

# Biophysique du cœur et de la circulation – Dr. Meghelli-

## L'hémodynamique

L'hémodynamique est l'étude de la dynamique du sang, elle applique les lois de l'hydrodynamique à la circulation sanguine.

### 1° Les pressions sanguines

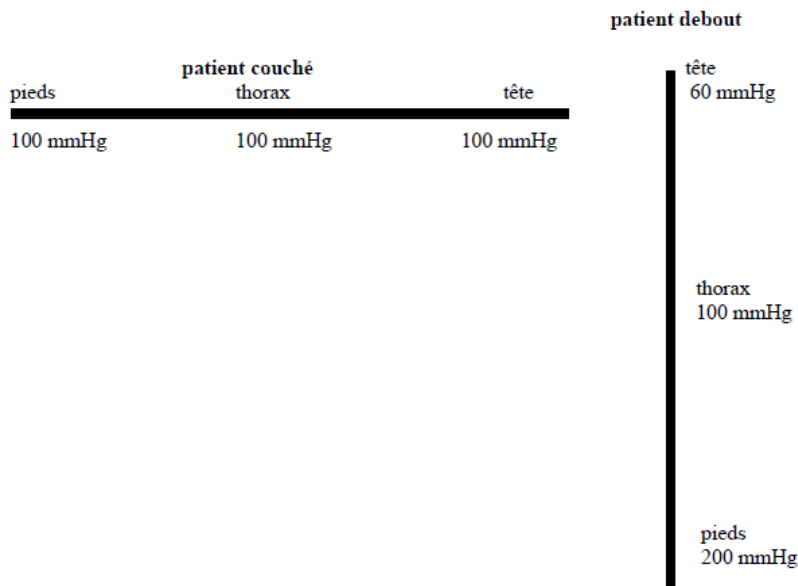
Les unités encore souvent utilisées pour la mesure des pressions sanguines (l'unité légale étant le pascal) sont les mmHg pour les pressions artérielles et les cmH<sub>2</sub>O pour les pressions veineuses.

Les valeurs normales sont approximativement les suivantes :

- pression artérielle systolique : 130 mmHg
- diastolique : 80 mmHg
- pression veineuse moyenne : 10 cmH<sub>2</sub>O

Une donnée importante est que ces pressions sont variables avec la posture (patient debout ou couché) et dépendent de l'endroit du corps où on les mesure : tête, thorax ou jambes.

Si l'on considère, par exemple une pression artérielle moyenne (intermédiaire entre la systolique et la diastolique) de 100 mmHg, les répartitions pourront être les suivantes :



Il existe donc une influence non négligeable de la pesanteur sur la répartition des pressions sanguines.

Ce phénomène est particulièrement important chez des cosmonautes en apesanteur et un séjour prolongé dans l'espace peut entraîner des perturbations hémodynamiques importantes.

## 2° La viscosité sanguine

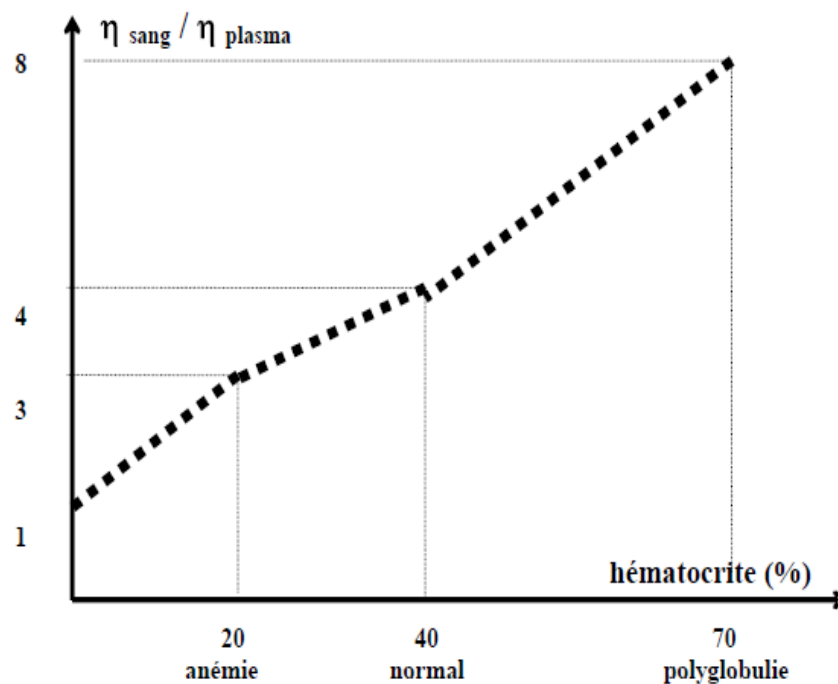
La viscosité sanguine est fortement variable avec la concentration en globules rouges (hématocrite).

En l'absence de cellules sanguines, le sérum (obtenu après coagulation) ou le plasma (obtenu par centrifugation) ont une viscosité proche de celle de l'eau à 20°C :

- sérum : 1,1 à 1,3  $10^{-3}$  Pa s

- plasma : 1,4  $10^{-3}$  Pa s

Pour ce qui concerne le sang total, il existe une relation entre la viscosité et l'hématocrite que l'on peut représenter approximativement sous la forme graphique suivante:



Dans les situations pathologiques, et notamment en cas de polyglobulie, la viscosité sanguine peut devenir très élevée, avec comme conséquence une augmentation parallèle des résistances mécaniques, étant donné que la viscosité intervient directement dans l'expression de la résistance mécanique.

$$\mathbf{F = \eta S \, dv/dx \quad d'o\grave{u} \quad \eta = F/S \, dx/dv}$$

Ces phénomènes peuvent avoir des conséquences graves sur la perfusion sanguine des tissus et sur l'apport d'oxygène par la circulation.

Une autre donnée relative à la viscosité sanguine concerne le caractère non newtonien du sang.

### Rappel : Les fluides newtoniens

Comme on l'a vu, le gradient de vitesse  $dv/dx$  intervient dans la définition du coefficient de viscosité.

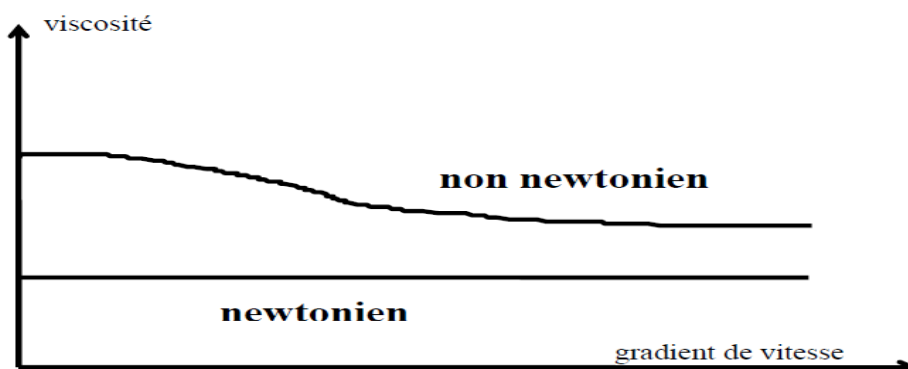
On est ainsi amené à considérer deux cas, selon que la force de cisaillement est proportionnelle au gradient de vitesse et donc le coefficient de viscosité est constant quel que soit le gradient de vitesse, ou au contraire que cette force de cisaillement diminue lorsque le gradient de vitesse augmente et dans ce cas le coefficient de viscosité diminue lorsque le gradient de vitesse augmente.

Ces considérations permettent de définir:

→ Les fluides newtoniens (premier cas : le coefficient de viscosité est constant quel que soit le gradient de vitesse)

→ Les fluides non newtoniens (la viscosité diminue lorsque le gradient de vitesse augmente).

Exemple: le sang est un liquide non newtonien, alors que les liquides purs et les solutions micromoléculaires sont en général newtoniens.



La présence de protéines et de cellules se traduit par deux phénomènes caractéristiques de la circulation sanguine (en régime laminaire) :

- il existe une concentration plus élevée de globules rouges dans la partie centrale du vaisseau par rapport aux bords (concentration axiale des globules rouges);

- sur les bords, en revanche, il existe une couche de protéines (couche de glissement) qui favorise l'écoulement et de ce fait le profil des vitesses s'éloigne du profil parabolique théorique, valable pour un liquide newtonien.

### 3° Les régimes d'écoulement dans les vaisseaux

Dans la majorité des vaisseaux le régime circulaire est laminaire. Il n'existe en pratique que deux exceptions : le régime circulaire dans l'aorte au cours d'un effort, et le régime en aval d'une sténose vasculaire. Dans ces deux cas on peut observer éventuellement un régime turbulent.

Dans le cas de l'aorte, on peut calculer la vitesse critique, celle qui rend possible (mais pas obligatoire) le régime turbulent, à partir de la formule de Reynolds :

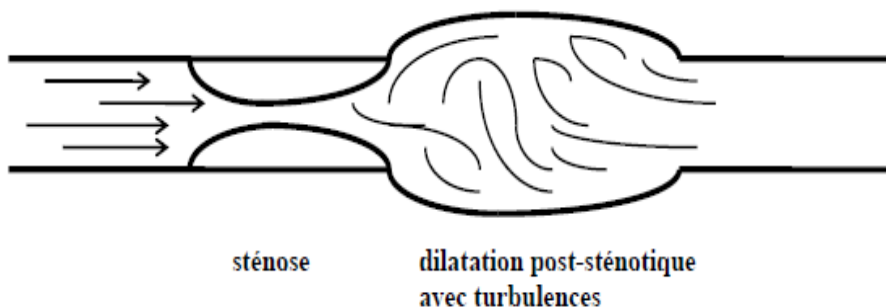
par exemple si  $d = 2 \text{ cm}$   
 $\rho = 1 \text{ gcm}^{-3}$  vitesse critique = 50 cm/s  
 $\eta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$

Ainsi, la circulation dans l'aorte dans les conditions de repos (25 à 30 cm/s) s'effectue en régime laminaire.

A l'effort, par contre, le débit cardiaque peut être multiplié par un facteur 4 (et donc également la vitesse circulaire moyenne) de telle sorte que la vitesse critique se trouve dépassée.

Ce régime turbulent à l'effort se traduit à l'auscultation par un souffle innocent (sans rapport avec une cardiopathie congénitale) et une telle observation est fréquente chez des sujets jeunes et sportifs.

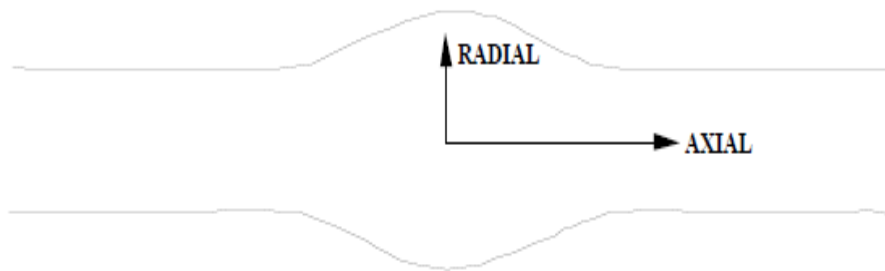
An niveau des sténoses vasculaires comportant une réduction importante du calibre des vaisseaux, il existe une accélération du flux (loi de la continuité) qui peut provoquer des turbulences à la sortie de la sténose (là encore on aura un souffle à l'auscultation).



#### 4° Les effets des parois vasculaires

Contrairement à ce qui se passe pour un tube rigide, dont le diamètre reste constant quelle que soit la pression qui s'exerce sur les parois, un vaisseau sanguin possède des parois souples qui peuvent se déformer lorsqu'arrive une onde de pression : ceci est particulièrement le cas pour les artères qui sont soumises à une circulation pulsée.

D'un point de vue physique, ce phénomène se traduit par l'existence d'une **composante radiale de la vitesse circulatoire**, en plus de la **composante axiale traditionnelle** :



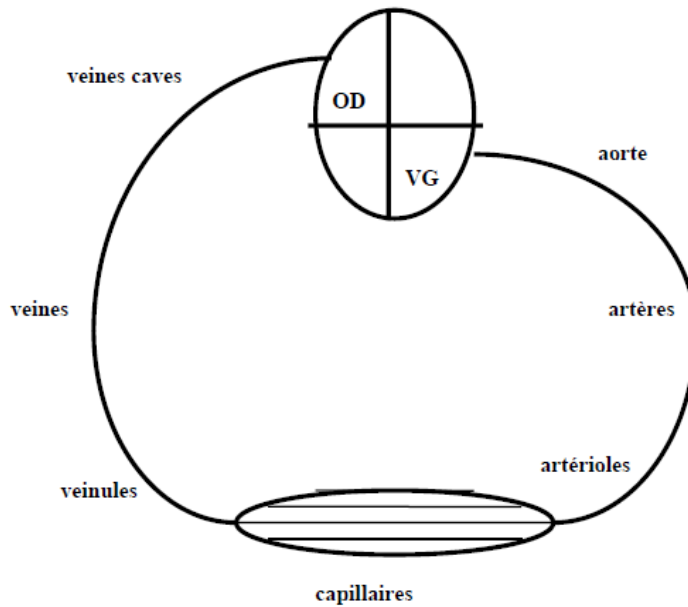
Le débit axial s'effectue en fonction de la chute de pression entre l'entrée et la sortie du segment vasculaire; le débit radial se traduit par une distension du vaisseau que l'on peut percevoir à la palpation : le **pouls**.

#### 5° Les pressions et résistances vasculaires

Les pressions et les résistances circulatoires sont variables tout au long du circuit vasculaire systémique

(il en est de même de la "petite circulation"), que l'on peut représenter schématiquement comme une boucle partant du ventricule gauche (VG) et aboutissant à l'oreillette droite (OD), avec successivement les segments vasculaires suivants:

**VG - aorte - artères - artérioles - capillaires - veinules - veines - veines caves - OD**



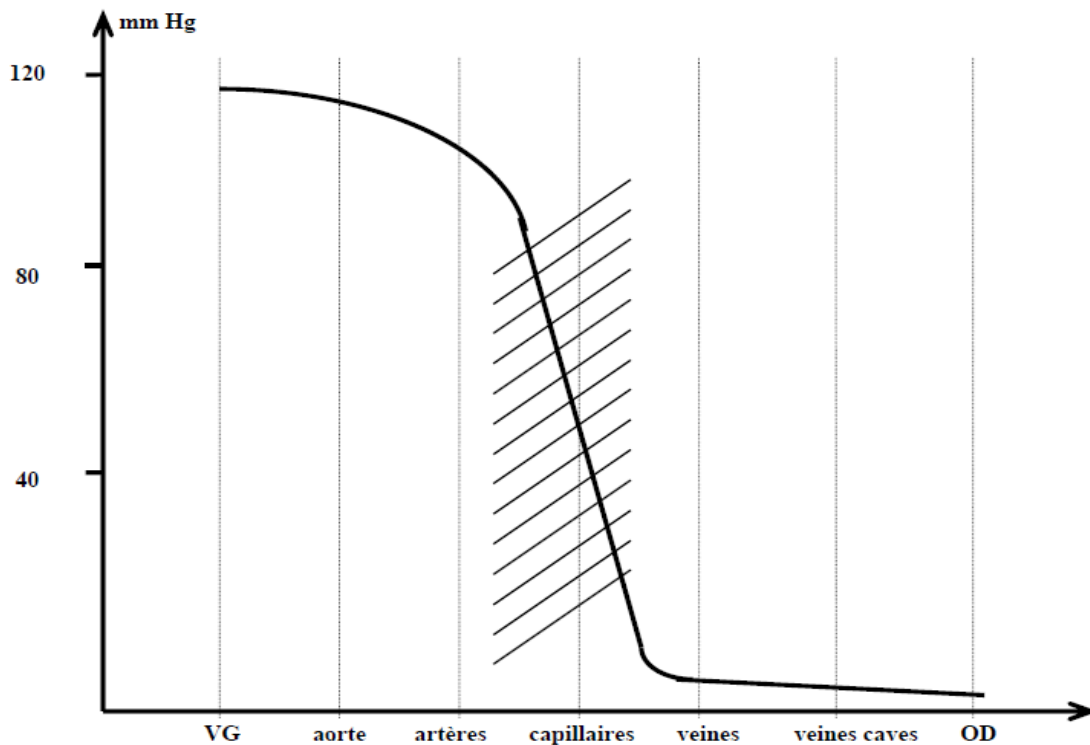
Si l'on attribue la valeur 100% à la résistance circulatoire totale du circuit allant du VG à l'OD, les différents segments de ce circuit ont approximativement les résistances suivantes :

<b>arbre artériel</b>	- aorte :	4 %	
	- artères :	5 %	
	- branches moyennes :	10 %	
	- branches terminales :	6 %	
	- artérioles :	41 %	= 66 %
<b>lit capillaire</b>			= 27 %
<b>circuit veineux - veinules :</b>		4 %	
	- veines terminales :	0,3 %	
	- branches veineuses :	0,7 %	
	- veines :	0,5 %	
	- veines caves :	1,5 %	= 7 %
			<u>100 %</u>

De ces chiffres il ressort que les deux tiers de la résistance vasculaire systémique concernent la partie artérielle de l'arbre vasculaire, alors que la partie veineuse possède une très faible résistance.

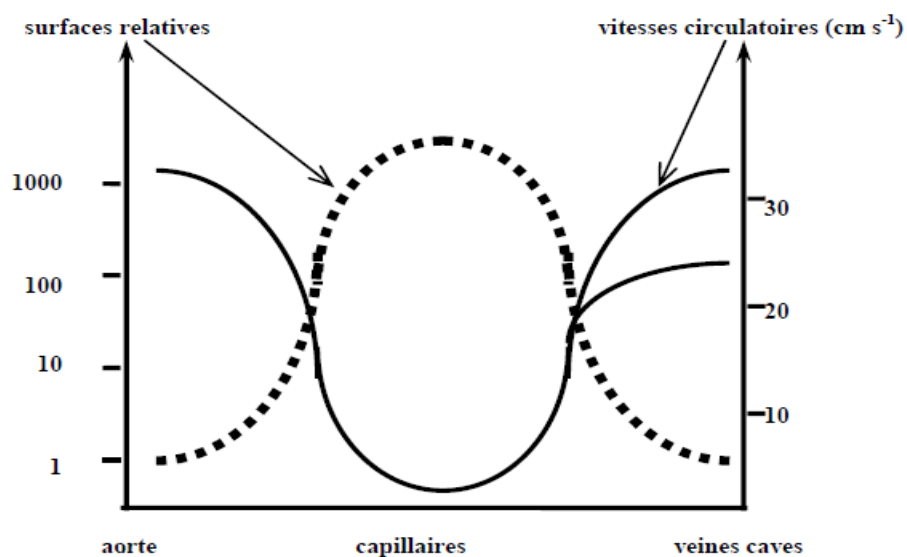
La traversée capillaire correspond également à une résistance assez importante car c'est à ce niveau que s'effectuent les échanges métaboliques, et par conséquent la circulation est relativement lente pour permettre ces échanges.

On peut schématiser l'évolution des pressions sanguines le long du circuit vasculaire (pressions moyennes qui ne tiennent pas compte de la variation systolo-diastolique au niveau des parties pulsatiles) de la manière suivante :



C'est au niveau de la zone hachurée, artériolaire et capillaire, que la chute de pression sanguine est la plus élevée, passant pratiquement de 85 mm Hg au niveau artériel vers 5 mm Hg au niveau veineux.

Les vitesses circulatoires dépendent de la surface des différents segments vasculaires, sachant que par rapport à la surface de section de l'aorte (entrée dans le circuit) et la somme des sections des capillaires (partie la plus ramifiée du circuit) il existe un rapport de l'ordre de 1000 (l'ensemble des capillaires représente environs 1000 fois la section de l'aorte).



C'est encore par application de l'équation de continuité que l'on déduit de cette augmentation de section que la vitesse circulatoire moyenne va diminuer dans les mêmes proportions, le débit restant bien évidemment constant tout au long du circuit.

Au niveau des veines caves, la vitesse circulatoire est en réalité moindre qu'au niveau de l'aorte, étant donné qu'il y a deux veines caves et que la somme des sections des deux veines caves est supérieure à la section de l'aorte, qui est unique.

## **6° Les mesures de vitesses circulatoires**

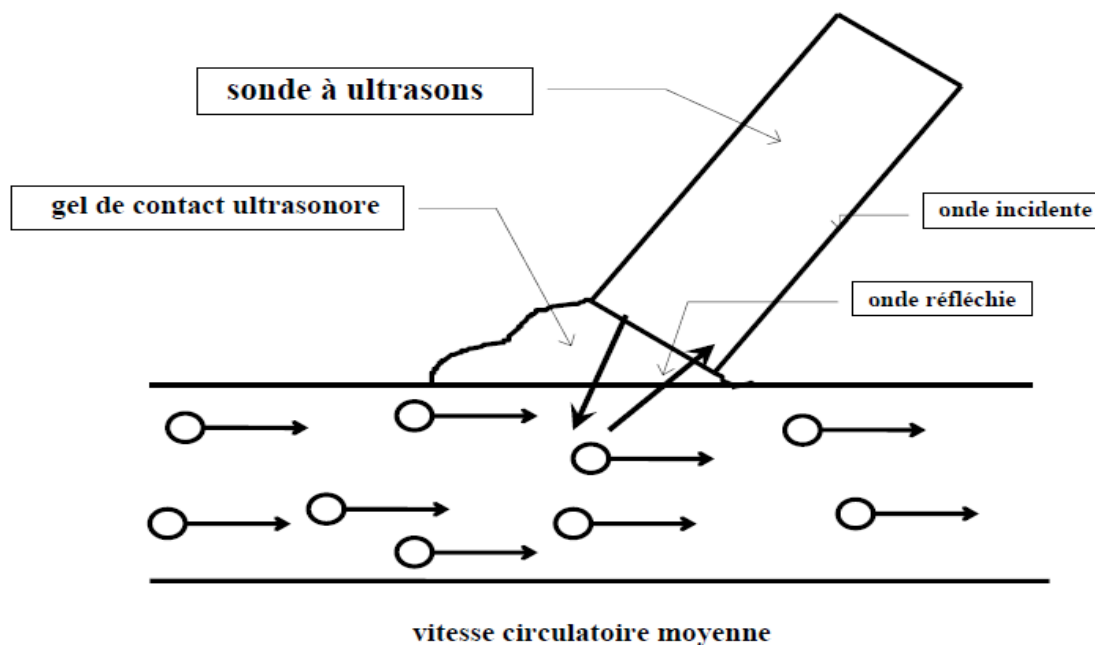
Les méthodes de mesure des vitesses circulatoires d'un liquide fondées sur la détermination de la chute de pression provoquée par cette vitesse (tube de Venturi) ont déjà été évoquées.

Ces techniques s'appliquent pour tout type de liquide, et notamment dans le cas d'un liquide homogène.

Dans le cas du sang, le caractère hétérogène (présence de globules rouges) permet d'envisager une autre méthode de mesure de la vitesse circulatoire fondée sur l'effet Doppler appliqué à un faisceau d'ultrasons (voir cours sur les ultrasons pour plus de détails).

En effet, les globules rouges se comportent comme de petits objets en déplacement capables de réfléchir les ultrasons.

L'effet Doppler permet d'en mesurer la vitesse de déplacement en fonction de la variation de fréquence de l'onde ultrasonore entre le faisceau incident et le faisceau réfléchi.



Cette méthode de mesure largement employée pour les explorations de la circulation sanguine présente un avantage substantiel : c'est d'être transcutanée, c'est-à-dire de ne pas nécessiter de ponction vasculaire. Par contre, elle ne donne pas le débit sanguin mais simplement la vitesse circulatoire et pour déterminer le débit il faut connaître en plus la section du vaisseau mesuré.