

Quel paramètre mécanique contrôle la viscosité ?

Daniel R. Neuville

Physique des Minéraux et Magmas
CNRS-IPGP



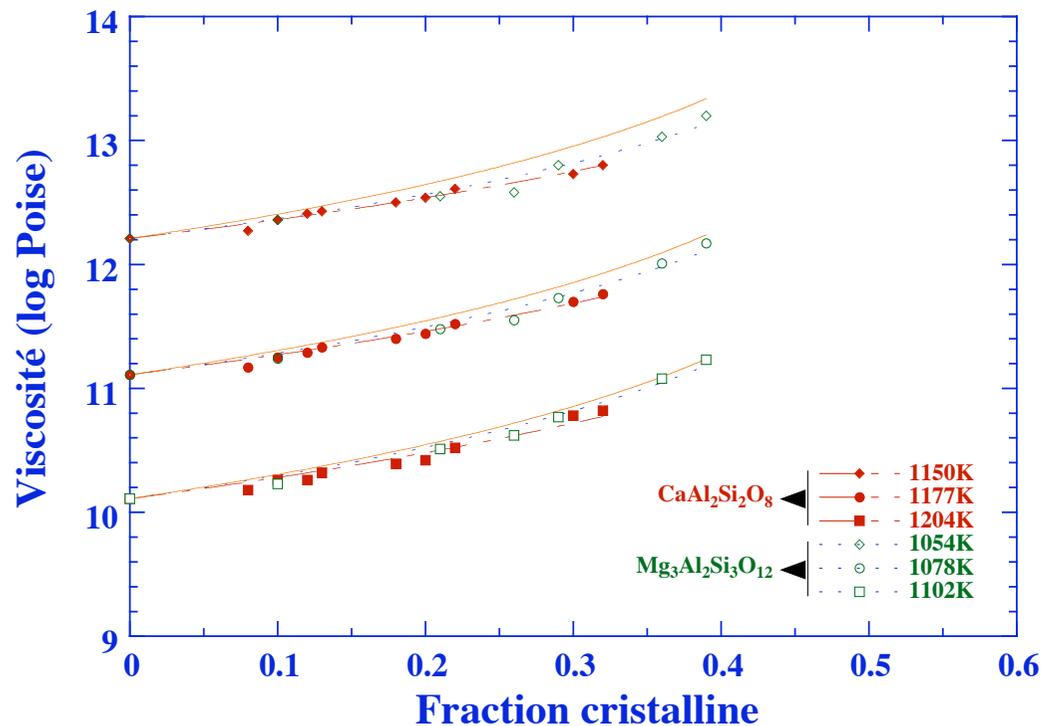
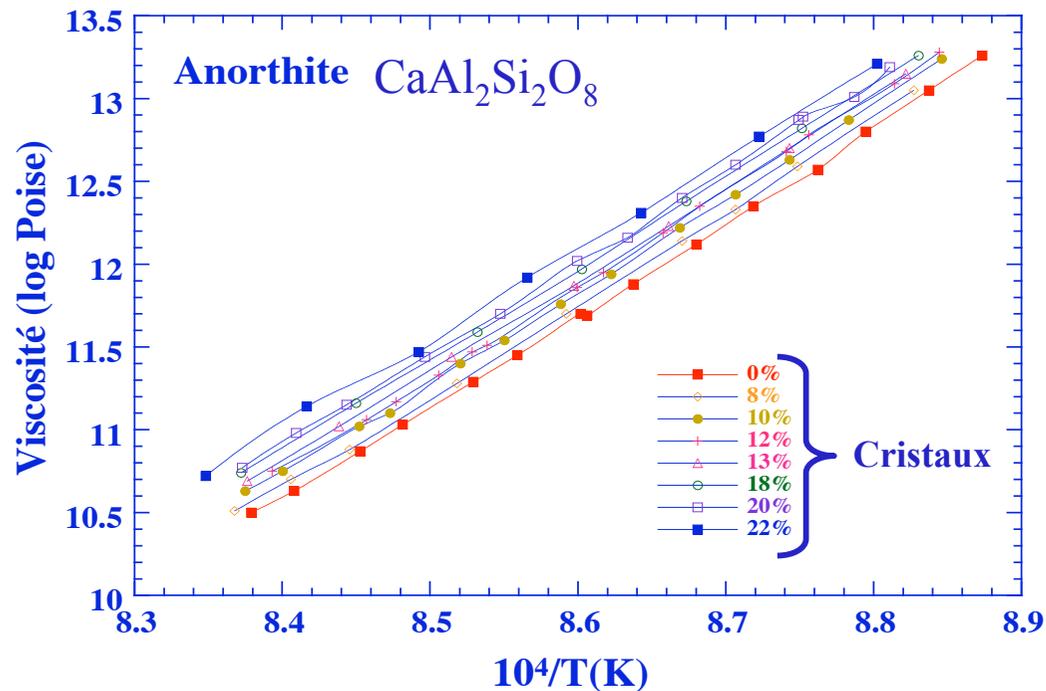
L'effet mécanique...

Nous allons voir dans cette partie, l'influence des inclusions solides, gazeuses et des volatils sur la viscosité.

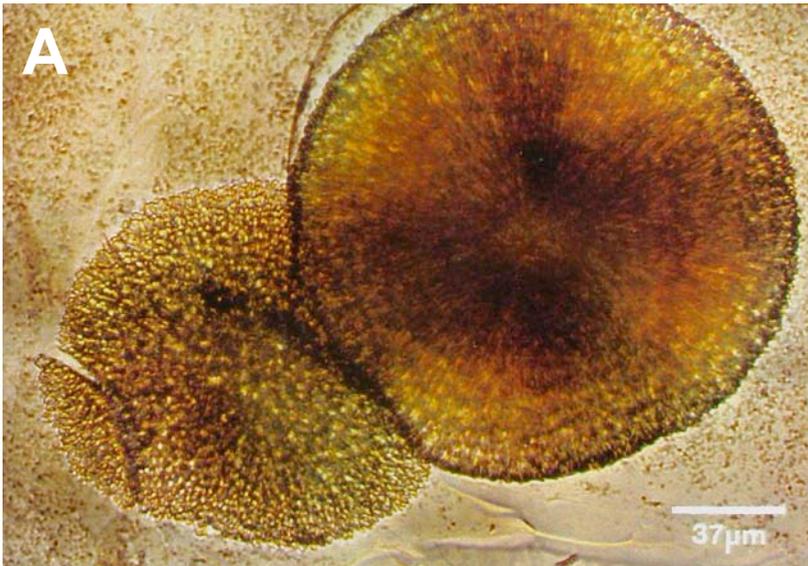
Cristaux...

Afin de comprendre le rôle des cristaux sur la viscosité, il nous a fallu trouver des compositions eutectiques pour ne pas modifier la composition chimique du liquide pendant la cristallisation : nous aurons donc dans les exemples présentés le liquide et les cristaux toujours avec la même composition. Ce qui ne correspond pas effectivement au cas réel caractérisé par la cristallisation fractionnée qui entraîne une modification du liquide résiduel au cours de la cristallisation. Eutectique ???

Les deux compositions étudiées sont des liquides à composition de pyrope, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ et d'anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.



Dans la figure ci-contre, nous avons reporté la viscosité pour une composition d'anorthite fondue, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, et partiellement cristallisée entre 0 et 22%. On constate que la viscosité augmente de 0,5 ordre de grandeur entre 0 et 22% de cristaux. Des résultats équivalents sont obtenus quelque soit la composition chimique comme on peut le voir dans la figure ci-dessous. Dans cette figure, nous avons reporté la viscosité des deux liquides étudiées (en rouge et vert) et on constate que pour des températures différentes liées à la composition chimique des silicates fondus, la viscosité suit le même comportement entre 0 et 40% de cristaux quelques soient la forme des cristaux (voir page suivante)



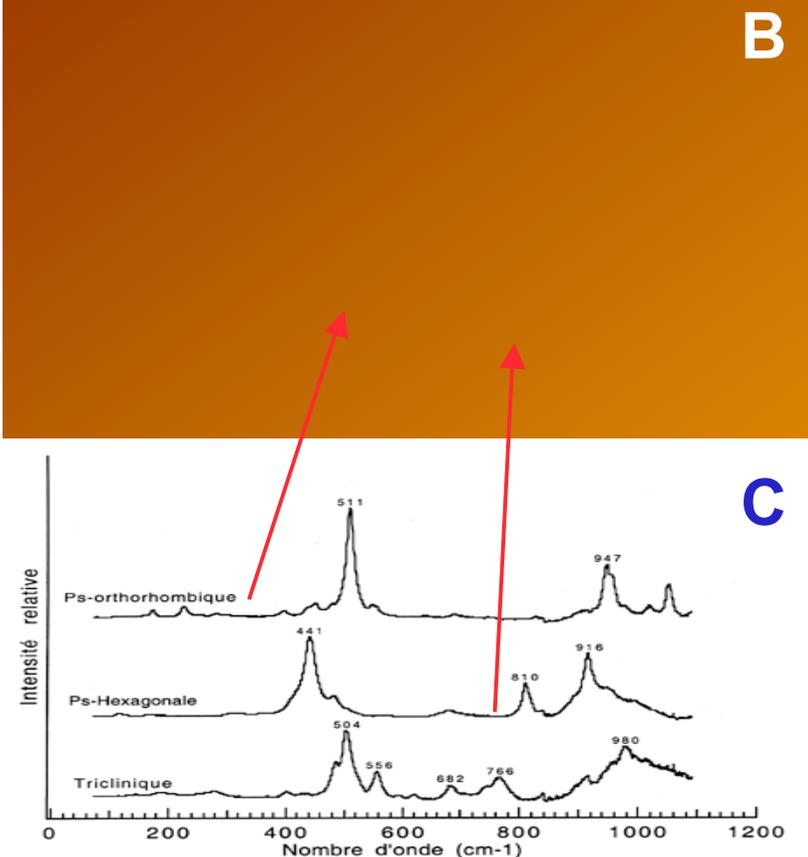
La figure A, représente des sphérolites d'enstatite alumineuse, phase stable de composition $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$, qui se forme lors de la cristallisation d'un liquide de pyrope $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ au dessus de la température de transition vitreuse. C'est la présence physique de ces sphérolites qui fait augmenter la viscosité de un ordre de grandeur entre 0 et 40% de cristaux.

Lors de la cristallisation d'un liquide à composition d'anorthite, $CaAl_2Si_2O_8$ on n'observe pas de sphérolite mais des cristaux parallélépipédique ou hexagonaux (photo B). Ces cristaux ont été caractérisés par spectrométrie Raman et correspondent à des polymorphes de l'anorthite $CaAl_2Si_2O_8$, (figure C).

Donc, jusqu'à 40% de cristaux, et quelle que soit la forme des inclusions cristallines, la viscosité suit le même comportement, et pourra être reproduite en utilisant une relation de Einstein-Roscoe :

$$\eta = \eta_0 (1 - R\Phi)^{-n}$$

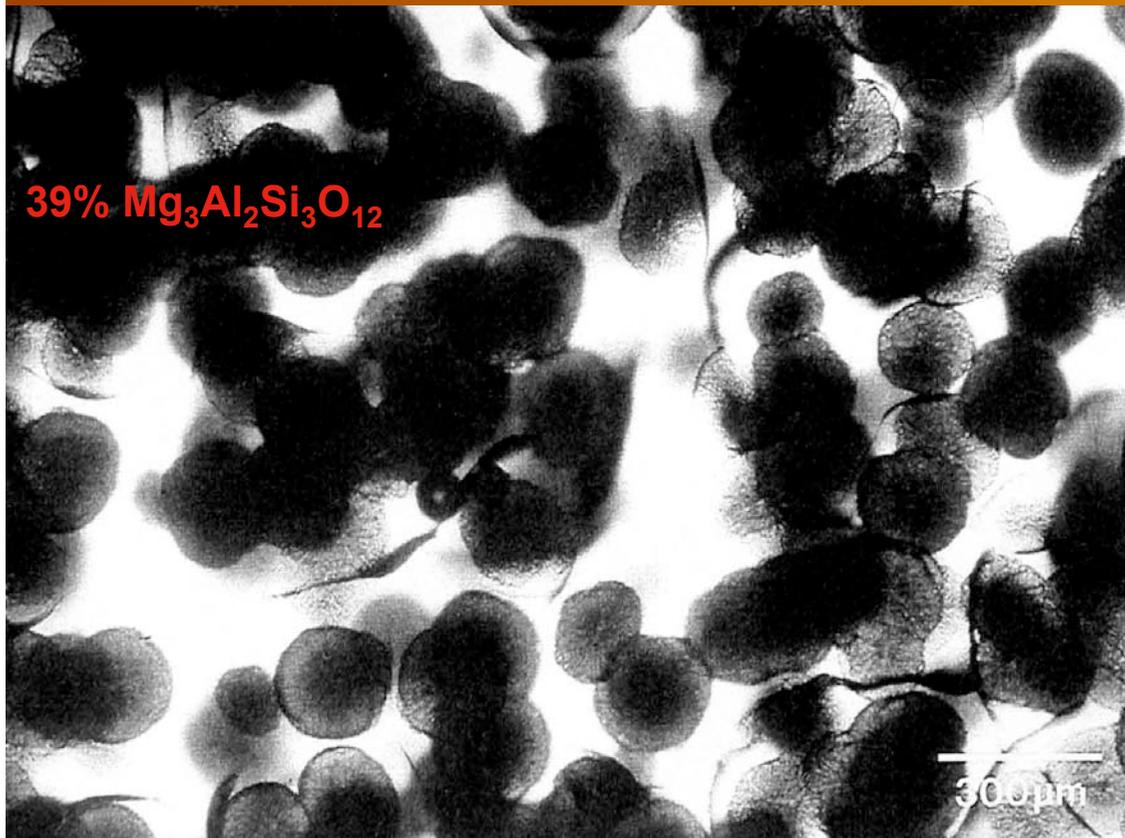
Avec η_0 la viscosité du liquide homogène, R , l'empilement maximum compact, Φ la fraction volumique de particules en suspension. Cette équation permet de reproduire les courbes de viscosité données précédemment.

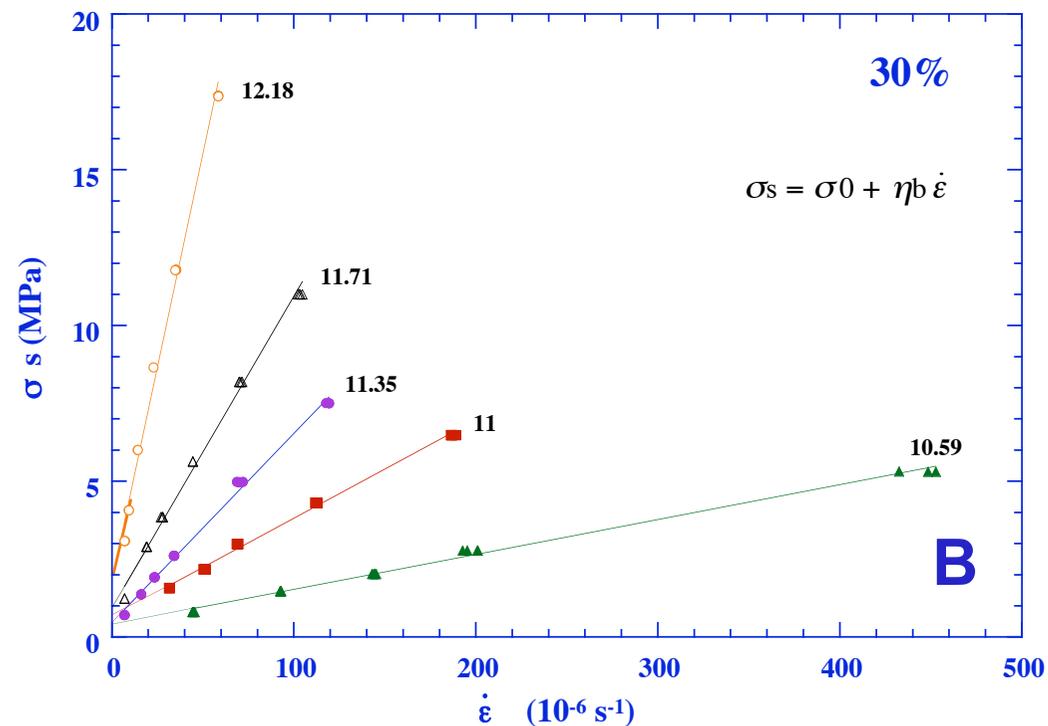
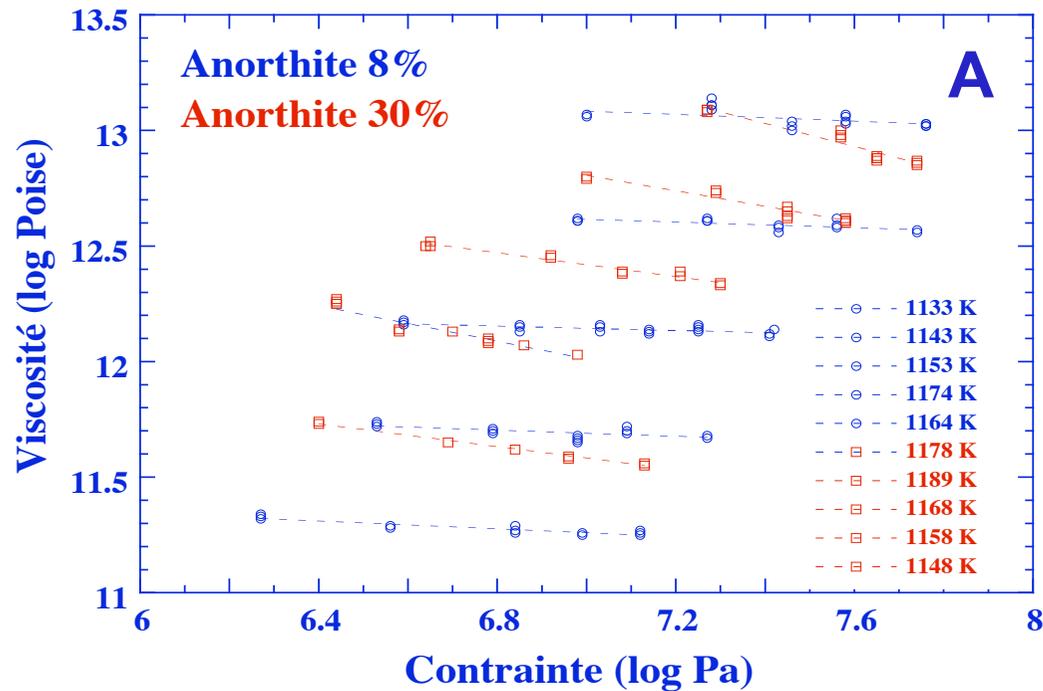


Mais que ce passe-t-il au delà de 30-40% de cristaux ?

À partir de 30% et 40% respectivement pour un liquide à composition de pyrope, $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ et d'anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ la viscosité augmente rapidement et franchi le 1^{er} seuil de percolation.

Au delà de ce seuil, le matériau est « armé » et la déformation n'est plus newtonienne. La viscosité est dépendante de la vitesse et de la contrainte de déformation.

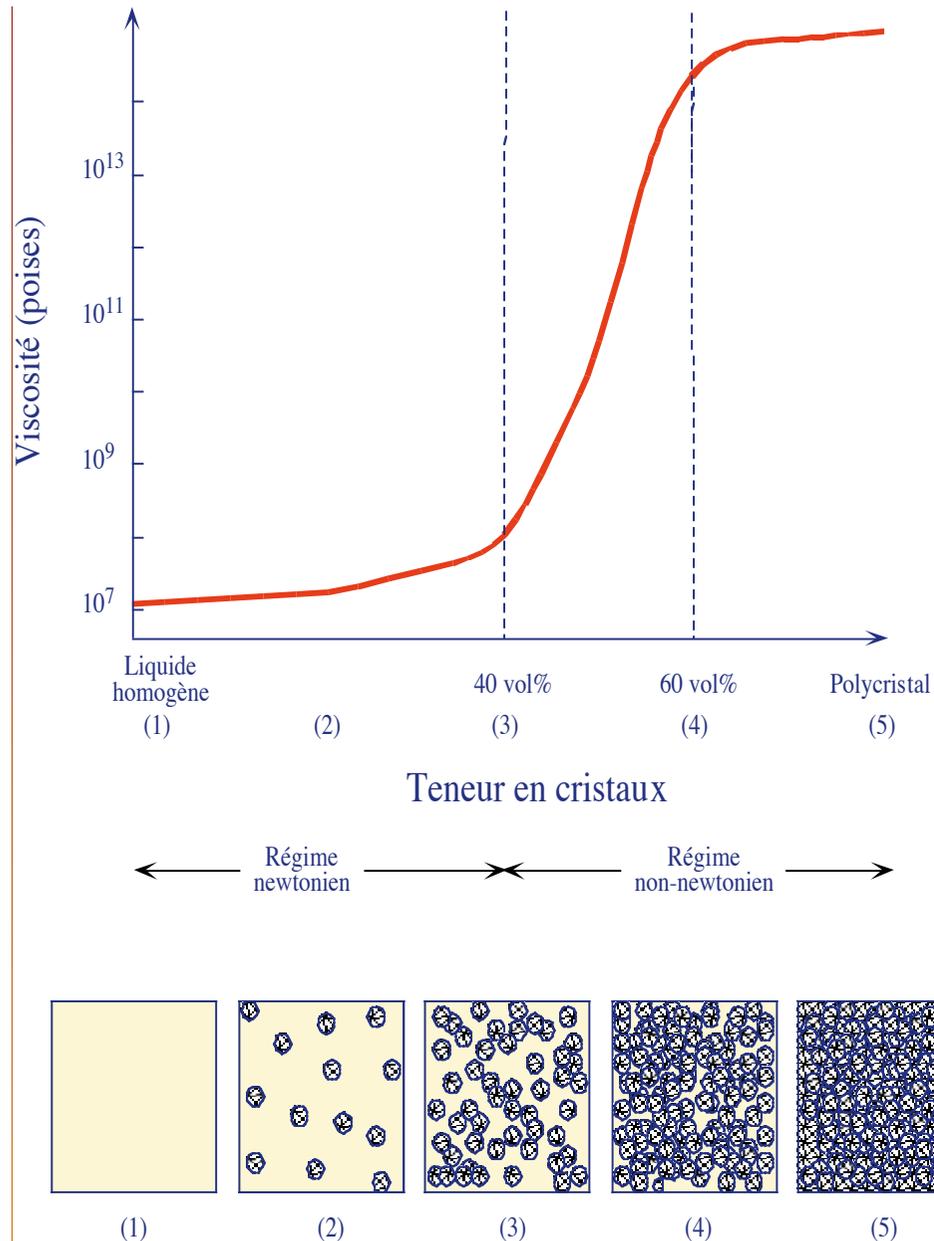




Dans la figure A, nous avons porté la viscosité pour un liquide à composition d'anorthite $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, avec 8 et 30% de cristaux.

Avec 8% de cristaux, la viscosité est newtonienne, indépendante de la contrainte appliquée ou de la vitesse de déformation. Pour 30% de cristaux, la viscosité diminue avec la contrainte : effet non-newtonien, ou rhéofluidifiant.

Une autre façon de représenter un comportement non-newtonien se trouve dans la figure B. Dans le cas d'un fluide newtonien, les droites contraintes versus vitesses de déformation passent par l'ordonnée à l'origine. Dans le cas, d'un fluide non-newtonien, ces droites ne passent pas par l'origine comme on peut le voir dans la figure B.



Pour conclure sur l'effet des cristaux, on peut observer la variation de viscosité en fonction de la teneur en cristaux, ϕ . On observe 3 domaines distincts :

- $\phi < 40\%$ de cristaux, faible influence sur la viscosité et comportement newtonien.
- $40 < \phi < 60\%$ régime transitoire abrupt, la viscosité est non newtonienne et elle augmente énormément avec la teneur en cristaux.
- $\phi > 60\%$ solide cristallin avec un peu de liquide, comportement non-newtonien et les lois de fluage sont celles des solides et non plus des liquides.

Au delà de 40%, on ne peut plus décrire simplement la viscosité qui dépend de la taille des cristaux, de leur agencement, et du mode de déformation.

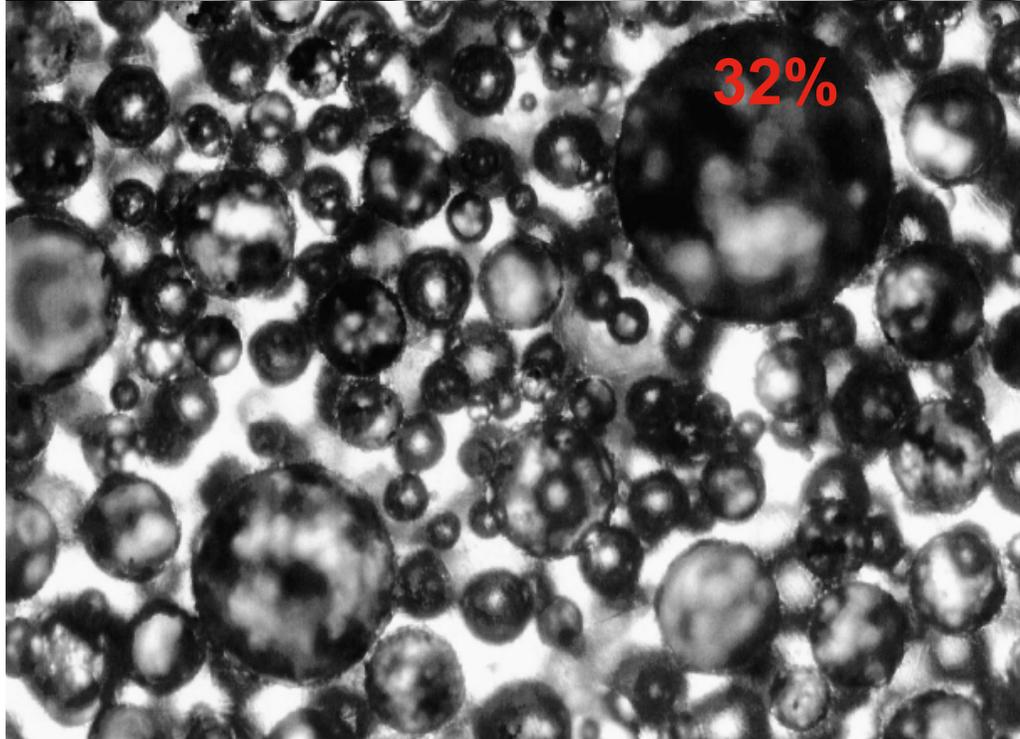
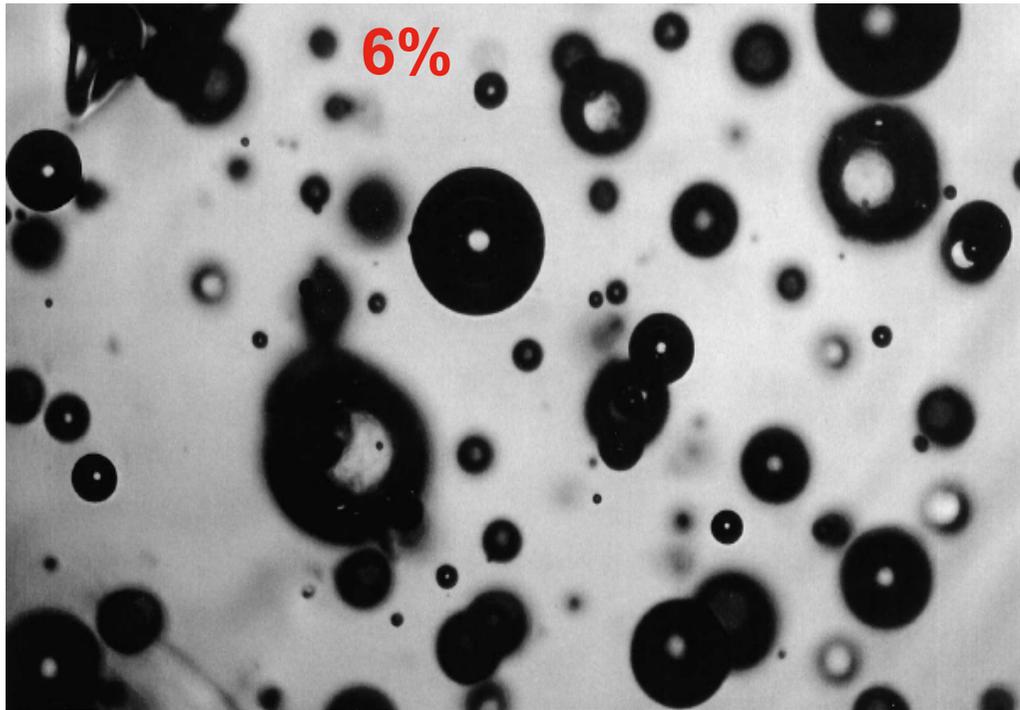
Pour avoir plus d'informations:

Lejeune, A.-M. and P. Richet (1995). "Rheology of crystal-bearing silicate melts: An experimental study at high viscosities." J. Geophys. Res. **100**: 4215-4229.

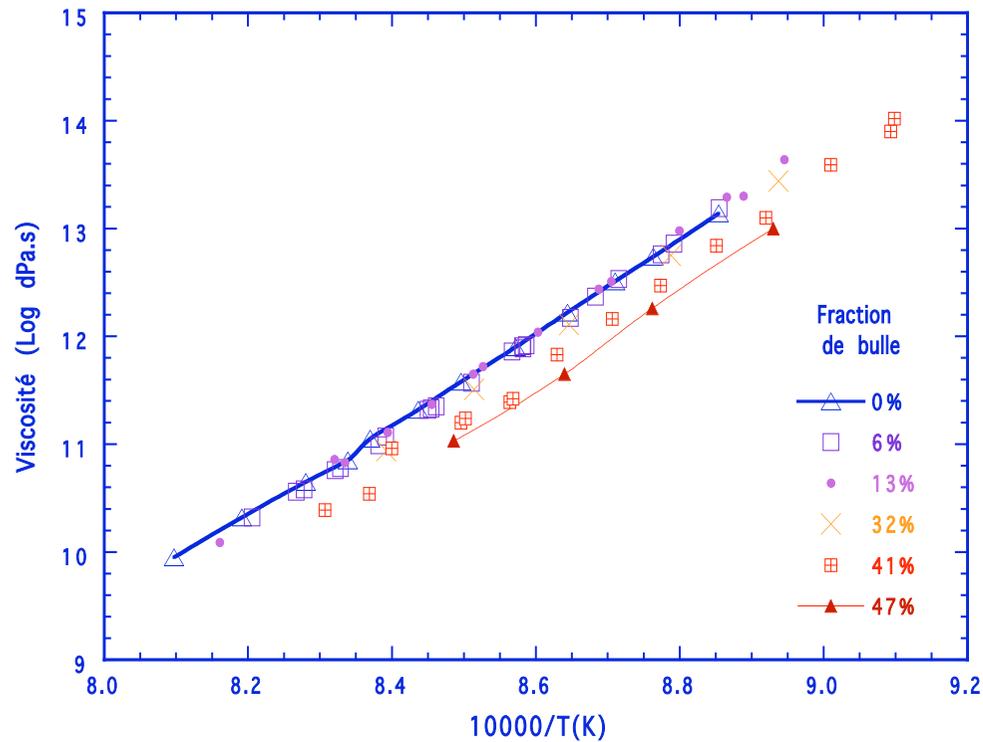
Lévesque, S., 1999. Rhéologie de silicates fondus et de laves partiellement cristallisées. Thèse, Univ., Marne-la-vallée. 157 pp.

Bulles...

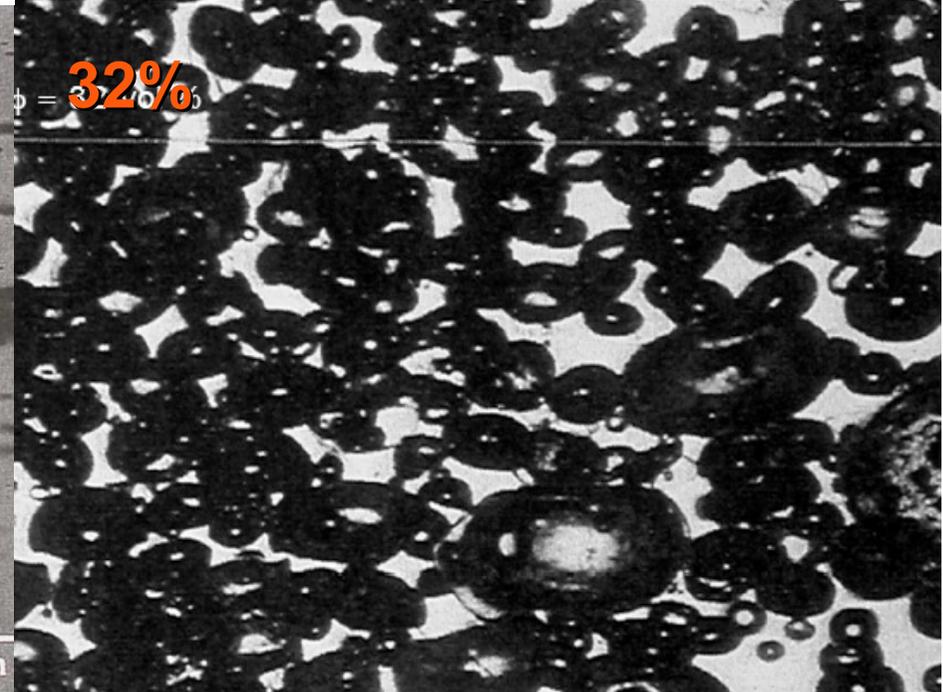
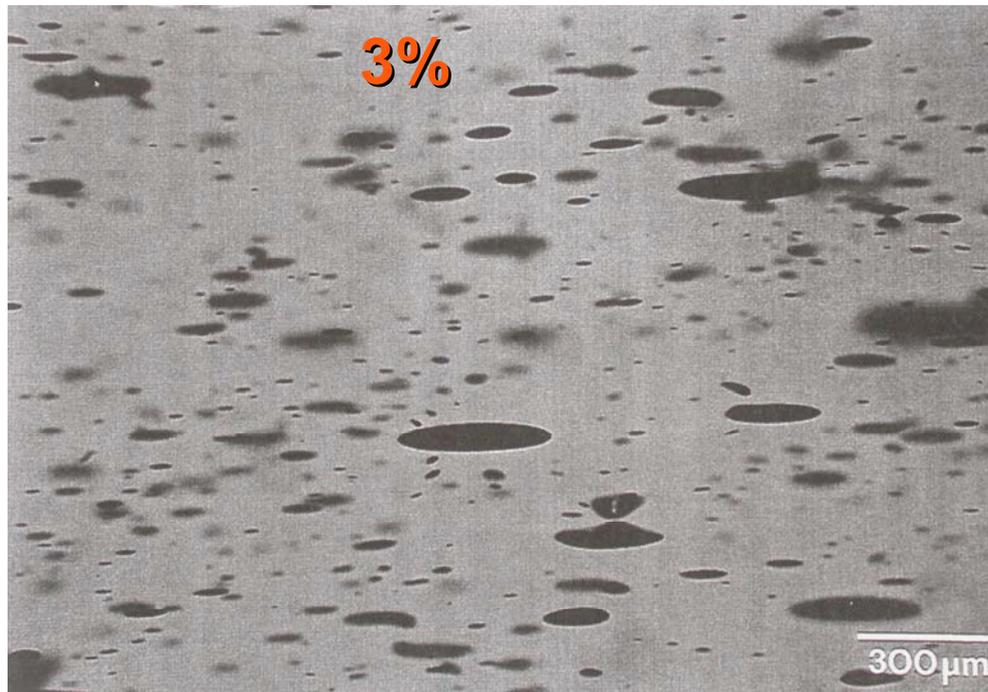
Pour comprendre le rôle des bulles sur la viscosité, nous avons introduit des bulles d'air dans un silicate de calcium.

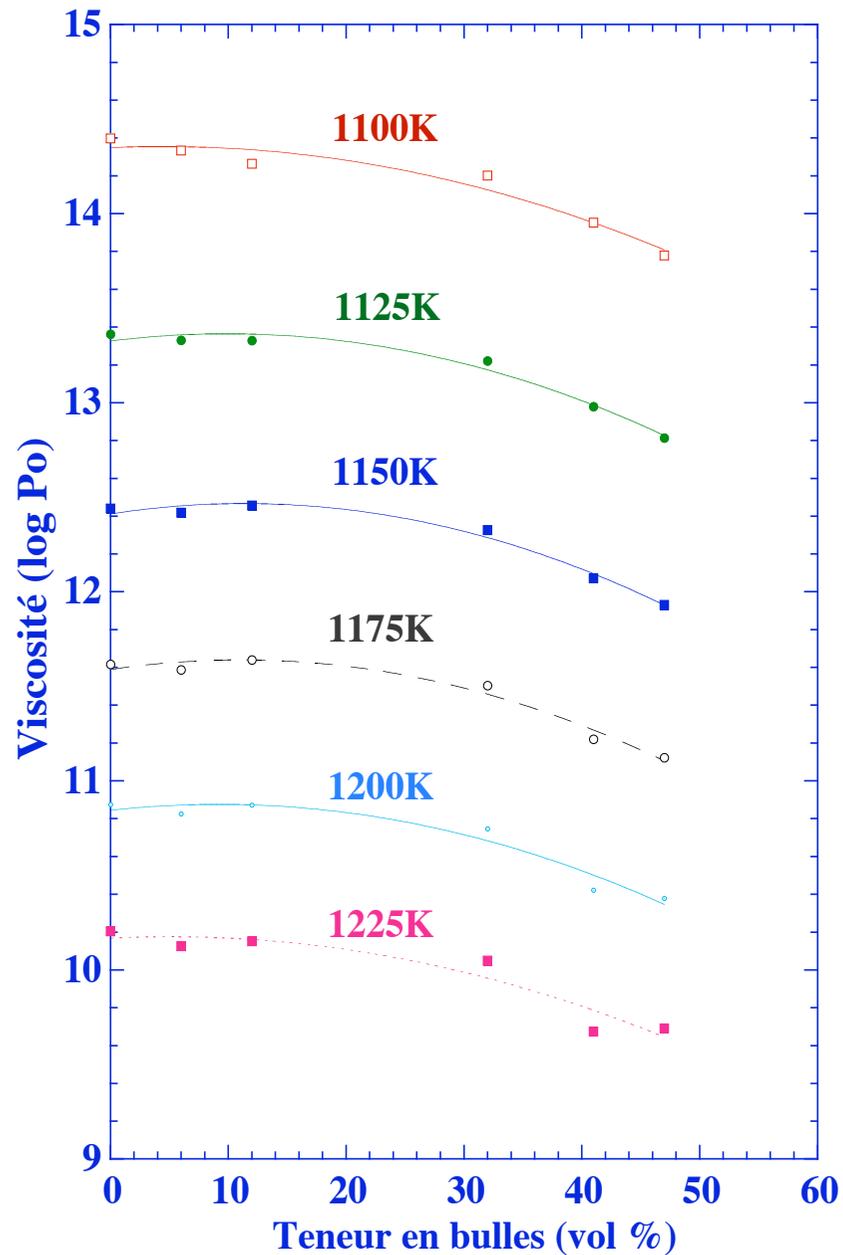


Échantillon de silicate de calcium avec
6 et 32 % de bulles.



Viscosité en fonction de l'inverse de la température pour des aluminosilicates de calcium avec différents teneurs de bulles. On observe que la présence de bulle fait diminuer la viscosité. Cependant cet effet est faible, moins d'un ordre de grandeur pour 40% de bulles. La viscosité reste newtonienne pour des teneurs de bulles jusqu'à 40%. Lors des expériences en compression, les bulles s'écrasent (voir photo ci-dessous).





Les viscosités reportées dans la figure ci-contre, peuvent être reproduite facilement en utilisant à nouveau la relation de Einstein-Roscoe utilisée dans le cas des cristaux en suspension :

$$\eta = \eta_0 (1 - R\Phi)^n$$

Mais à la différence avec le cas précédent, le facteur n est négatif avec des bulles. A faible contrainte, le liquide se comporte comme un fluide newtonien.

A viscosité élevée ($>10^9$ poises) les forces de déformation visqueuse correspondant à la contrainte appliquée sont supérieures aux tensions de surface des bulles. Ces forces provoquent une déformation des bulles, responsables de la diminution de la viscosité.

Pour les viscosités élevées, les bulles et les cristaux ont un effet antagoniste. On peut noter que jusqu'à 30% d'inclusions l'effet des bulles va annuler l'effet dû aux cristaux.

Pour avoir plus d'informations:

Lejeune, A. M., Y. Bottinga, Trull T. and Richet P. (1999). "Rheology of bubble-bearing magmas." *Earth Planet. Sci. Lett.* **166**: 71-84.