

Chapitre 2 Aspect biologique et rhéologie du sang

1. Introduction

Le corps humain est composé de millions de cellules. Il y en a de toutes sortes : cellules de la peau, du foie, des os, etc. Elles sont si petites qu'on ne peut les voir qu'au microscope. Chacune de ces cellules fonctionne un peu comme une personne. Pour vivre, elles ont besoin sans cesse d'oxygène, de nourriture, de vitamines, d'eau, etc. C'est le sang qui leur amène tous ces éléments. De plus, il ramasse tous les déchets des cellules qui sont ensuite éliminés par les reins, le foie et les poumons.

2. La composition du sang

Le sang est une suspension très concentrée (environ 45% en volume) d'éléments cellulaires (globules rouges, globules blancs et plaquettes). Le liquide suspendant est du plasma. (Fig. 2.1). Le tableau 2.1 donne la quantité, la forme, la taille et la concentration des composants cellulaires dans le sang humain normal.

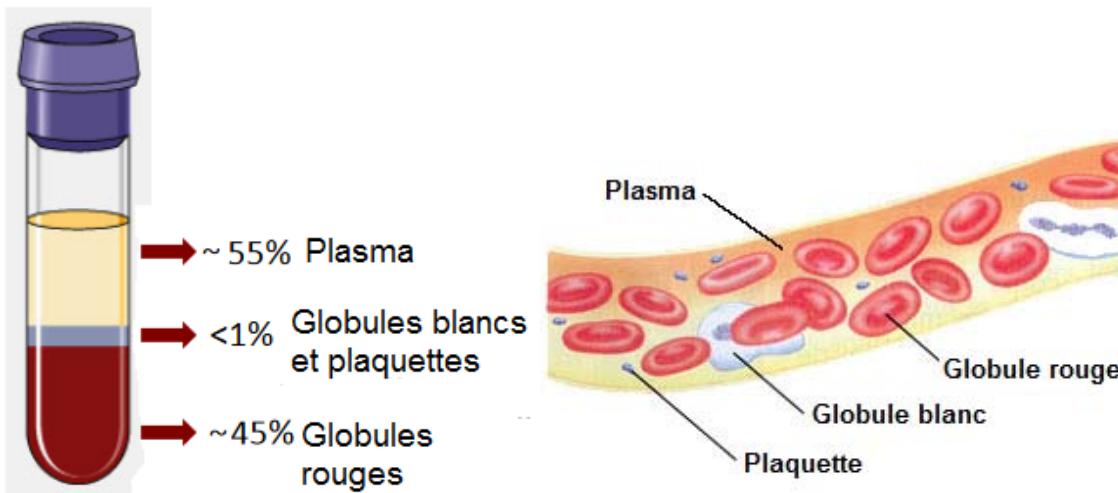


Figure 2.1: Les éléments constitutifs du sang dans un vaisseau sanguin humain.

Cellule	Nombre par mm^3	Forme normale et dimensions (μm)	Concentration volumique dans le sang (%)
Globules rouges	$4 - 6 \times 10^6$	Disque biconcave $8 \times 1 - 3$	45
Globules blancs	$4 - 11 \times 10^3$	Sphérique $7 - 22$	1
Plaquettes	$250 - 500 \times 10^3$	Arrondi ou ovale $2 - 4$	

Tableau 2.1: Quantité, forme, taille et concentration des composants cellulaires dans le sang humain normal.

2.1 Les globules rouges :

Ce sont des cellules qui servent à ramasser l'oxygène des poumons pour l'amener dans les cellules. La forme d'une globule rouge normale est un discoïde biconcave avec un diamètre de 6 à 8 μm , une surface d'environ $130 \mu m^2$ et un volume d'environ $98 \mu m^3$, (Fig. 2.2). Cette forme peut se modifier en raison des effets mécaniques, chimiques ou thermiques.

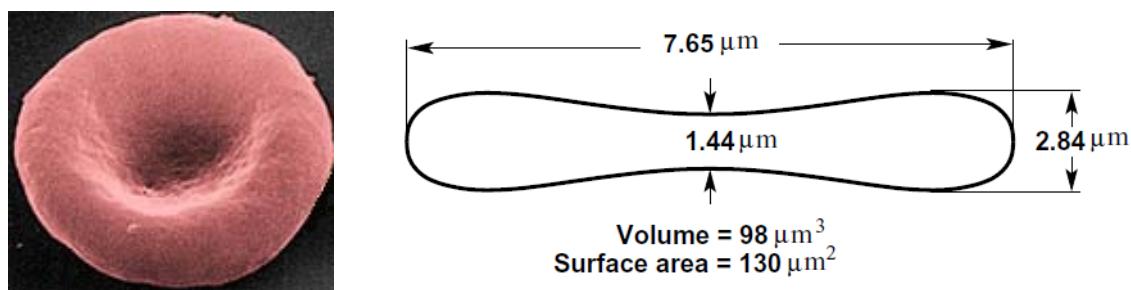


Figure 2.2: Image microscopique d'un globule rouge normal avec des paramètres géométriques moyens.

2.1.1 Hématocrite (Ht):

C'est le volume occupé par les globules rouges circulants dans le sang exprimé en pourcentage par rapport au volume total du sang. C'est aussi le nom de l'examen

permettant de déterminer ce paramètre, qui est souvent abrégé en Ht. Les niveaux d'hématocrite normaux pour les femmes et les hommes sont d'environ 40% et 45%, respectivement. En plus du genre, le niveau d'hématocrite peut varier en raison de l'état pathologique (de 30 % à 75 %), du niveau d'activité et de l'altitude dans laquelle on vit. Le pourcentage élevé des globules rouges conduit à négliger, du point de vue de la mécanique des fluides, la présence des globules blancs et des plaquettes, excepté pour les écoulements dans des vaisseaux dont le diamètre est du même ordre de grandeur que celui des globules blancs, ainsi que pour des situations pathologiques où la concentration des globules blancs est anormalement élevée.

2.2 Les globules blancs :

Ce sont des cellules qui ont pour rôle de combattre les virus et les bactéries qui entrent dans notre corps afin d'éviter des maladies. Les globules blancs sont beaucoup moins nombreux que les globules rouge (moins de 1% du volume de sang). Ils sont généralement de forme approximativement sphérique avec des diamètres allant d'environ 7 à 22 μm .

2.3 Les plaquettes :

Ce sont des cellules qui se collent entre elles et qui servent de pansements pour soigner les coupures et les blessures du corps.

2.4 Le plasma :

C'est un liquide composé en grande partie d'eau (environ 90 à 92% en poids) qui sert à transporter les globules, les plaquettes ainsi que les aliments nécessaires pour nourrir les cellules. Le plasma se comporte comme un fluide newtonien (dont la viscosité varie environ de 1.2 à 1.6 mPa.s, restant ainsi voisine de celle de l'eau qui est de 1 mPa.s à température ambiante).

3. Système cardiovasculaire humain

3.1 La circulation sanguine

Le rôle du système cardiovasculaire est de faire circuler le sang dans tout l'organisme. Pompé par le cœur au rythme d'environ 5 litres à la minute, le sang circule dans un réseau

de vaisseaux sanguins. Il est important de comprendre que ce réseau est un circuit fermé (continu), et que ce réseau se divise en deux parties : la circulation pulmonaire et la circulation systémique (péphérique). Ceci signifie que le débit de sang, qui est pompé par le cœur vers tous les organes, passe aussi par les poumons (Fig. 2.3).

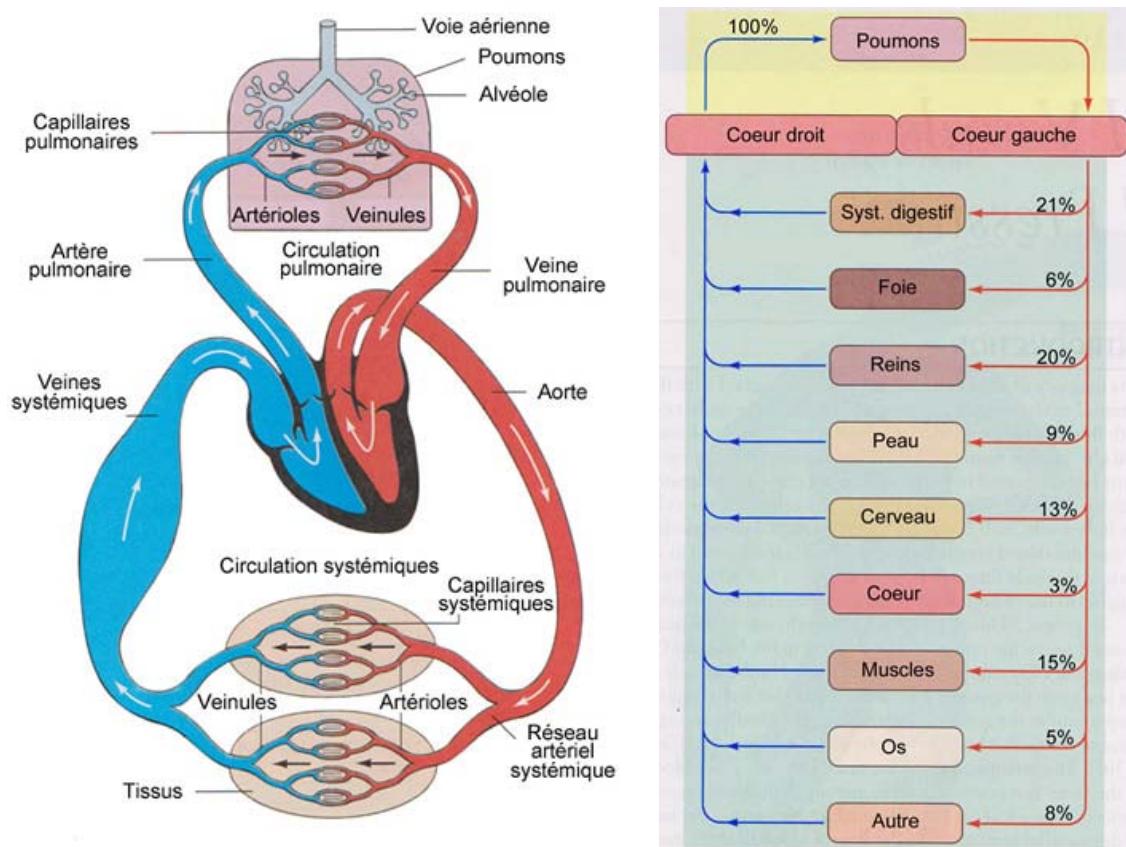


Figure 2.3: Schéma de la circulation sanguine et distribution du sang dans le corps

3.2 Paramètres pertinents des écoulements dans le système cardiovasculaire humain

Le tableau 2.2 fournit les valeurs des paramètres physiques de l'écoulement du sang dans différents types de vaisseaux du corps humain.

Vaisseau sanguin	Diamètre (mm)	Vitesse moyenne (mm/s)	Vitesse moyenne max (mm/s)
Aorte ascendante	20	—	630
Aorte descendante	16	—	270
Grandes artères	2 – 6	—	200 – 500
Capillaires	0.005 – 0.01	0.5 – 1	—
Veines	5 – 10	150 – 200	—

Tableau 2.2 : Paramètres d'écoulement pour la circulation sanguin de l'humain.

4. Dynamique microscopique et rhéologie du sang

4.1 Faible cisaillement: agrégation et désagrégation

Le sang est un fluide non newtonien dit rhéofluidifiant (sa viscosité apparente diminue lorsque le taux de cisaillement augmente). À des vitesses de cisaillement très faibles (ou en l'absence d'écoulement), les globules rouges ont tendance à s'agréger entre eux ce qui rend le sang très visqueux. Les protéines du plasma, notamment le fibrinogène, sont responsables d'une interaction attractive entre les globules rouges, qui conduit à faible taux de cisaillement à une agrégation sous forme d'empilements semblables aux « rouleaux » de pièces de monnaie (Fig. 2.4a). L'agrégation des globules rouges est un phénomène dynamique réversible.

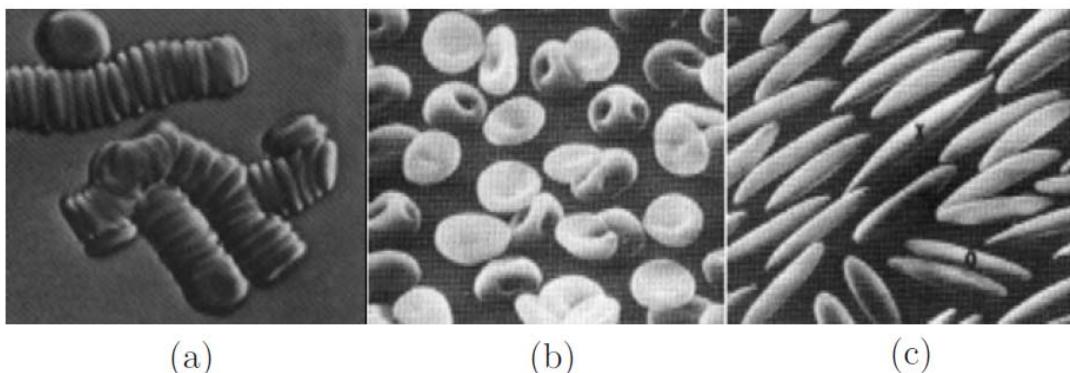


Figure 2.4 : Vue microscopique des globules rouges du sang humain normal pour différents taux de cisaillement.

4.2 Comportement à haut taux de cisaillement:

Pour des faibles taux de cisaillement, les cellules sanguines sont orientées au hasard (Fig. 2.4b). Quand la vitesse de l'écoulement augmente, donc le taux de cisaillement aussi, les globules rouges s'orientent dans le sens de l'écoulement, parallèlement les unes par rapport aux autres (Fig. 2.4c). L'écoulement est alors facilité et la viscosité du sang diminue.

5. Viscosité du sang

5.1 Nomenclature

5.1.1 Viscosité apparente:

c'est la contrainte de cisaillement appliquée à un fluide divisé par le taux de cisaillement $\mu_a = \tau/\dot{\gamma}$. Pour un fluide Newtonien, la viscosité apparente est constante et égale à la viscosité dynamique Newtonienne du fluide, mais pour les fluides non Newtoniens, la viscosité apparente dépend du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$.

5.1.2 Viscosité relative:

c'est un nombre sans dimension représentant le rapport de la viscosité du sang sur la viscosité du plasma ou de l'eau à la même température.

$$\mu_{rel} = \mu_a/\mu_p \quad (2.1)$$

5.1.3 Unités de viscosité:

Bien qu'une grande partie de la littérature scientifique et technique utilise des unités SI, des travaux importants sur la rhéologie du sang utilisent l'unité Centipoise (cP). Le poise est équivalent à $1\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$, un centipoise est $1/100$ de poise. L'unité SI commune de viscosité est le Pascal seconde: $1\text{Pa}\cdot\text{s}=1\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$.

5.2 Données expérimentales pour la viscosité du sang

La figure 2.5 représente la viscosité apparente en fonction du taux de déformation du sang obtenu auprès d'une femme donneuse de 25 ans avec $\text{Ht} = 40\%$ et $T=23^\circ\text{C}$. La

viscosité est obtenue à l'aide d'un viscosimètre de couette pour $\dot{\gamma} \in [0.06, 128] \text{ s}^{-1}$ et d'un viscosimètre capillaire pour $\dot{\gamma} \in [300, 1000] \text{ s}^{-1}$.

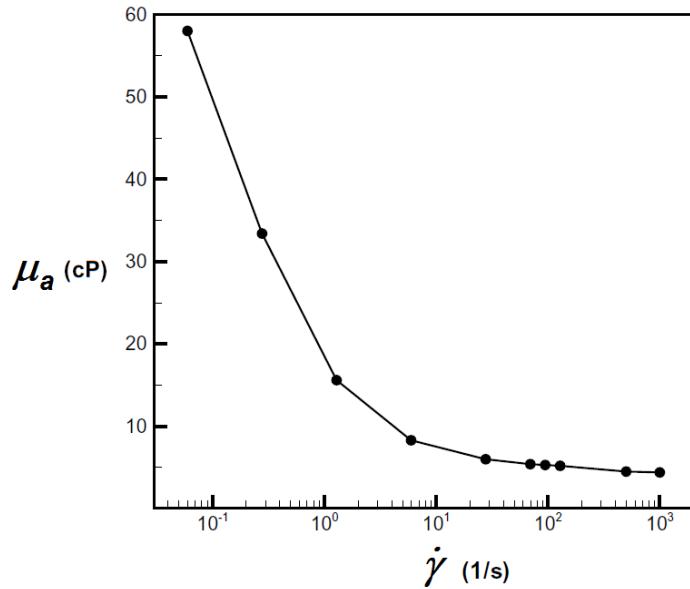


Figure 2.5: Viscosité apparente en fonction du taux de déformation pour du sang humain.

5.3 Modèles de viscosité pour le sang

5.3.1 Modèle de viscosité constante:

La viscosité du sang peut souvent être approchée par une viscosité constante. Dans le cas des écoulements qui présente un faible taux de déformation ou dans les régions de recirculation où l'écoulement est presque stagnant cette approximation n'est plus valable.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad \text{avec} \quad \mu = C^{ste} \quad (2.2)$$

5.3.2 Modèle de la loi en puissance:

La loi en puissance est un modèle mathématique simple permettant de modéliser facilement un fluide non-newtonien sans seuil en reliant la contrainte de cisaillement au taux de déformation :

$$\tau = \mu_a \dot{\gamma} \quad \text{avec} \quad \mu_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.3)$$

où

K est une constante : l'indice de consistance ;

n un nombre sans dimension : l'indice d'écoulement.

Ainsi, si :

$0 < n < 1$, le fluide est rhéofluidifiant ou pseudoplastique ;

$n = 1$, il est newtonien ;

$n > 1$, il est rhéoépaississant ou dilatant.

Dans le cas du sang $n < 1$ puisque c'est un fluide rhéofluidifiant. Le modèle de loi en puissance prédit une viscosité apparente infini ($\mu_0 = \infty$) pour un taux de déformation nul et une viscosité apparente nulle ($\mu_\infty = 0$) pour des taux de déformation infini, ce qui n'est pas le cas physiquement. Malgré cette limitation, le modèle de la loi en puissance est fréquemment utilisé en raison du nombre de solutions analytiques pouvant être obtenues.

5.3.3 Autres modèles :

La plupart des autres modèles de viscosité pour le sang ont une valeur finie pour μ_0 et μ_∞ et peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\mu_a = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)f(\dot{\gamma}) \quad (2.4)$$

ou, sous forme non dimensionnelle, comme suit:

$$\frac{\mu_a - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = f(\dot{\gamma}) \quad (2.5)$$

Des exemples de la fonction $f(\dot{\gamma})$ utilisés pour modéliser la viscosité du sang sont donnés dans le tableau 2.3 pour différents modèles. Et la comparaison entre ces modèles et les données expérimentales est montré sur la figure 6.

Modèle	$f(\dot{\gamma})$	Constantes du modèle
Powell-Eyring modifié	$\frac{\ln(1 + \lambda\dot{\gamma})}{(\lambda\dot{\gamma})^m}$	$\mu_0 = 57.46 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_\infty = 4.93 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 5.97 \text{ s}$, $m = 1.16$
Cross simplifié	$\frac{1}{1 + \lambda\dot{\gamma}}$	$\mu_0 = 73.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_\infty = 5.18 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 4.84 \text{ s}$
Cross	$\frac{1}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^m}$	$\mu_0 = 87.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_\infty = 4.70 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 8.00 \text{ s}$, $m = 0.801$
Carreau	$\frac{1}{[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(1-n)/2}}$	$\mu_0 = 63.9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_\infty = 4.45 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 10.3 \text{ s}$, $n = 0.350$
Carreau-Yasuda	$\frac{1}{[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{(1-n)/a}}$	$\mu_0 = 65.7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_\infty = 4.47 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 10.4 \text{ s}$, $n = 0.34$, $a = 1.76$

Tableau 2.3: Différents modèles pour la viscosité du sang avec les constantes du modèle correspondantes. Les constantes ont été obtenues pour les données expérimentales montrées sur la figure 2.6.

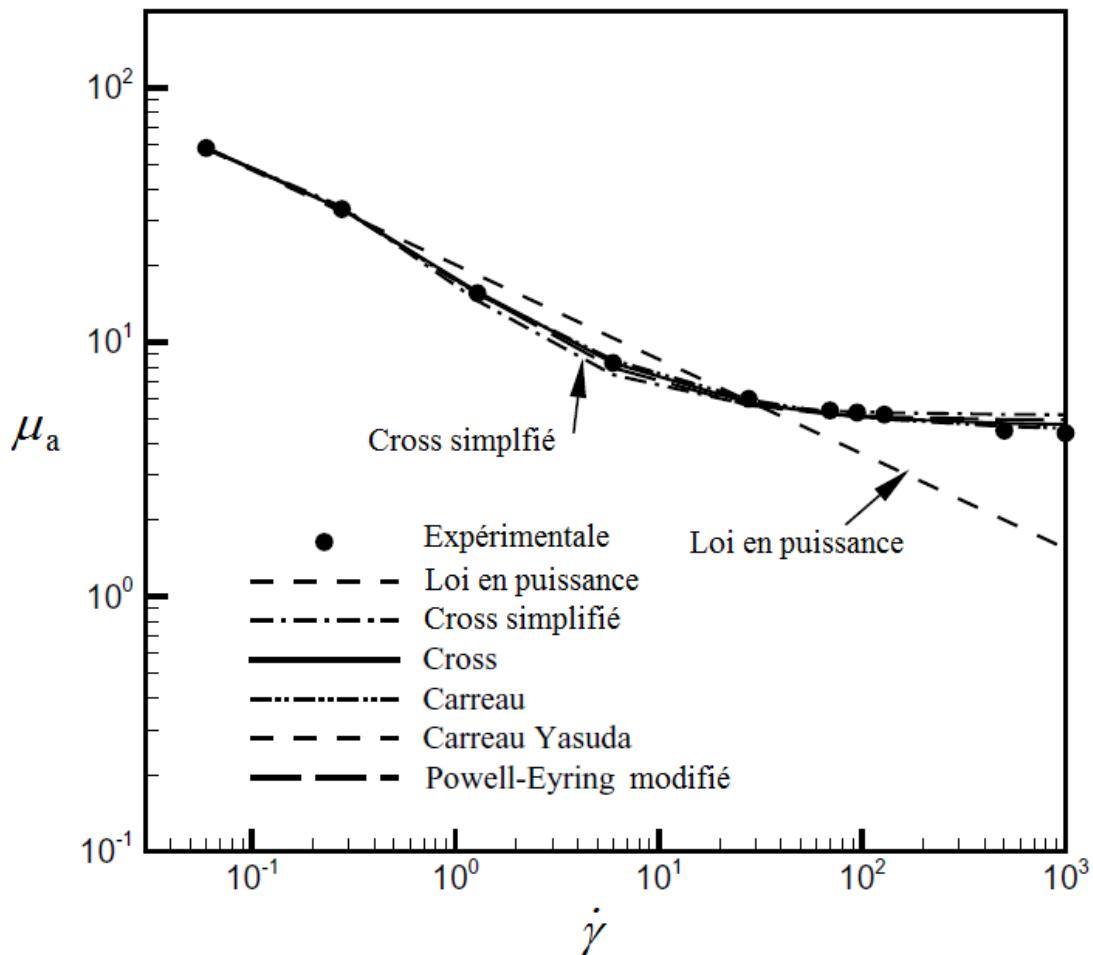


Figure 2.6: Viscosité apparente du sang en fonction du taux de déformation pour différents modèles.

5.4 Dépendance de la viscosité du sang à d'autres facteurs:

La viscosité du sang est très sensible à un certain nombre de facteurs en dehors du taux de déformation. Ceux-ci comprennent (i) l'hématocrite et le niveau des autres composants dans le sang, (ii) la température, (iii) la viscosité du plasma, (iv) le sexe (masculin ou féminin), (v) l'état pathologique, (vi) l'âge des globules rouges et (vii) le niveau d'exercice. Certains de ces facteurs seront discutés ci-dessous.

5.4.1 Effet de l'hématocrite et des composants sanguins sur la viscosité:

Comme le montre la figure 2.7, la viscosité apparente du sang augmente considérablement à mesure que l'hématocrite augmente. Une augmentation modérée de 40.5 à 45% entraîne une augmentation de 21% de la viscosité. Ces données ont été obtenues pour le sang humain à un taux de déformation fixe de 128 s^{-1} et le niveau d'hématocrite a été contrôlé par la dilution de sang avec plasma.

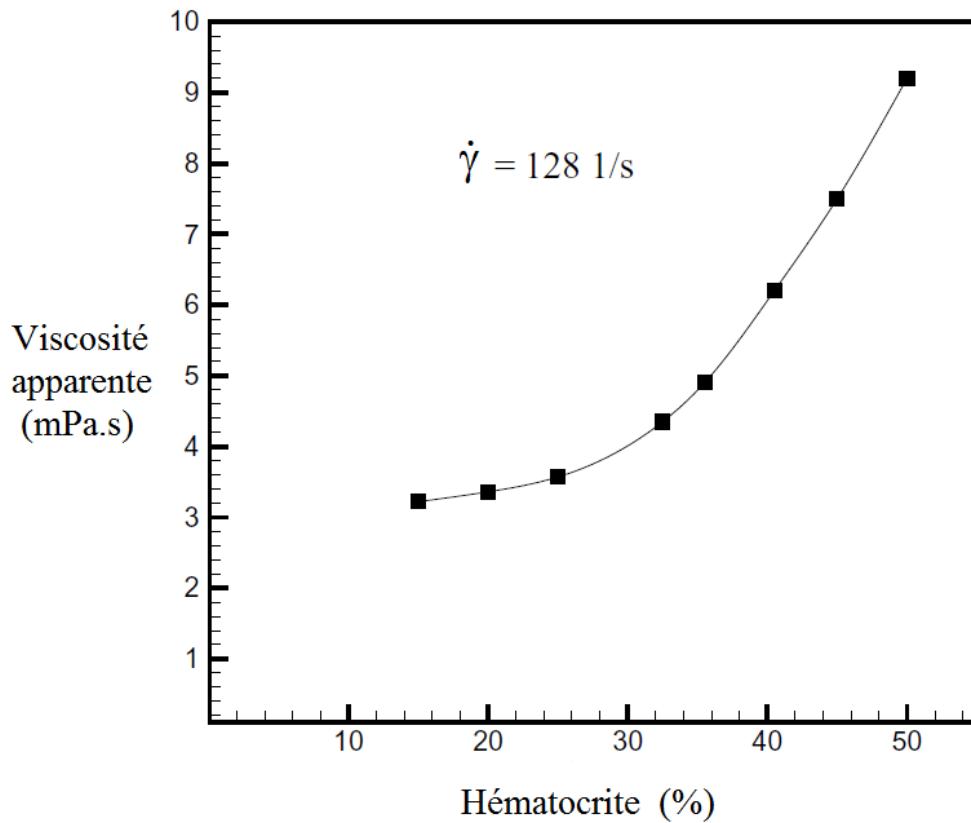


Figure 2.7: Relation entre la viscosité du sang humain et l'Hématocrite pour le sang dilué avec du plasma à 23°C et un taux de déformation $\dot{\gamma} = 128 \text{ s}^{-1}$.

5.4.2 Effet de la température sur la viscosité du sang:

Comme beaucoup d'autres liquides, la viscosité du plasma et du sang dépendent fortement de la température. Par exemple, lorsque la température du sang avec un Ht = 40% diminue de 37°C à une température ambiante de 22°C , la viscosité (à une vitesse de

cisaillement de 212s^{-1}) augmente de 3.8 mPa.s à 6.3 mPa.s, une augmentation de 66%. Sous la même chute de température, la viscosité plasmatique chez les hommes de 44 à 45 ans augmente de plus de 45%, de 1.2 à 1.76 mPa.s (tableau 2.4).

	Viscosité du plasma (in cP = mPa · s)	Température
Hommes (age = 44 - 45 ans)	1.760 ± 0.134	20°C
	1.229 ± 0.086	37°C
	1.150 ± 0.076	40°C
Homme athlète (age = 22 - 37 ans)	1.630 ± 0.045	20°C
	1.183 ± 0.021	37°C
	1.132 ± 0.019	40°C

Tableau 2.4: Viscosité du plasma pour des hommes à différentes températures et âges.