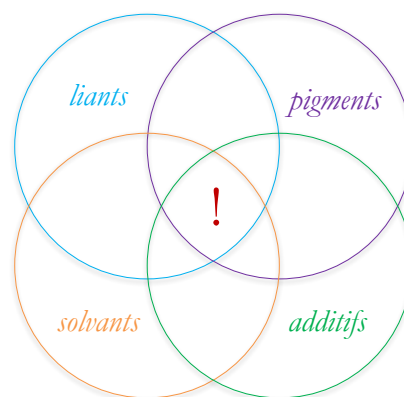


Etudes de cas

1

La peinture



2

La peinture

Définition

produit liquide ou en poudre, contenant des pigments, destiné à être appliqué sur une surface pour former une couche opaque

Concentration en matières solides: 0 (vernis) à 60% (peintures mates)

Séchage physique : évaporation du solvant, et fusion des particules de liant

Séchage chimique : oxydation, catalyse (processus thermiquement activés)

3

La peinture

Cycle de vie : de la production des ingrédients à leur transport et stockage, au mélange, application et séchage, et à la durée de vie, restauration et élimination en fin de vie.

Cahier des charges

- bonne dispersion des pigments
- Bonne stabilité (pas de coagulation, sédimentation lente)
- viscosité basse à l'application (lissage)
- viscosité élevée après l'application (pas de coulées)

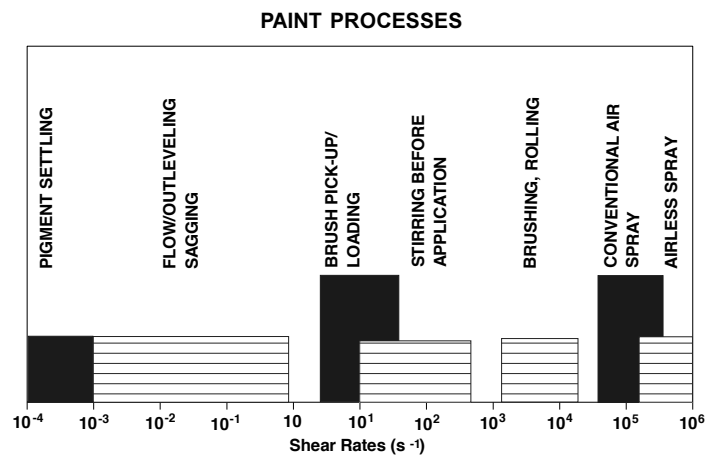
4

Rhéologie de la peinture

- suspension colloïdale stable
- concentration adéquate de pigments ... contrainte seuil !
- viscosité adaptée au mélange
- pseudo-plasticité (rhéofluidification)
- suspension élastique
- mélange thixotrope : présence de liaisons hydrogène, résines alkydes, polarité du solvant
- temps de relaxation court pour l'effet de lissage

5

Rhéologie de la peinture

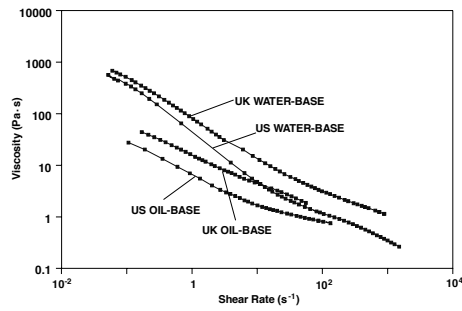


Courtesy TA Instruments

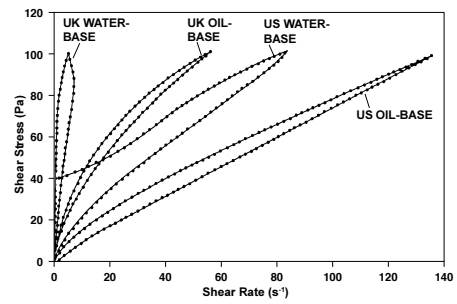
6

Rhéologie de la peinture

Rhéofluidifiant



... et thixotrope



Courtesy TA Instruments

7

Le chocolat

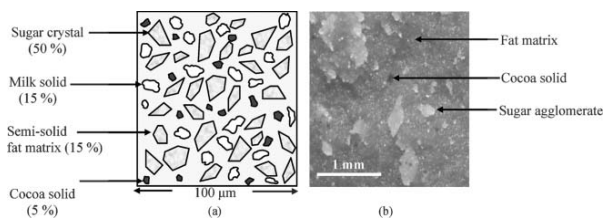


8

Le chocolat

Suspension (à $T > 35^{\circ}\text{C}$) : poudre de cacao, sucre, poudre de lait dans une phase de beurre de cacao

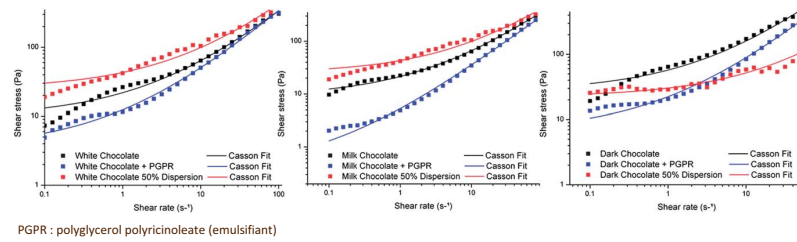
- taille des particules : 15 à 25 microns
- concentration : 65 à 73%
- contrainte seuil



9



Rhéologie du chocolat



Modèle de Casson (avec contrainte seuil) $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_{Ca}\dot{\gamma}}$

Skelhon et al., Food Funct. (2013)

11

Exercice 1 : Dégustation de chocolat

Rhéologie :

- Présence d'un seuil d'écoulement (entre 10 et 200 Pa)
- Viscosité à 36°C...

Texture et aspects sensoriels du chocolat :

1. Dureté dans la bouche : force requise pour écraser le chocolat
2. Dissolubilité : manière dont le chocolat fond dans la bouche
3. Souplesse : degré de granulométrie ressenti
4. Niveau de collage : collage à la langue et au palais

12

Exercice 2 : Formulation de chocolat au lait

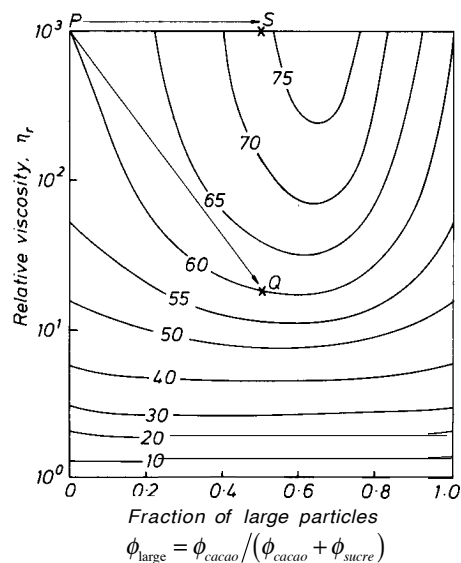
Le chocolat est un mélange de lait, de cacao, de beurre de cacao et de sucre.

On mélange préalablement le lait avec le beurre de cacao fondu à 40°C qui donne un liquide homogène de viscosité 1 Pa.s. On introduit alors les particules supposées parfaitement sphériques de cacao maigre (diamètre 5 μm) et de sucre (diamètre 1 μm).

1. Quel genre de suspension a-t-on ? Quelles sont les interactions prédominantes attendues ?
2. On veut élaborer du chocolat qui contient 50% de poudre de cacao, mais dont la viscosité à 40°C n'excède pas 100 Pa.s. Est-ce possible ?
3. Quelles autres formulations permettent d'assurer une viscosité égale à 100 Pa.s ? Qu'est-ce que vous pouvez en déduire quant à l'amertume des chocolats obtenus ? Comment peut-on changer cette dernière caractéristique tout en gardant 50% de cacao ?
4. L'incorporation de cacao et de sucre dans la phase continue formée de beurre de cacao et de lait fait apparaître un seuil d'écoulement. Quelles sont les interactions physiques qui expliquent cela ? Quelle équation peut-on utiliser pour décrire ce comportement rhéologique ?

13

Exercice 2 : Formulation de chocolat au lait



Barnes, Hutton & Walters, An introduction to rheology, Elsevier (1989)

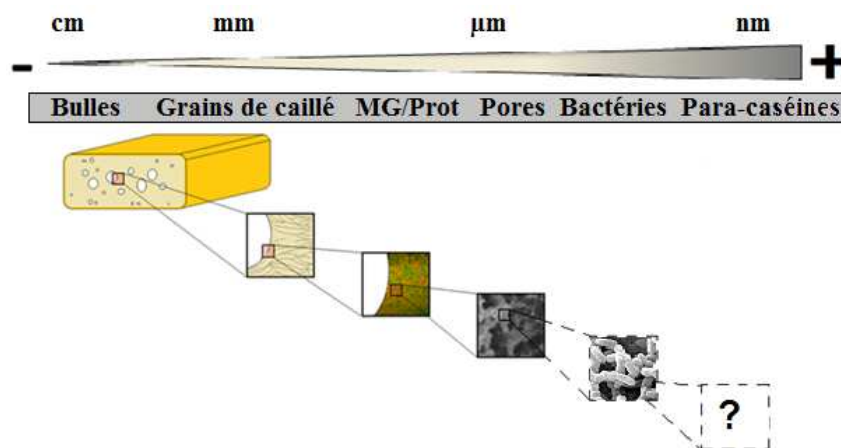
14

Le fromage



25

Le fromage

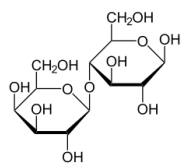


Huc, Université de Rennes 1, thèse 2013

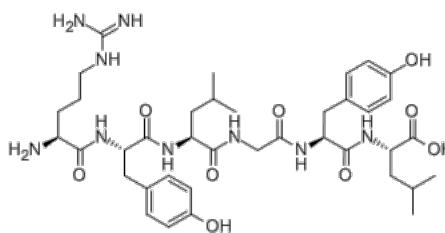
26

Le lait est une émulsion

- eau 87.7%
- lactose 4.9% (sucre : disaccharide de glucose et galactose) dissout dans la phase aqueuse
- graisse 3.4% triglycérides
- protéines 3.3% caséine (micelles, 0.3 μm diamètre) et autre.
- vitamines, minéraux 0.7%
- enzymes (lipase, qui est tuée par la pasteurisation)



lactose



caséine

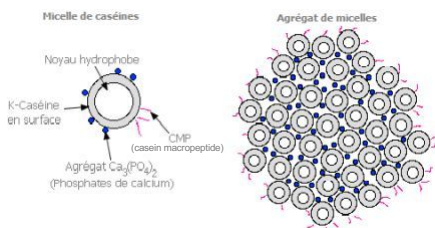
27

Production du fromage

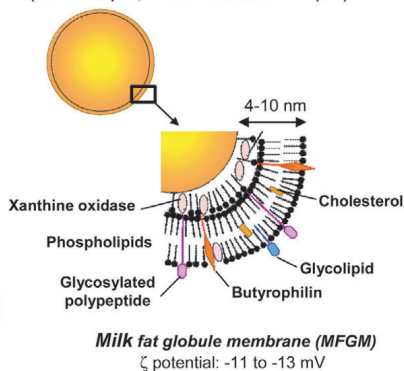
- point isoélectrique de la caséine : $\text{pH} = 4.6$
 - pH du lait : 6.6
- La caséine est chargée négativement

si on ajoute de l'acide, ou que le sucre se transforme en acide lactique par fermentation enzymatique, les micelles de caséine coagulent :

- agrégation
- formation d'un gel



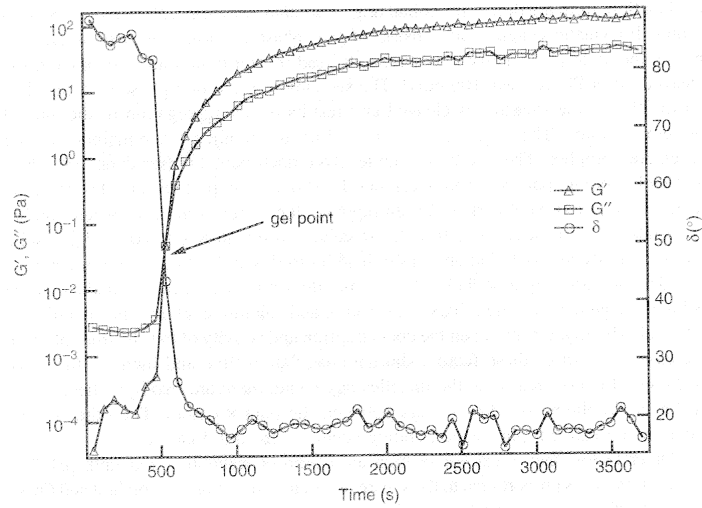
Natural milk fat globules
(0.2 – 10 μm , mean diameter ~ 4 μm)



Lopez and Briard-Bion, Lait (2007)

28

Coagulation et gélification du lait



Uludogan, 1999

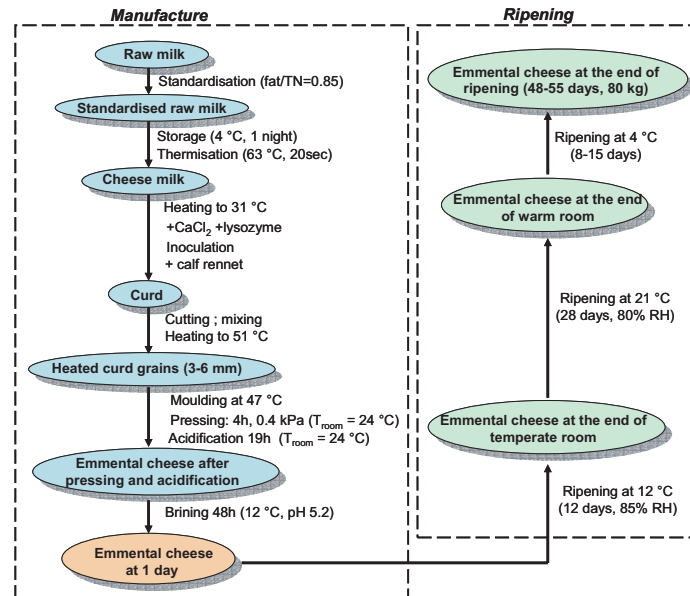
29

L'Emmental



30

L'Emmental

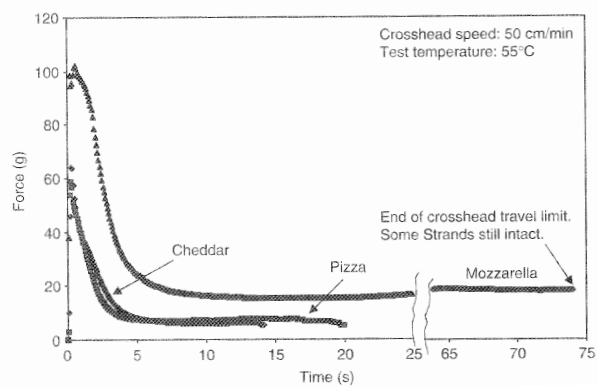


Lopez and Briard-Bion, Lait (2007)

31

Viscosité élongationnelle de fromages

Test de la fourchette



Gunasekaran and Ak, 1997

32

Rhéologie de la Mozzarella

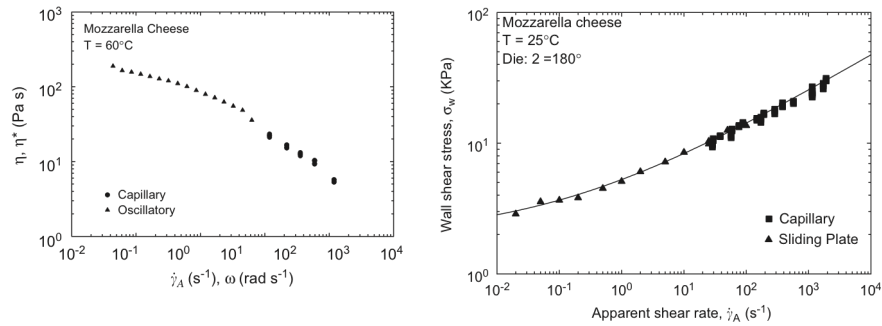


Fig. 12. A Herschel-Bulkley model fits well with the true flow curve of mozzarella cheese at 25°C , resulting a yield stress value that agrees well with the experimentally determined one.

$$\sigma = \sigma_y + K\dot{\gamma}_A^n, \quad (4)$$

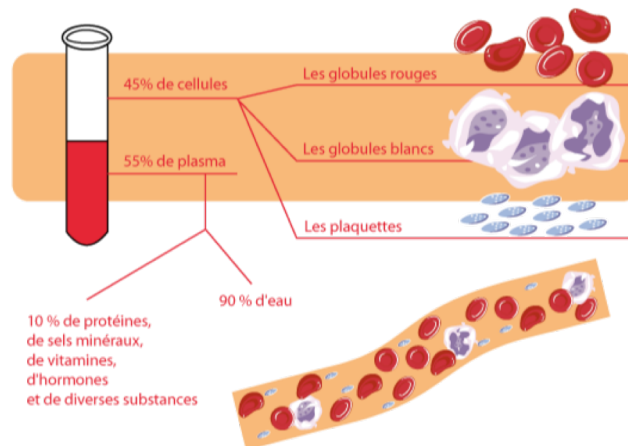
where σ_y is the yield stress, K and n are the consistency and power law indexes, respectively, yielded $\sigma_y = 1930 \text{ Pa}$, $K = 3.34 \text{ Pa s}$, and $n = 0.28$.

Muliawan, Hatzikiriakos, International Dairy Journal 17 (2007) 1063–1072

33

Le sang

Suspension concentrée de globules rouges et blancs et de plaquettes dans du plasma (eau et protéines)



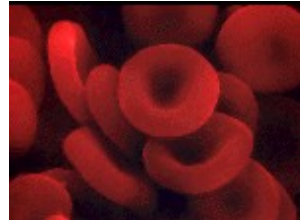
Dondusang-doubs.org

34

Globules rouges et blancs

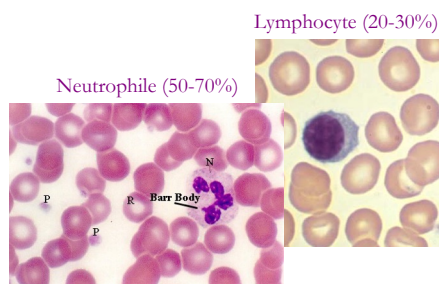
Globules rouges

- hématoците (H) = ϕ
- diamètre 4-5 μm
- 4 à 6 millions par μl de sang d'adulte
- transport d'oxygène, durée de vie : 120 jours
- formés dans la moelle osseuse



Globules blancs

- diamètre 7 à 12 μm
- 6 à 9000 par μl de sang d'adulte
- rôle immunitaire
- durée de vie : 120 jours
- formées dans la moelle osseuse



35

Rhéologie du sang

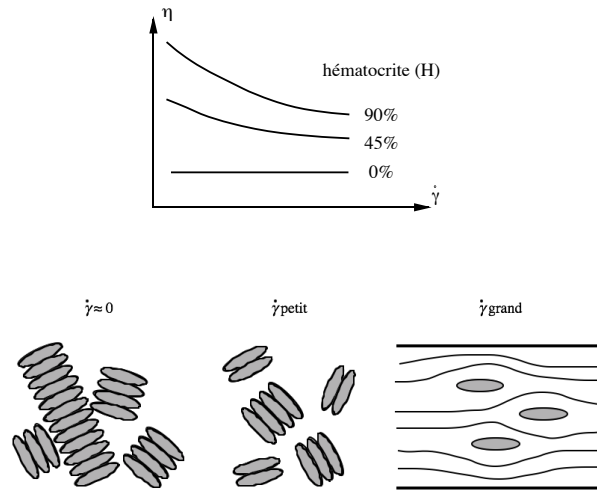


Tableau 1 Hémodynamique de l'arbre vasculaire.

Vaisseau	Diamètre (mm)	Nombre	Vitesse locale (cm s^{-1})	Shear stress (dynes cm^{-2})	Shear rate (s^{-1})	Nombre de Reynold's
Aorte	20 à 30	1	60	10	130	4500
Artères	1 à 3	600	20 à 50	20	700	400
Artéριοles	0,5 à 0,1	$40 \cdot 10^6$	0,5	40 à 70	1000	2,3
Capillaires	0,05 à 0,01	$1200 \cdot 10^6$	0,05	60	800	0,05
Veinules postcapillaires	0,01 à 1	$80 \cdot 10^6$	0,1 à 0,04	1 à 5 ^a	0,01 à 0,02	0,01
Veines	3 à 6	1000	5	6 à 10 ^a	100 à 200	400
Veine cave	13 à 15	1	10 à 15	10	50	400

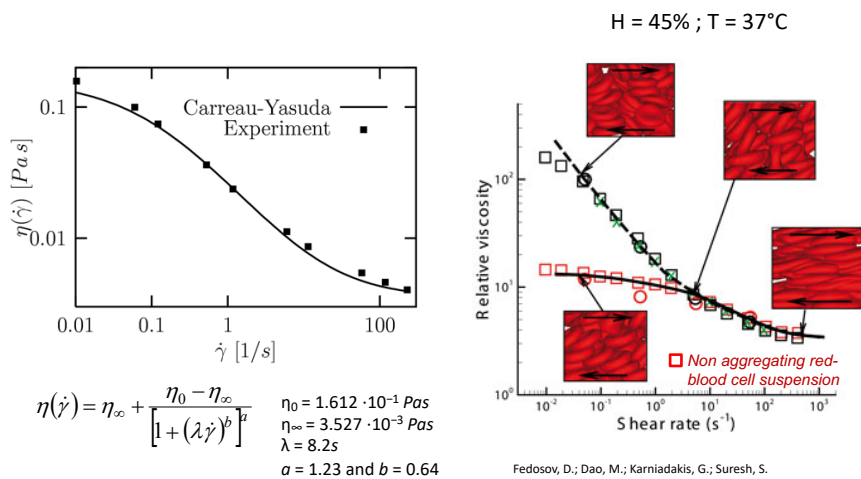
^a Selon que le flux sanguin est présent ou non. Données provenant des moyennes de plusieurs publications.

Rhéologie du sang



37

Rhéologie du sang



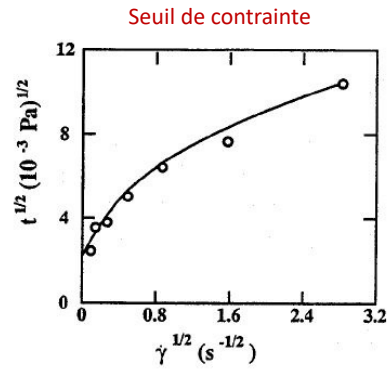
Fedosov, D.; Dao, M.; Karniadakis, G.; Suresh, S. Computational Biorheology of Human Blood Flow in Health and Disease. *Annals of biomedical engineering* **2013**, 42.

Ternik, Int. J. Simul. Model. (2008)

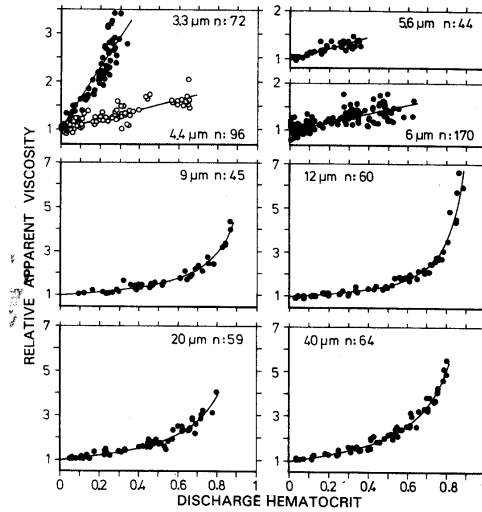
38

Rhéologie du sang

Viscosité relative vs. H dans des tubes de différents diamètres

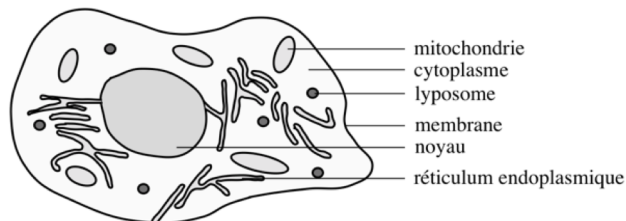


Pries AR, Neuhaus D and Gaehtgens P. Blood viscosity in tube flow: dependence on diameter and hematocrit. Am J Physiol 1992; 263(6 Pt 2): H1770-8.



39

Les cellules



40

Détermination de la viscosité des cellules

Magnétophorèse (mouvement
de particules magnétiques
dans un fluide soumis à un
gradient de champ
magnétique

$$\eta = f\left(M \text{ ou } F; \frac{dx}{dt}\right) \quad \text{et} \quad F = 6\pi\eta d \frac{dx}{dt}$$

Mouvement
Brownien des
corpuscules dans
l'hyaloplasme après
centrifugation

$$D_x = 14.7 \cdot 10^{-18} \frac{Tt}{\eta d}$$

$$\eta_{\text{cytoplasme}} = 4.5 \eta_{\text{hyaloplasme}}$$