

DES PISTES DE RECHERCHE POUR DIMINUER LA VISCOSITÉ DES BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES

Julie HOT, Nicolas ROUSSEL

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar),
14-20 Bd Newton Cité Descartes - Champs sur Marne 77447 Marne la Vallée cedex 2
julie.hot@ifsttar.fr
nicolas.rousseau@ifsttar.fr

1. VERS DE NOUVEAUX BÉTONS PLUS RESPECTUEUX DE L'ENVIRONNEMENT

Depuis ses premières applications au début du XX^e siècle, le béton connaît un essor ininterrompu dans les travaux publics comme dans le bâtiment, et possède un potentiel mécanique et esthétique exceptionnel. En France, la majorité des ouvrages d'art, 80% des logements individuels et 90% des logements collectifs sont construits en béton [CIM 06]. C'est un matériau d'une grande souplesse qui sait adapter ses qualités et ses performances aux besoins spécifiques d'un projet. L'immense progrès qu'a connu le béton au cours des dernières années a été possible grâce aux avancées techniques stimulées par la recherche mais s'explique également par la nécessité de faire face à la créativité plus libre des architectes, avec des formes novatrices plus abstraites et épurées, et à l'évolution des réalités de la construction exigeant la mise au point de bétons toujours plus performants [AIT 00, CIM 07]. Il s'impose

donc comme le matériau de la modernité aux possibilités surprenantes.

Le béton est également le produit industriel le plus consommé dans le monde. Avec trois tonnes par personne et par an [AIT 00], il est difficilement remplaçable dans le développement de larges infrastructures. Cette forte utilisation du béton s'explique par de nombreux avantages qui sont aussi bien liés aux propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité offertes par ce matériau qu'aux aspects économiques. En effet, le béton est capable de reprendre des charges très élevées, résiste bien au feu et présente une bonne durabilité dans le temps s'il est correctement mis en œuvre. Une fois tous ses composants mélangés avec de l'eau, il est transformé en un fluide dont l'écoulement peut être contrôlé permettant ainsi d'utiliser des coffrages aux formes diverses.

Malgré ses avantages, le béton, comme tous les autres matériaux de construction, doit adapter son impact sur l'environnement, et de ce fait remettre en question sa formulation. Dans un contexte de construction durable, de respect de l'environnement et de prise de conscience des

dangers du réchauffement climatique, le secteur du BTP, comme de nombreux autres secteurs, se doit en effet de limiter les impacts des bâtiments sur l'environnement [CIM 03, LAF 10]. Le matériau béton est donc au cœur des problématiques actuelles et doit évoluer en tenant compte des aspects économiques, environnementaux et sociétaux. En effet, le secteur des matériaux de construction occupe la troisième position dans le classement des secteurs industriels responsables des émissions de CO₂ les plus élevées dans le monde et en Europe. Ce secteur représente 10% des émissions totales de CO₂ dont la majorité proviennent de la fabrication du béton [HAB 10, CAP 11]. Dans une étude limitée à l'optimisation de la composition du béton d'un point de vue exclusivement matériau, les impacts environnementaux des différents composés du béton (eau, granulats, ciment et adjuvants) ont été analysés, et les résultats ont montré que le composé ciment, principal constituant, était la source principale des impacts environnementaux du matériau béton, représentant plus de 90% de l'indicateur changement climatique d'un mètre cube de béton [HAB 09]. Par ailleurs, l'industrie cimentière représente, à elle seule, entre 5 et 8% des émissions de CO₂ d'origine anthropique dans le monde [SHA 10, PRO 11] avec une production mondiale de ciment pour l'année 2011 estimée à 3,6 milliards de tonnes [CEM 12]. Le ciment apparaît donc comme la source des impacts autour de laquelle les recherches scientifiques doivent s'organiser afin de proposer des stratégies pour réduire l'empreinte environnementale du béton sans compromettre les besoins des Hommes et de la société en matière de logements, bâtiments et infrastructures.

Ainsi, la mise en œuvre de bétons plus respectueux de l'environnement est possible et justifiée si les émissions de CO₂ dues à la production de son principal constituant, le ciment, sont diminuées [NIE 07]. Le béton voit alors sa formulation sans cesse complétée et améliorée pour se plier à tous les défis de la construction et limiter les émissions de CO₂ engendrées lors de sa fabrication. Les tendances actuelles montrent que le rapport eau sur ciment des bétons modernes diminue progressivement. En effet, afin de conserver des performances à l'état durci compatibles avec une baisse de la quantité de ciment, la formulation de ces nouveaux bétons passe par une diminution de la quantité d'eau présente dans le mélange. Du fait de la fraction volumique de solide élevée, les propriétés nécessaires de ces bétons sont obtenues mais la fluidité, et en particulier sa viscosité, sont fortement affectées, posant ainsi un problème important concernant la mise en œuvre sur site. Ces bétons, même s'ils présentent des affaissements conformes aux attentes, sont souvent « collants » et difficiles à lisser et à vibrer. Leur pompage est laborieux et les cadences de chantier chutent.

Les pistes de recherche permettant de contourner le problème de viscosité des bétons à forte fraction volumique solide et à faibles impacts environnementaux sont nombreuses et portent notamment sur l'emploi de polymères. Le travail présenté ici a donc pour but d'identifier certains mécanismes d'action de ces molécules à l'origine d'une diminution de la viscosité. Les polymères utilisés dans cette étude appartiennent à deux familles différentes : les

superplastifiants (SP) et les agents entraîneurs d'air (AEA). Il peut être noté que notre travail se distingue des études de la littérature, qui se focalisent sur les effets des polymères sur le seuil d'écoulement du béton évalué par l'affaissement ou l'étalement du matériau, en mettant l'accent sur l'autre paramètre du comportement : la viscosité.

2. ACTION DES SUPERPLASTIFIANTS

2.1. Introduction

Les superplastifiants (SP) sont des polymères faisant partie de la catégorie des adjuvants appelés « hauts réducteurs d'eau » dont le rôle est de diminuer la quantité d'eau nécessaire à la fabrication de béton. Ces molécules ont l'avantage d'améliorer la fluidité du béton [COL 98]. En s'adsorbant à la surface des grains de ciment, les SP diminuent l'intensité des interactions colloïdales par répulsion électrostatique et/ou stérique, et donc la contrainte seuil [FLA 04, HOU 99, UCH 97]. Dans ce cadre, ils ne devraient pas avoir d'influence sur la viscosité macroscopique des systèmes lorsqu'ils sont soumis à un régime d'écoulement où les interactions colloïdales deviennent négligeables devant les interactions hydrodynamiques. Cependant, une diminution de la viscosité macroscopique, ou apparente, est parfois reportée dans la littérature [CYR 00, PAP 04, PHA 06]. La contrainte seuil jouant un rôle majeur dans la viscosité apparente à faibles et intermédiaires vitesses de cisaillement pour des pâtes traditionnelles, la diminution observée pourrait être seulement due à une diminution des interactions colloïdales et de la contrainte seuil macroscopique. Nos résultats montrent que ce n'est pas le cas, et que la contribution visqueuse à la viscosité macroscopique de pâtes de ciment soumises à des vitesses de cisaillement élevées est influencée par la présence de polymères adsorbés à la surface des grains.

2.2. Constatation expérimentale

2.2.1. Matériel et protocole expérimental

Un ciment Portland ASTM Type 1 est utilisé. Les pâtes de ciment sont préparées avec un rapport E/C=0,35. Le SP étudié est un polycarboxylate éther (PCE) sous forme liquide. Son dosage est exprimé en pourcentage de la masse de ciment. Nous avons choisi ici une combinaison ciment/SP pour laquelle des interactions chimiques, telles que l'intercalation ou la co-précipitation, ne semblent pas avoir lieu [FLA 01, JOL 98]. La raison de ce choix est de créer des systèmes pour lesquels un changement dans la rhéologie n'est pas du à un changement dans la nature des minéraux mais provient plutôt d'un changement dans les interactions directes ou indirectes entre les particules minérales. Nous utilisons donc un protocole en ajout différé. Le ciment et 85% de l'eau sont d'abord mélangés mécaniquement pendant 2 min. La pâte est ensuite laissée au repos pendant 20 min avant de rajouter les 15% d'eau restante contenant le polymère. La pâte est de nouveau mélangée pendant 2 min et laissée au repos 10 min. Le polymère est

donc ajouté 20 min après le premier contact entre le ciment et l'eau, c'est-à-dire après la nucléation de la plupart des premiers produits d'hydratation. Par ailleurs, des observations à la DRX (Diffraction des Rayons X) et des mesures d'adsorption à l'analyseur de COT (Carbone Organique Total), non présentées ici, permettent de conclure que le SP choisi n'induit aucun changement dans la nature des minéraux à la surface des grains.

Pour les mesures de rhéologie, un rhéomètre Bohlin avec une géométrie à ailettes est utilisé. Une rampe de vitesse de cisaillement croissante est appliquée suivie d'une rampe de vitesse de cisaillement décroissante. Seules les rampes décroissantes sont montrées dans cet article.

Pour les mesures de force normale, le rhéomètre est équipé d'une géométrie à plans parallèles. La procédure consiste à mesurer les contraintes normales et tangentielles pour une vitesse de cisaillement constante.

2.2.2. Mesures de rhéologie

La figure 1 représente la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents dosages en PCE. Pour la pâte de référence, nous observons un comportement rhéofluidifiant caractéristique des pâtes de ciment (la viscosité diminue avec la vitesse de cisaillement). Avec l'ajout du PCE, ce comportement devient moins prononcé. Ceci peut s'expliquer par l'action du polymère qui, grâce à des effets de répulsion électrostatiques et/ou stériques, est capable de diminuer l'intensité des interactions colloïdales et donc défloculer le système [FLA 04, UCH 97, HOU 99]. La contrainte seuil et donc la contribution des interactions colloïdales à la viscosité apparente/macroscopique diminue avec l'ajout de polymère. Par ailleurs, un comportement rhéoépaississant (la viscosité augmente avec la vitesse de cisaillement) est également observé pour des vitesses de cisaillement élevées. Son effet est de plus en plus marqué avec l'ajout de polymère.

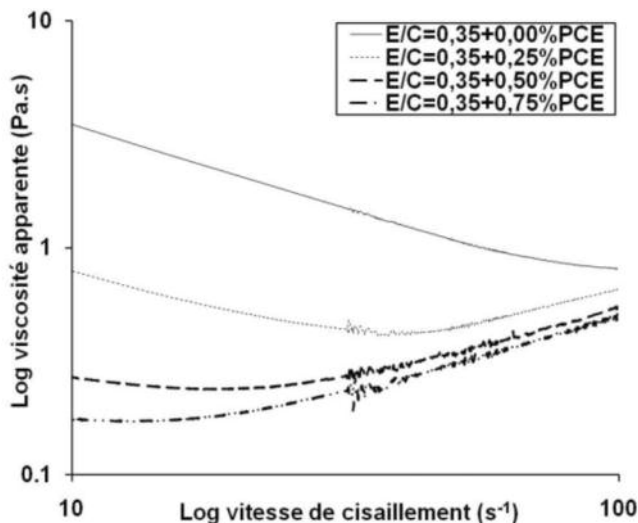


Figure 1. Viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement.

A partir de la viscosité apparente, nous déterminons la viscosité résiduelle, c'est à dire la viscosité apparente diminuée de la contribution de la contrainte seuil. La figure 2

représente la viscosité résiduelle en fonction de la vitesse de cisaillement. Un plateau est observé et est considéré ici comme étant représentatif de l'intensité de la dissipation visqueuse. Nous remarquons que la dissipation visqueuse est affectée par la présence du polymère, le niveau du plateau diminuant lorsque le dosage en PCE augmente. De plus, le rhéoépaississement ne semble pas dépendre du dosage en PCE. Ce comportement n'est pas induit par le polymère et est en fait toujours présent dans le système.

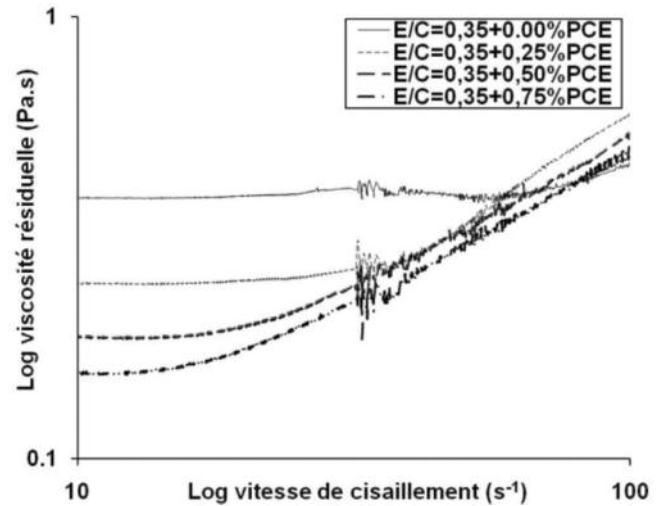


Figure 2. Viscosité résiduelle en fonction de la vitesse de cisaillement.

2.2.3. Mesures de force normale

La figure 3 représente le rapport entre la contrainte normale et la contrainte tangentielle en fonction du temps pour trois vitesses de cisaillement pour la pâte de ciment de référence et celle contenant 1% de PCE. Nous remarquons que le rapport ne dépend pas de la vitesse de cisaillement pour la gamme de vitesse testée. Par ailleurs, alors que la fraction volumique du système reste constante ($E/C=0,35$), nous observons une diminution importante de la force nor-

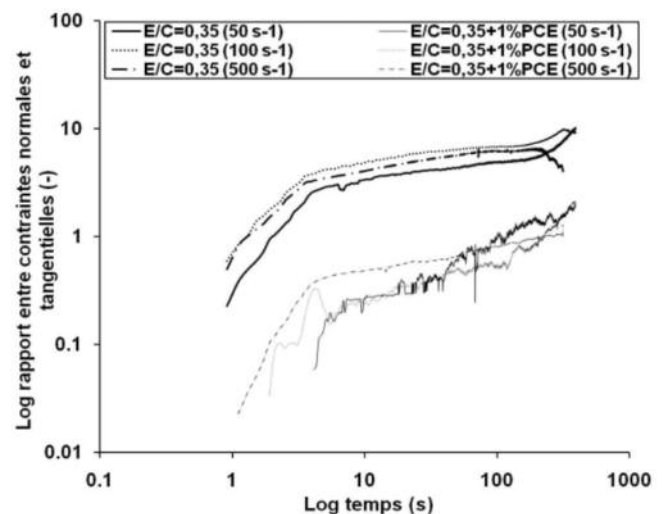


Figure 3. Rapport entre contraintes normales et tangentielles en fonction du temps.

male entre la pâte de référence et celle contenant 1% de PCE. Comme la gamme de vitesse de cisaillement étudiée ici est élevée, la contribution des forces colloïdales, et donc de la contrainte seuil, devrait être faible. Par conséquent, lorsque le PCE est ajouté, quelque chose autre que la contrainte seuil change dans le système.

2.3. Analyses

Afin d'analyser les résultats, nous allons nous appuyer sur une relation qui décrit la dissipation visqueuse (μ étant la viscosité macroscopique) pour des suspensions non-Browniennes, colloïdales et concentrées [LEM 09, MAN 99, ROU 10]. Elle tient compte de la viscosité du fluide interstitiel μ_0 , de l'encombrement du système $f(\Phi/\Phi_{div})$ (Φ , fraction volumique solide et Φ_{div} , fraction volumique solide pour laquelle la viscosité diverge) et du nombre de contacts entre particules $g(k, \Phi/\Phi_{div})$ qui augmente avec Φ/Φ_{div} et k (k , coefficient de friction entre les grains de ciment) :

$$\mu = \mu_0 f(\Phi/\Phi_{div}) g(k, \Phi/\Phi_{div}) \quad [1]$$

Les résultats rhéologiques montrent une diminution de l'intensité des interactions colloïdales avec l'ajout de PCE. Cependant, comme la viscosité résiduelle indépendante de la contrainte seuil diminue, il y a également une diminution de l'intensité des interactions visqueuses. Par ailleurs, le rapport contrainte mesurée entre les contraintes normales et tangentielles est en accord avec l'origine frictionnelle des forces normales [BOY 11, BRA 97] (contacts directs entre particules). Le PCE entraîne donc une diminution de la contribution des contacts frictionnels. Comme celle-ci diminue ainsi que la contribution de la contrainte seuil, l'état de floculation du système devrait diminuer avec le rapport Φ/Φ_{div} . Nous pouvons citer deux mécanismes potentiels à l'origine de la diminution de la viscosité apparente et des forces normales : soit une diminution dans le nombre total de contacts directs frictionnels entre les grains [BOY 11, LOM 08], soit un changement dans le coefficient de friction (rugosité) entre les agrégats ou les grains. Ce dernier mécanisme peut être négligé. En effet, l'épaisseur du polymère adsorbé, estimée à quelques nanomètres [FLA 06, PER 12], est trop faible pour pouvoir changer la rugosité de surface des grains, de l'ordre de quelques centaines de nanomètres. Par ailleurs, les analyses à la DRX et les mesures d'adsorption ne montrent pas de changement dans la nature des minéraux à la surface des grains en présence de polymère. Enfin, des simulations numériques récentes dans le domaine des milieux granulaires secs ont montré qu'une diminution du coefficient de friction pour des grains de ciment de 0,6-0,7 [KEN 87] à 0,1-0,2 [LEM 09] est nécessaire afin de pouvoir observer des conséquences sur le comportement macroscopique. Si nous reprenons la relation [1] et le premier mécanisme décrit, nous pouvons avancer que le polymère affecte le nombre total de contacts directs frictionnels, entraînant ainsi une modification du rapport Φ/Φ_{div} . Comme la fraction volumique solide Φ ne change pas, le polymère change la contribution des contacts à la viscosité macroscopique seulement en changeant l'état de floculation de la suspension. En défloculant le système, il change la façon de le cisaillement se concentre dans le fluide interstitiel

entre les flocs et réduit ainsi l'encombrement du système [HOT 13].

3. ACTION DES AGENTS ENTRAINEURS D'AIR

3.1. Introduction

Les agents entraineurs d'air (AEA) semblent entraîner des bulles d'air qui peuvent diminuer la viscosité sans affecter drastiquement les propriétés à l'état durci. Ce type d'agents est bien connu pour améliorer la durabilité des bétons durcis soumis à des cycles de gel/dégel et exposés à des sels de déverglaçage [DOL 95, PIG 95]. En plus de cet avantage, l'air entraîné semble être également très bénéfique pour les bétons frais. En effet, les bétons à air entraîné apparaissent plus maniabiles que les bétons sans air entraîné [KHA 00, STR 04, WAL 03], ce qui laisse suggérer que la teneur en air affecte la fluidité et donc la rhéologie des bétons. Malheureusement, les mécanismes d'action à l'origine d'une diminution de la contrainte seuil et de la viscosité ne sont pas évidents [DOL 95, MIE 58, JOL 03]. L'existence de deux régimes, pour lesquels les conséquences de la présence de bulles d'air sur le comportement rhéologique sont différentes, pourrait expliquer les changements de fluidité observés sur les bétons suite à l'ajout d'AEA. Dans un premier régime, les bulles d'air sont suffisamment larges pour être déformées pendant l'écoulement et réduire ainsi la viscosité macroscopique. Dans un deuxième régime, les bulles d'air sont trop petites ou l'écoulement est trop lent pour qu'elles se déforment. Elles gardent donc leur forme sphérique et sont considérées comme des inclusions rigides, augmentant ainsi la viscosité macroscopique. Gardant en tête ces deux régimes, il devrait être possible d'expliquer le mode d'action des AEA. Nos résultats sur mortiers montrent qu'il semble possible d'entraîner des bulles d'air déformables fluidifiant le système.

3.2. Constatation expérimentale

3.2.1. Matériel et protocole expérimental

Un ciment Portland ASTM Type 1 et du sable de Seine 0/4 mm sont utilisés. Les mortiers préparés sont composés en volume de 40% de sable et 60% de pâte de rapport E/C=0,30. L'AEA testé est un produit commercial sous forme liquide. Son dosage est exprimé en pourcentage de la masse de ciment. Certains des mortiers sont préparés avec un dosage fixe de SP (0,25% du PCE présenté dans la partie 1.2.1.).

Pour les mortiers sans SP (mortiers fermes), l'AEA, l'eau et le ciment sont d'abord mélangés dans le malaxeur pendant 4 min. Le sable est ensuite rajouté et l'ensemble est finalement mélangé pendant 6 min.

Pour les mortiers avec 0,25% de PCE (mortiers fluides), l'AEA, un tiers du PCE, l'eau et le ciment sont d'abord mélangés dans le malaxeur pendant 2 min 30 s. Le sable est

ensuite rajouté et l'ensemble est mélangé pendant 1 min 30 s. Les parois de la cuve du malaxeur sont raclées et le reste de SP est ajouté. Le mortier est finalement mélangé pendant 6 min.

Pour les mesures de teneur en air, le mortier est placé, après le malaxage, dans un aéromètre de capacité 1 litre. La teneur en air est la moyenne de trois mesures.

Pour les mesures de rhéologie, le rhéomètre BTRHEOM [HU 96] est utilisé. Il est équipé d'une géométrie à ailettes. Après le malaxage, la cuve du rhéomètre est remplie avec le mortier et un pré-cisaillement est appliqué suivi d'une rampe de vitesse de cisaillement croissante.

3.2.2. Mesures de la teneur en air

La figure 4 montre la teneur en air pour les mortiers préparés avec différents dosages en AEA. Nous remarquons que la teneur en air augmente rapidement pour des dosages de 0% à 1% et se stabilise ensuite autour de 17%. Par ailleurs, il n'y a pas de différence significative entre le mortier ferme et le mortier fluide.

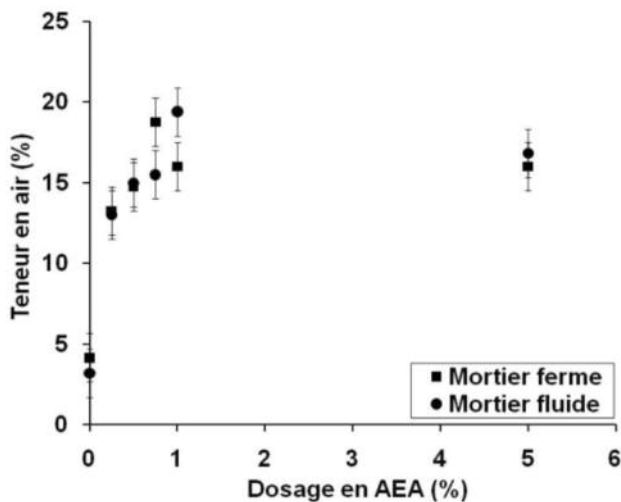


Figure 4. Teneur en air en fonction du dosage en AEA (0, 0,25, 0,50, 0,75, 1 et 5%).

3.2.3. Mesures de rhéologie

La contrainte seuil et la viscosité plastique sont identifiées avec la relation de Bingham (τ_0 : contrainte seuil, μ_{pl} : viscosité plastique, $\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement) :

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \dot{\gamma} \quad [2]$$

La figure 5 représente la contrainte seuil relative en fonction de la teneur en air. La contrainte seuil relative est le rapport de la contrainte seuil du mortier avec AEA par la contrainte seuil du mortier sans AEA. Nous remarquons que le comportement est dépendant de la présence de SP. La contrainte seuil du mortier fluide préparé avec du PCE augmente avec la teneur en air. L'inverse est observé pour le mortier ferme sans SP qui a une contrainte seuil divisée par 2 pour une teneur en air de 15%.

La figure 6 représente la viscosité plastique relative en fonction de la teneur en air. La viscosité plastique relative est le rapport de la viscosité plastique du mortier avec AEA par la viscosité plastique du mortier sans AEA. Nous

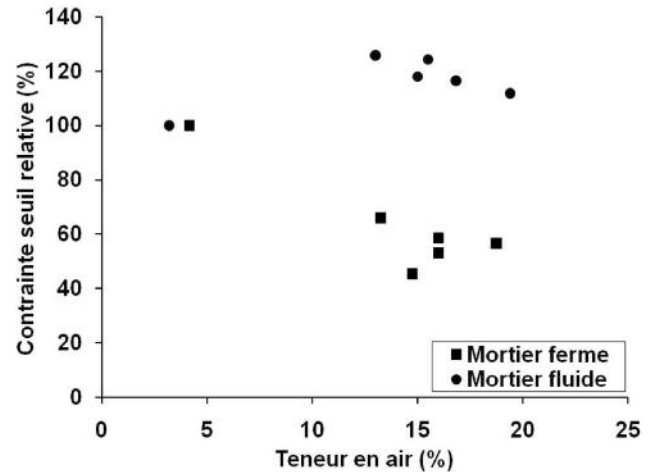


Figure 5. Contrainte seuil relative en fonction de la teneur en air.

remarquons que la viscosité plastique diminue pour les deux types de mortiers lorsque la teneur en air augmente. Pour une teneur en air de 15%, la viscosité plastique est divisée par 2.

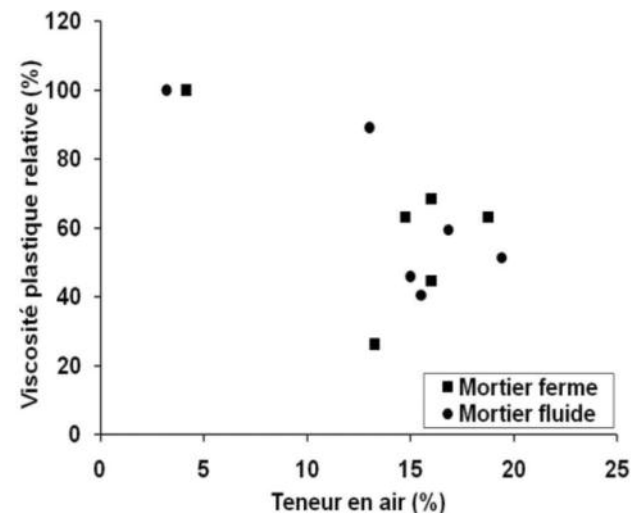


Figure 6. Viscosité plastique relative en fonction de la teneur en air.

3.3. Analyses

Les deux mortiers considérés ici ont un comportement différent lorsque la teneur en air augmente dans le mélange. Pour le mortier ferme, la contrainte seuil et la viscosité plastique diminuent, et pour le mortier fluide, la contrainte seuil augmente alors que la viscosité plastique diminue. L'augmentation de la contrainte seuil avec la teneur en air est un résultat quelque peu inattendu. Nous essayons d'expliquer les tendances observées en utilisant un nombre capillaire adimensionnel Ca qui est le rapport entre la contrainte de cisaillement qui tend à déformer les bulles et la tension de surface qui tend à empêcher cette déformation (d_0 : diamètre de la bulle, τ : contrainte appliquée, Γ : tension de surface entre la suspension et l'air) :

$$Ca = d_p \tau / \Gamma \quad [3]$$

La transition entre le régime de bulles d'air rigides et le régime de bulles d'air déformables se situe autour de $Ca=1$ ($Ca<1$, inclusions rigides ; $Ca>1$, bulles déformables).

Dans le tableau 1, nous calculons deux types de nombre capillaire : Ca qui correspond à la situation où l'écoulement s'arrête ou démarre ($\tau \approx \tau_0$ et $\dot{\gamma} = 0 \text{ s}^{-1}$), et Ca qui correspond à la situation où le système s'écoule dans la cadre de pratiques industrielles ($\dot{\gamma} = 5 \text{ s}^{-1}$). La tension de surface est prise égale à $0,04 \text{ Pa.m}$ du fait de la présence de l'AEA. Les valeurs de diamètre moyen de bulles de $60 \text{ }\mu\text{m}$ et $80 \text{ }\mu\text{m}$ pour les mortiers de référence ferme et fluide respectivement sont utilisées.

Nous pouvons identifier deux situations différentes. Premièrement, si $Ca<1$ (cellules blanches), les bulles d'air ne peuvent pas être déformées, et se comportent donc comme des inclusions rigides. Dans ce cas là, la contrainte seuil pour le nombre capillaire au repos et la viscosité plastique pour le nombre capillaire en écoulement devraient augmenter. Deuxièmement, si $Ca>1$ (cellules grises), les bulles d'air peuvent être déformées, et se comportent donc comme des inclusions déformables. Dans ce cas là, la contrainte seuil pour le nombre capillaire au repos et la viscosité plastique pour le nombre capillaire en écoulement devraient diminuer. Nous retrouvons bien les comportements observés expérimentalement.

Ainsi, en fonction du niveau de contrainte dans le système et du diamètre des bulles, le nombre capillaire peut passer de valeurs inférieures à 1 à des valeurs supérieures à 1. Il est donc possible de prédire les conséquences de l'entraînement d'air sur la rhéologie des mortiers fermes et fluides.

4. CONCLUSION

Les études sur le mode d'action des SP et des AEA présentées précédemment montrent qu'il est possible de diminuer la viscosité macroscopique de pâtes de ciment et de mortiers fortement concentrés.

Les polymères adsorbants (SP) changent l'état de floculation de la suspension et donc sa capacité à concentrer le cisaillement et dissiper l'énergie dans le fluide interstitiel. L'intensité des interactions hydrodynamiques est donc diminuée. Les SP apparaissent alors comme une solution au problème de fluidité des bétons à faibles impacts environnementaux. En plus d'agir sur le seuil d'écoulement, ils diminuent l'autre paramètre rhéologique, la viscosité.

Les AEA, quant à eux, peuvent modifier la viscosité macroscopique d'une suspension. Grâce à l'utilisation du

nombre capillaire, il est possible de définir le type de régime (soit « bulles d'air rigides », soit « bulles d'air déformables ») et de prévoir ainsi les conséquences de l'entraînement d'air sur le comportement rhéologique, c'est à dire sur les paramètres rhéologiques seuil d'écoulement et viscosité. Ainsi, les AEA, dans certaines conditions, peuvent être utilisés comme agents fluidifiants.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [AIT 00] AITCIN P.C., Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 9, 2000, p. 1349-1359.
- [BOY 11] BOYER F., Suspensions concentrées : Expériences originales de rhéologie, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, France, 2011.
- [BRA 97] BRADY J. F., MORRIS J. F., Microstructure of strongly sheared suspensions and its impact on rheology and diffusion, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 348, 1997, p. 103-139.
- [CAP 11] CAPROS P., KOUVARITAKIS N., MANTZOS L., Economic evaluation of sectoral emission reduction objectives for climate change: Top-down analysis of greenhouse gas emission reduction possibilities in the EU, Contribution to a Study for DG Environment, European commission, 2011.
- [CEM 12] CEMBUREAU Association Européenne du Ciment, Rapport d'activité 2011, 2012.
- [CIM 03] CIMBETON, Documentation Technique - Le développement durable, *Routes*, n° 84, 2003, p. 7-14.
- [CIM 06] CIMBETON, Les bétons : Formulation, fabrication et mise en œuvre, *Fiches Techniques*, tome 2, 2006, chap. 2.
- [CIM 07] CIMBETON, Solutions Béton - Les nouveaux bétons, des solutions bétons éprouvées et performantes, *Construction Moderne*, n° 126, 2007, p. 15-25.
- [COL 98] COLLEPARDI M., Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete, *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, n° 2, 1998, p. 103-112.
- [CYR 00] CYR M., LEGRAND C., MOURET M., Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 9, 2000, p. 1477-1483.
- [DOL 95] DOLCH W. L., *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology*, Second Edition, chap. 8, p. 518-557, Noyes Publications, 1995.
- [FLA 01] FLATT R. J., HOUST Y. F., A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 8, 2001, p. 1169-1176.
- [FLA 04] FLATT R. J., Towards a prediction of superplasticized concrete rheology, *Materials and Structures*, vol. 37, n° 5, 2004, p. 289-300.

| | Contrainte à 0 s^{-1} (Pa) | Contrainte à 5 s^{-1} (Pa) | Viscosité plastique (Pa.s) | Ca à 0 s^{-1} | Ca à 5 s^{-1} |
|----------------|---|---|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Mortier ferme | 1220 | 1410 | 38 | 1,83 | 2,1 |
| Mortier fluide | 322 | 507 | 37 | 0,64 | 1,01 |

Tableau 1. Ordres de grandeurs de la contrainte à 0 s^{-1} et 5 s^{-1} , de la viscosité plastique et du nombre capillaire à 0 s^{-1} et 5 s^{-1} .

- [FLA 12] FLATT R. J., BOWEN P., Yodel: A yield stress model for suspensions, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 89, n° 4, 2006, p. 1244-1256.
- [HAB 09] HABERT G., ROUSSEL N., Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, n° 6, 2009, p. 397-402.
- [HAB 10] HABERT G., BILLARD C., ROSSI P., CHEN C., ROUSSEL N., Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives, *Cement and Concrete Research*, vol. 40, n° 5, 2010, p. 820-826.
- [HOT 13] HOT J., BESSAIES H., BRUMAUD C., DUC M., CASTELLA C., ROUSSEL N., Adsorbing polymers and viscosity of cement pastes, submitted in *Cement and Concrete Research*.
- [HOU 99] HOUST Y. F., FLATT R. J., BOWEN P., HOFMANN H., Influence of superplasticizer adsorption on the rheology of cement paste, *Proceedings of the International RILEM Conference on The Role of Chemical Admixtures in High Performance Concrete*, Mexico, mars 1999, p. 387-402.
- [HU 96] HU C., DE LARRARD F., SEDRAN T., BOULAY C., BOSCH F., DEFLORENNE F., Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete, *Materials and Structures*, vol. 29, n° 10, 1996, p. 620-631.
- [JOL 98] JOLICOEUR C., SIMARD M. A., Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts, *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, n° 2, 1998, p. 87-120.
- [JOL 03] JOLICOEUR C., TO T. C., NGUYEN T. S., HILL R., PAGÉ M., Investigation of physico-chemical aspects of air entrainment in cementitious systems, *Proceedings of the 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Berlin, octobre 2003, ACI SP-217, p. 595-619.
- [KEN 87] KENDALL K., Interparticle friction in slurries, *Tribology in Particulate Technology*, Dunod Technique, Briscoe and Adam Edition, 1987, p. 91-102.
- [KHA 00] KHAYAT K. H., Optimization and performance of air-entrained, self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, vol. 97, n° 5, 2000, p. 526-535.
- [LAF 10] LAFARGE, Rapport de développement durable 2009, 2010.
- [LEM 09] LEMAÎTRE A., ROUX J. N., CHEVOIR F., What do dry granular flows tell us about dense non-Brownian suspension rheology?, *Rheological Acta*, vol. 48, n° 8, 2009, p. 925-942.
- [LOM 08] LOMBOIS-BURGER H., COLOMBET P., HALARY J. L., VAN DAMME H., On the frictional contribution to the viscosity of cement and silica pastes in the presence of adsorbing and non adsorbing polymers, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 11, 2008, p. 1306-1314.
- [MAN 99] MANSOUTRE S., COLOMBET P., VAN DAMME H., Water retention and granular rheological behavior of fresh C_3S paste as a function of concentration, *Cement and Concrete Research*, vol. 29, n° 9, 1999, p. 1441-1453.
- [MIE 58] MIELENZ R. C., Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete Part 1 - Entrained Air in unhardened concrete, *ACI Journal Proceedings*, 1958.
- [NIE 07] NIELSEN C.V., GLAVIND M., Danish experiences with a decade of green concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 5, n° 1, 2007, p. 3-12.
- [PAP 04] PAPO A., PIANI L., Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 11, 2004, p. 2097-2101.
- [PER 12] PERROT A., LECOMPTE T., KHELIFI H., BRUMAUD C., HOT J., ROUSSEL N., Yield stress and bleeding of fresh cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol. 42, n° 7, 2012, p. 937-944.
- [PHA 06] PHAN T. H., CHAOUICHE M., MORANVILLE M., Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 10, 2006, p. 1807-1813.
- [PIG 95] PIGEON M., PLEAU R., *Durability of concrete in cold climates*, Modern Concrete Technology 4, Edition E&FN SPON, Londres, 1995.
- [PRO 11] PROPARCO Groupe Agence française de développement, Le ciment, entre responsabilité écologique et impératifs économiques, *Secteur Privé & Développement*, n° 10, 2011.
- [ROU 10] ROUSSEL N., LEMAÎTRE A., FLATT R. J., COUSOT P., Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art, *Cement and Concrete Research*, vol. 40, n° 1, 2010, p. 77-84.
- [SHA 10] SHARP J., GARTNER E., MACPHEE D., Novel cement systems (sustainability). Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium, *Advances in Cement Research*, vol. 22, n° 4, 2010, p. 195-202.
- [STR 04] STRUBLE L. J., JIANG Q., Effects of air entrainment on rheology, *ACI Materials Journal*, vol. 101, n° 6, 2004, p. 448-456.
- [UCH 97] UCHIKAWA H., HANEHARA S., SAWAKI D., The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture, *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 1, 1997, p. 37-50.
- [WAL 03] WALLEVIK O., Rheology - a scientific approach to develop self-compacting concrete, *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, août 2003, p. 23-31.