ_0 et η , sont le plus souvent utilisés pour caractériser le comportement rhéologique d'un coulis hydraulique.

Certains auteurs [Costa U. et col., 1986], [Dyduch K. et col., 1987], [Shaughnessy R. et col., 1988], tiennent compte du caractère non linéaire du modèle rhéologique à l'aide de relations de comportement de la forme :

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\epsilon}^n \quad (1.3)$$

L'exposant n est ici inférieur à 1 si le coulis a un comportement « fluidifiant » et supérieur à 1 s'il a un comportement « épaississant ».

L'évaluation des paramètres rhéologiques d'un coulis hydraulique peut être compliquée par l'apparition plus ou moins marquée du phénomène de thixotropie. Ce dernier se caractérise par le fait qu'une fois franchi le seuil de cisaillement on constate généralement que l'effort nécessaire pour faire écouler le coulis à vitesse constante diminue au cours du temps. Ce phénomène traduit la destruction progressive de la structure floculée que possède une suspension de ciment au repos. Les courbes d'écoulement obtenues au viscosimètre sont dans ce cas caractérisées par une boucle d'hystérésis (fig. 1.6).



Figure 1.6 : Phénomène de thixotropie [Shaughnessy et col., 1988]

1.3.1.2 Influence de la concentration en solide

La concentration volumique en solide, notée ici C_v , se définit par la relation :

$$C_v = \frac{V_s}{V_s + V_e} \quad (1.4)$$

avec V_s : volume de la phase solide du liant.
 V_e : volume d'eau.

La concentration volumique et la teneur en eau E/L sont liées par les relations simples suivantes :

$$C_v = \frac{1}{\frac{\gamma_s}{\gamma_e} \frac{E}{L} + 1} \quad (1.5)$$

Avec E/L : rapport de la masse d'eau sur la masse du liant
 γ_s : masse volumique de la phase solide
 γ_e : masse volumique de l'eau.

Les tableaux 1.1, 1.2 donnent à titre d'exemple les concentrations volumiques correspondant à quelques teneurs en eau caractéristiques dans le cas d'un ciment dont la masse volumique est prise égale à 3,15 g/cm³ ou d'une chaux à masse volumique égale à 2,26 g/cm³.

Tableau 1.1 : Correspondance entre les paramètres E/C et C_v ($\gamma_s = 3.15$ g/cm³).

E/C	C_v
0,4	0,442
0,5	0,388
0,6	0,346
0,7	0,312
0,8	0,284

Tableau 1.2 : Correspondance entre les paramètres E/Cx et C_v ($\gamma_s = 2.26$ g/cm³).

E/Cx	C_v
0,8	0,356
0,9	0,329
1,0	0,306
1,1	0,286
1,2	0,269

La concentration volumique est assurément l'un des paramètres, voire le paramètre, ayant une influence majeure sur le comportement rhéologique des coulis. Parmi les nombreux travaux abordant cette question, il est tout d'abord intéressant de relever les contributions théoriques proposant une expression des paramètres rhéologiques en fonction de la concentration volumique dans le cas où les particules sont supposées n'avoir aucune interaction entre elles. Les relations le plus souvent utilisées sont celles d'Einstein, de Guth-Simha-Gold et de Brinkman exprimant la viscosité en fonction de la concentration volumique.

Le tableau 1.3 rappelle ces relations et leurs conditions d'application.

Tableau 1.3 : Expression de la viscosité en fonction de la concentration volumique.
 Cas de particules sphériques sans interaction
 (η_0 : viscosité du fluide contenant les particules solides).

Type	Relation	Condition d'application
Einstein [Einstein A., 1906]	$\eta = \eta_0 (1 + 2,5 C_v)$	Particules sphériques Concentrations faibles ($C_v \leq 0,05$)
Guth-Simha-Gold [Frish et Simha, 1956]	$\eta = \eta_0 (1 + 2,5 C_v + 14,1 C_v^2)$	Particules sphériques Concentrations moyennes ($C_v \leq 0,30$)
Brinkman [Brinkman H.C., 1952]	$\eta = \eta_0 (1 - KC_v)^{-2,5}$	Particules sphériques unidimensionnelles Concentrations élevées

La figure 1.7 visualise l'évolution de la viscosité en fonction de la concentration pour chacune des trois relations proposées dans le tableau 1.3.

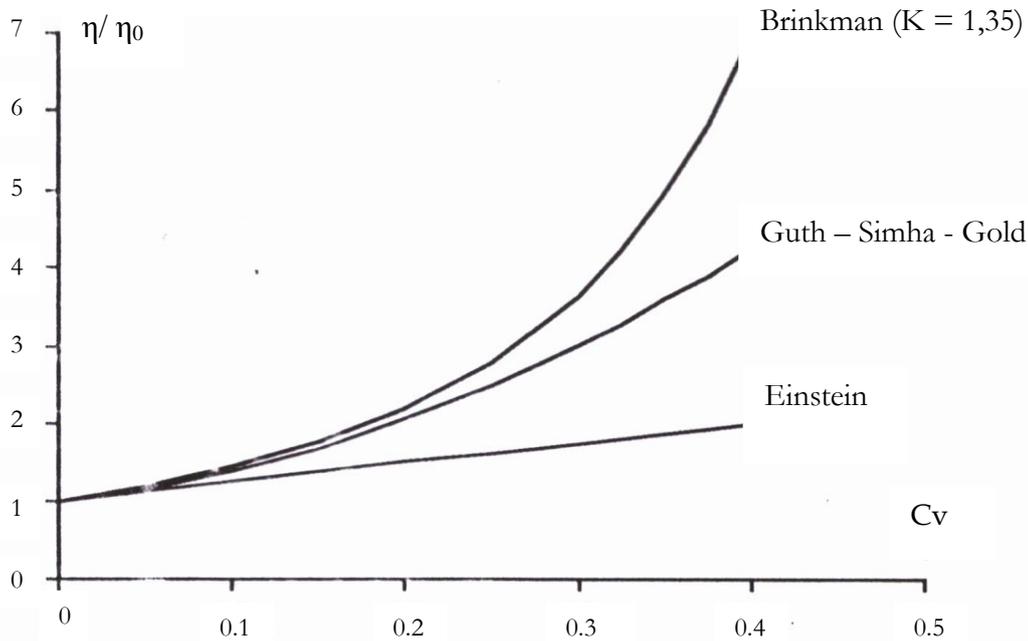


Figure 1.7 : Evolution de la viscosité en fonction de la concentration volumique

La figure 1.7 nous indique déjà que la viscosité croît de manière significative avec la concentration volumique. L'hypothèse de base sous-jacente à chacune de ces trois relations exprime le fait que les particules n'ont aucune interaction entre elles.

Nous avons pu voir dans le paragraphe I.2.2, que ceci était loin d'être vérifié dans le cas d'une suspension de ciment. Outre les efforts d'origine mécanique, les particules sont en effet soumises en particulier à des forces d'origine électrique. Ces forces étant d'autant plus importantes que les particules sont rapprochées et donc que la concentration est élevée, on imagine facilement que les paramètres rhéologiques vont croître de manière plus rapide que ne peuvent le prévoir les trois relations explicitées par le tableau 2.2. Les nombreux résultats publiés dans la littérature [Helmuth R.A., 1980], [Vom Berg W., 1979], [Ish-Shalom M. et col., 1960], [Hobbs D.W., 1976] confirment naturellement cette prévision.

Malgré leur nombre conséquent, il reste difficile d'effectuer une synthèse cohérente des publications portant sur ces problèmes rhéologiques car les résultats publiés sont relativement disparates. Cette disparité s'explique surtout par l'influence importante des conditions d'essais sur les résultats obtenus. Parmi ces conditions, nous pouvons en particulier noter :

- le type de viscosimètre considéré,
- la plage de vitesse de déformation retenue,
- la température du mélange,
- le type et la durée de malaxage,
- le temps laissé entre la fin du malaxage et la réalisation des essais.
- la nature du liant hydraulique.

A ces difficultés d'ordre expérimental viennent s'ajouter des imprécisions liées à la nature même de la loi de comportement.

Dans le paragraphe I.3.1.1, nous avons pu en effet noter que les courbes d'écoulement n'avaient pas toujours la linéarité des fluides newtoniens ou de Bingham et que de plus les suspensions de

ciment pouvaient présenter un phénomène de thixotropie. La détermination des paramètres rhéologiques et en particulier la viscosité s'avère ainsi douteuse. Il n'en demeure pas moins que tous ces résultats montrent la très rapide croissance des paramètres « seuil de cisaillement » et « viscosité plastique » en fonction de la concentration volumique. Pour illustrer cette affirmation nous avons reporté sur les tableaux 1.4 et 1.5 les résultats de Ish-Shalom [Ish-Shalom M. et col., 1962] et Vom Berg [Vom Berg W., 1979] servant très souvent de référence dans la littérature spécialisée.

Nous avons reporté également sur ces mêmes tableaux les résultats des travaux de Miltiadou [Miltiadou A, E., 1990] obtenus sur des coulis réalisés à l'aide d'un ciment CPA-55 PM. Le tableau 1.6 présente les conditions dans lesquelles ont été réalisés ces essais.

Tableau 1.4 : Expression de la viscosité en fonction de la concentration volumique.
(S_b = surface spécifique Blaine).

E/C	C_v	Viscosité plastique η (10^3 Pa.s)				
		Relation d'Einstein $\eta = \eta_0 (1 + 2,5 C_v)$	Brinkman $\eta = \eta_0 (1 - 1,35 C_v)$	Ish-Shalom $S_b = 2260 \text{ cm}^2/\text{g}$	Vom Berg $S_b = 3250 \text{ cm}^2/\text{g}$	Coulis CPA 55 PM $S_b = 3489 \text{ cm}^2/\text{g}$
0,4	0,442	2,10	9,68	39,0	300	77,2
0,5	0,388	1,97	6,39	16,0	120	28,6
0,6	0,346	1,86	4,82	12,0	45	18,3
0,7	0,312	1,78	3,92	8,5	20	11,9
0,8	0,284	1,71	3,34	5,8	9	-

Tableau 1.5 : Expression du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique

E/C	C_v	Seuil de cisaillement τ_0 (Pa)		
		Ish-Shalom	Vom Berg	CPA 55 PM
0,4	0,442	81	37,0	108
0,5	0,388	39,0	10,0	27
0,6	0,346	25,0	2,8	11
0,7	0,312	9,0	1,6	8
0,8	0,284	1,6	1,0	-

Tableau 1.6 : Conditions d'essai des mesures des paramètres rhéologiques.

Type d'appareil	: Viscosimètre à cylindres coaxiaux LCPC [1985]
Vitesse de déformation	: 0 à 100 s^{-1}
Malaxage	: Malaxage à ultra-sons – durée 2 mn
Température	: $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Le tableau 1.4 montre clairement que les viscosités plastiques mesurées pour des suspensions de ciment croissent très rapidement avec la concentration volumique et qu'elles sont toutes très largement supérieures aux résultats obtenus en appliquant une relation de type Brinkman. Ceci montre, si besoin était, toute l'importance de l'interaction entre les particules.

Le tableau 1.5 nous permet de noter le même phénomène pour le seuil de cisaillement. Il est également important de relever ici que pour les concentrations « faibles » de l'ordre de 0,3 couramment utilisées dans les coulis hydrauliques, le seuil de cisaillement devient pratiquement nul. Les coulis ont dans ce cas un comportement se rapprochant d'un comportement purement Newtonien.