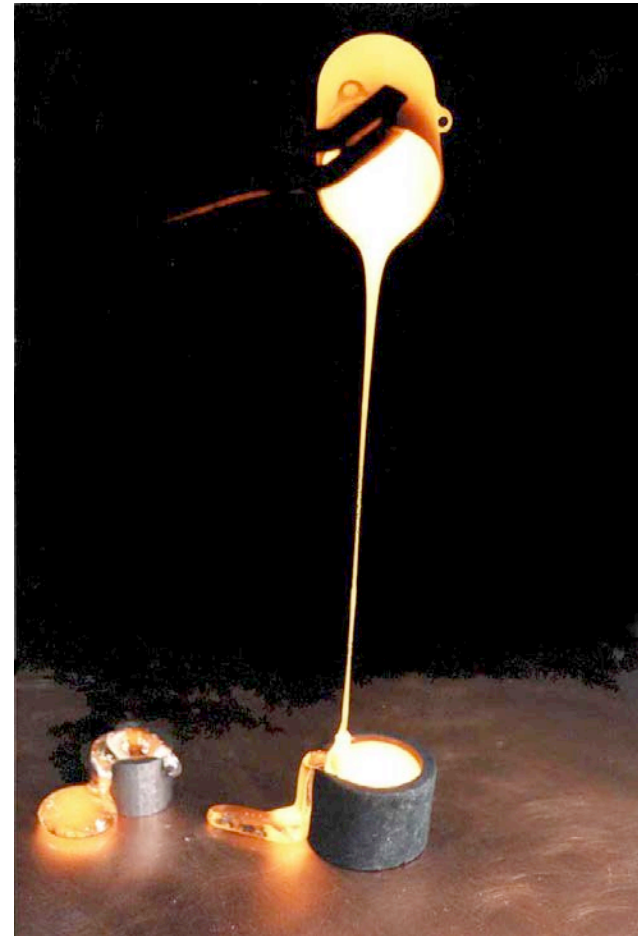
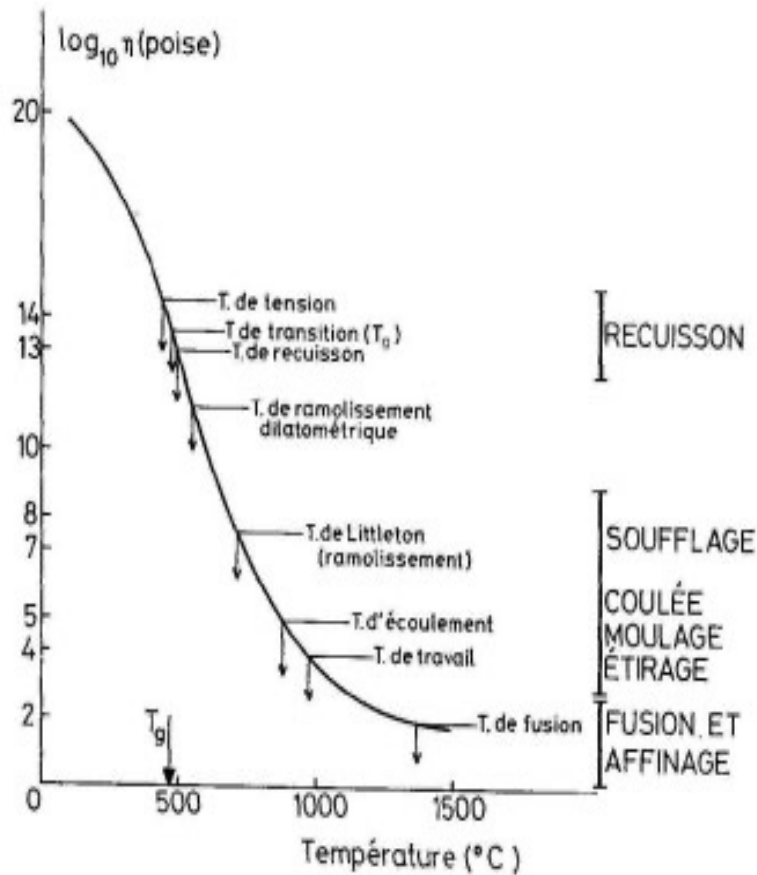
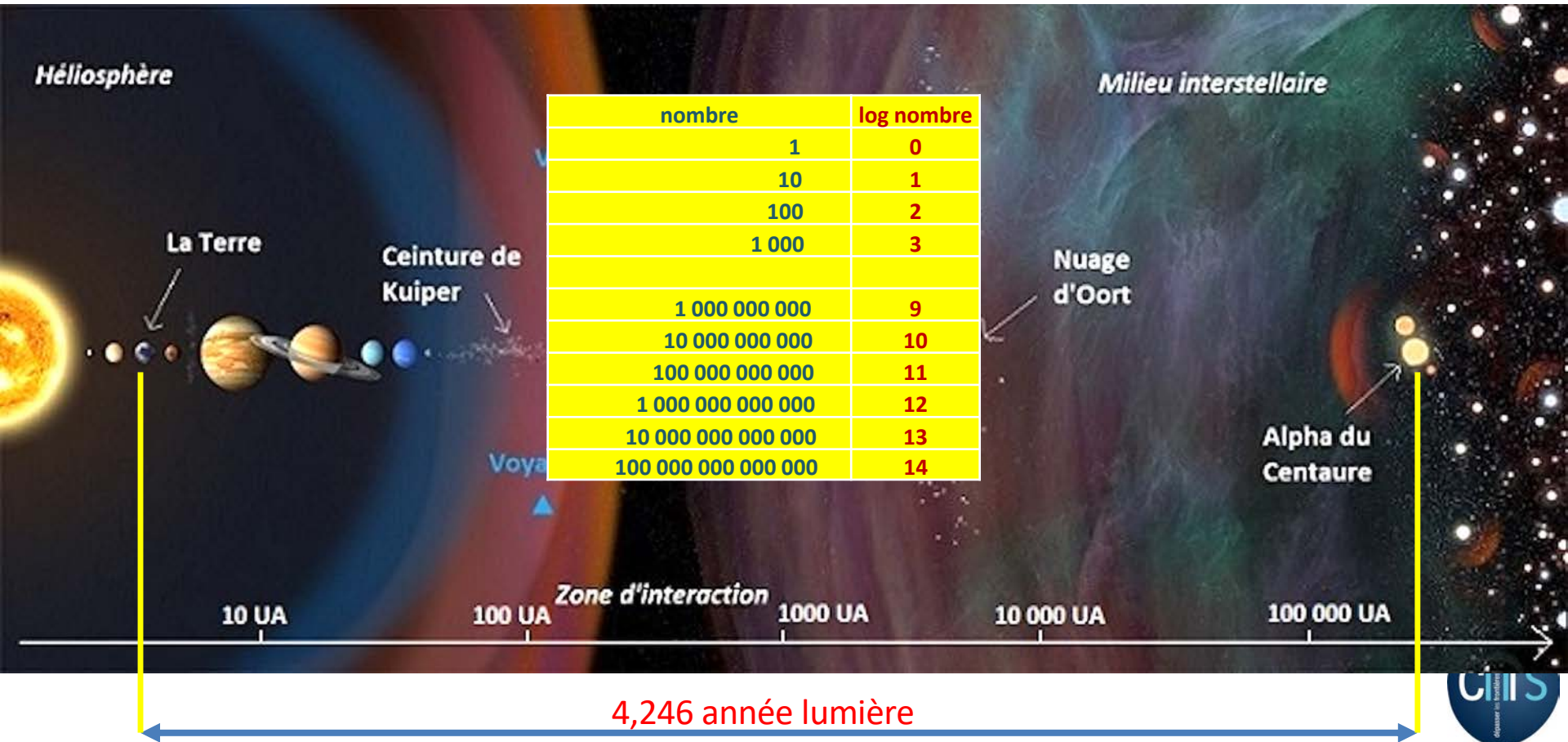


# La viscosité des silicates vitreux et fondus?

Daniel R. Neuville



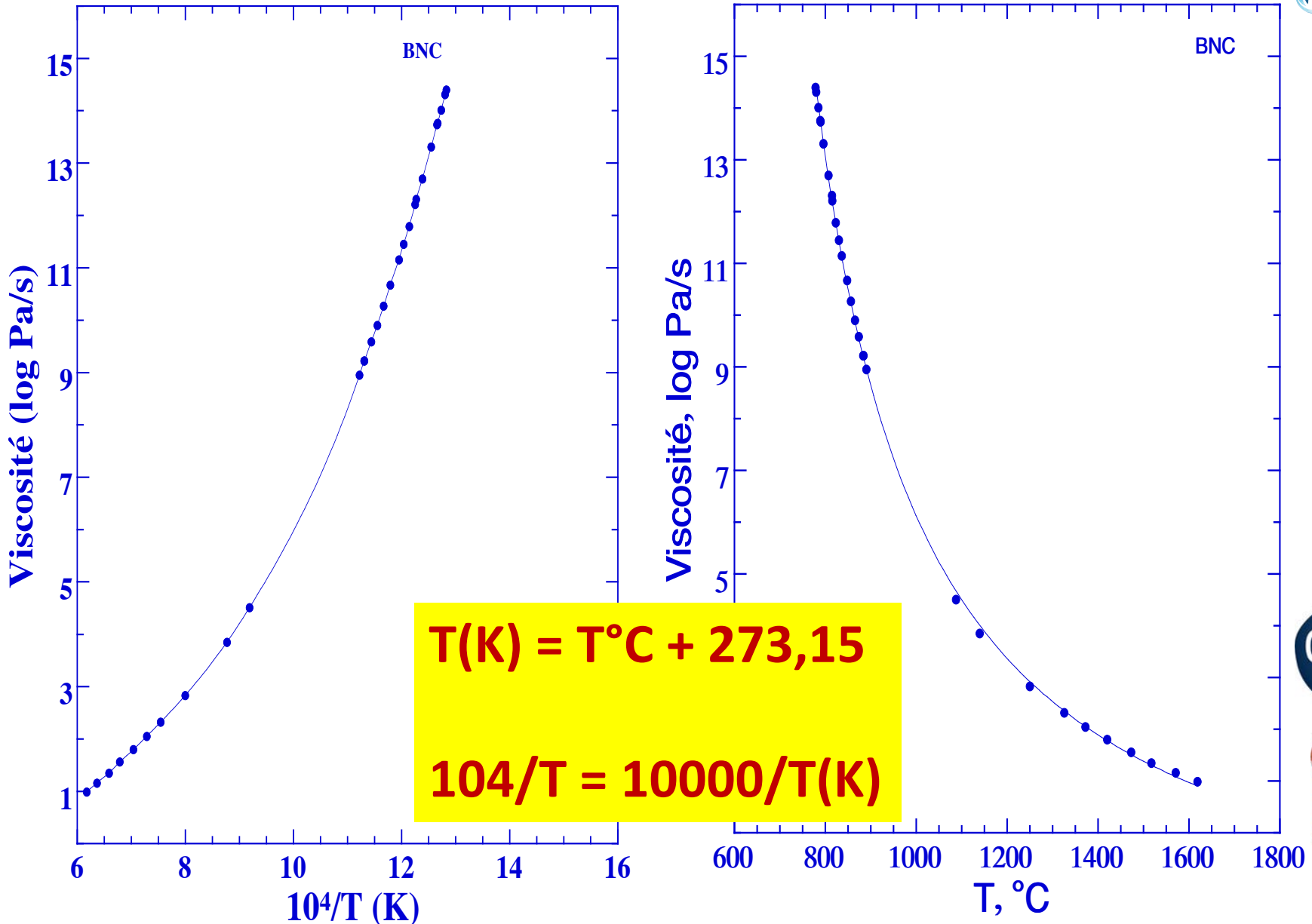


4,246 année lumière

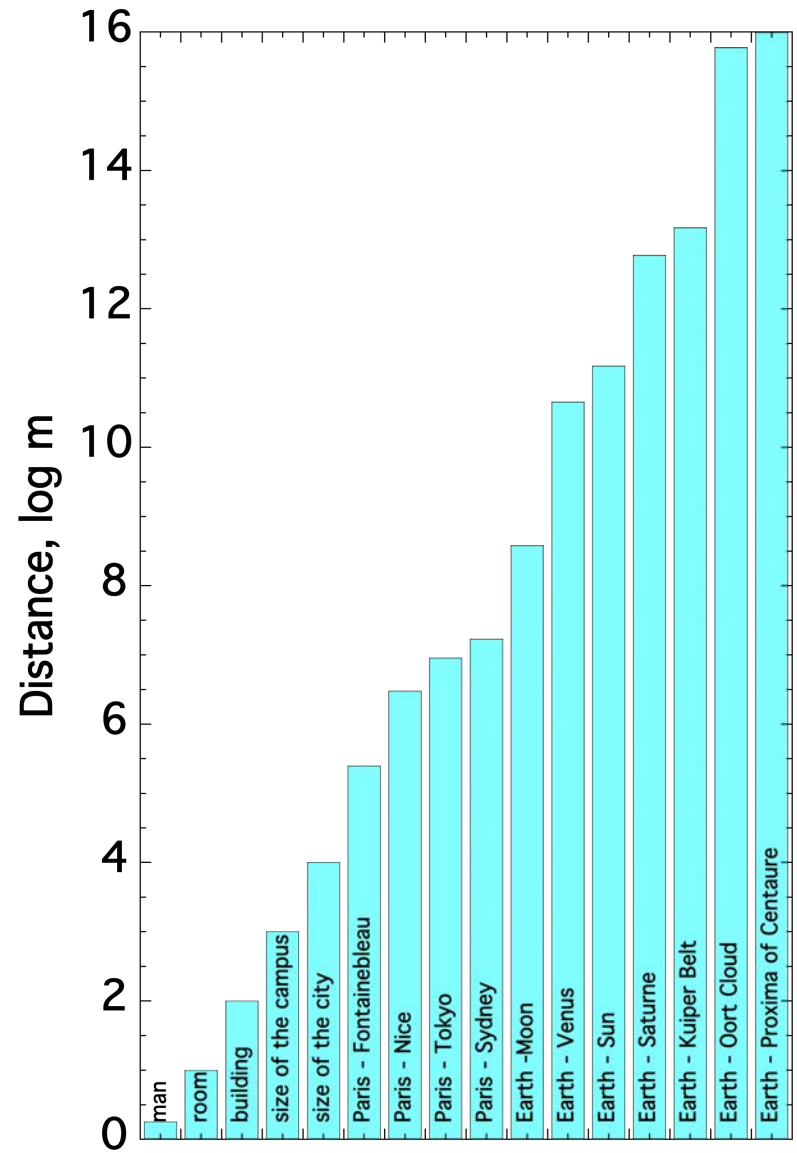
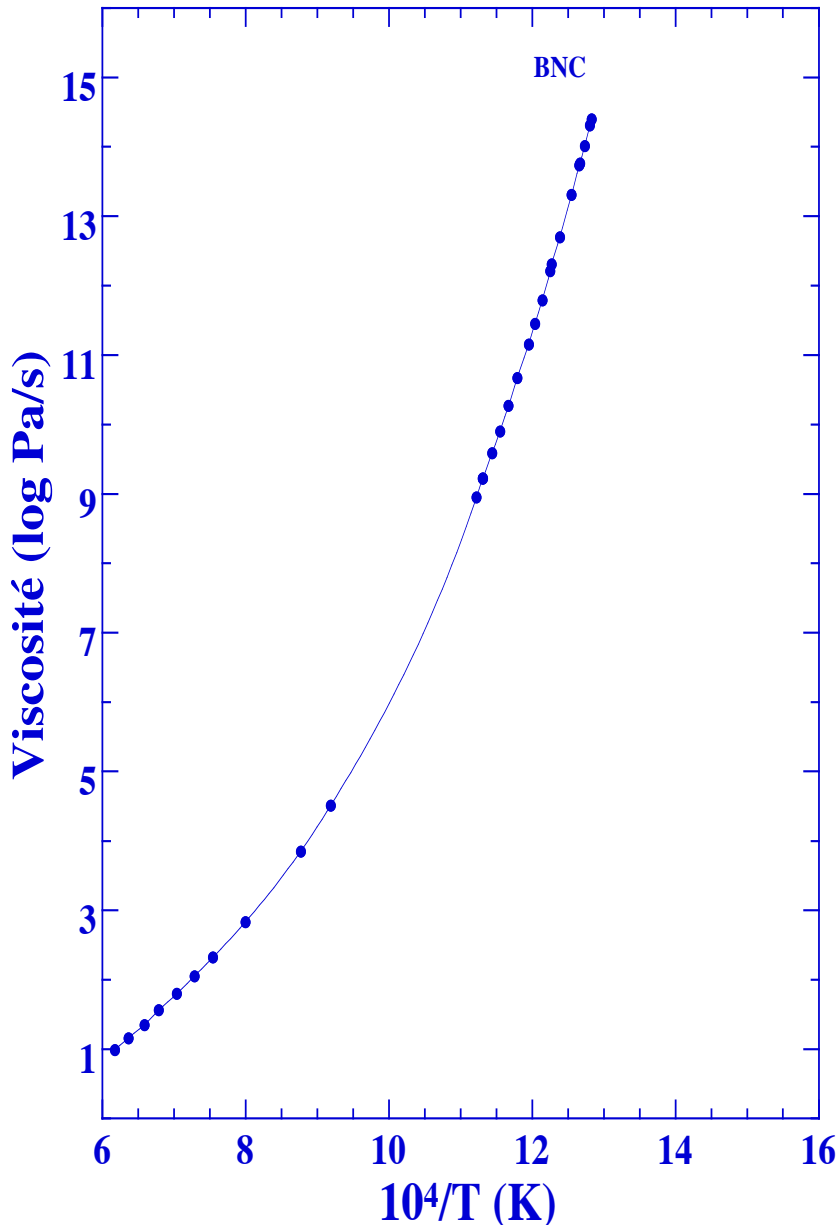
1 année lumière = 9461000000000 km = 9461000000000000 m

4,246 année lumière = 40171406000000000 m = **16,6 log m**

Grand nombre -> difficile à mesurer



Grand nombre -> difficile à mesurer





## Mesure aux fortes viscosités – basse température

### Flexion de tige de verre

Hagy, 1963

Fontana et Plummet, 1966,

Napolitano et al., 1964

### Étirement de fibre

Poole, 1948

Napolitano et al., 1964

Dingwell à Bayreuth jusqu'en 1998

### Machine de torsion

Mesure de cisaillement, obtention  
des modules de cisaillement,  
jusqu'à 1000°C, avec des  
fréquences entre 1 mHz et 10Hz.  
Dispositif de S. Webb : Gottingen

### Dispositif de pénétration

Saucier, 1952, ENS Paris

Y. Gueguen, Rennes

Dingwell, Munich

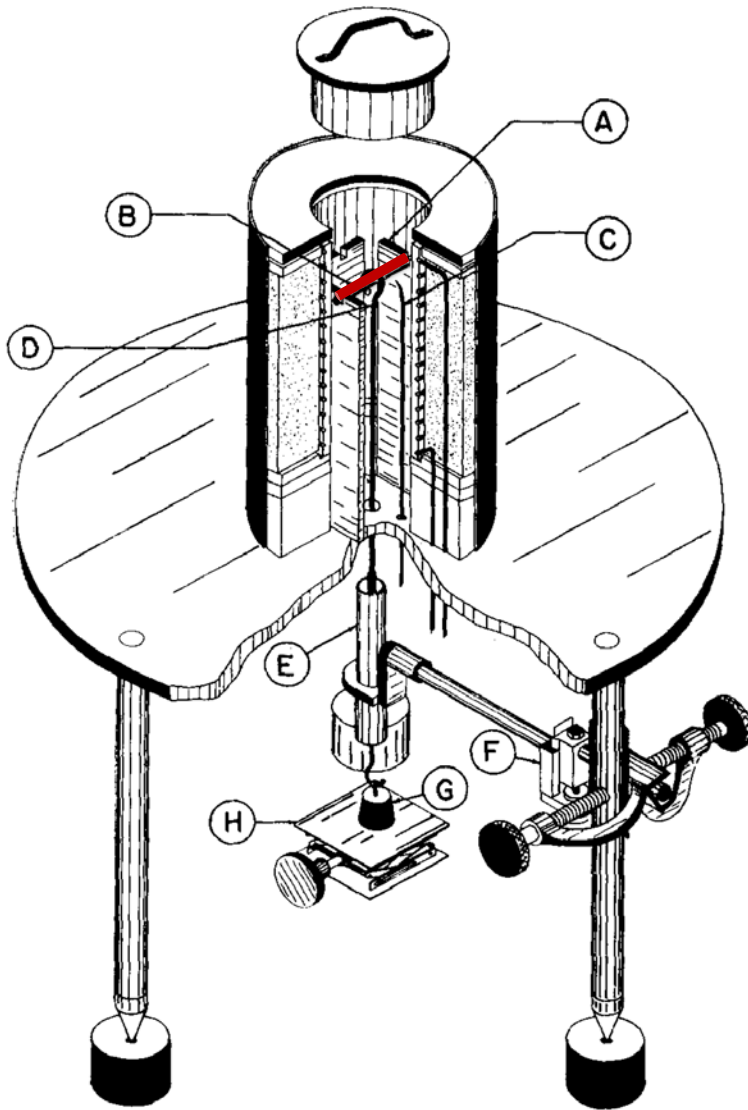
### Ecrasement,

Sabatier, 1959

Fontana, 1969

marche bien, faible gradient  
thermique <1°C

Mais charge de 12kg



## Flexion de tige de verre

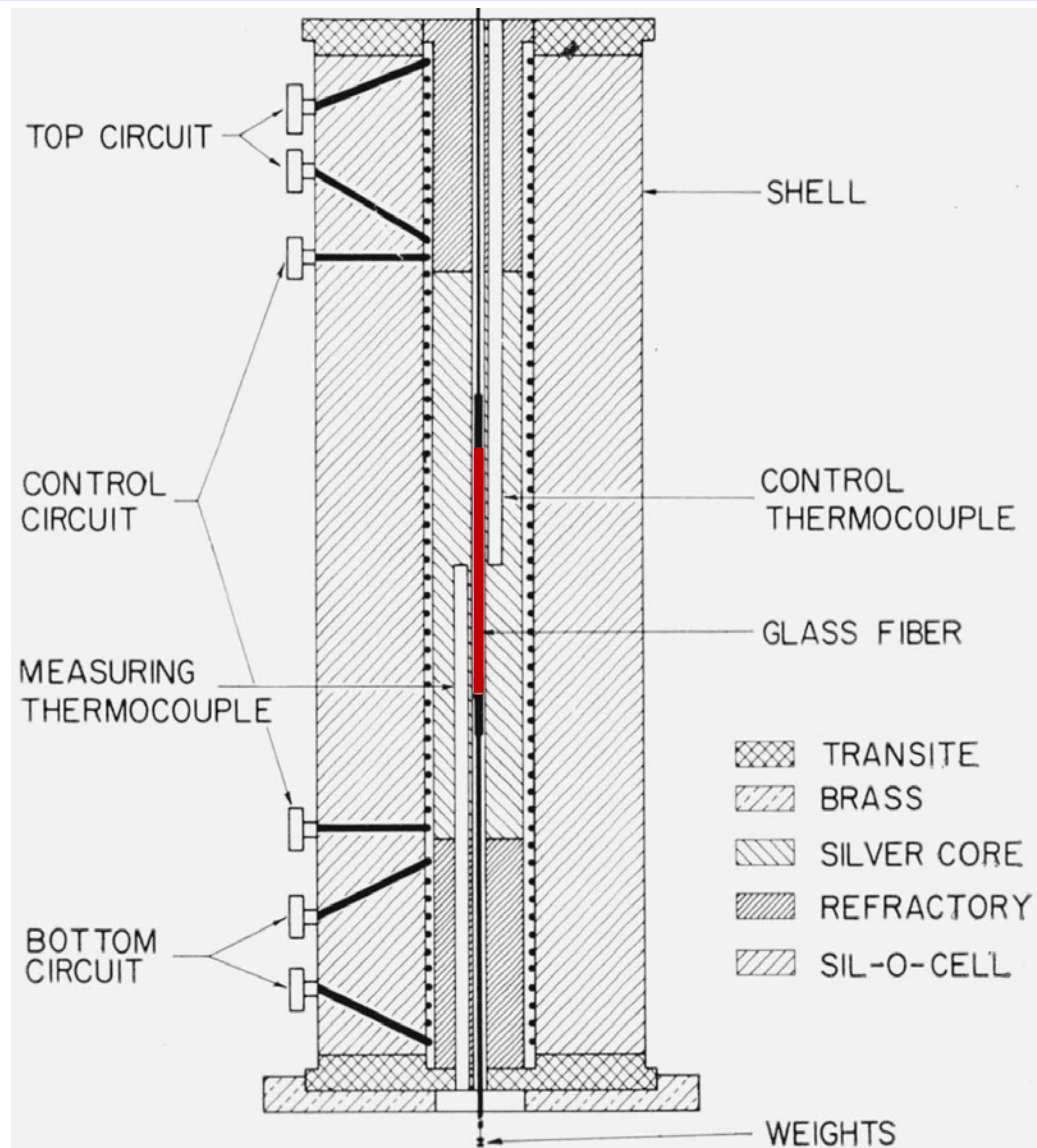
Hagy, 1963

Fontana et Plummet, 1966,

Napolitano et al., 1964

Fig. 1. Cutaway drawing of beam-bending apparatus showing (A) alumina support stand, (B) specimen beam, (C) thermocouple, (D) flame-bent sapphire loading rod, (E) linear variable differential transformer, (F) clamping arrangement for transformer, (G) weight, (H) small laboratory jack.

# Mesure aux fortes viscosités



## Étirement de fibre

Poole, 1948

Napolitano et al., 1964

Dingwell à Bayreuth jusqu'en 1998

problème de contrôle du gradient thermique

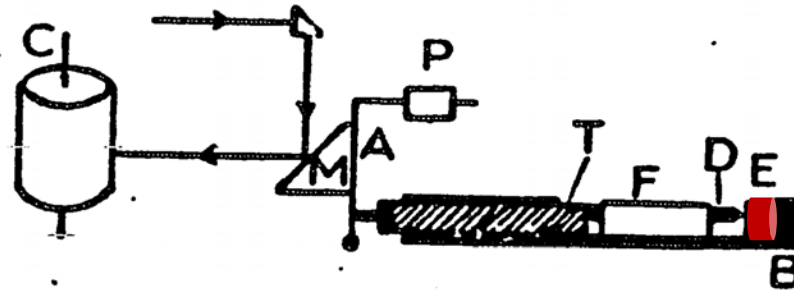
FIGURE 3. *Low-temperature viscosity furnace.*

## Mesure aux fortes viscosités



### **Machine de torsion**

Mesure de cisaillement, obtention des modules de cisaillement, jusqu'à 1000°C, avec des fréquences entre 1 mHz et 10Hz. Dispositif de S. Webb : Gottingen



**FIG. II-1. — Principe du pénétromètre. A bras mobile portant le contrepois P et le miroir M. B berceau de silice vitreuse, dans lequel coulisse la tige T en silice également; la tige de corindon D est supportée par un patin F en silice. En E l'échantillon à étudier. C cylindre enregistreur.**

## Dispositif de pénétration

Saucier, 1952, ENS Paris

Y. Gueguen, Rennes

Dingwell, Munich



# Mesure aux fortes viscosités

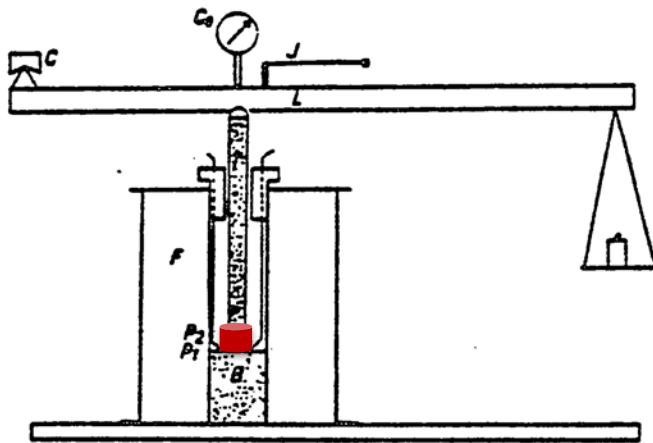


FIG. 1. — Dispositif expérimental.

B : bloc d'alumine frittée ; C : couteau ; C<sub>o</sub> : comparateur pouvant être remplacé par une jauge extensométrique J ; F : four ; L : bras de levier ; P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> ; rondelles de platine ; T : tige en alumine frittée.

## Ecrasement,

Sabatier, 1959

Fontana, 1969

marche bien, faible gradient thermique  $<1^{\circ}\text{C}$

Mais charge de 12kg

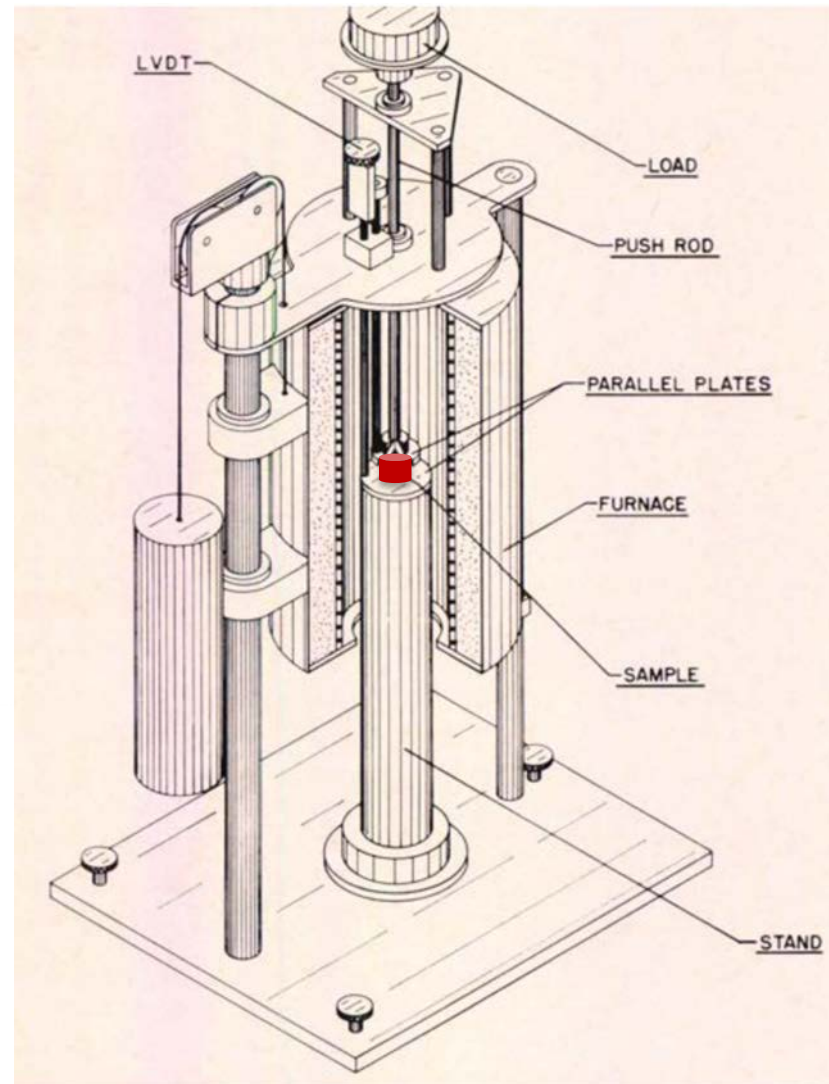


Fig. 1. Parallel plate viscometer.



# Machine d'écrasement JP Caron, 1968

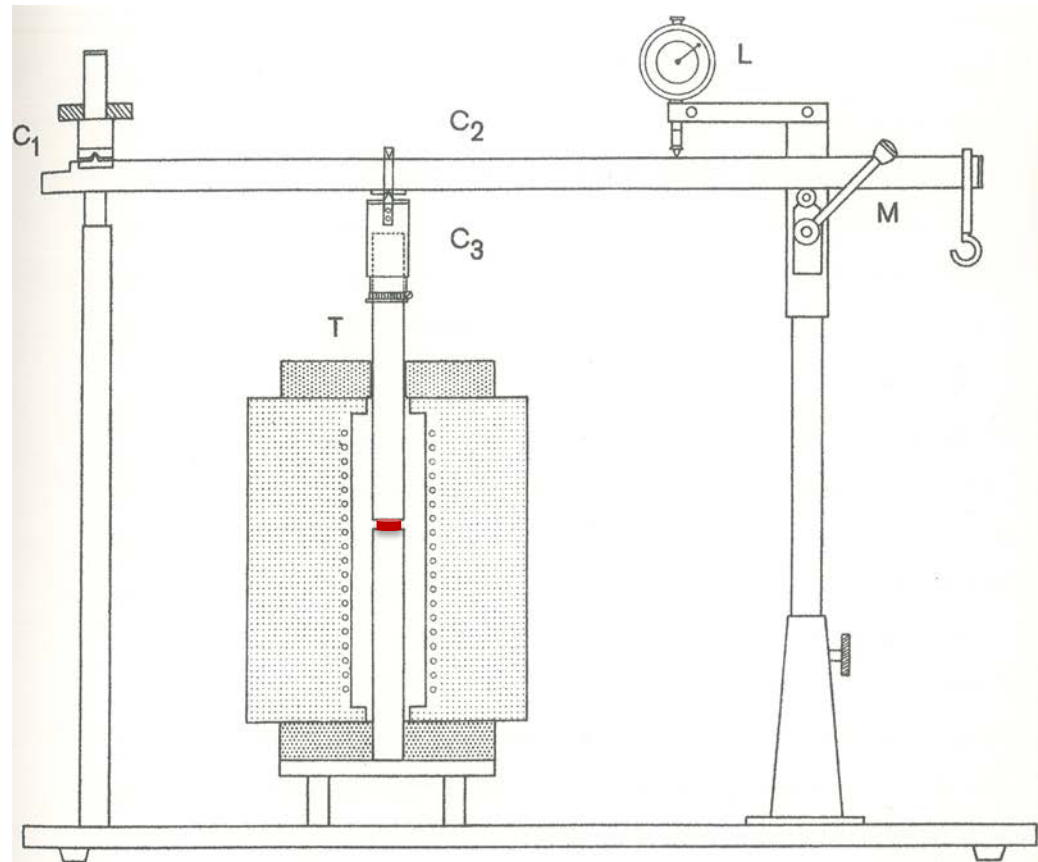
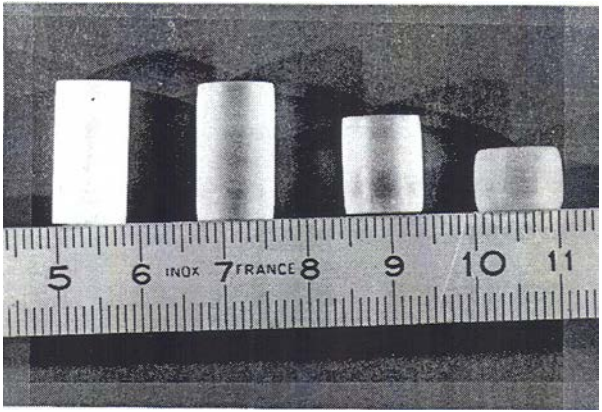
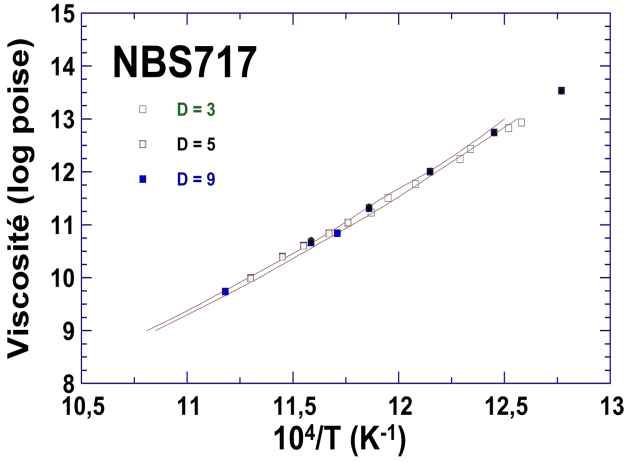
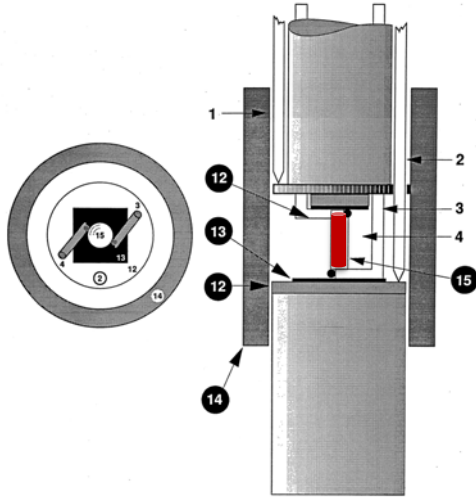
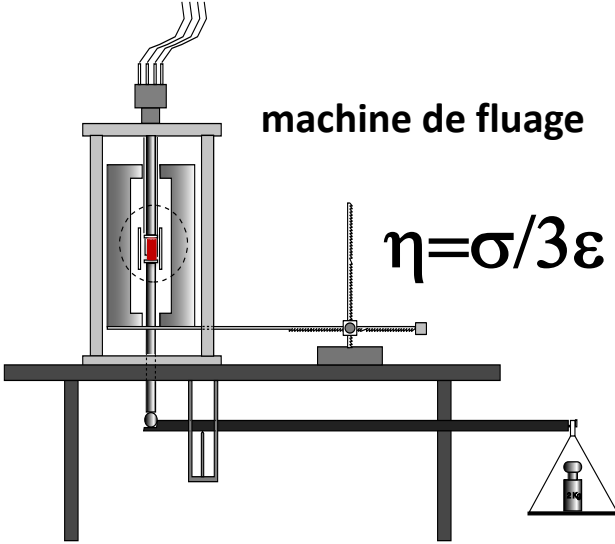
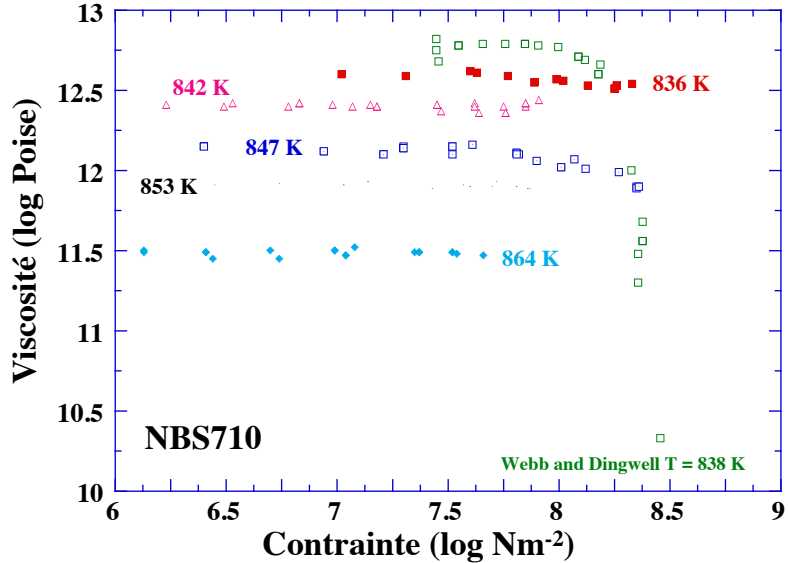


Fig. 1.- Schéma du dispositif de mesure des viscosités par écrasement. L'échantillon d'obsidienne, figuré en noir est placé dans un four à régulation (pointillés), et comprimé par une tige T qui transmet les forces exercées par des poids variés suspendus à l'extrémité d'un fléau horizontal mobile autour d'un couteau C<sub>1</sub>. En position de repos, la tige T est suspendue par le couteau C<sub>2</sub>, en position de travail, elle est articulée au niveau de C<sub>3</sub>. Il est une manette de blocage, L un dispositif de lecture des déformations (comparateur ou jauges extensométriques).

# Mesure aux fortes viscosités



$$\eta = MgL / (3\pi R_0^2 dL/dt (1 - 1/2 R_0^2/L^2)),$$

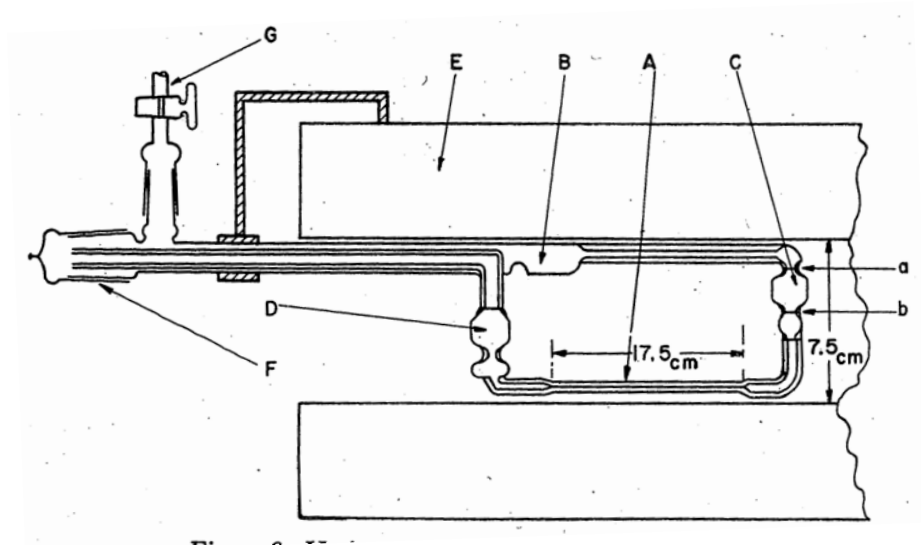
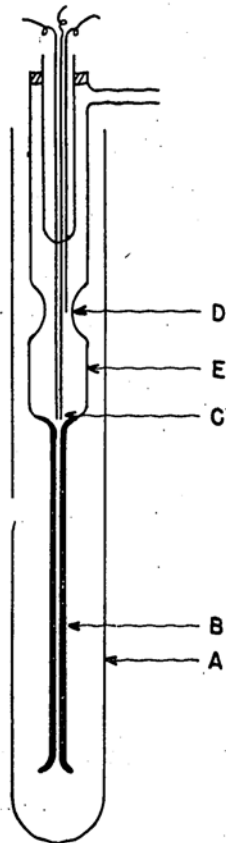


Neuville D.R. (2006) Viscosity, structure and mixing in (Ca, Na) silicate melts. Chem. Geol., 229, 28-42.

**Viscosimètre par capillarité,**

Bloom, Harrap et Heymann, 1956

Jusqu'à 700°C Tube en verre

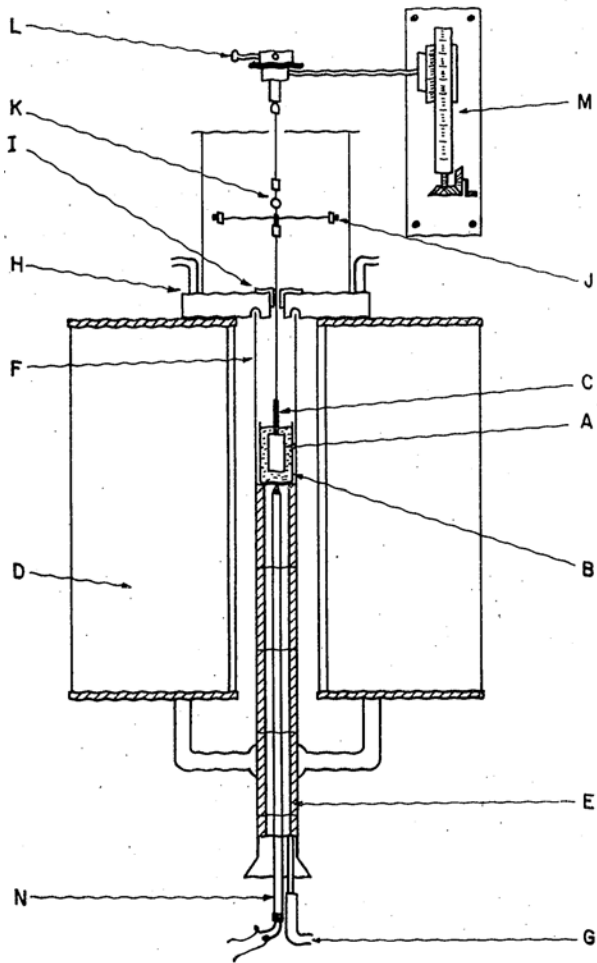


**Capillaire horizontal,**

Speels, 1946,

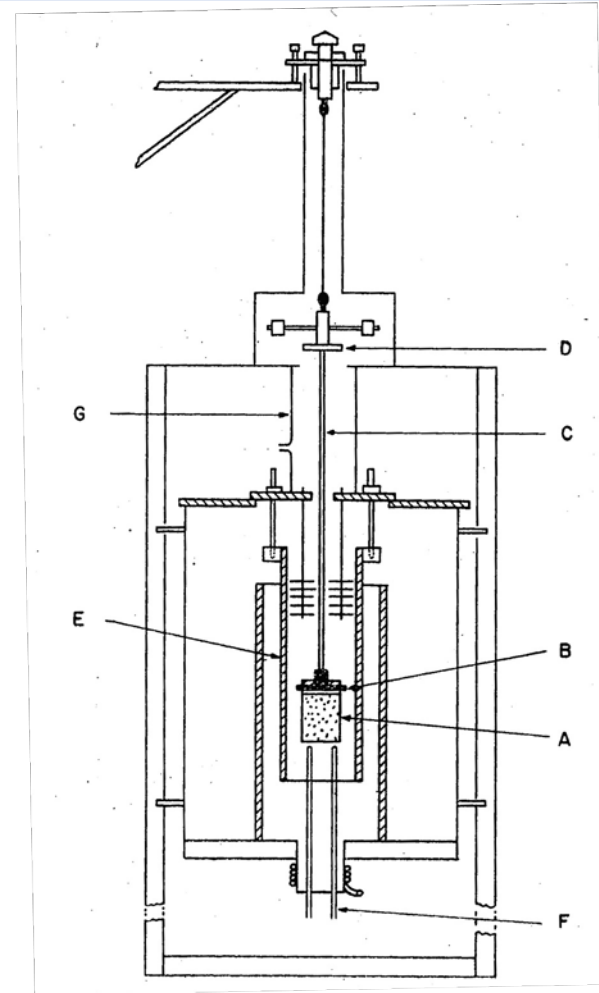
tube de quartz jusqu'à 1100°C

# Mesure aux faibles viscosités



**Viscosimètre à plongeur oscillant**

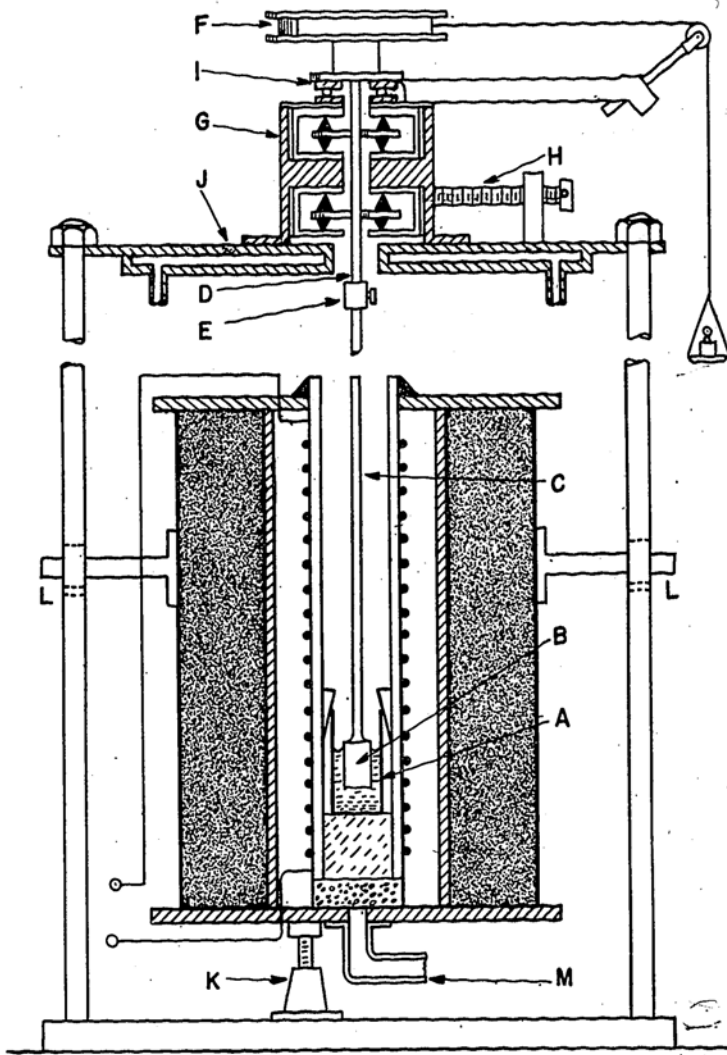
Towers and Kay, 1950



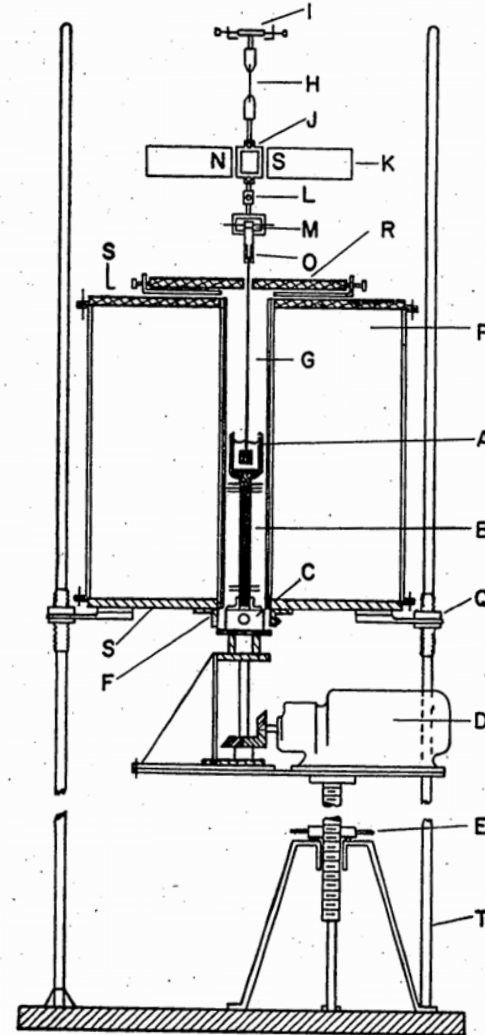
**Viscosimètre à creuset oscillant**

Barfield and Kitchener, 1947

# Mesure aux faibles viscosités



Rait et Hay, 1938



Bockris and Lowe, 1953

## Viscosimètre Rotatif



# Mesure aux faibles viscosités

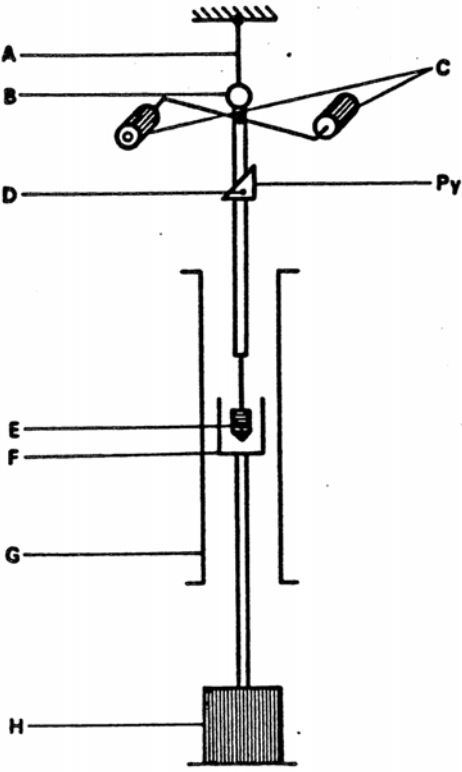
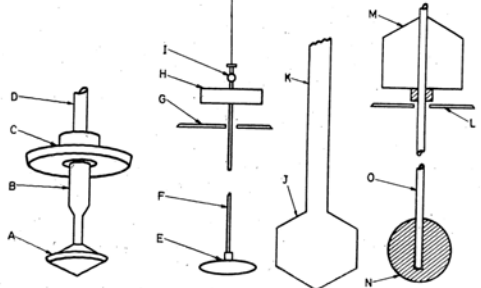
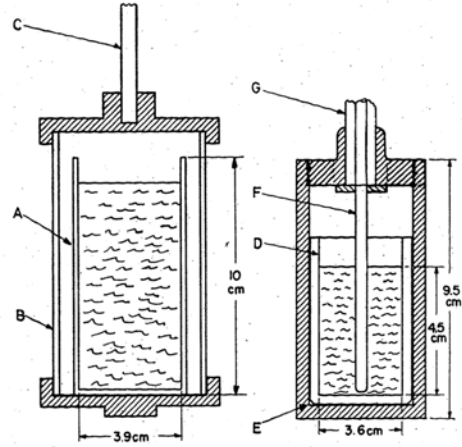


Schéma de principe du viscosimètre.

A) ruban de suspension soutenant l'équipage portant le miroir B) ; le prisme δ D) pour les visées avec le pyromètre optique (Py) ; C) Bobines d'équilibrage électrique ; F) Creuset entraîné à vitesse constante par (H) (Mo ou W) ; G) Tôle chauffante (Mo ou W) du four ; E) Plongeur (Mo ou W).

Urbain, 1974

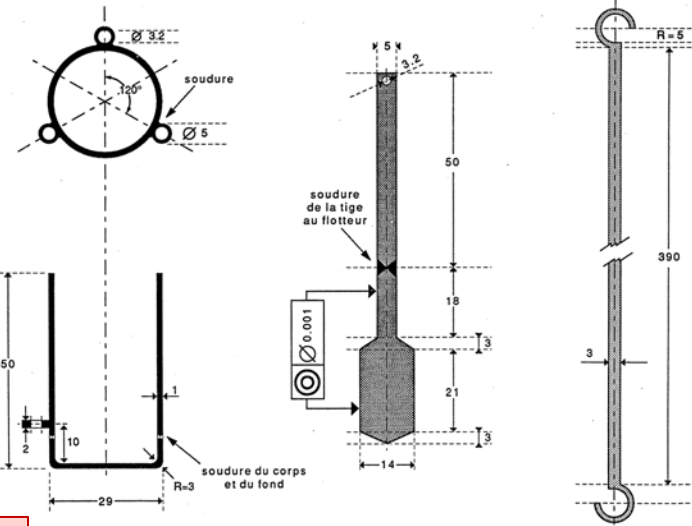
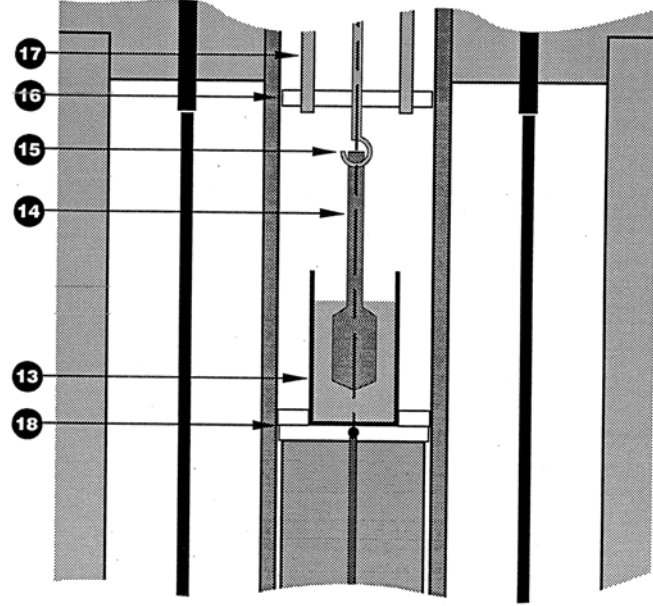
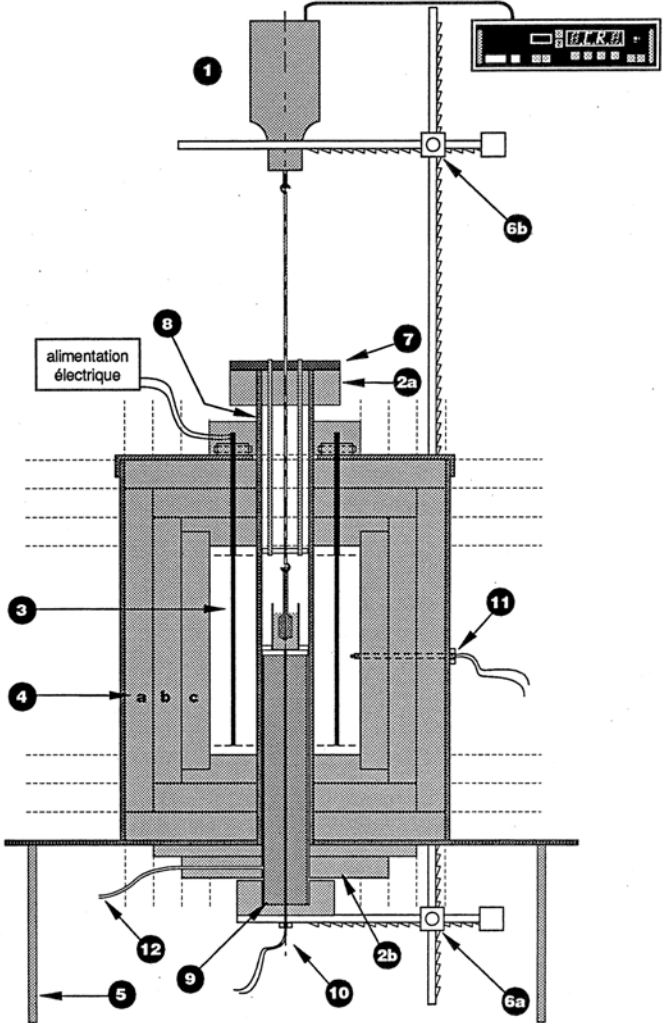


## Viscosimètre Rotatif

- English, 1923,
- Rait et Hay, 1938
- Bockris and Lowe, 1953
- Dingwell, 1986
- Neuville, 2006 IPGP
- .....



# Mesure aux faibles viscosités

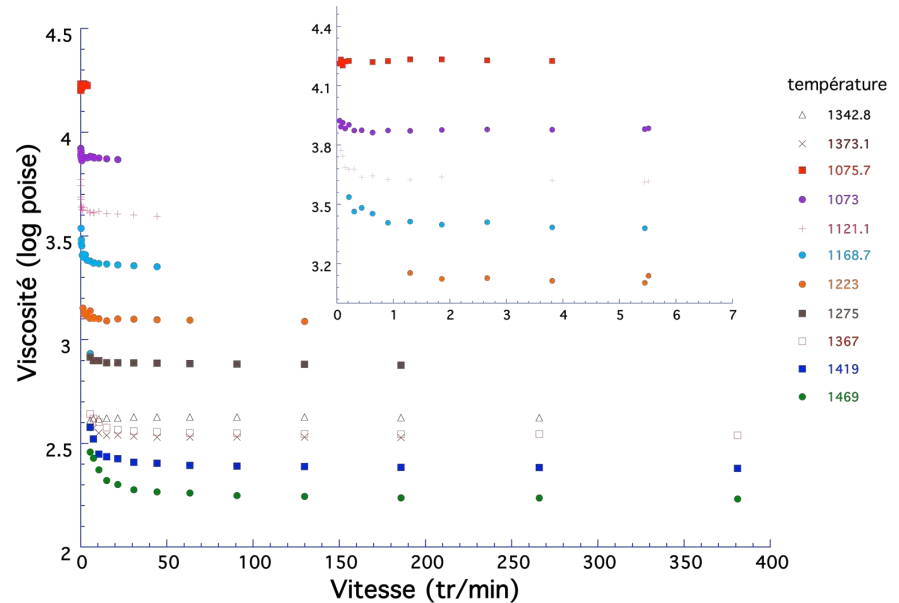
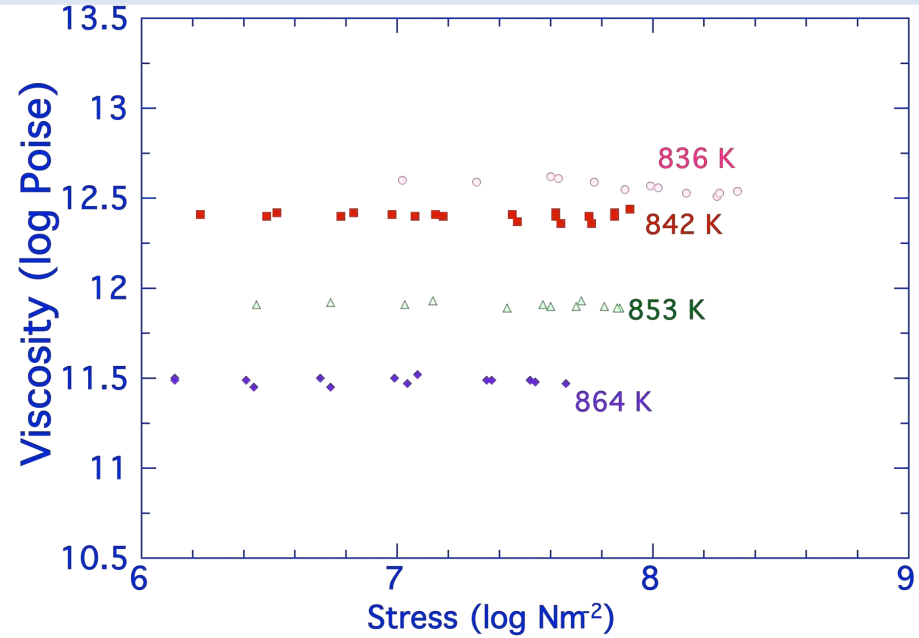
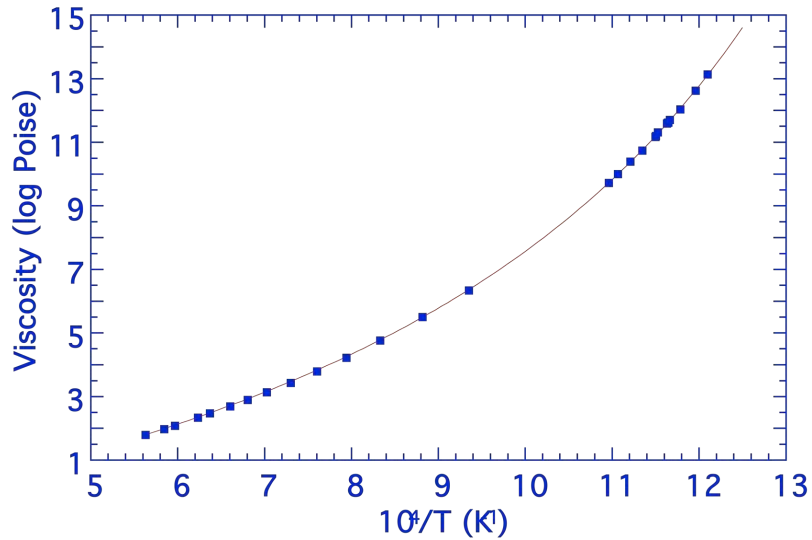


## Viscosimètre Rotatif IPGP

Neuville D.R. (2006) Viscosity, structure and mixing in (Ca, Na) silicate melts. Chem. Geol., 229, 28-42.

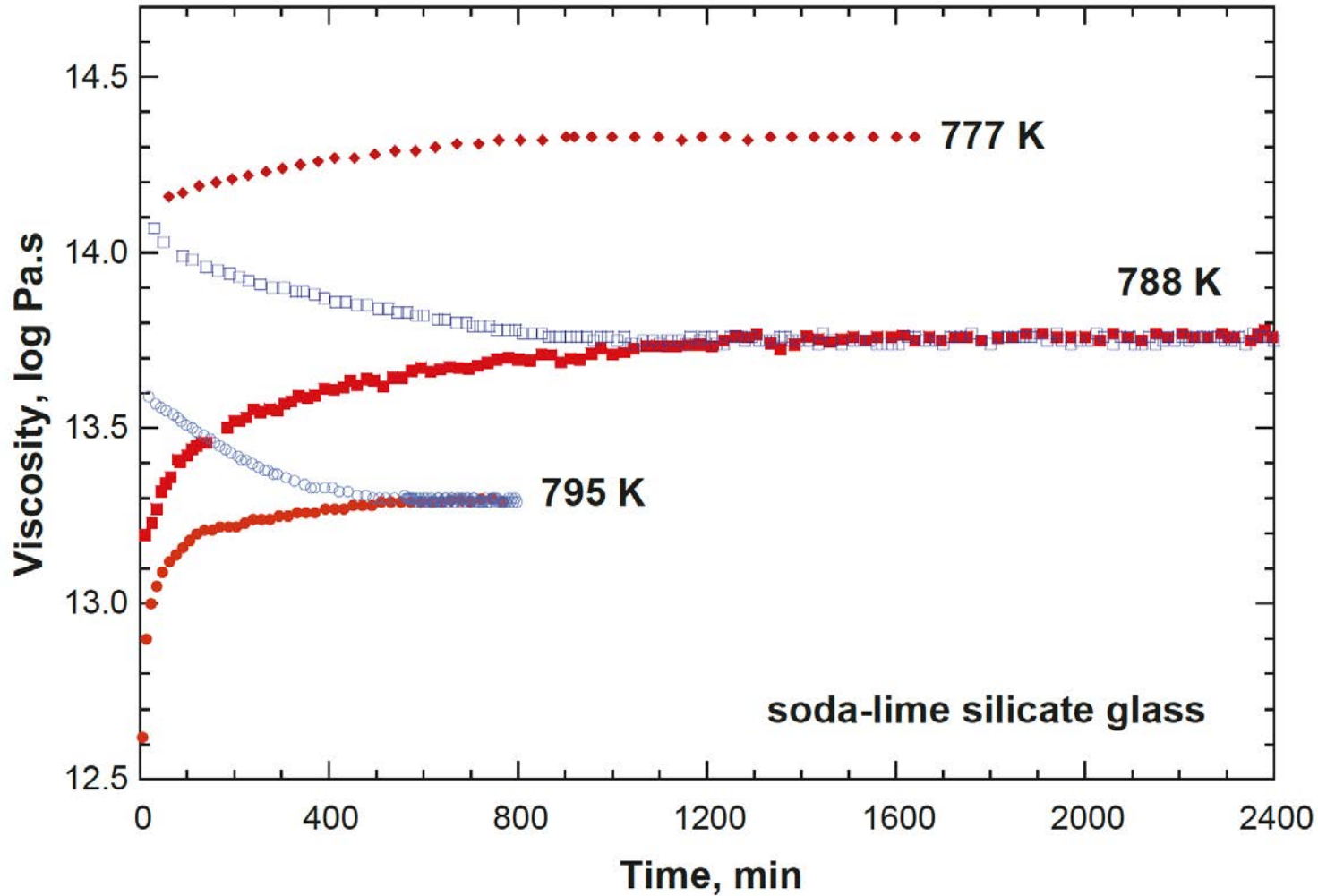
# Mesure sur NBS710

## NBS710

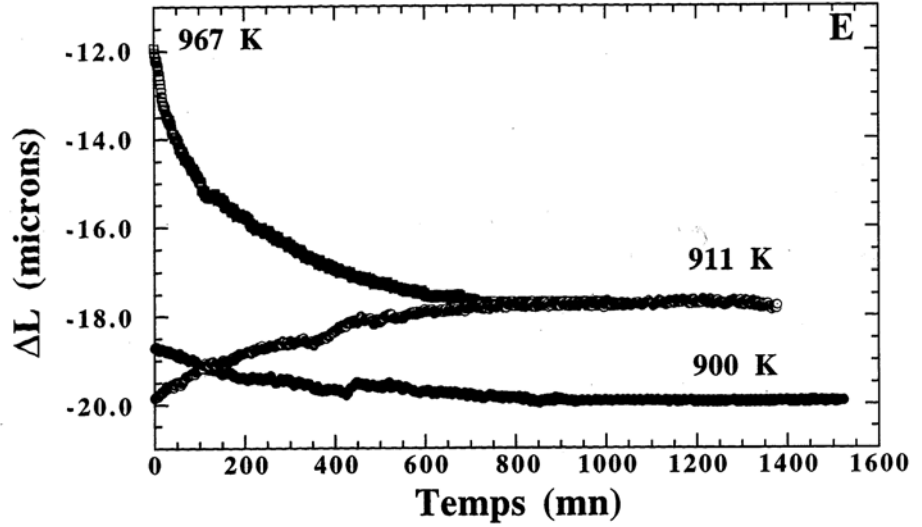
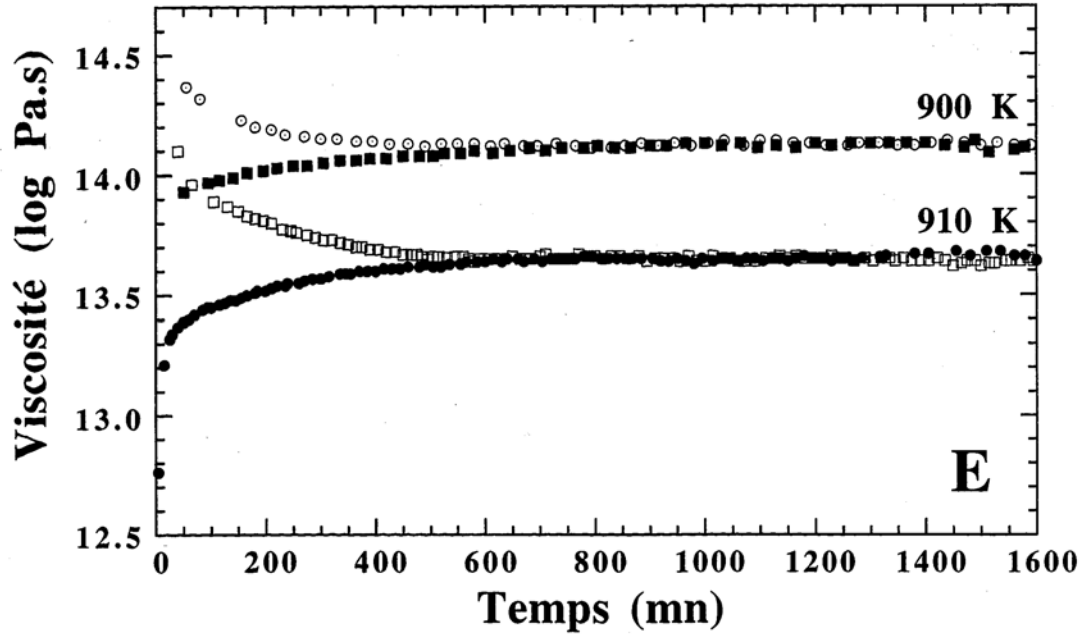


Neuville D.R. (2006) Viscosity, structure and mixing in (Ca, Na) silicate melts. *Chem. Geol.*, 229, 28-42.

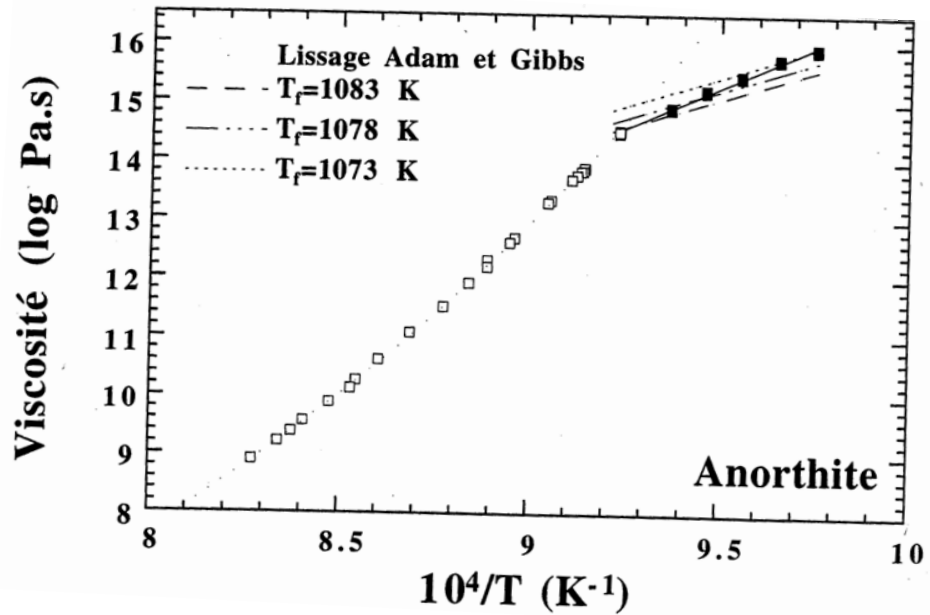
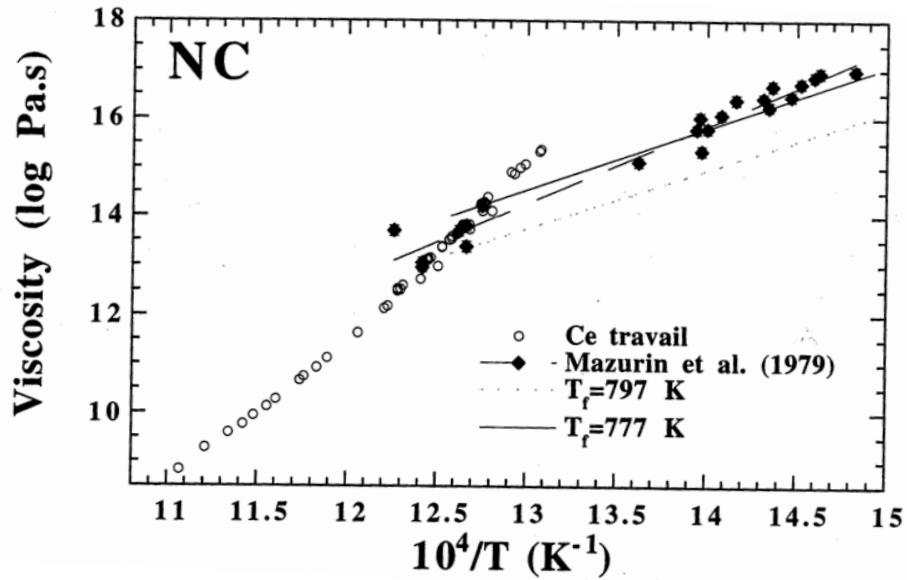
*Neuville & Le Losq*



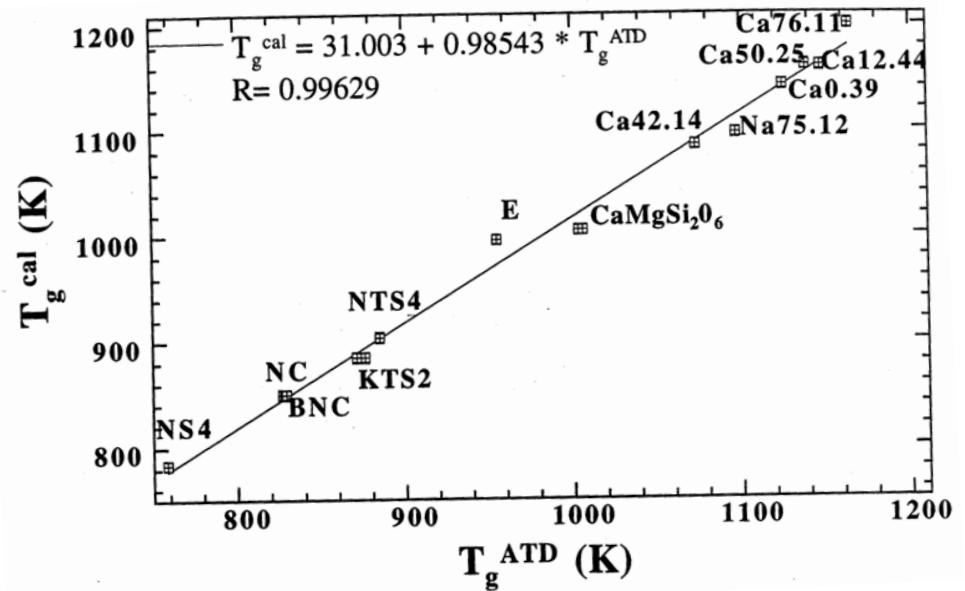
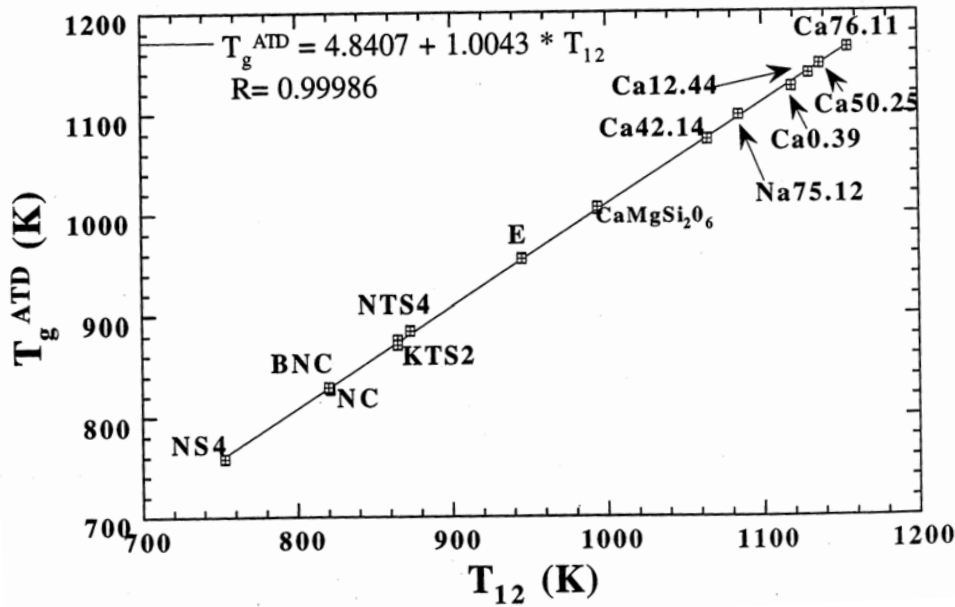
# Différente relaxation pour différente propriétés?



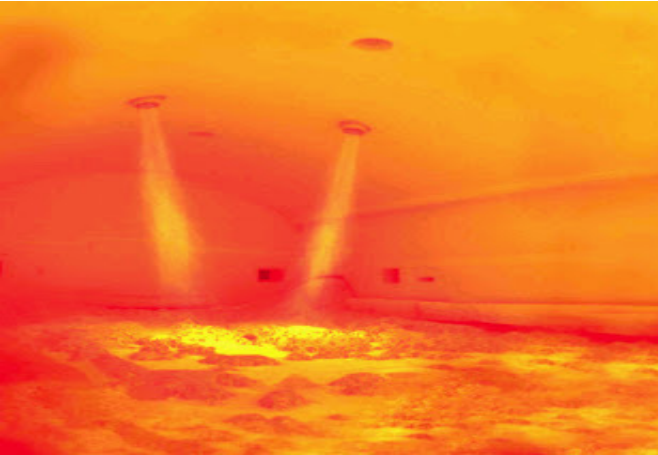
# Viscosité équilibre ? Non équilibre?



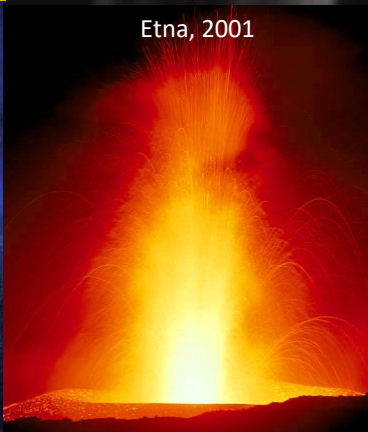
# Similitude des températures de transition vitreuse?







Tel Process, Saint-Gobain Isover

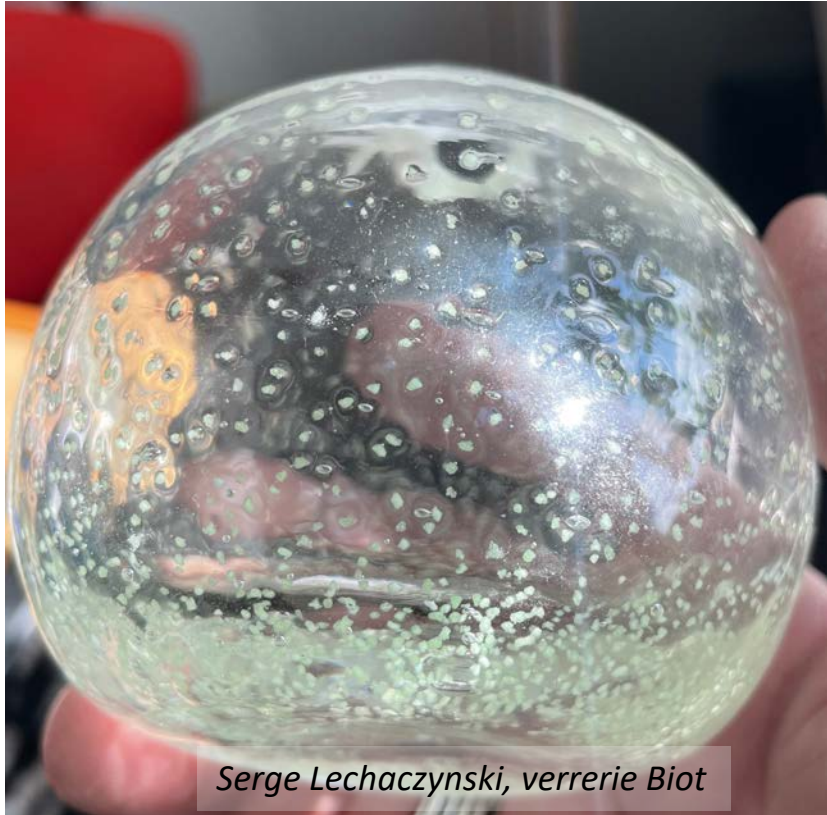


Etna, 2001

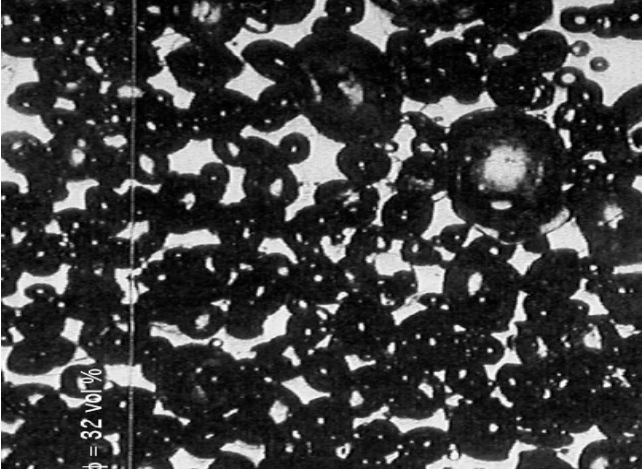




# Effet des bulles



Serge Lechaczynski, verrerie Biot



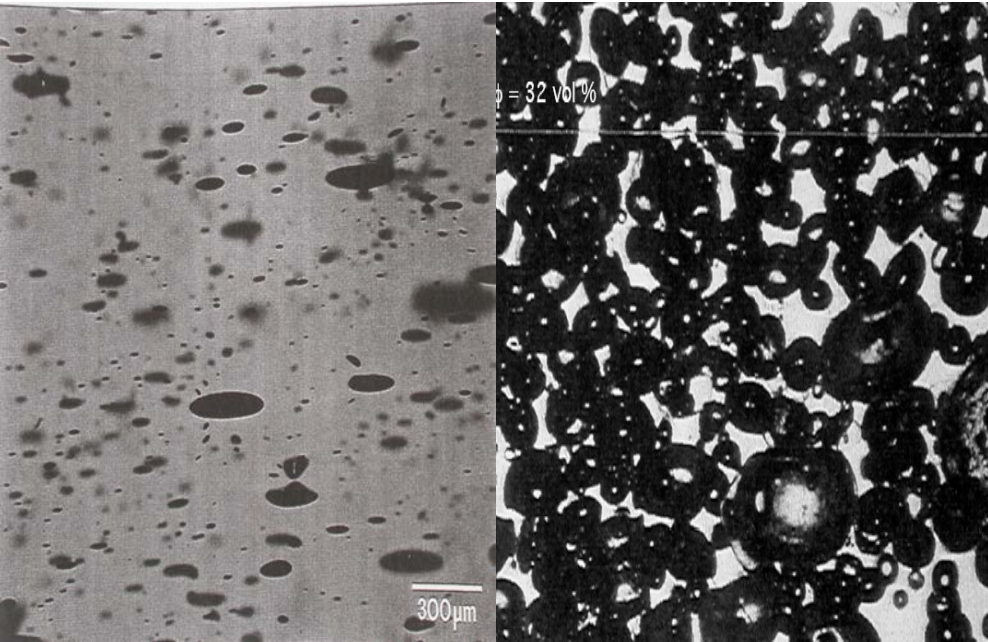
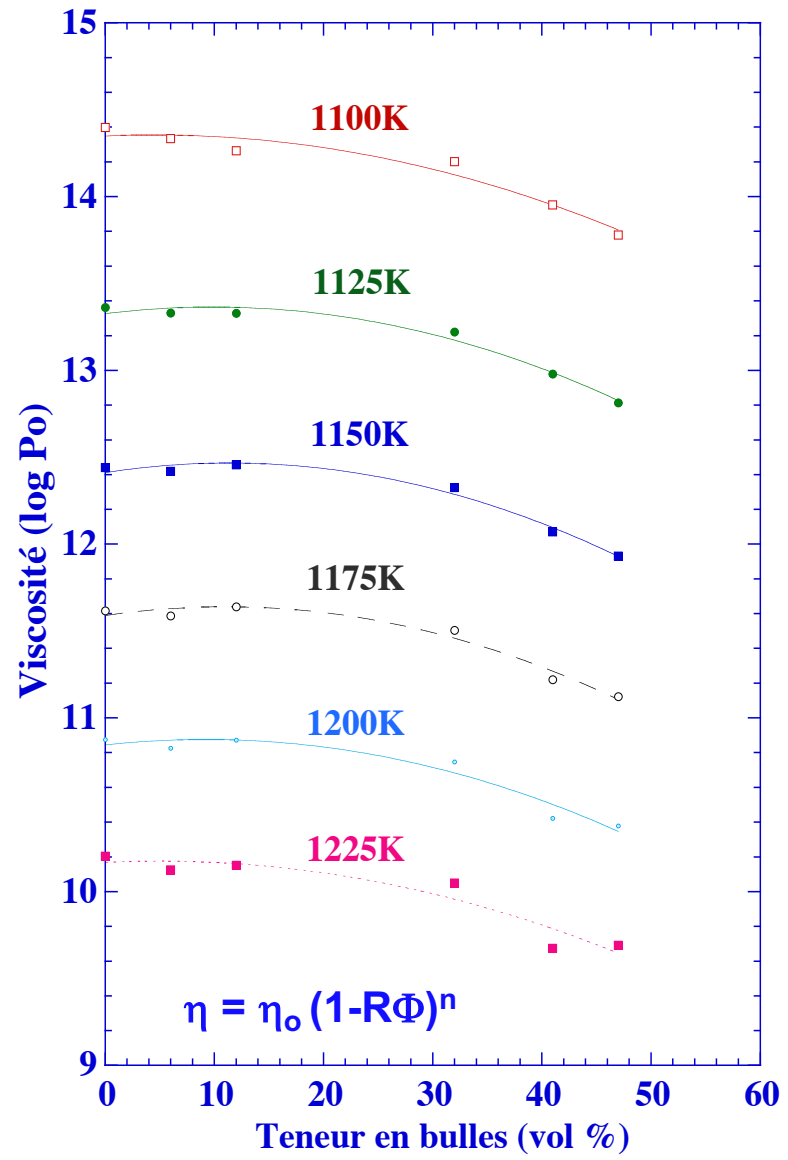
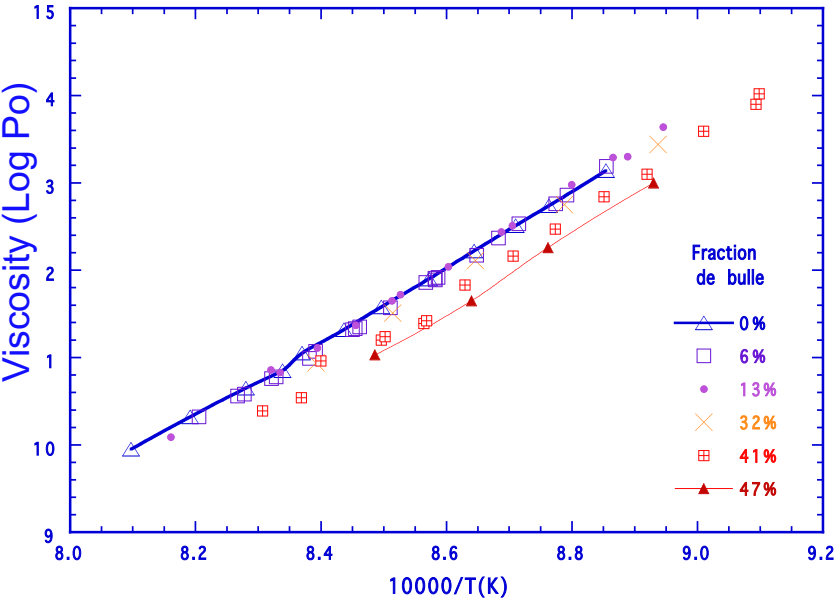
$\phi = 32 \text{ Vol} \%$

A-M Lejeune



300  $\mu\text{m}$

Effet des bulles



Lejeune et al.





## Dévitrication Roselyne Blanc Bessière

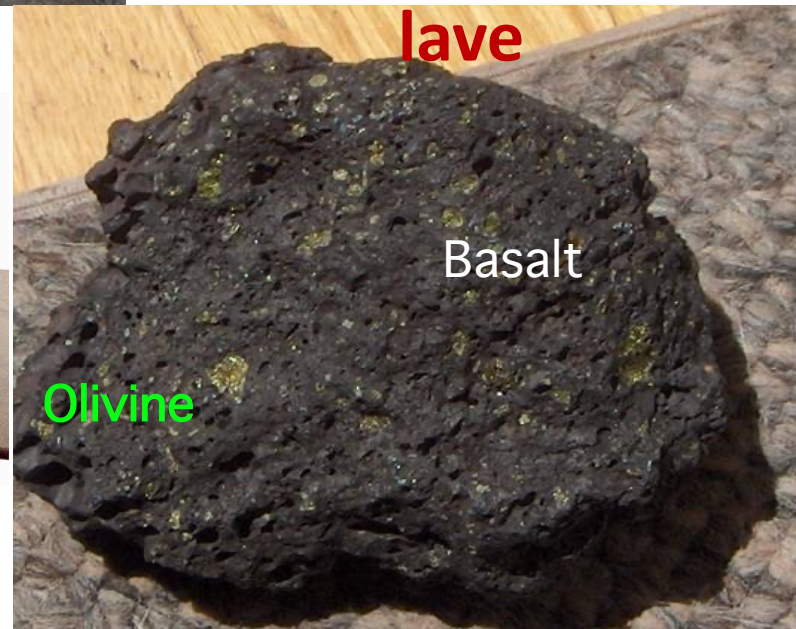


Keralite®

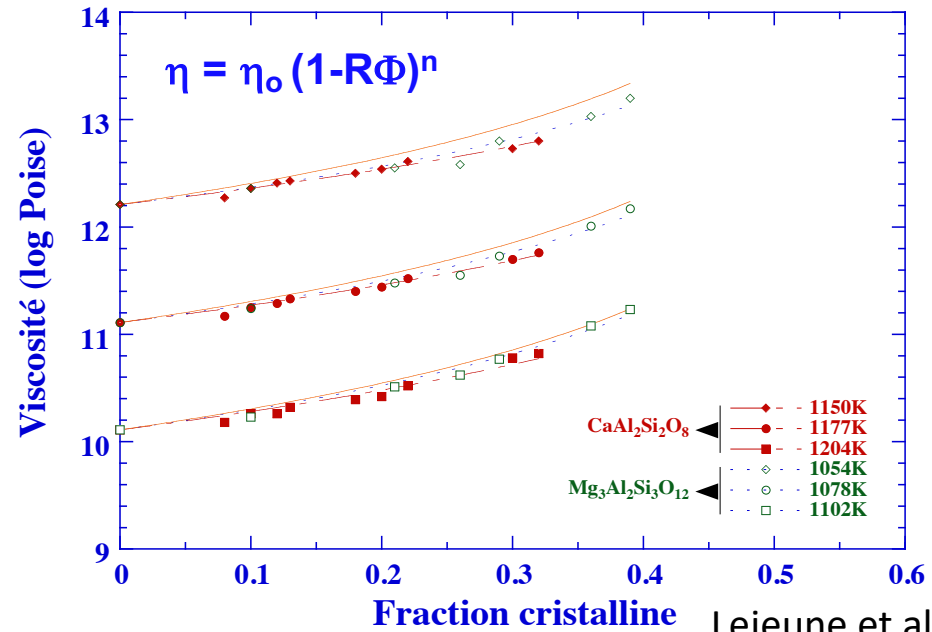
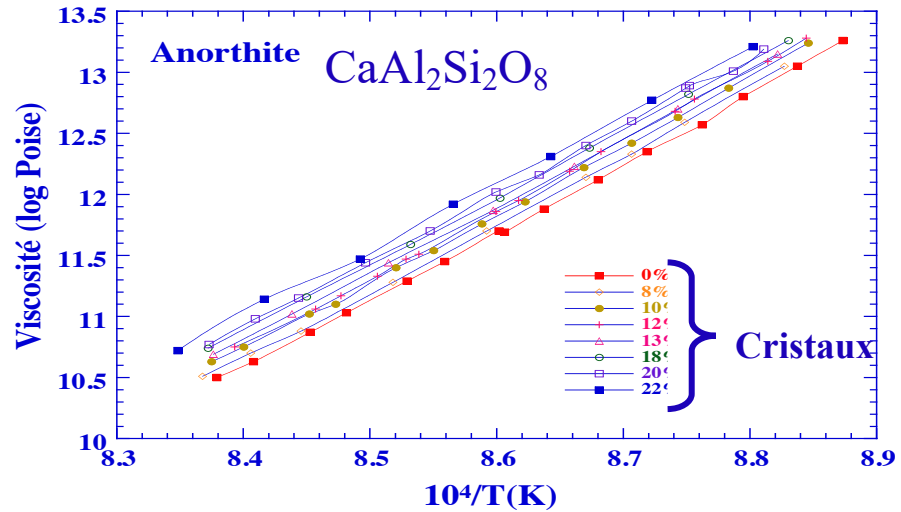
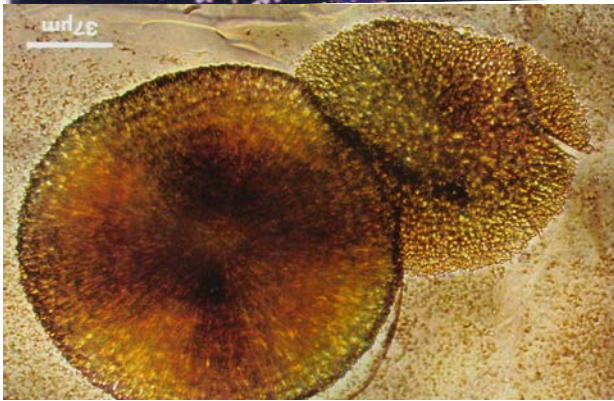
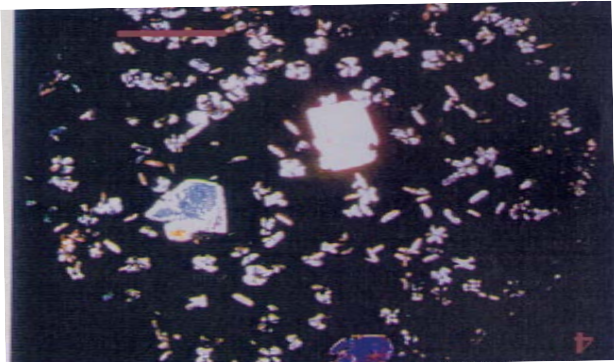
## vitrocéramique



Kerablack®



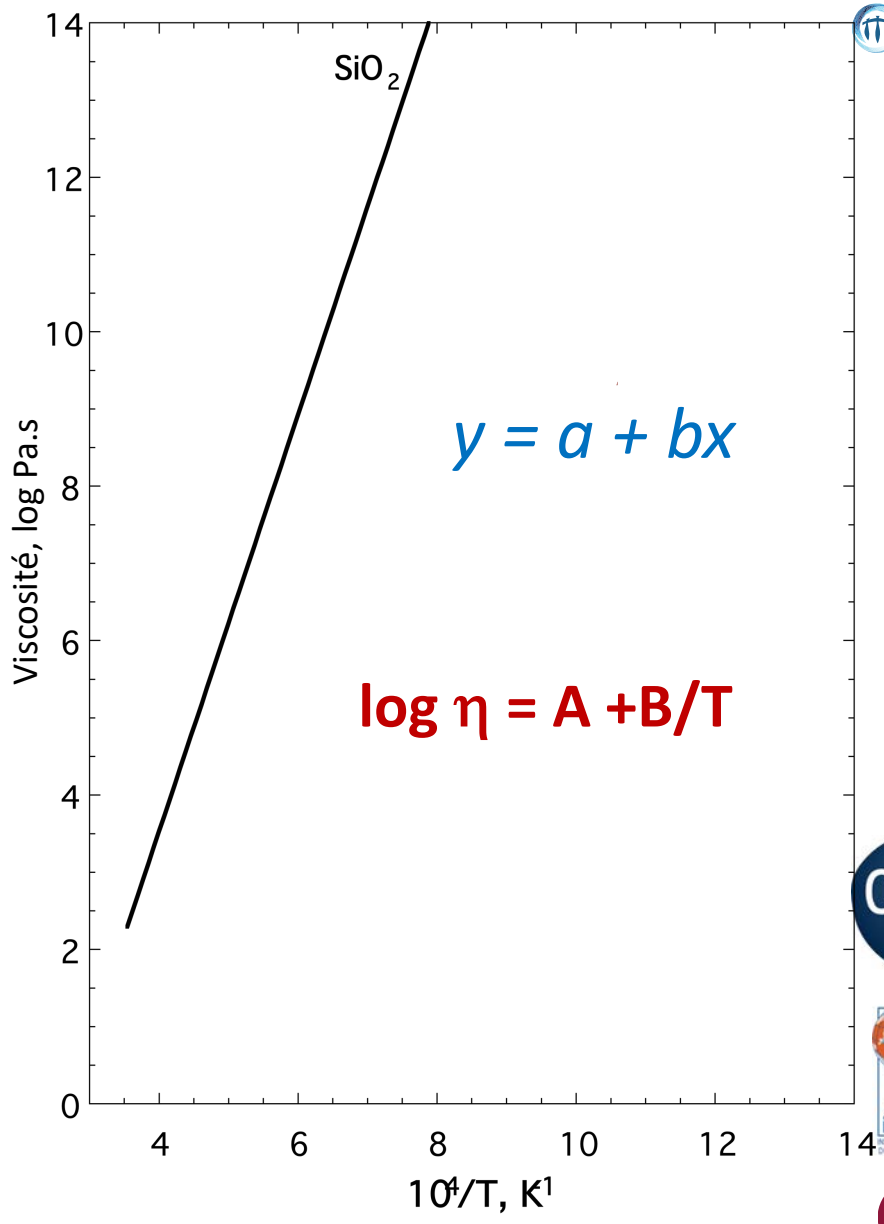
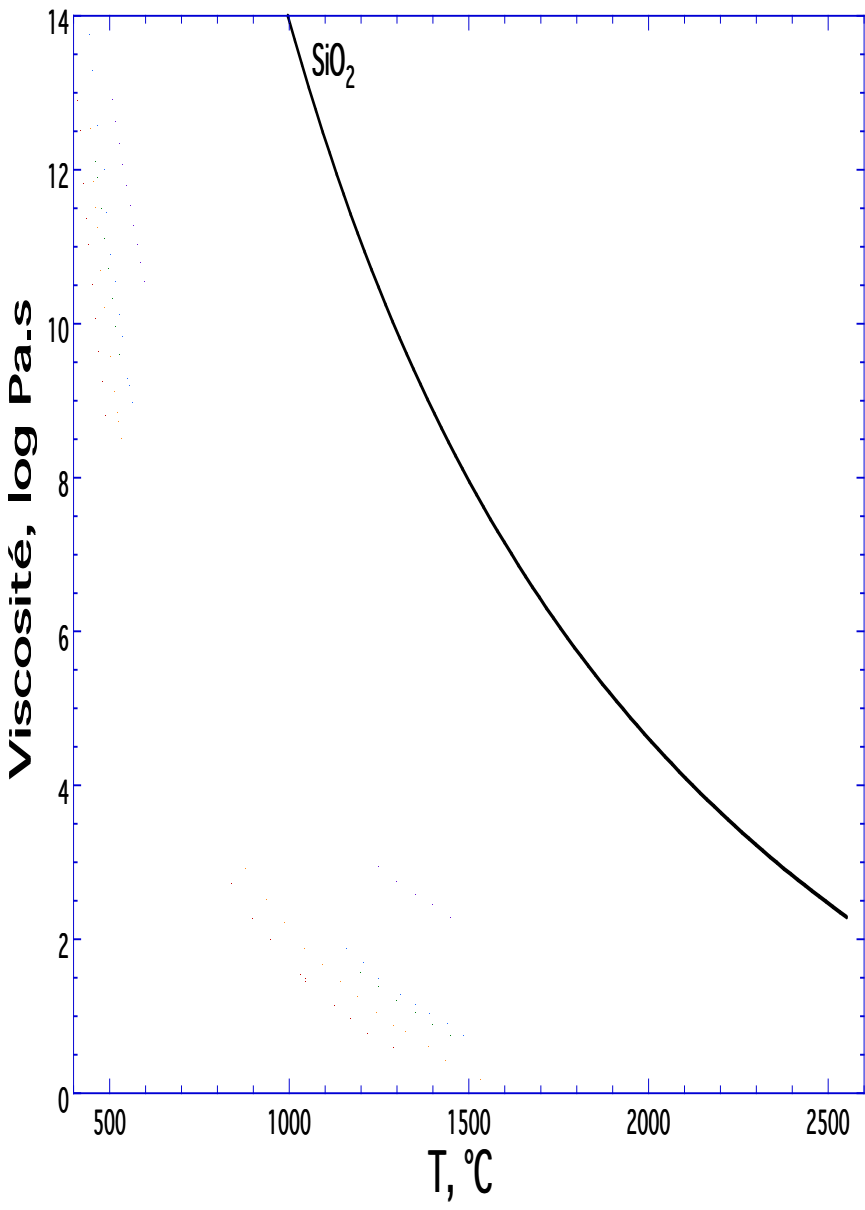
Effet des cristaux



Lejeune et al.

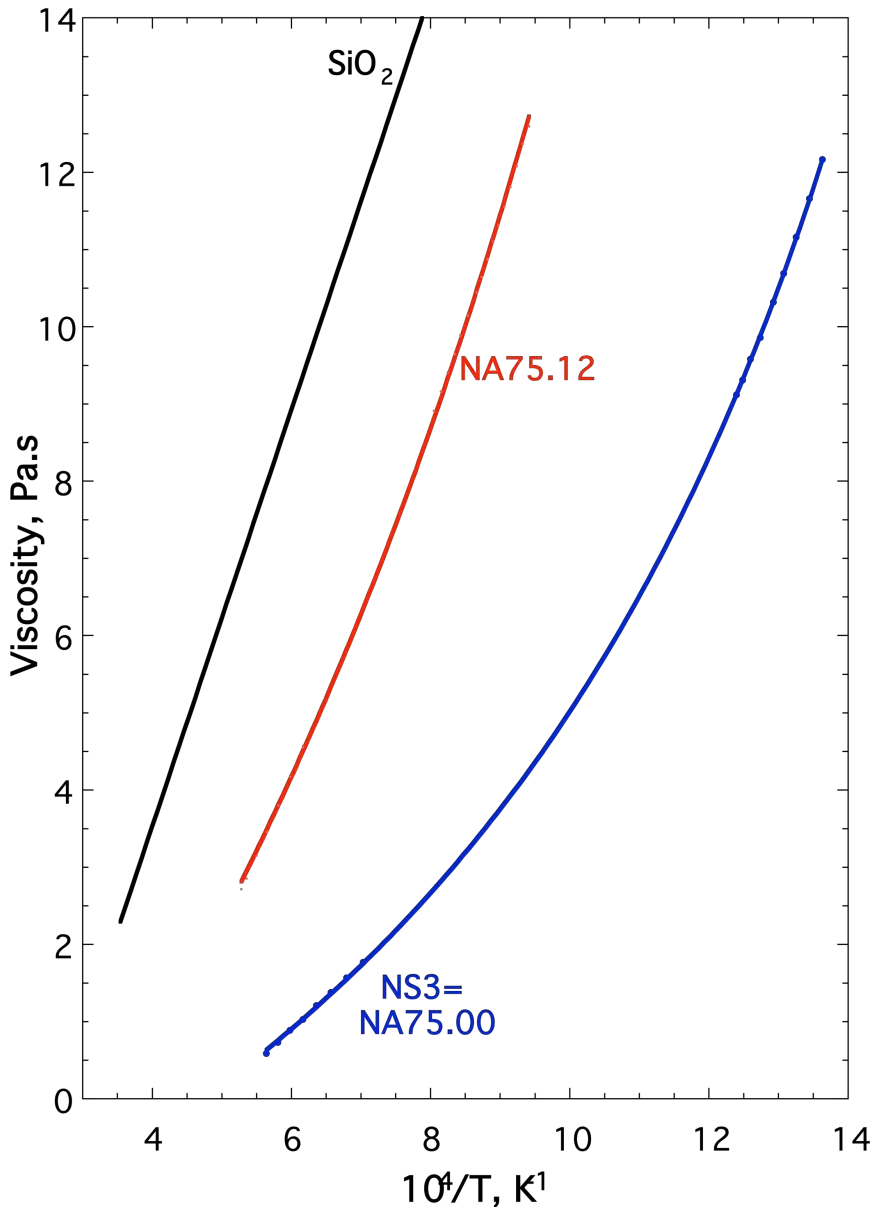
Levesque et al.

# Viscosité de la silice ?





## Quelle équation choisir?



## Modèle d'Arrhénius

$$\log \eta = A + B/T$$

Mais... cette loi ne fonctionne que pour quelques systèmes silicatés,  $SiO_2$ ,  $NaAlSi_3O_8$  (NA75.12)...

Dans le cas d'un silicate de sodium, NS3, l'énergie d'activation est de 2000kJ/mol à 1000K et de 300kJ/mol à 1800K, donc l'équation (1) ne peut pas reproduire correctement des changements continus lorsque la température varie.

## Modèle Tamman-Vogel-Fulcher, TVF

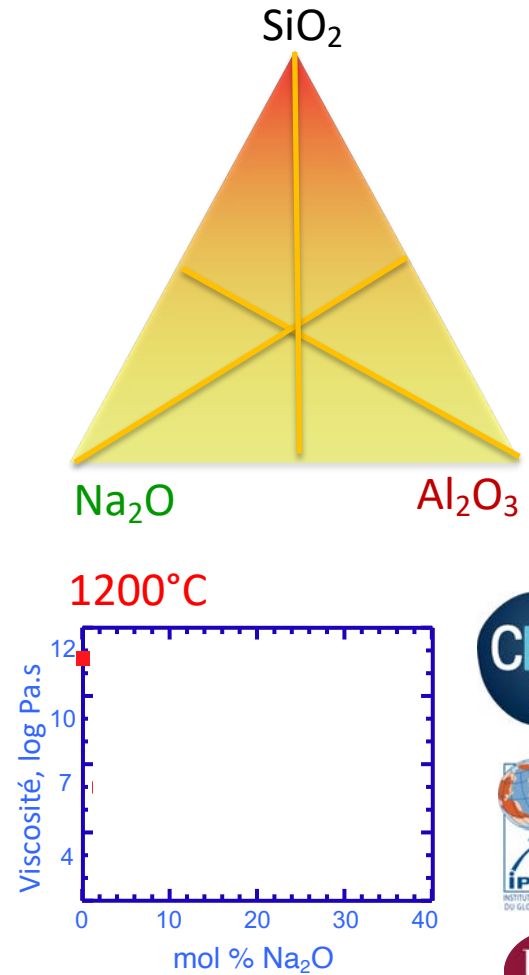
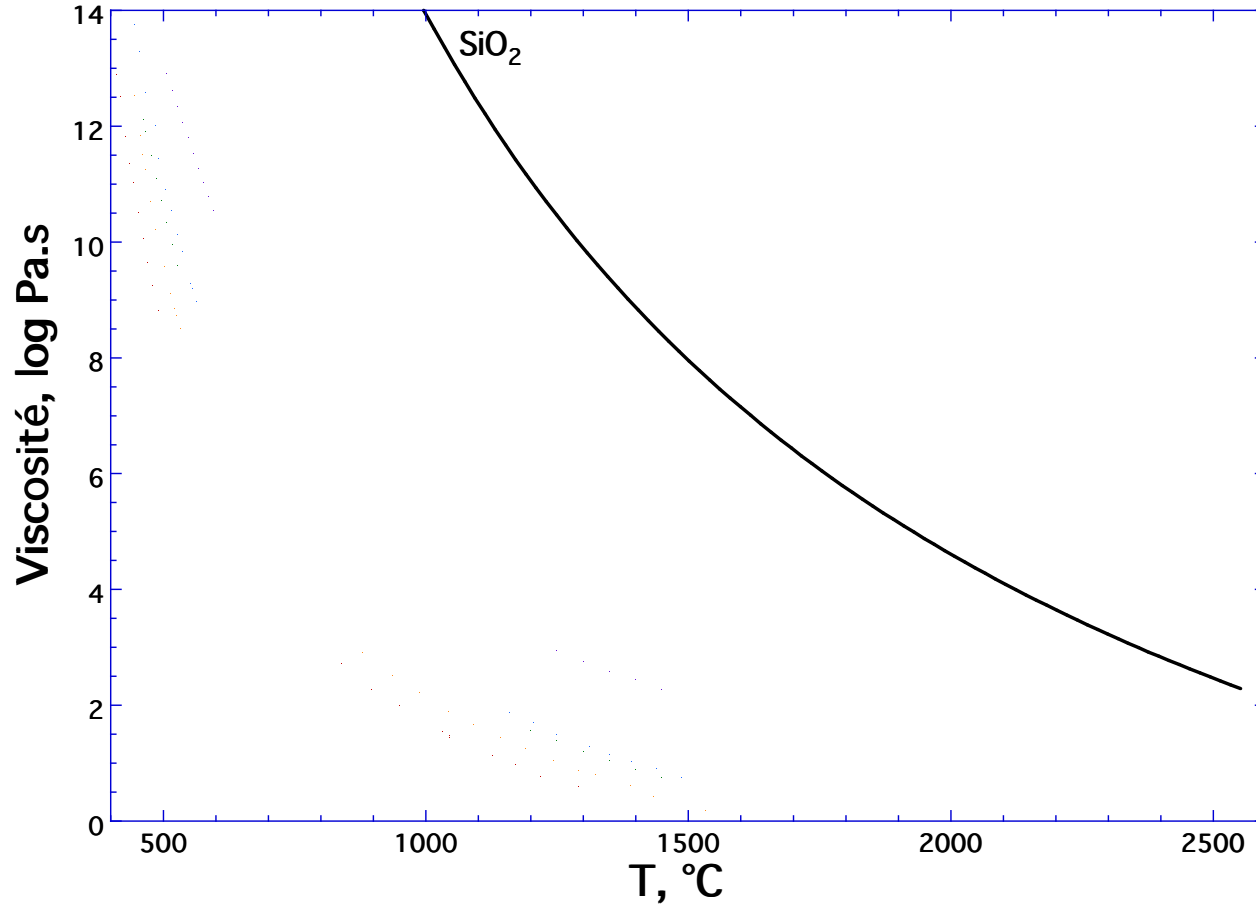
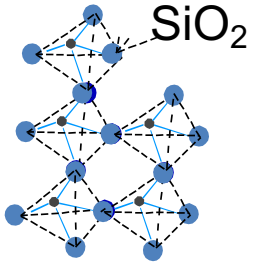
$$\text{Log } \eta = A + B/(T - T_1)$$

$A$ ,  $B$ ,  $T_1$  sont des paramètres ajustables empiriques qui permettent de reproduire les données.

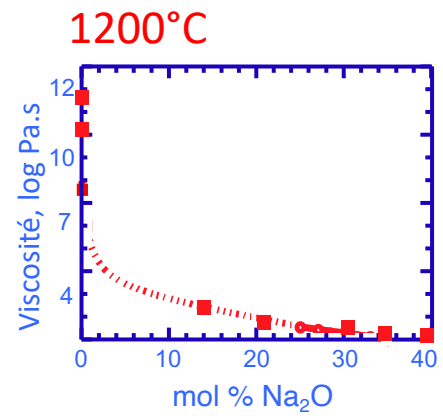
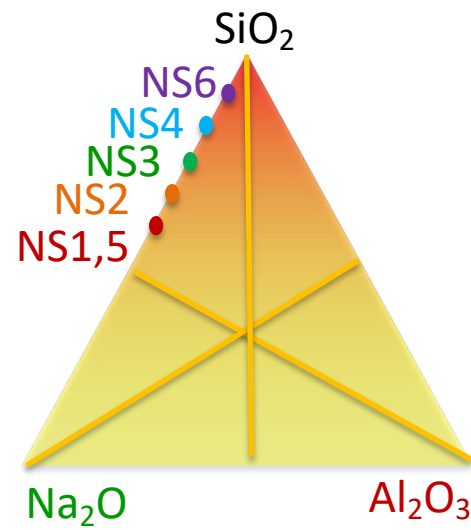
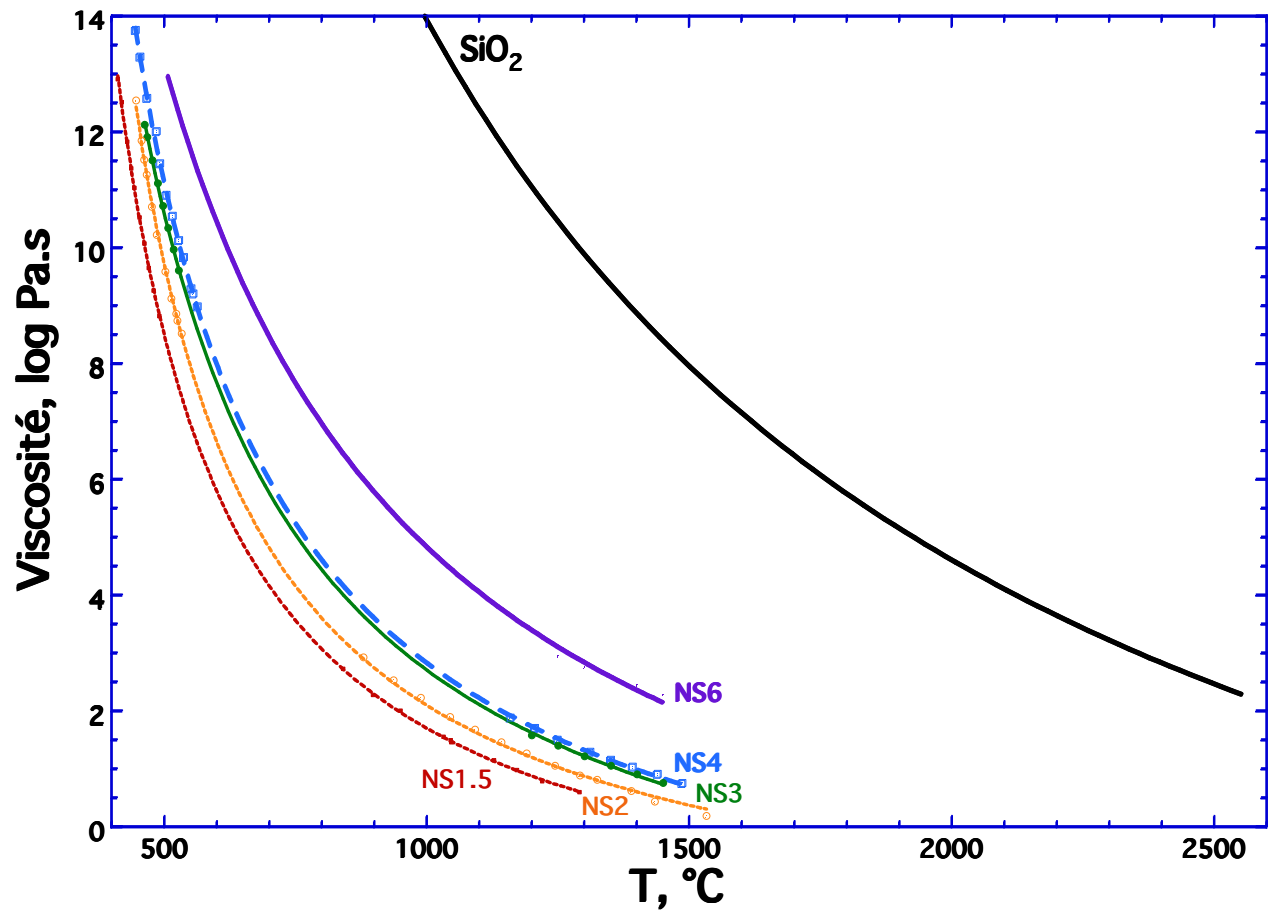
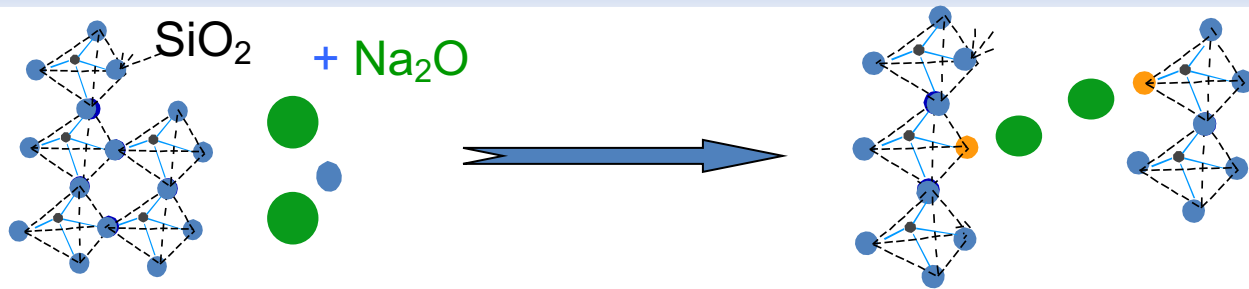
$A$  sans signification

$B$  peut correspondre à une énergie d'activation

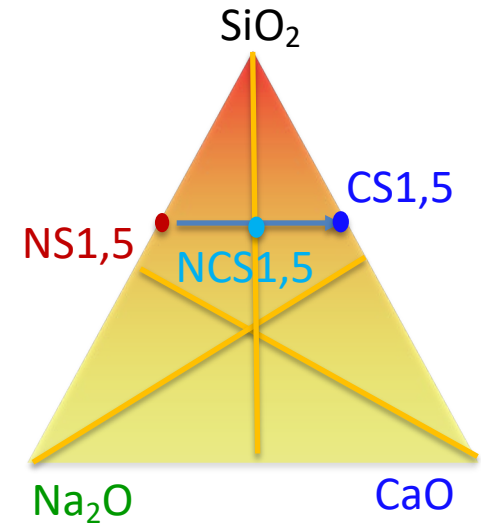
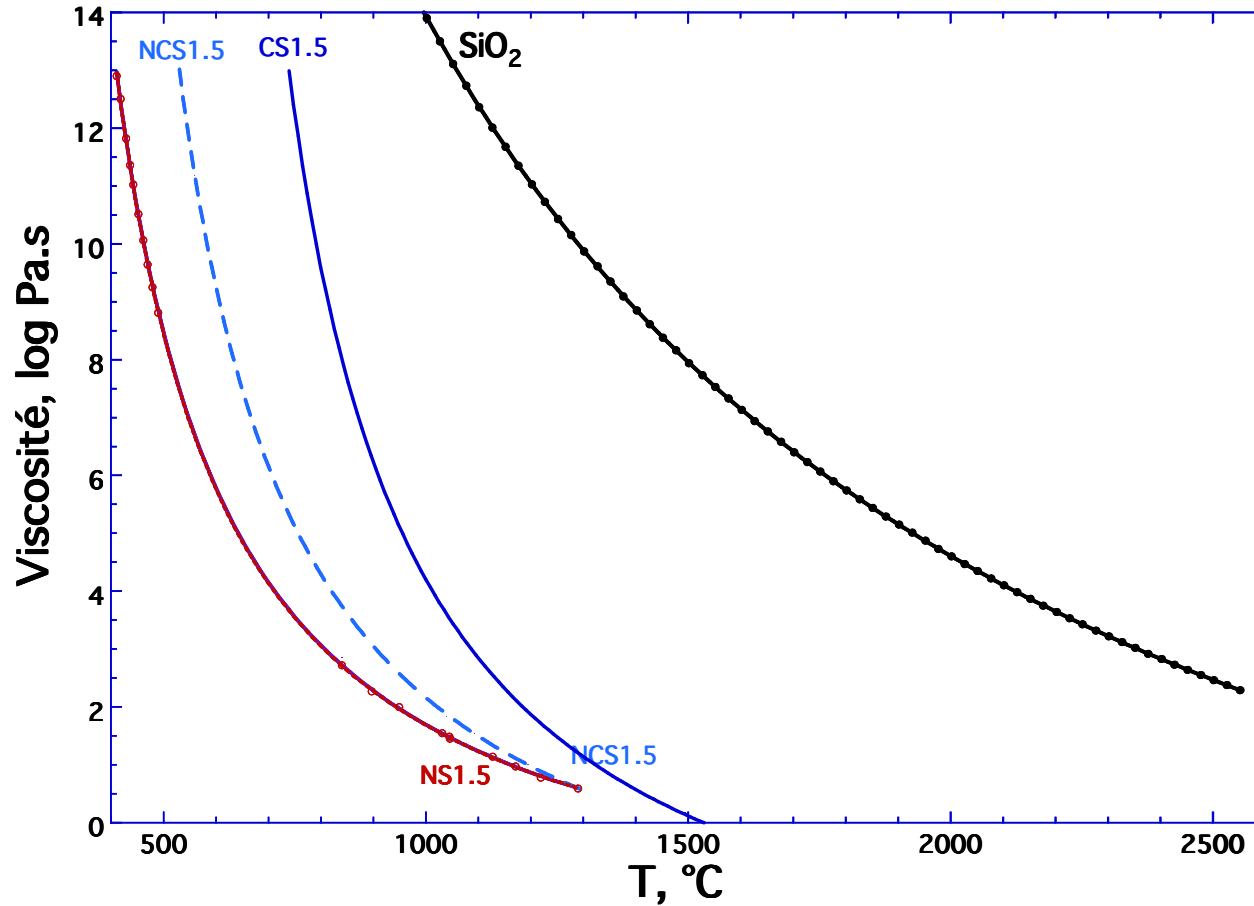
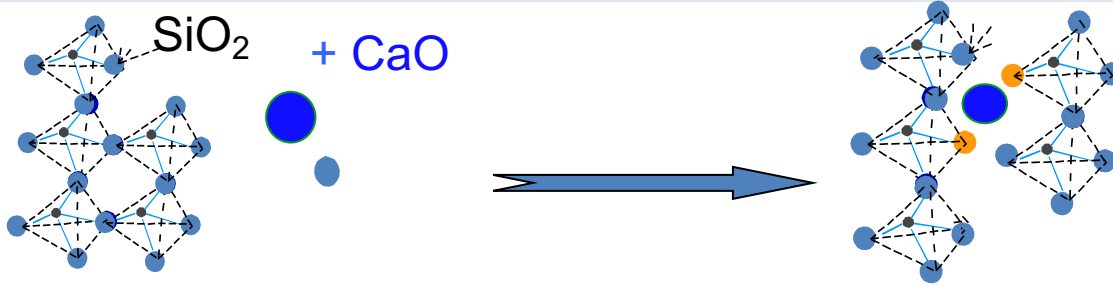
# Silice fondue



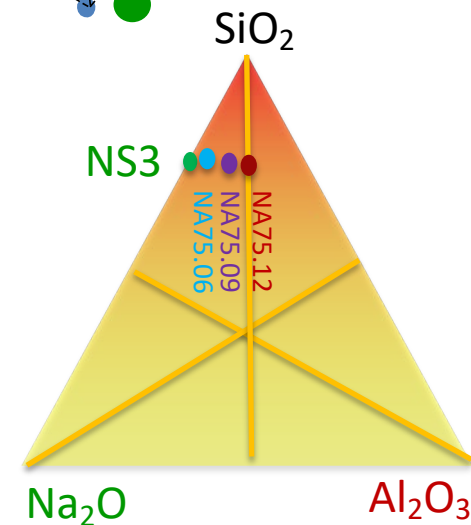
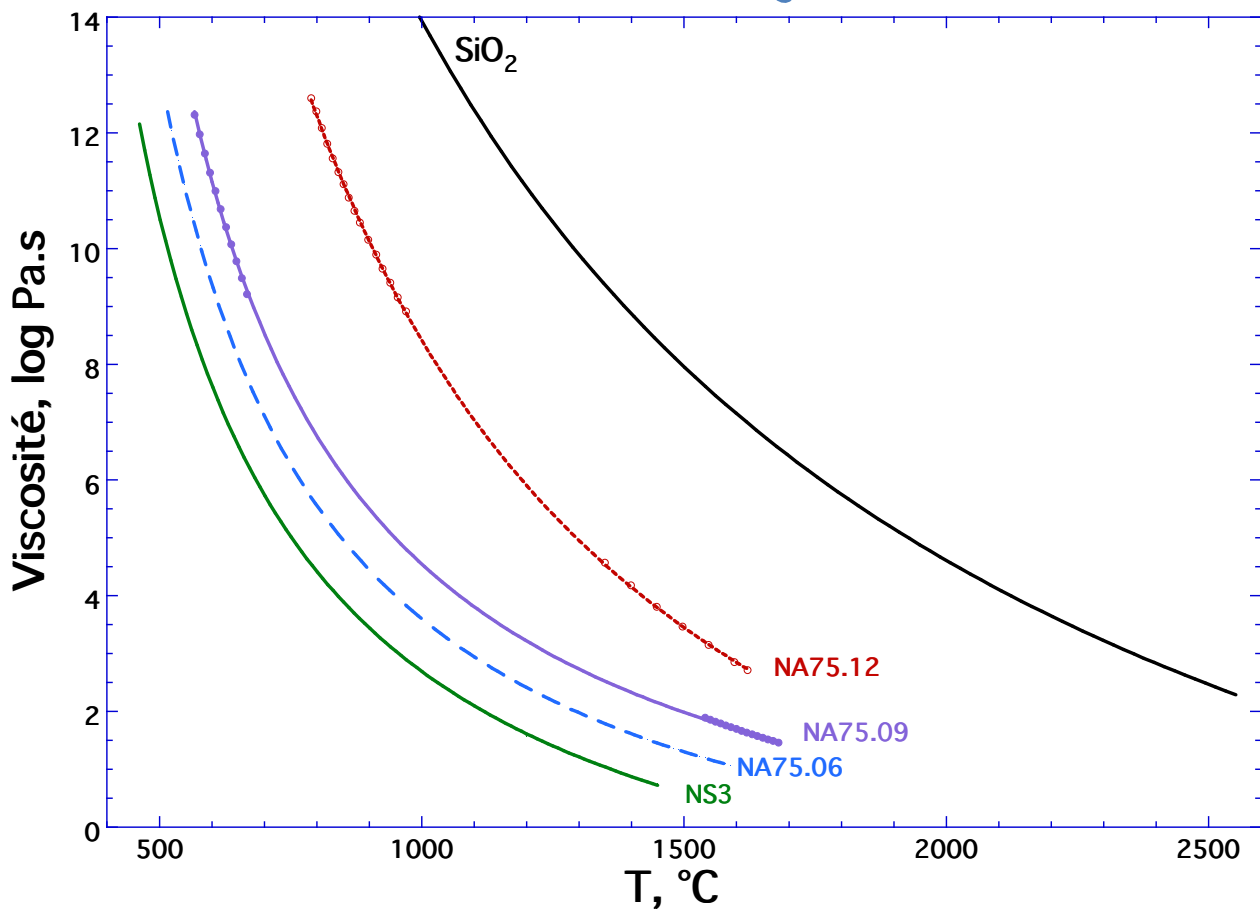
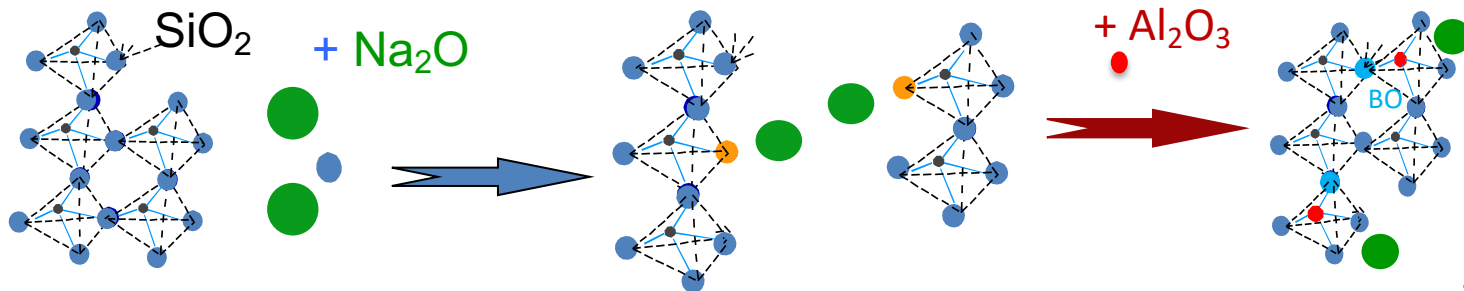
# Silicate vitreux de sodium



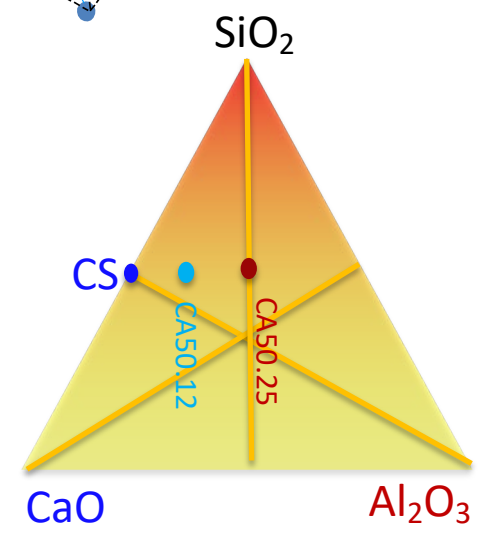
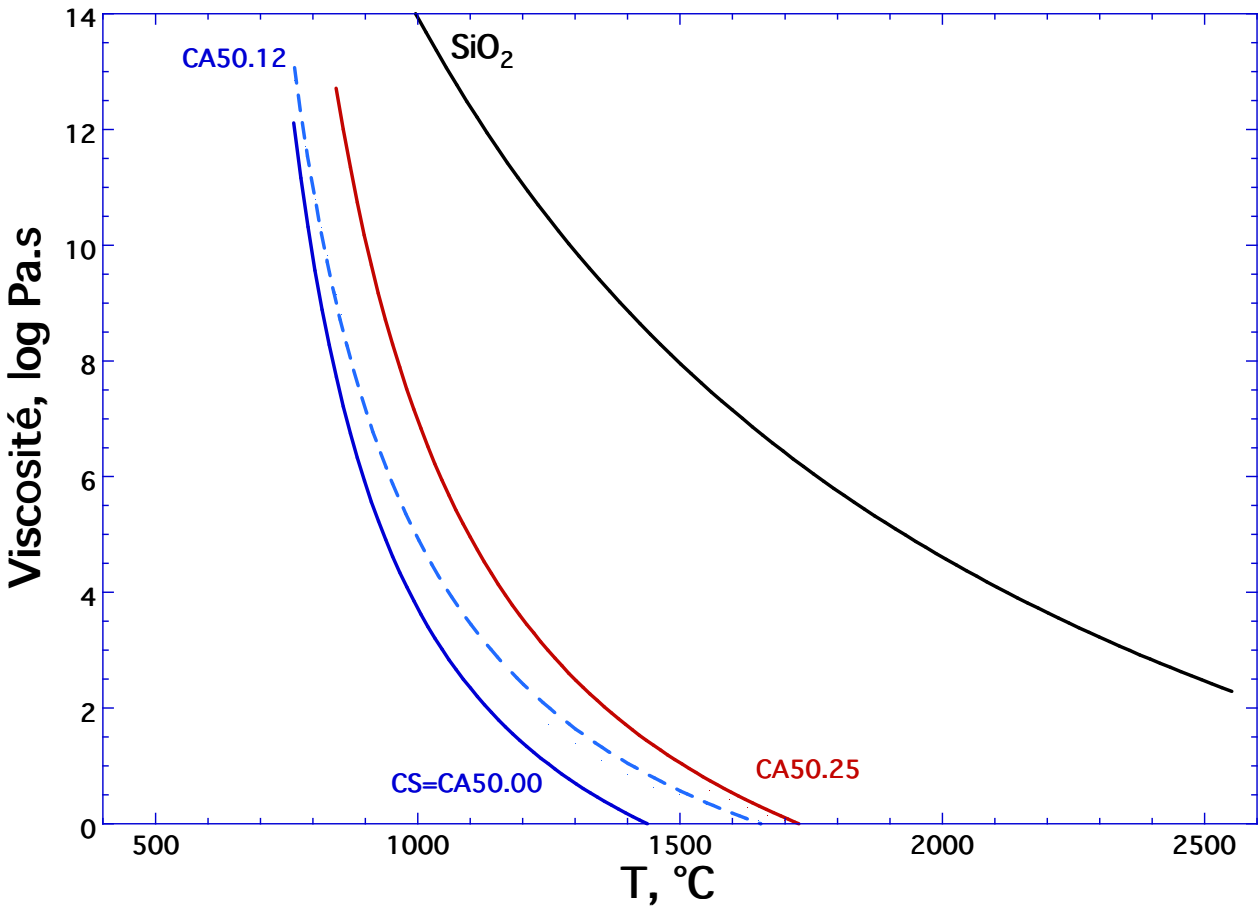
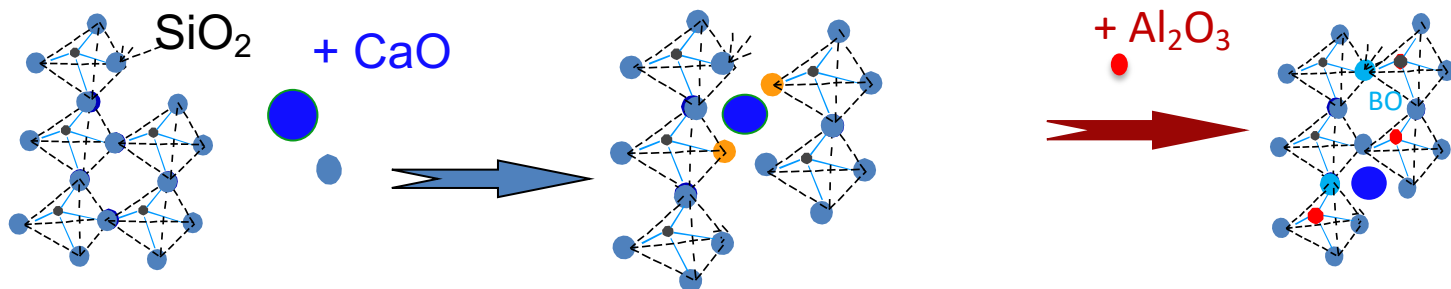
# Silicate vitreux de calcium et sodium



# Aluminosilicate vitreux de sodium



# Aluminosilicate vitreux de calcium





**Si<sup>4+</sup>** : formateur de réseau : très forte viscosité.

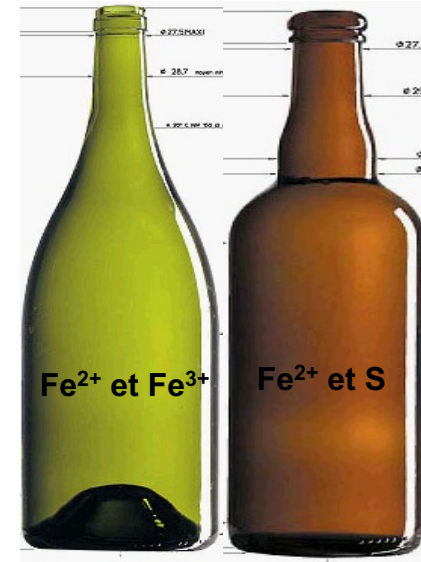
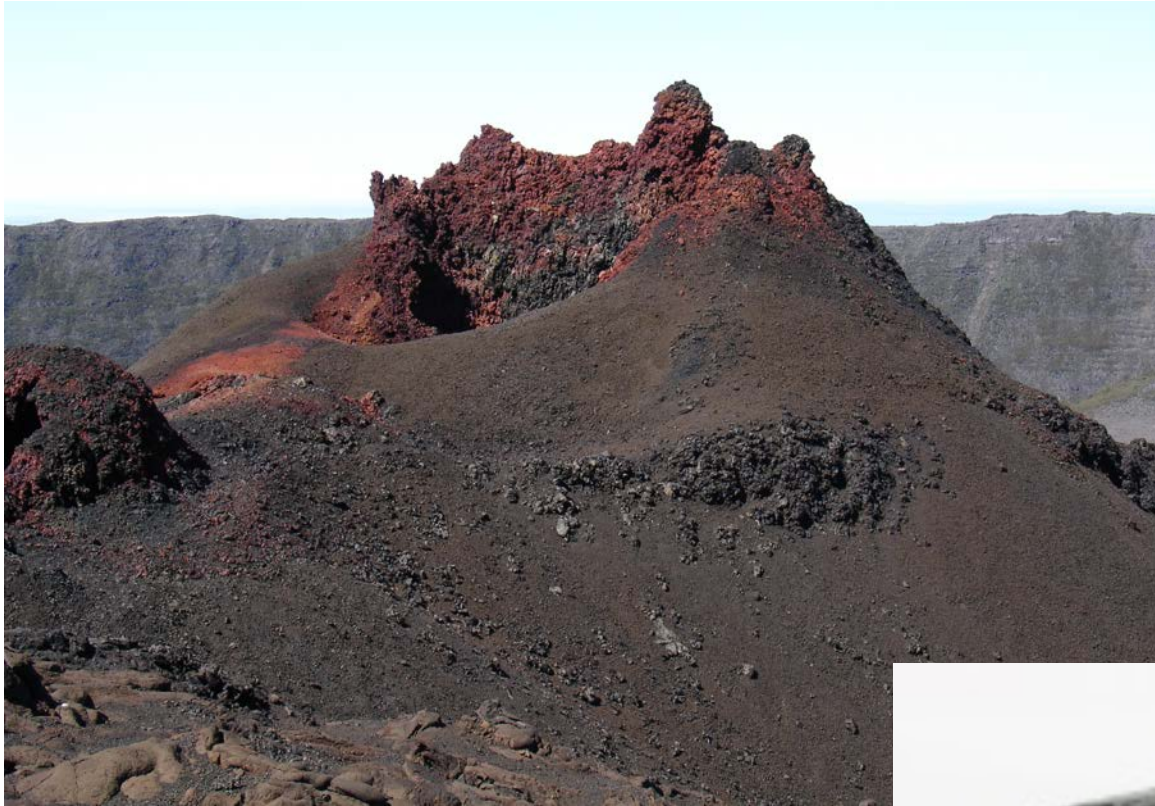
**O** : Oxygène : connection entre les Si en créant des oxygènes pontants.

**Na<sup>+</sup>** : casse les connections entre les Si : plus Na augmente et plus viscosité diminue.

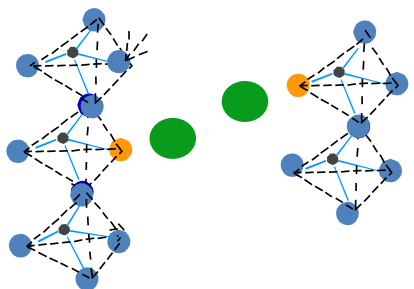
**Ca<sup>2+</sup>** : stabilise le réseau, mais casse les connections entre Si, faible viscosité mais moins faible qu'avec Na.

**Al<sup>3+</sup>** : reconstruit le réseau car il prend la charge + de Na ou 2+ de Ca qui ne casse plus le réseau, la connection du réseau augmente et la viscosité aussi.

# Le rôle du fer sur la viscosité

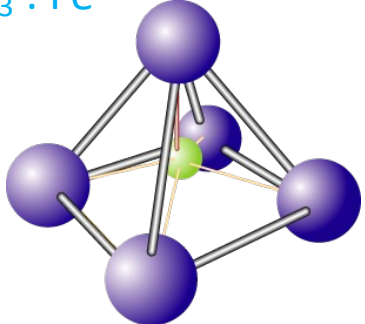


# Le rôle du fer sur la viscosité

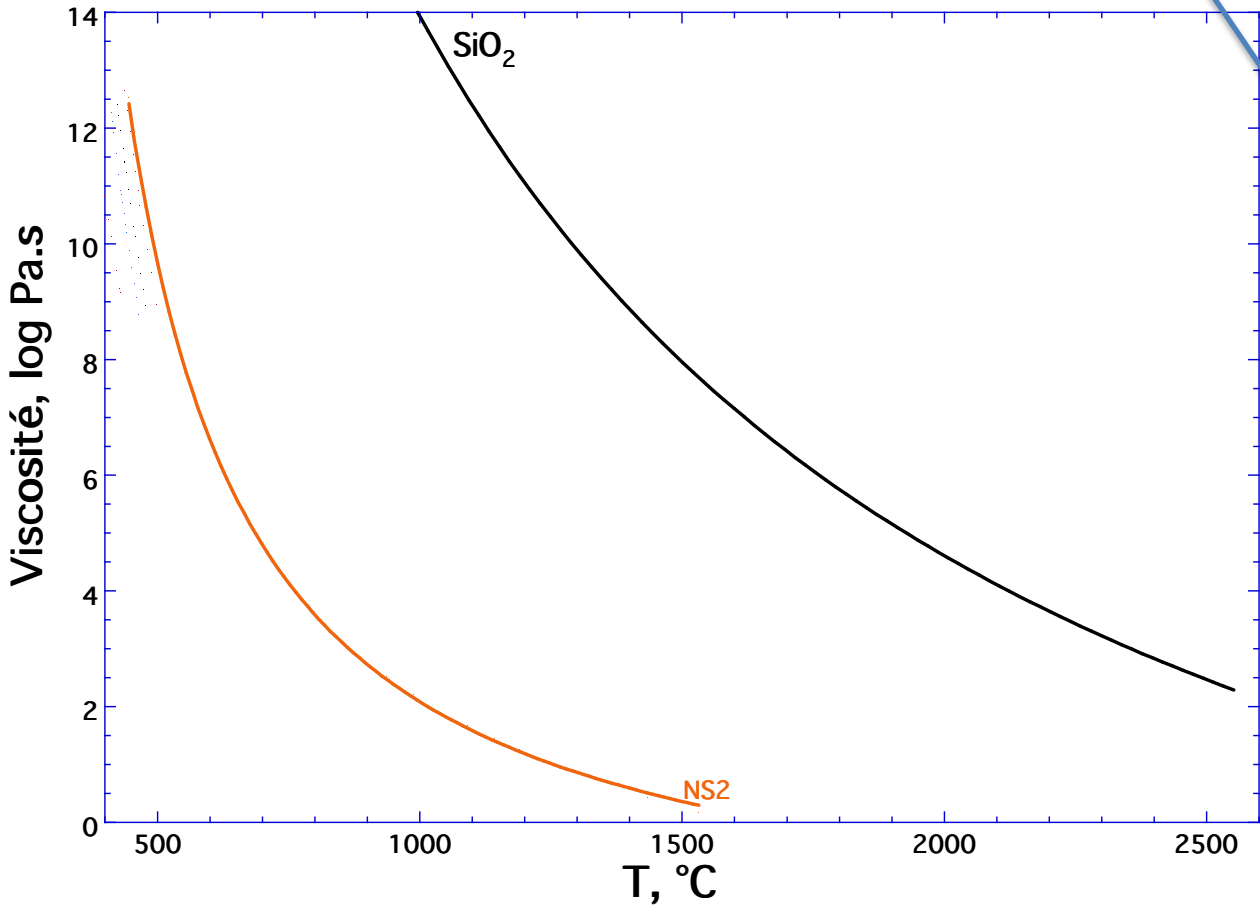
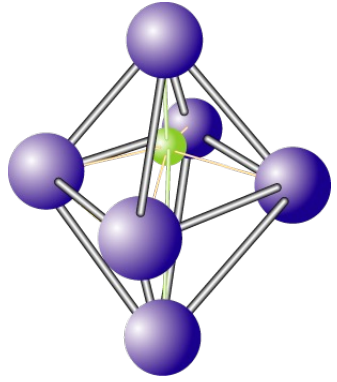


+ Fe

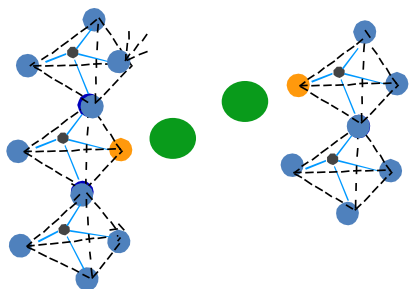
+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Fe<sup>3+</sup>  
[4]Fe<sup>3+</sup>



+ FeO : Fe<sup>2+</sup>  
[6]Fe<sup>2+</sup>

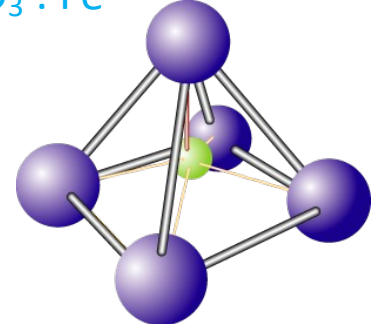


# Le rôle du fer sur la viscosité

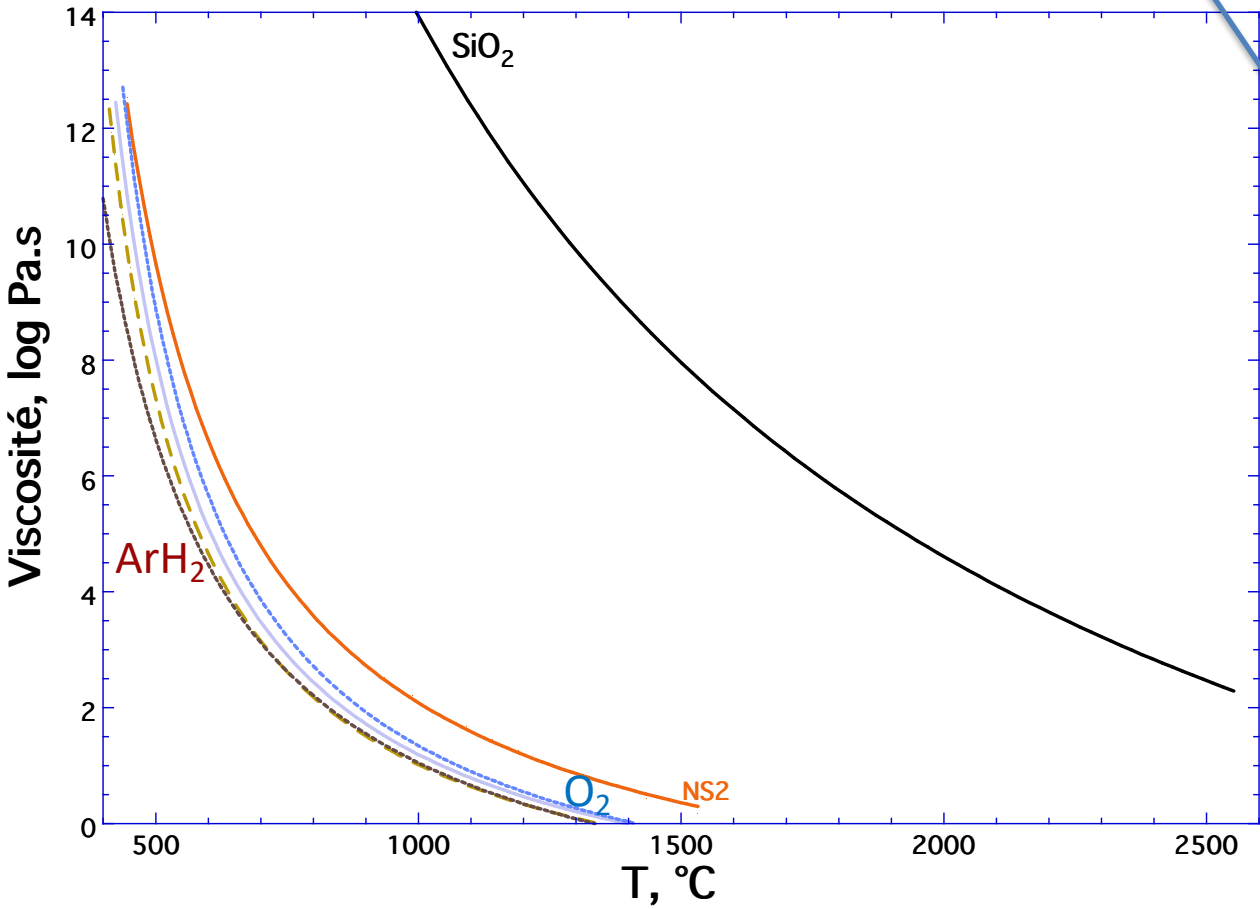
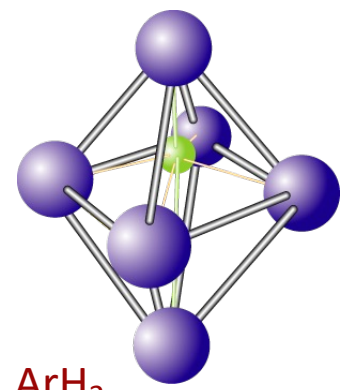


+ Fe

+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Fe<sup>3+</sup> O<sub>2</sub>



+ FeO : Fe<sup>2+</sup>  
[6]Fe<sup>2+</sup>



ArH<sub>2</sub>

bomma

## MATERIAL SAFETY DATA SHEET — 16 Sections

## SECTION 1 — CHEMICAL PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

Product Identifier <b>bomma cullet</b>		[WHMIS Classification]	
Product Use Brilliant, clear, longworking studio crystal glass for the professional and the novice			
Manufacturer's Name BOHEMIA MACHINE s.r.o.		Supplier's Name BOHEMIA MACHINE s.r.o.	
Address Zámecká 1177 58291 Světlá nad Sázavou Czech Republic		Address Zámecká 1177 58291 Světlá nad Sázavou Czech Republic	
E-mail info@bomma.cz	Emergency Telephone +420 569 453 149	E-mail info@bomma.cz	Emergency Telephone +420 569 453 149
Date MSDS Prepared March 20 <sup>th</sup> , 2019	MSDS Prepared By Manufacturer's technical department		Phone Number +420 602 487 576

SiO <sub>2</sub>	: 71,79
Na <sub>2</sub> O	: 9,68
MgO	: 0,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: 0,68
K <sub>2</sub> O	: 5,18
CaO	: 4,54
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: 0,66
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: 0,28
BaO	: 3,60
ZnO	: 1,04

## SECTION 2 — COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

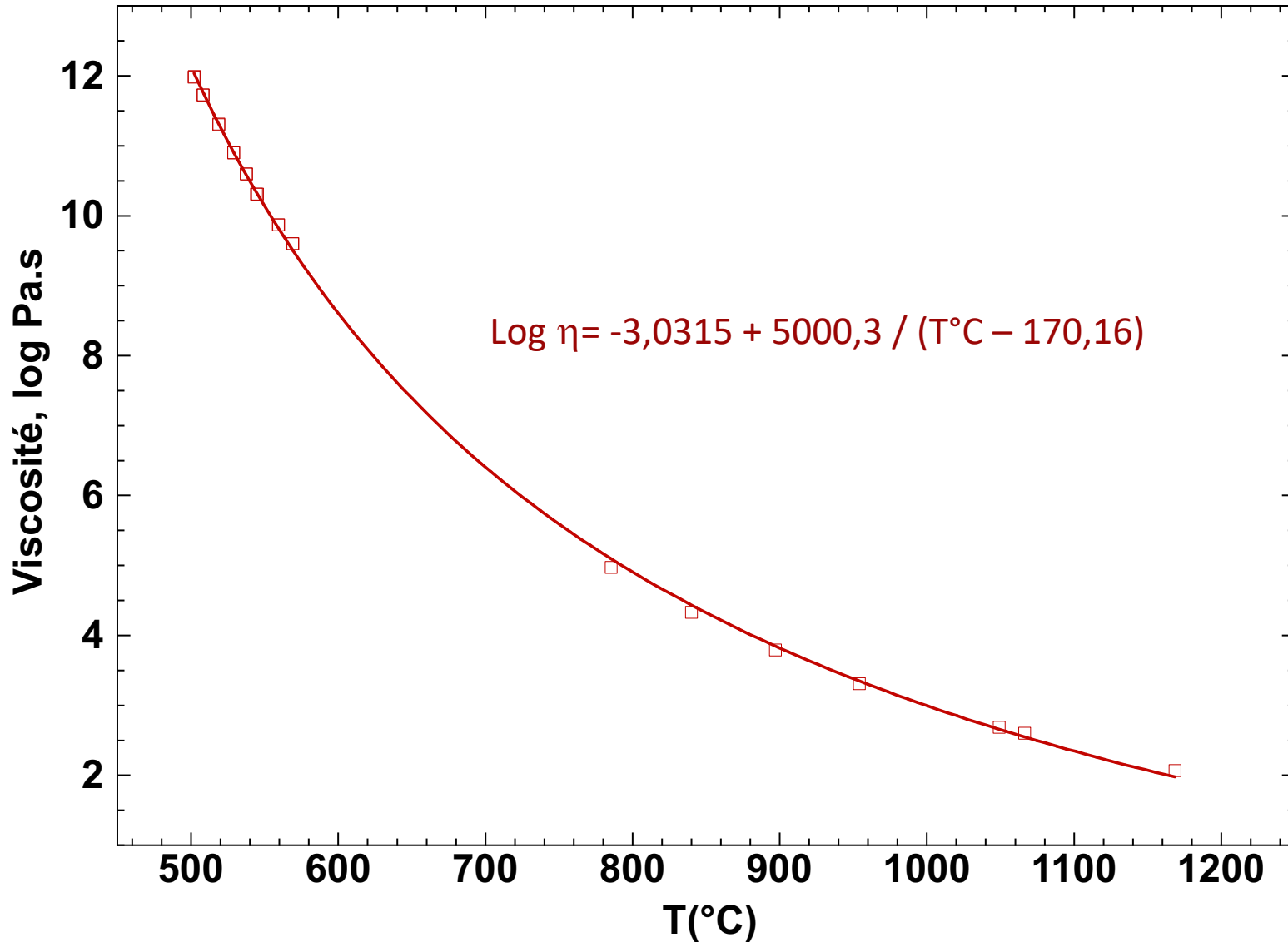
**Crystal Glass Mixture.** Main Constituents see table. All ingredients bonded by vitrification. **Without Hazardous Ingredients.**

Listed are known approximations

Ingredients ( <i>specific</i> )	Approx. in %	Ingredients ( <i>specific</i> )	Approx. in %
SiO <sub>2</sub>	65 – 75	BaO	3 - 5
Na <sub>2</sub> O	5 – 15	ZnO	1 - 3
K <sub>2</sub> O	5 – 15	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 <
Li <sub>2</sub> O	1 <	MgO	1 <
CaO	5 – 15	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 <

WHMIS Symbols]







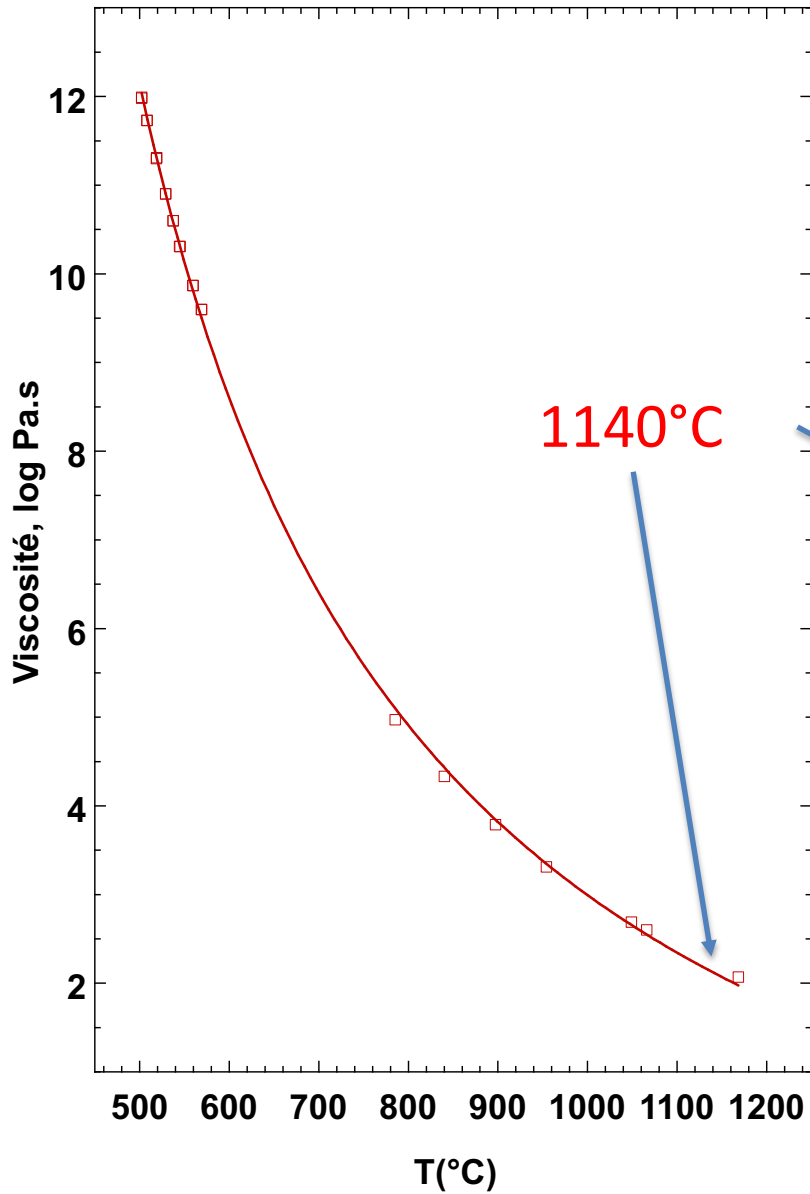
**100 Poise =  $10^2$  Poise = 10 Pa.s  $\Rightarrow$  log = 1 Pa.s**  
**1000 Poise =  $10^3$  Poise =  $10^2$  Pa.s  $\Rightarrow$  log = 2 Pa.s**  
**10000 Poise =  $10^4$  Poise =  $10^3$  Pa.s  $\Rightarrow$  log = 3 Pa.s**

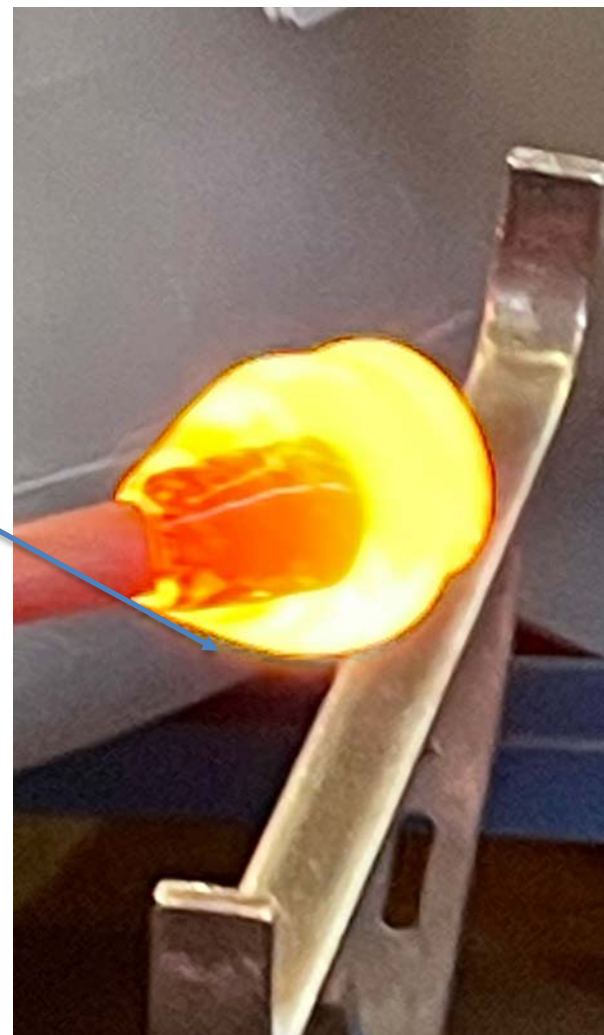
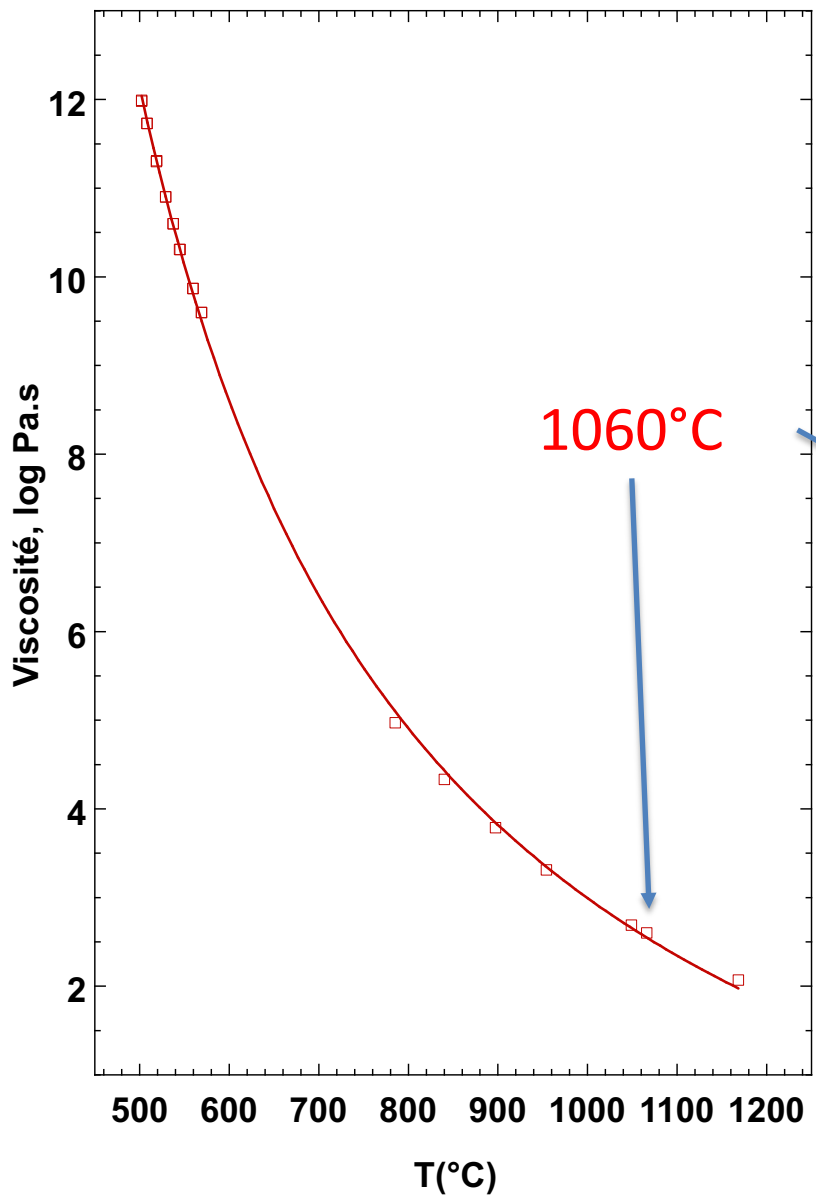
...

**10 000 000 000 000 Poise =  $10^{13}$  Poise =  $10^{12}$  Pa.s  $\Rightarrow$  log = 12 Pa.s**

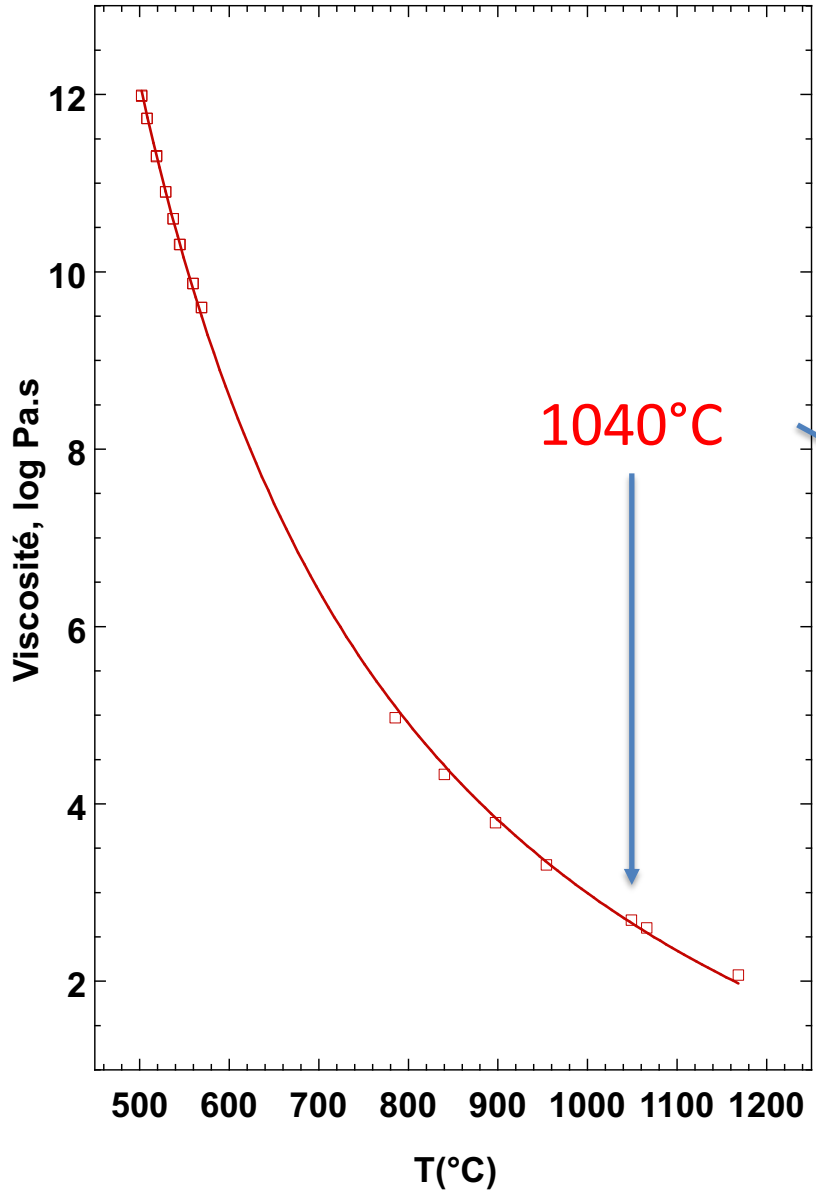
Température de fusion :	$10 \text{ Pa.s} \Rightarrow 1 \log \text{ Pa.s}$
<b>Température de travail :</b>	<b><math>10^2 - 10^3 \text{ Pa.s} \Rightarrow 2-3 \log \text{ Pa.s}</math></b>
Température d'enfoncement :	$10^{3,22} \text{ Pa.s} \Rightarrow 3,22 \log \text{ Pa.s}$
Température écoulement : <i>Littleton</i>	$10^{6,6} \text{ Pa.s} \Rightarrow 6,6 \log \text{ Pa.s}$
Temp ramollissement dilatométrique :	$10^{10,3} \text{ Pa.s} \Rightarrow 10,3 \log \text{ Pa.s}$
Temp cuisson :	$10^{12} \text{ Pa.s} \Rightarrow 12 \log \text{ Pa.s}$
<b>Temp Transition vitreuse :</b>	<b><math>10^{12} \text{ Pa.s} \Rightarrow 12 \log \text{ Pa.s}</math></b>
Température de tension :	$10^{13,5} \text{ Pa.s} \Rightarrow 13,5 \log \text{ Pa.s}$

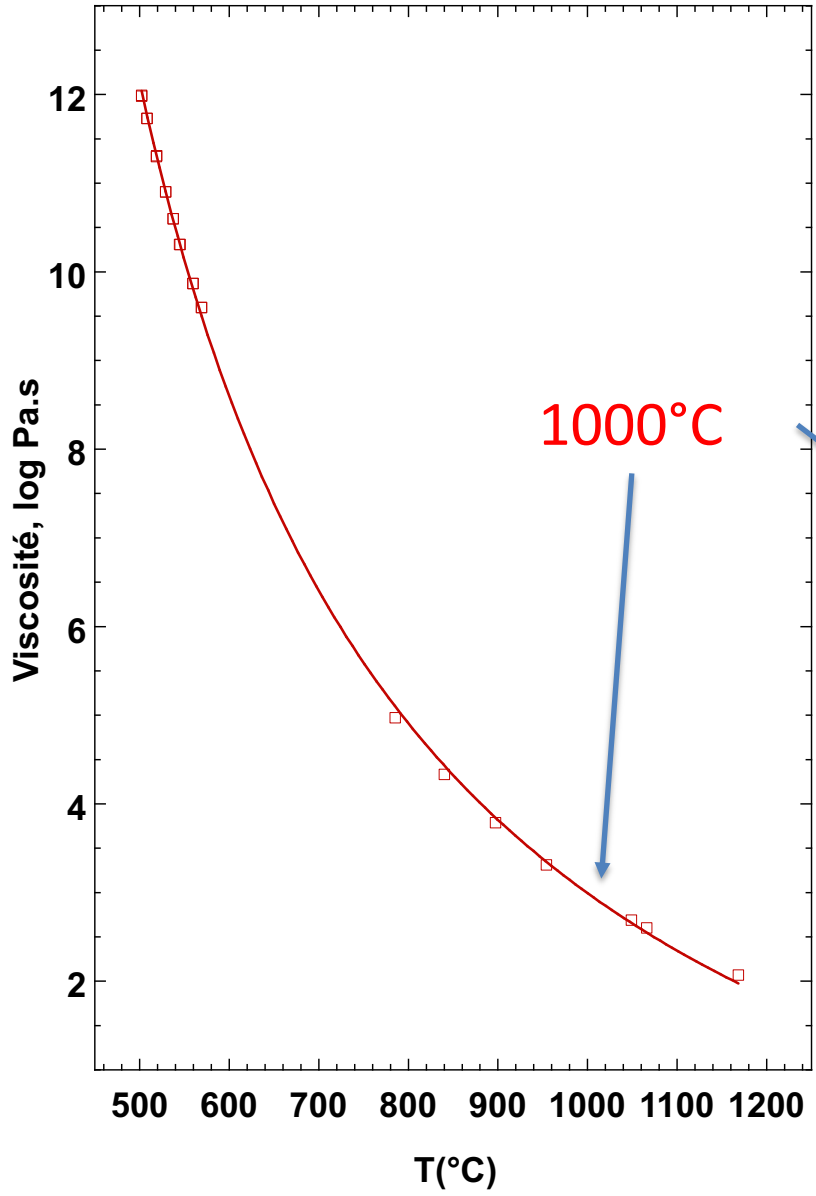
Température du bain  
10 Pa.s => 1 log Pa.s

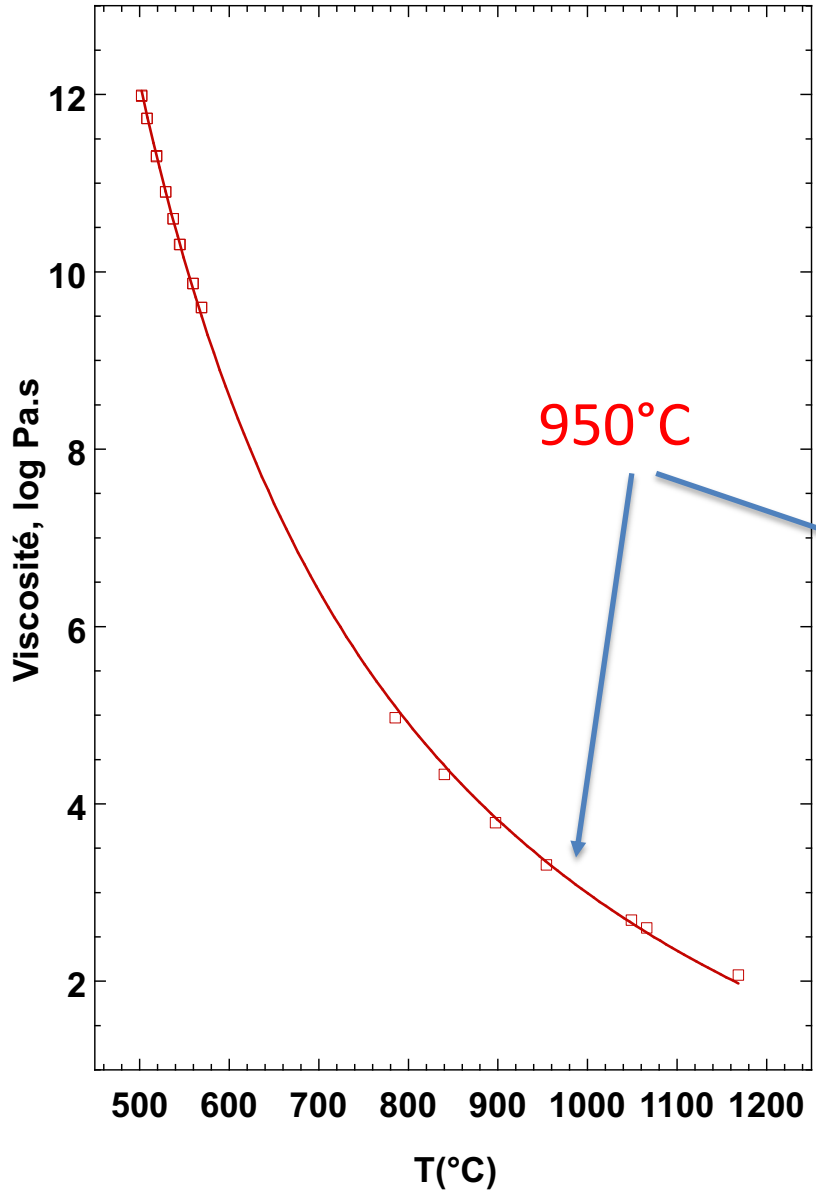


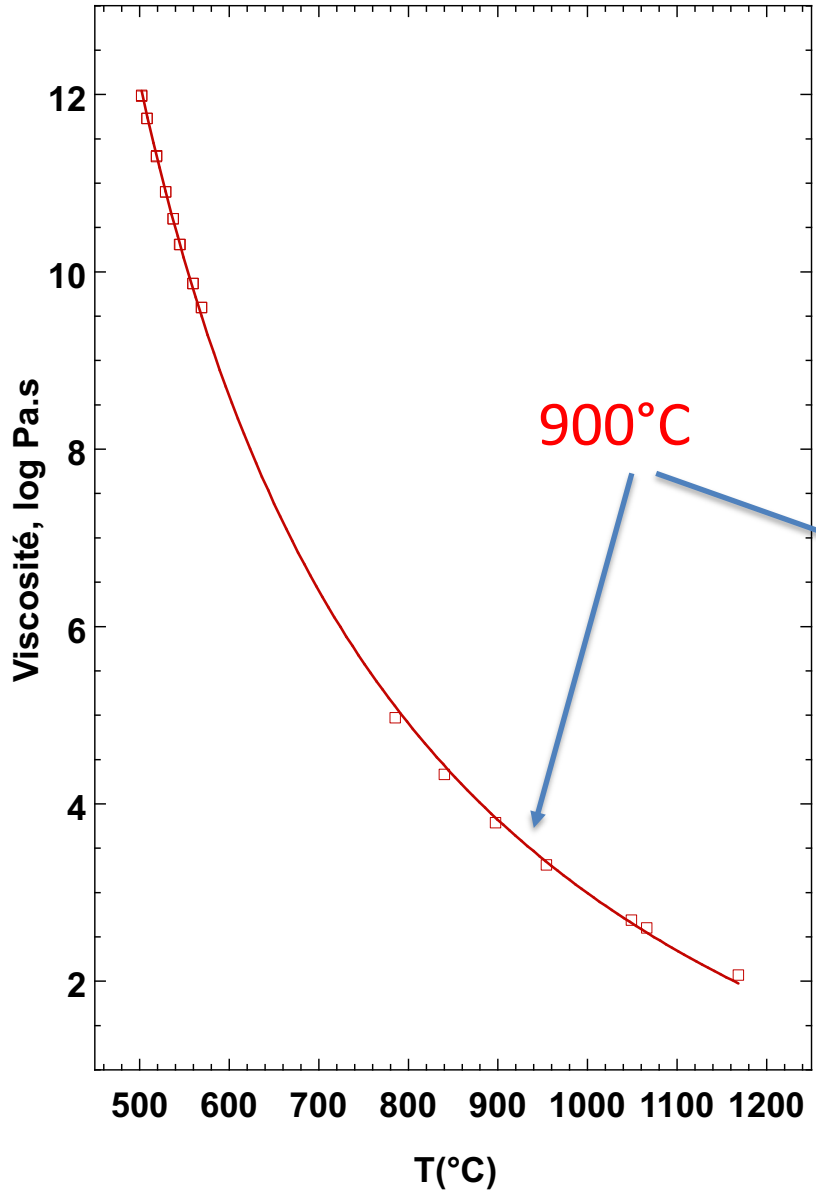




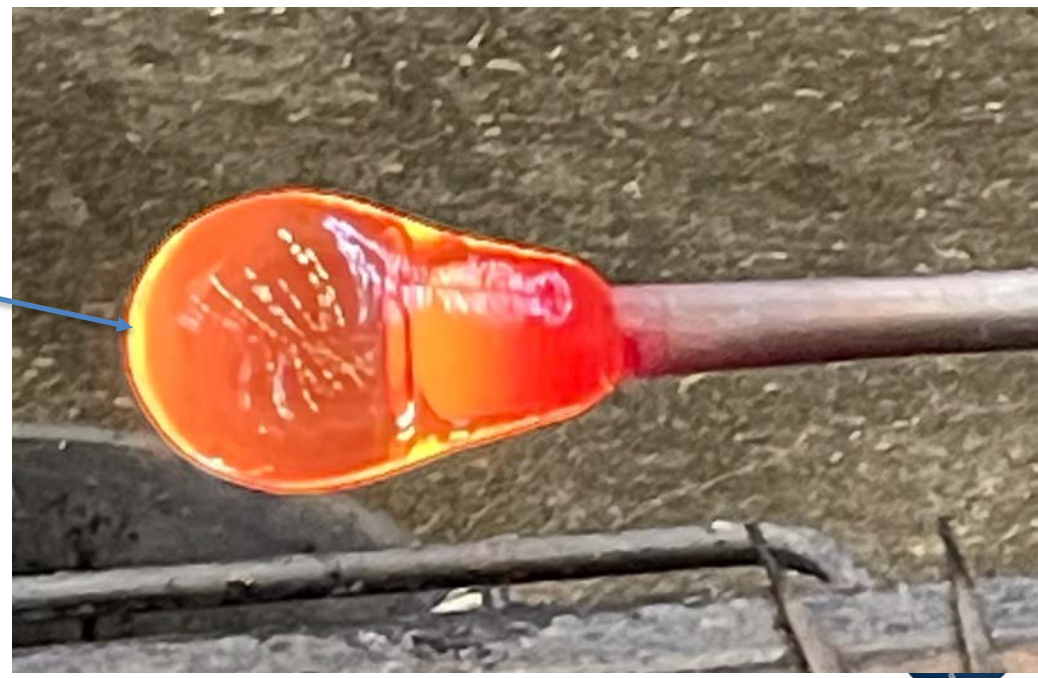
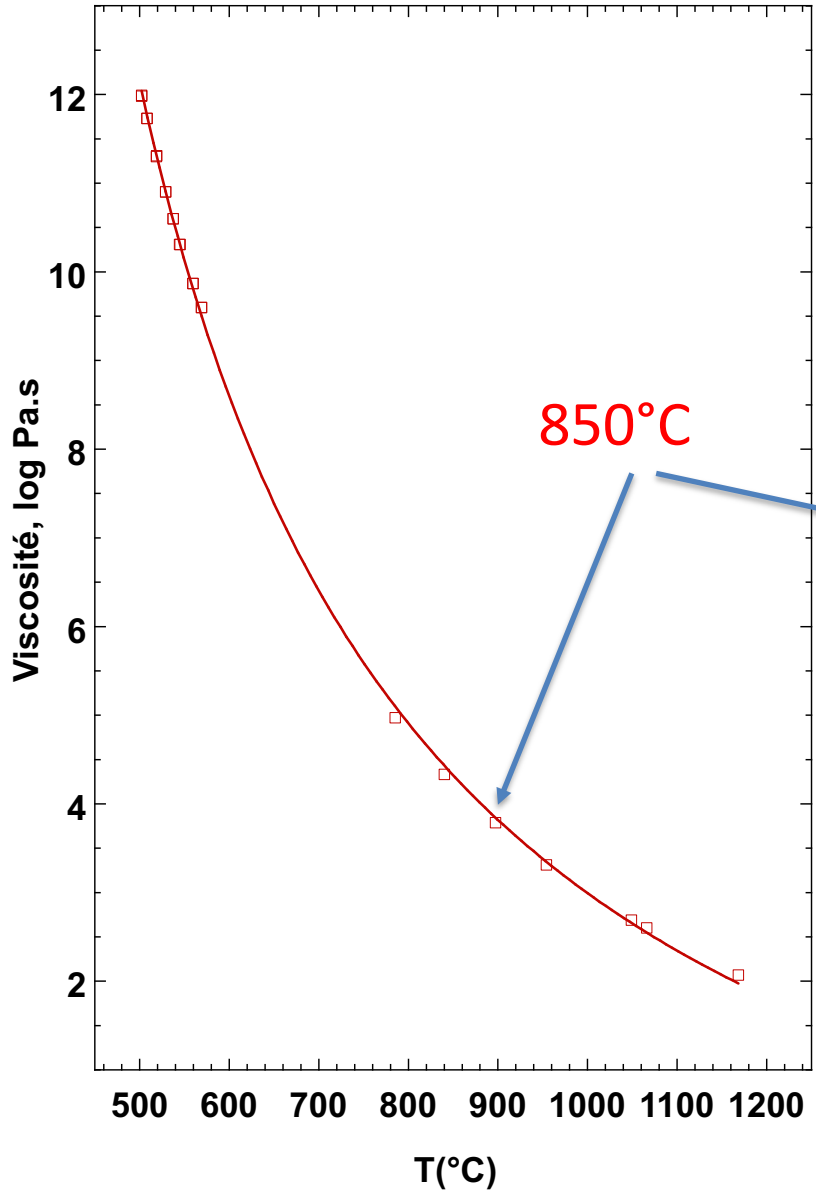




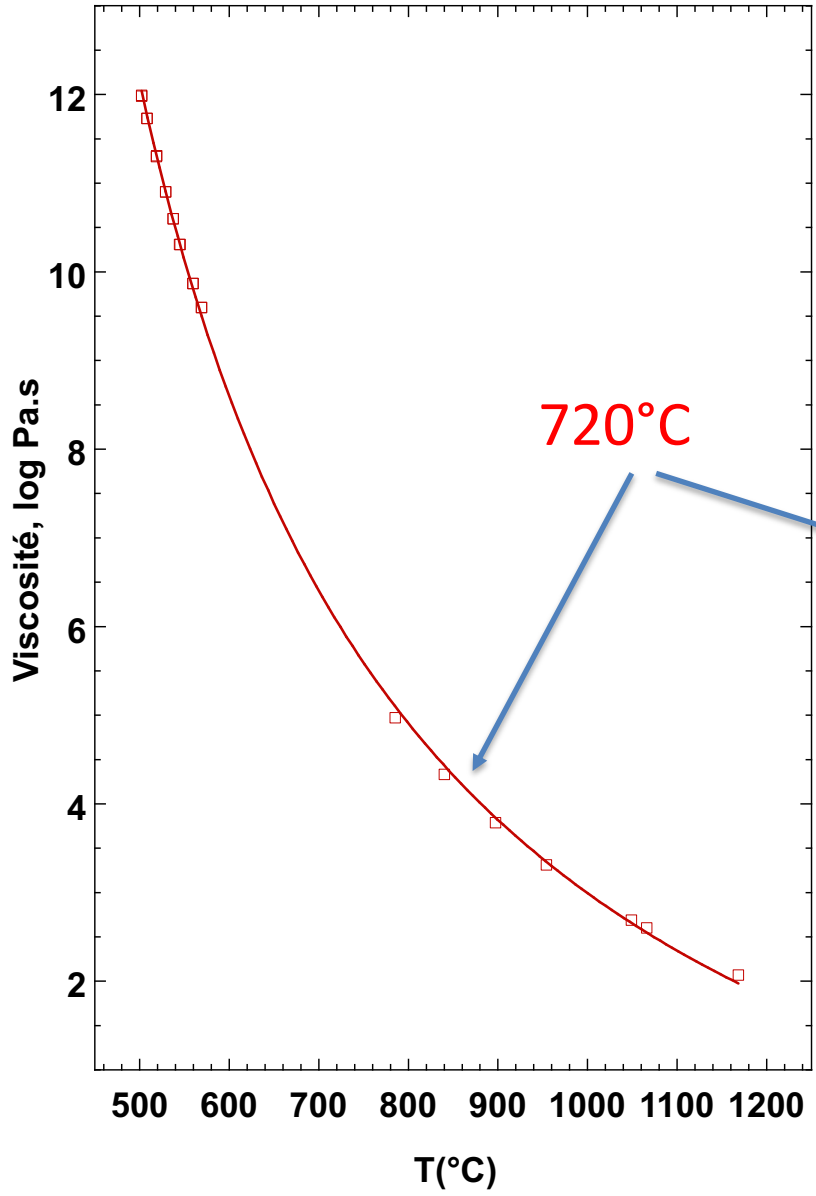


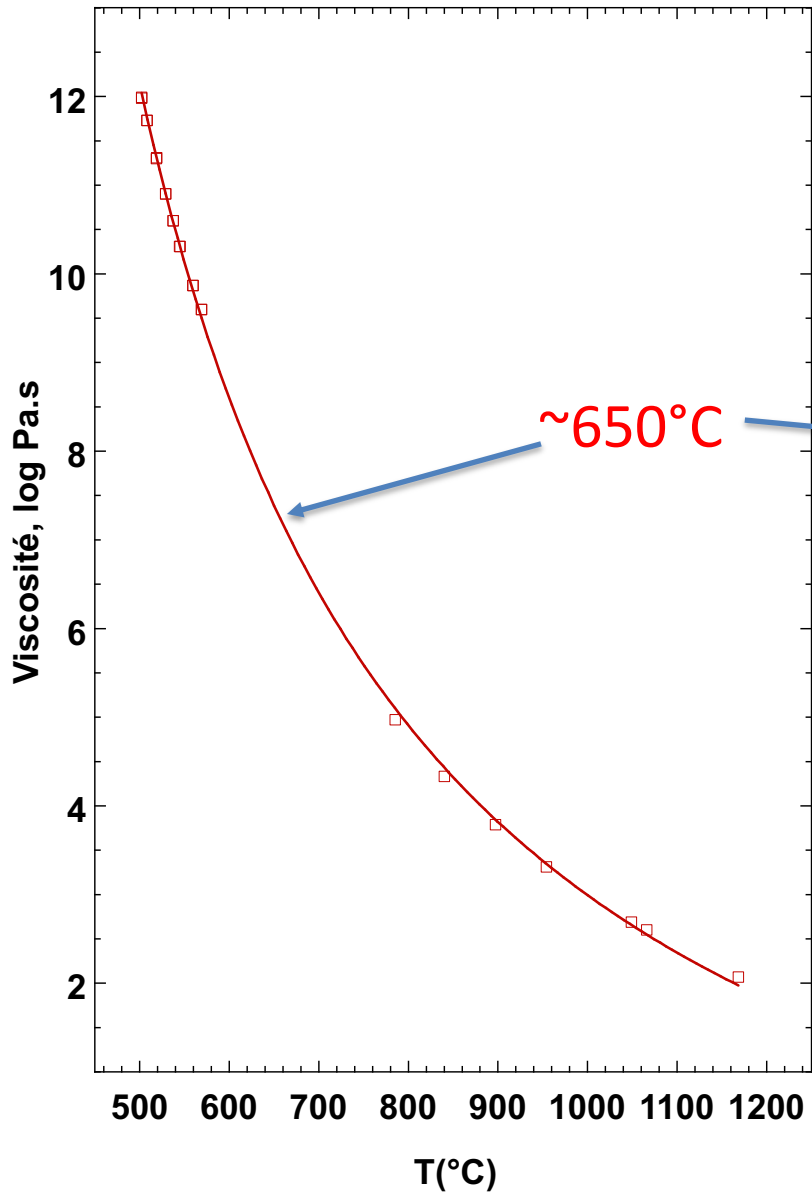


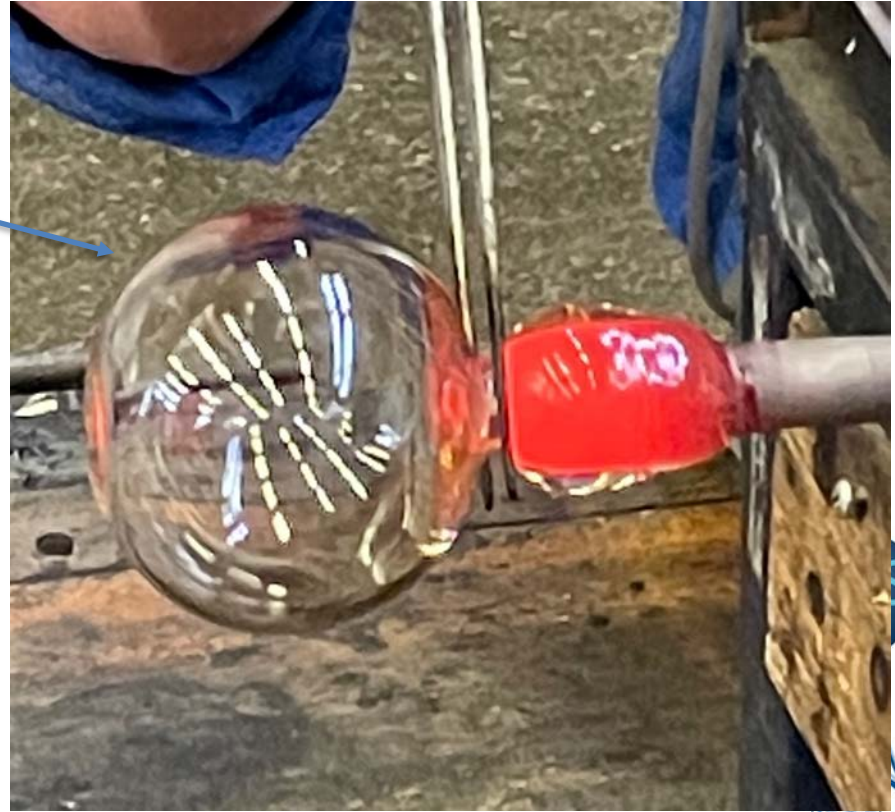
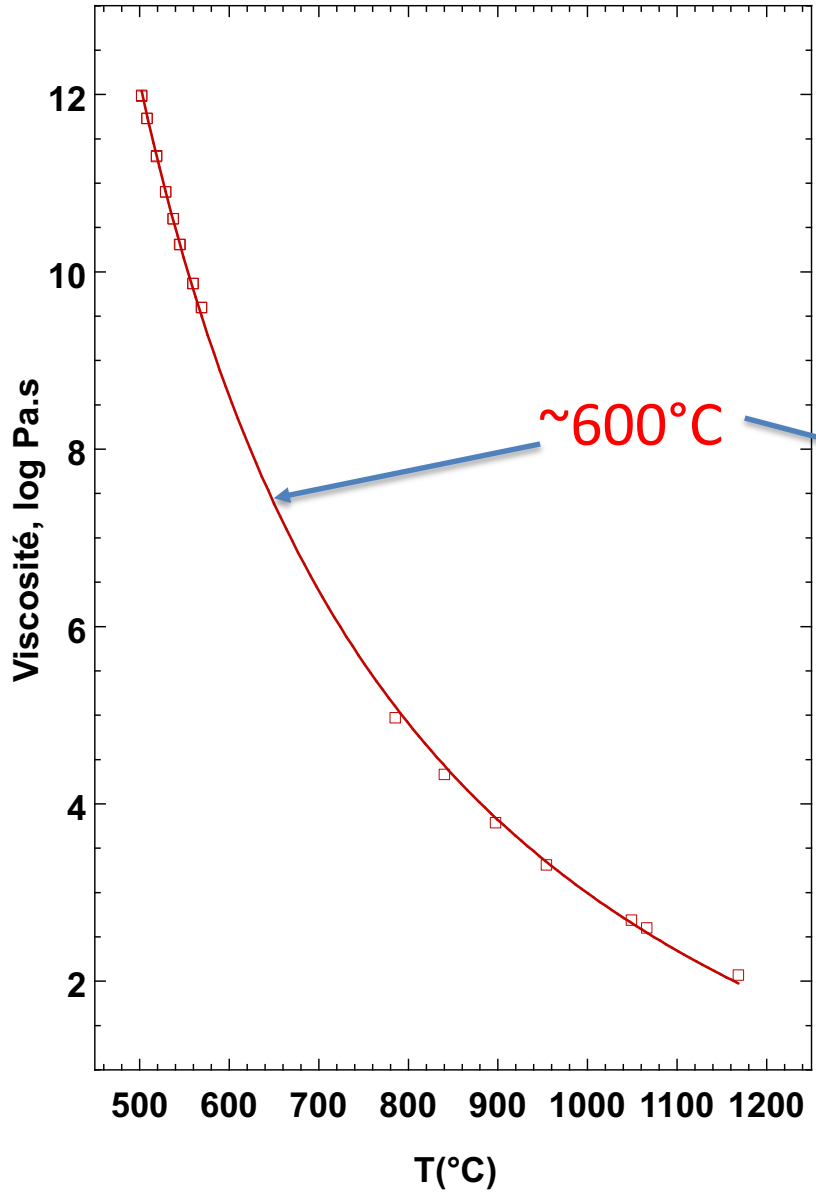


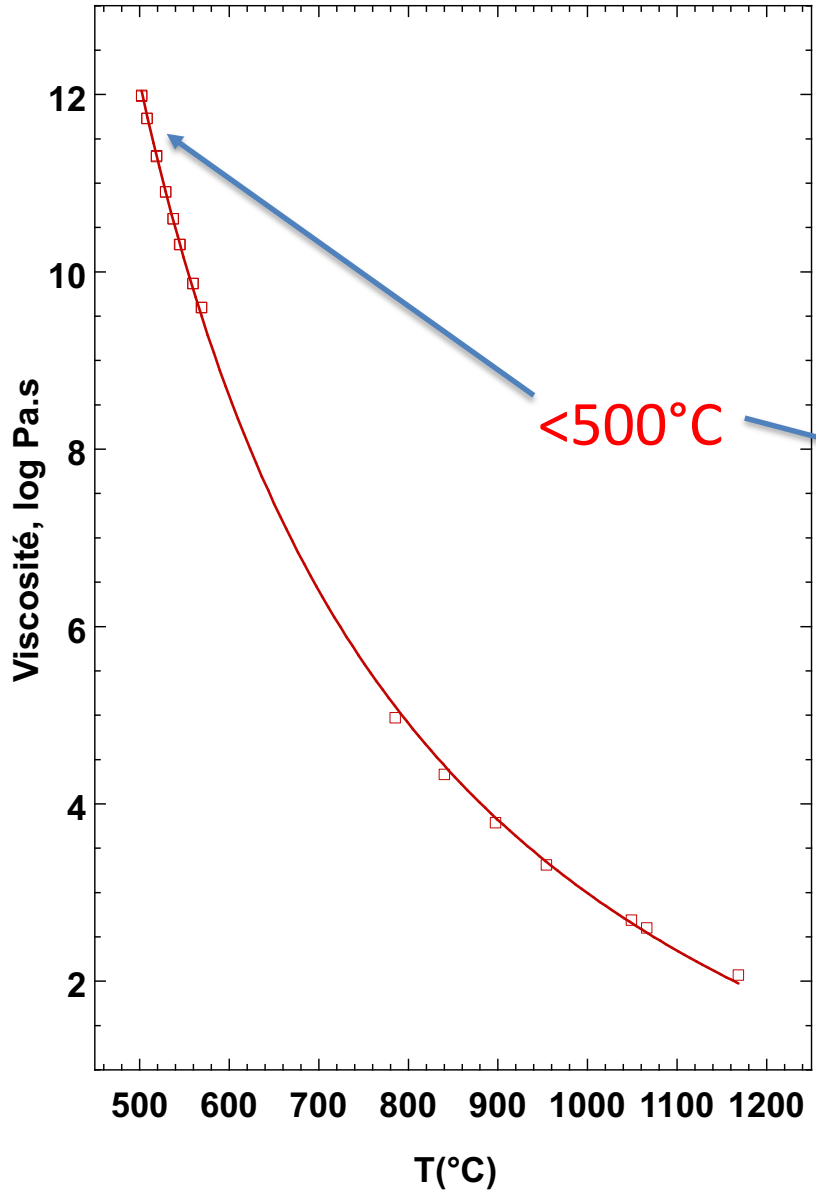




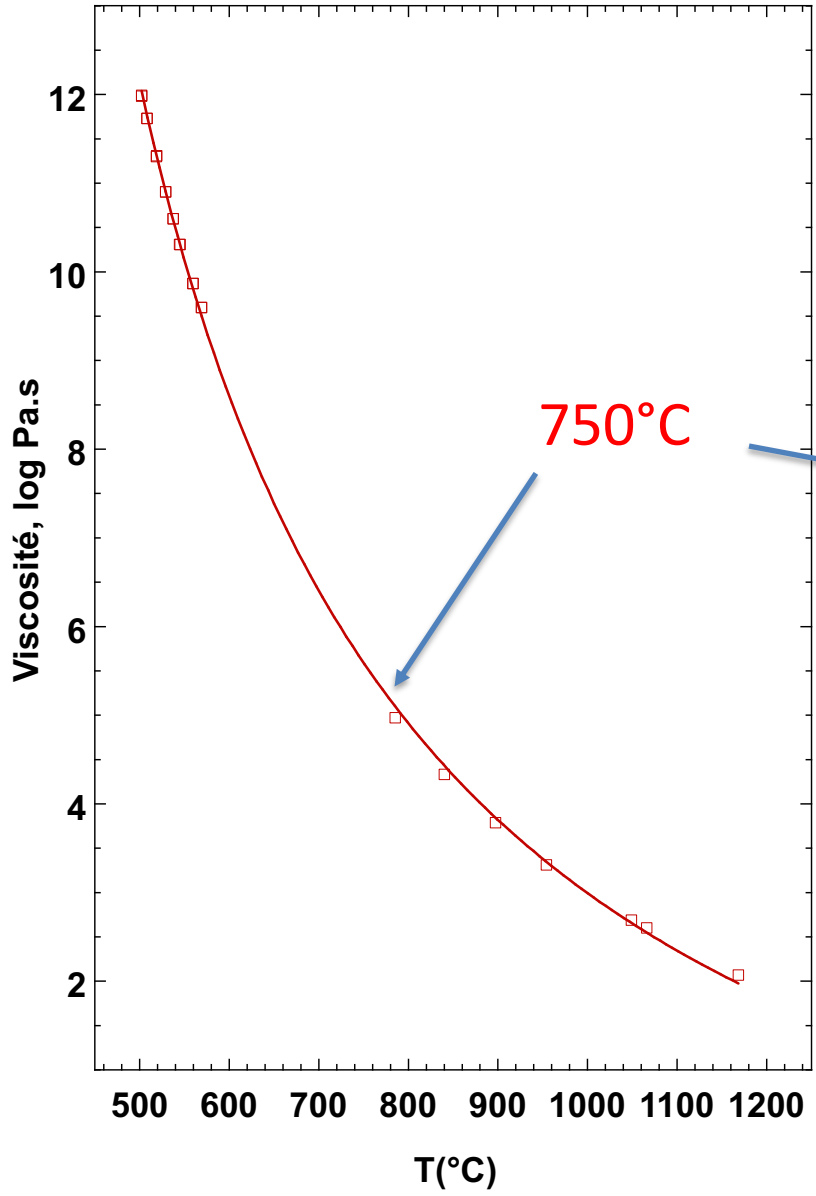




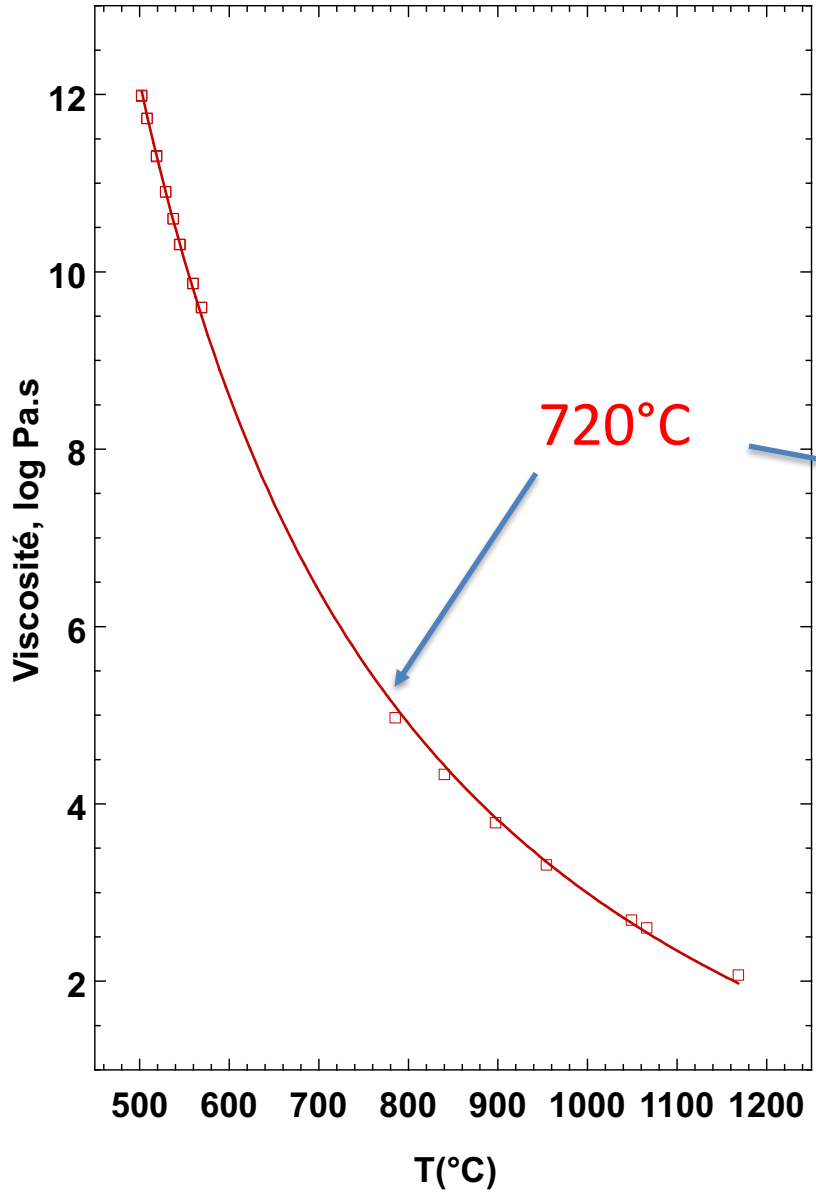












## Philosophie théorique et pratique

La théorie c'est quand on sait tout mais que rien ne marche.

La pratique c'est quand tout marche mais que l'on ne sait pas pourquoi.

Ici on a uni la théorie et la pratique.

Rien ne marche et personne ne sait pas pourquoi.

# Mais, on essaie