

# LA CIRCULATION EXTRACORPORELLE PULSÉE PAR UNE POMPE SOLÉNOÏDE.

R. VENET, T. DUPONT, P. LEGER, A. PAVIE.

Service de chirurgie cardiaque. Institut du cœur (Pr PAVIE). Hôpital Pitié-Salpêtrière  
75013 Paris.

## E X T R A I T

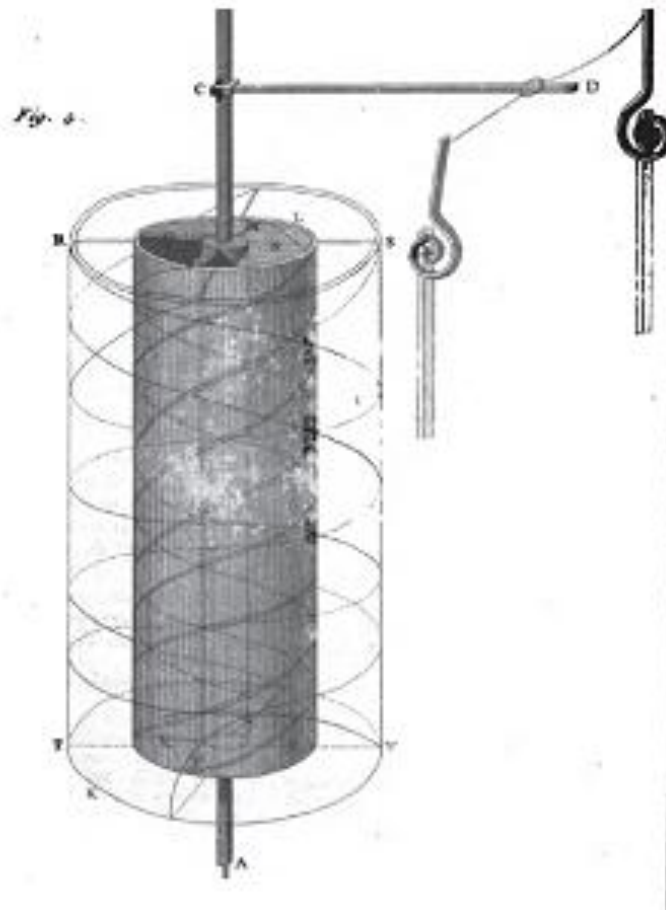
D'un ouvrage traitant d'un nouveau moyen pour élever les  
eaux par un double serpenteau & une pompe à hélice, &  
par le simple courant des rivières, en vertu d'impulsions &  
coups de belier hydraulique,

Par L.-M. VIALON, l'un des conservateurs de la bibliothèque du Panthéon.

---

Cet ouvrage, annoncé dans le Journal de Paris le 12 messidor de l'an 5,  
a été présenté le 21 dudit mois à la première classe de l'Institut, & paraphé  
par son secrétaire.

---



En 1966 Réménérias<sup>1</sup> proposait un nouveau type de pompe d'assistance circulatoire : la pompe solénoïde (figure 1). La théorie de cette pompe a été décrite par Bergeron<sup>2</sup> : il s'agit d'un tuyau AB enroulé autour d'un cylindre. Les extrémités du tuyau sont ramenées dans l'axe du solénoïde **xy** ainsi formé dans des paliers A et B. Le tuyau d'aspiration Bα est muni d'un clapet C et le tuyau de refoulement se termine par un réservoir R. Le cylindre oscille autour de l'axe **xy** d'un angle  $\Omega$ .

Soit **s** la section d'une spire perpendiculairement à l'axe et **n** le nombre de spires la pression H (charge) engendrée sera : 
$$H = -\frac{2}{g} ns \frac{d\Omega}{dt} = +\frac{2}{g} ns \Omega_m \frac{2\pi}{T} \sin \frac{2\pi t}{T}$$
 équation 2.

L'oscillation de ce solénoïde engendre entre A et B une différence de pression proportionnelle :

1. au nombre de spires **n**
2. à la surface de la spire **s**
3. à la fréquence des oscillations  $\frac{1}{T}$
4. à la vitesse angulaire maxima  $\Omega_m$  avec  $\Omega_m = \alpha \frac{2\pi}{T}$

Cette différence H de pression est sinusoïdale. Dès qu'elle dépasse la hauteur **h** entre les niveaux d'aspiration et de refoulement le clapet **C** s'ouvre et le débit commence à s'écouler.

Bergeron a calculé que la pression maximum  $H_m$  est 
$$H_m = \frac{2}{g} ns \Omega_m \frac{2\pi}{T}$$

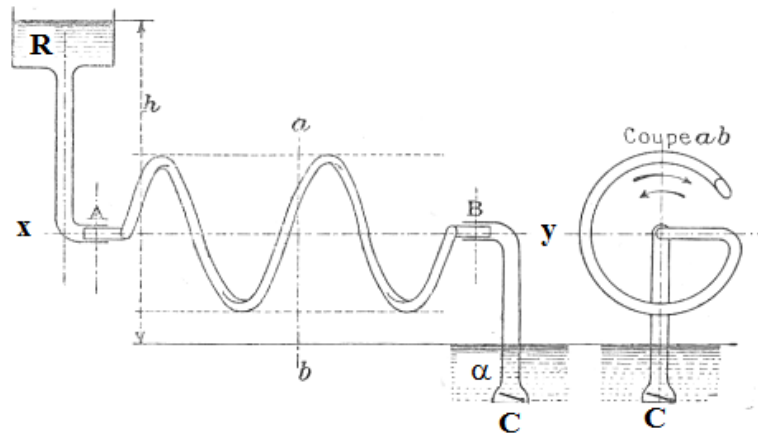


Figure 1. La pompe solénoïde<sup>2</sup>.

La figure 2 empruntée à Bergeron<sup>2</sup> représente les courbes de la pression et de la vitesse instantanées enregistrées sur une période  $T$ .

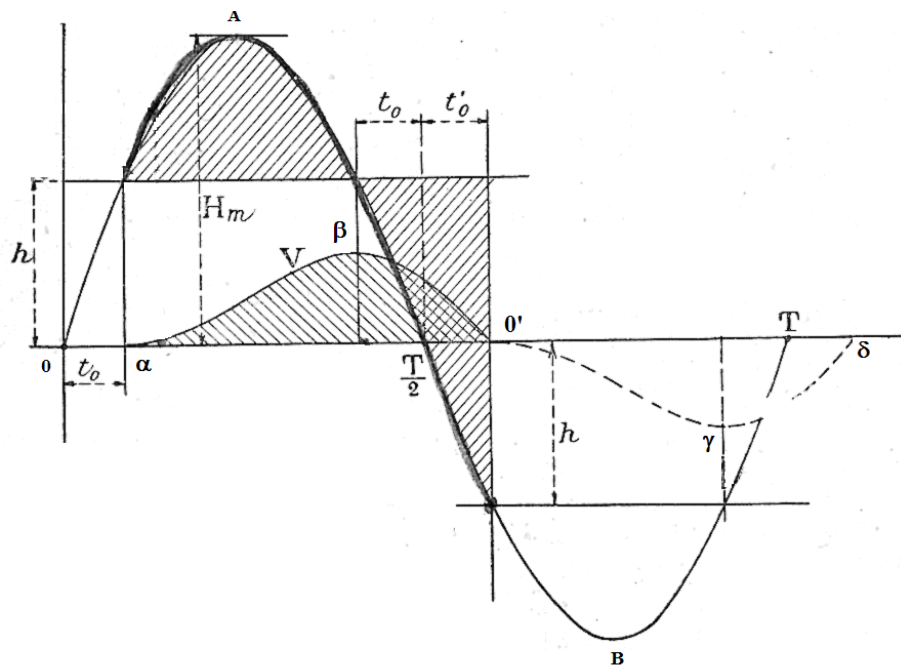
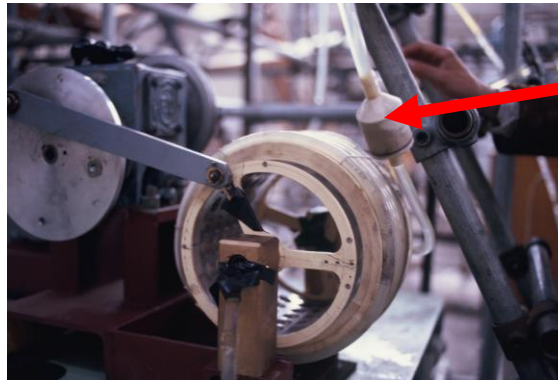


Figure 2. Courbes de la vitesse  $V$  ( $\alpha\beta\gamma\delta$ ) d'écoulement à travers la pompe solénoïde débitant sur une hauteur constante  $h$  et de la pression instantanée  $0ABC$ . Bergeron<sup>2</sup>

L'allure sinusoïdale de la pression est théorique. En réalité nous avons construit un prototype mu par un système bielle-manivelle (figure 3.) le diamètre du cylindre est de 20 cm, et nous avons enroulé 8 spires de ligne artérielle de polyuréthane pour circulation extracorporelle de 0.9 cm de diamètre intérieur. Cette pompe nécessite à la sortie ou à l'entrée de la conduite la présence d'un clapet anti-retour. Les courbes expérimentales enregistrées de la pression sont en réalité pseudo-sinusoïdales (figure 4).



Clapet anti-retour

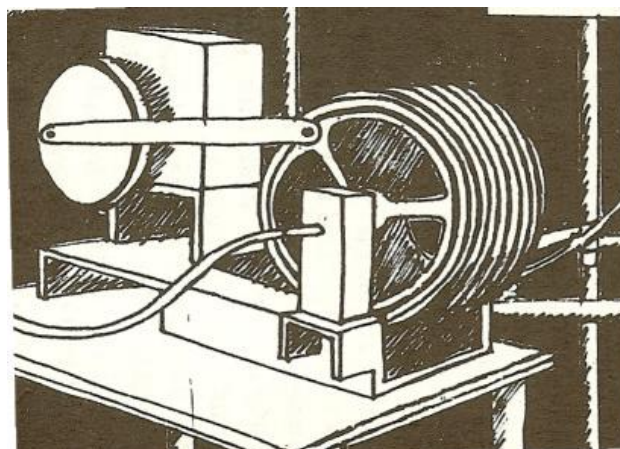


Figure 3. Système bielle-manivelle à l'origine de l'oscillation de notre prototype de 1982.

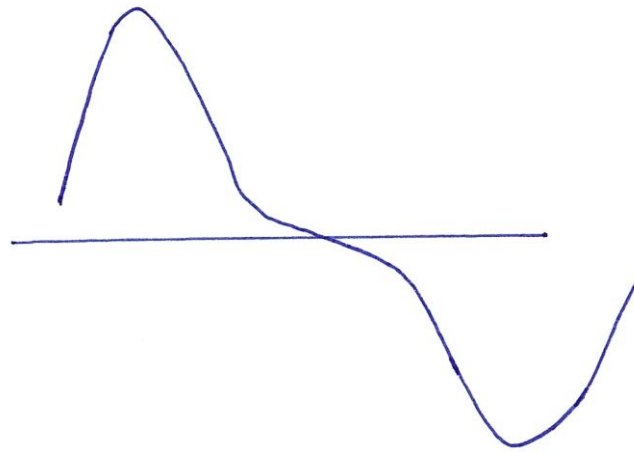


Figure 4. Courbe de la pression instantanée engendrée par le prototype de la figure 3.

Les courbes caractéristiques de la pompe solénoïde sont des verticales, identiques en cela aux courbes caractéristiques des pompes à piston ou à la pompe à galets. Mais hélas si les pressions obtenues sont élevées les débits sont faibles, le débit maximum enregistré est de 3 l/mn. **Ce résultat rend rédhibitoire l'application à la circulation extracorporelle.**

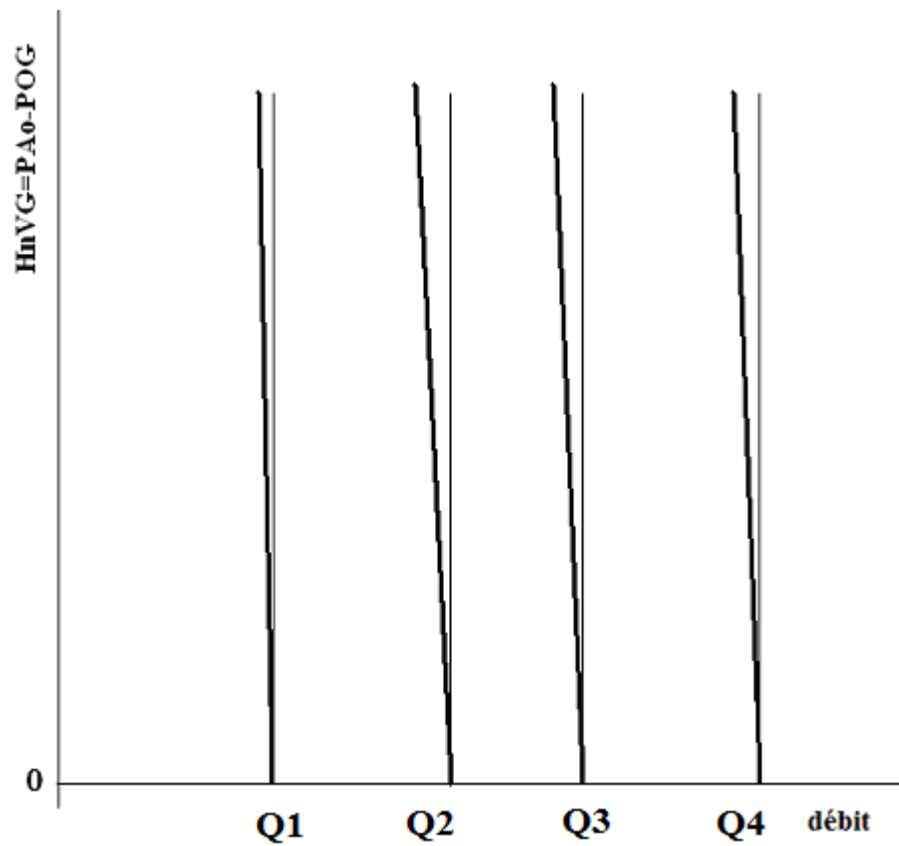


Figure 5. Courbes caractéristiques de la pompe solénoïde.

Nous avons alors imaginé que la pompe solénoïde (PS) pouvait servir de pulsateur en aval d'une pompe à galets (PàG). L'avantage d'un tel montage est la disparition du clapet anti-retour et la possibilité d'agir sur le débit et la pression de manière indépendante. Le débit est réglé par la pompe à galets et la pression par la fréquence de l'oscillation. La figure 6 représente le montage que nous avons expérimenté sur banc hydraulique puis sur l'animal de laboratoire.

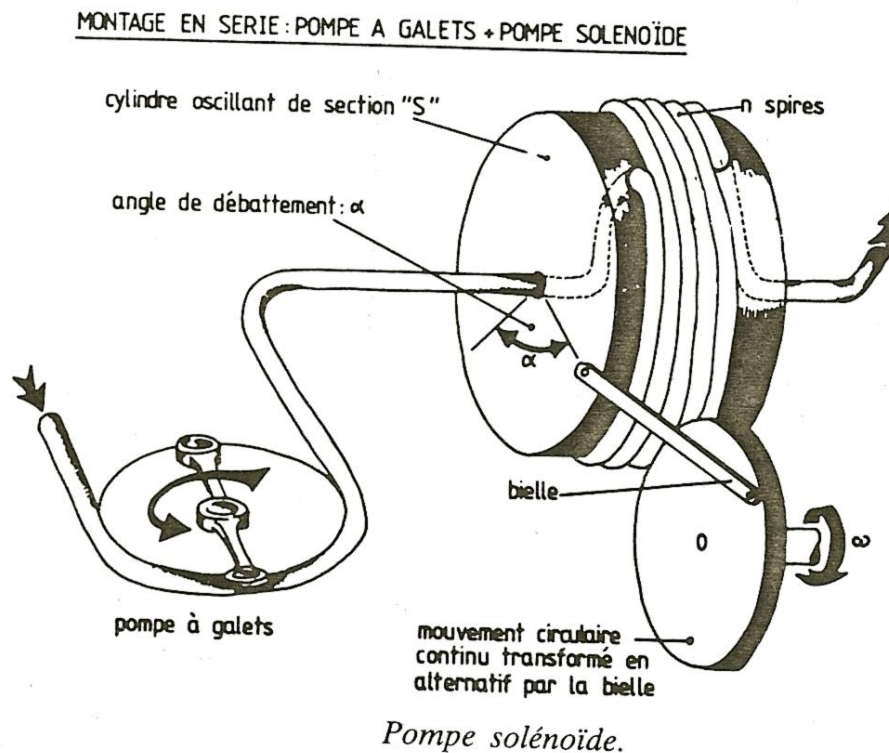


Figure 6. Montage de la pompe solénoïde en aval d'une pompe à galets pour réaliser une CEC pulsée. Le débit est réglé par la vitesse de rotation de la pompe à galets et la pression pulsée est donnée par la fréquence de la bielle-manivelle. La CEC pulsée. État actuel et perspectives. A. PAVIE, F. BAUD, R. VENET, H. LASNIER, C. CABROL. *Cœur. XV, 1,41-*

L'étude de l'hémolyse du dispositif PàG + PS a montré que la pompe solénoïde n'augmentait pas l'hémolyse et que les courbes de la pression instantanée mesurées au niveau de l'artère fémorale de l'animal étaient identiques à celles enregistrées à cœur battant. Mais hélas le volume de liquide contenu dans la ligne artérielle diminuait considérablement

l'hématocrite. En effet 8 spires sur un cylindre de 20 cm de diamètre correspondent à une longueur de la ligne artérielle de 5.30 m, soit un volume de 500 ml uniquement pour la solénoïde.

La pompe solénoïde reste donc une pompe de laboratoire permettant de simuler le débit et la pression pulsée le plus physiologiquement possible.

Historiquement la pompe solénoïde a été inventée par L.M. Viallon<sup>3</sup> en 1798. La figure 7 est extraite du Journal de Physique 21 du Messidor an V, elle représente une pompe à double effet. L'intérêt de cette pompe était pour son inventeur d'élever une eau avec des sédiments d'une grande hauteur en utilisant comme seule force la force musculaire. Viallon envisageait l'utilisation de son invention sur les bateaux pour écoper l'eau des soutes. Le point de départ de son invention dérive du bélier hydraulique inventé par les frères Montgolfier en 1798.

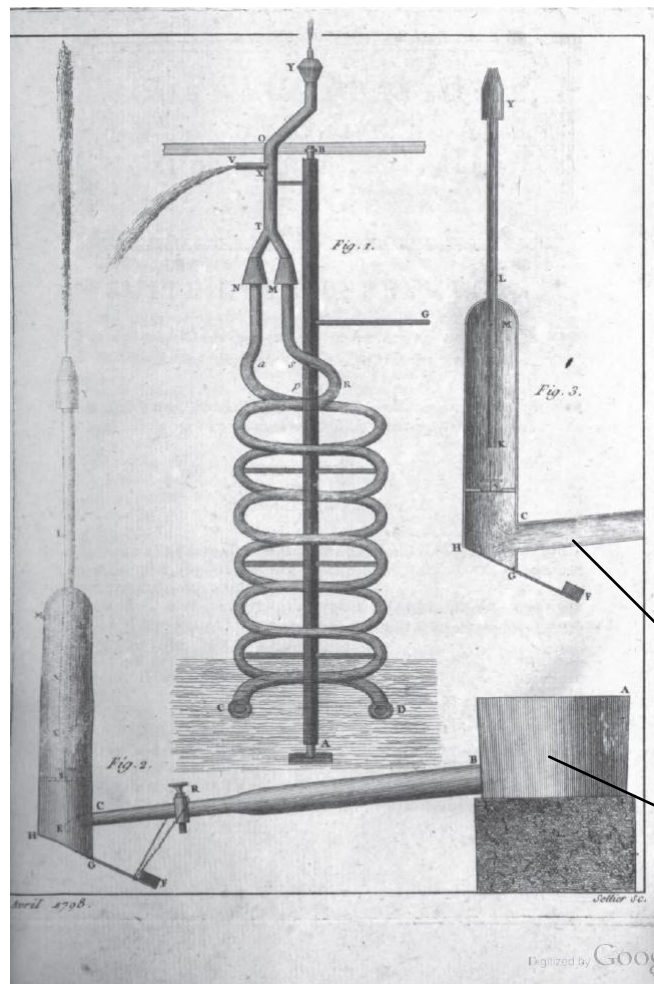
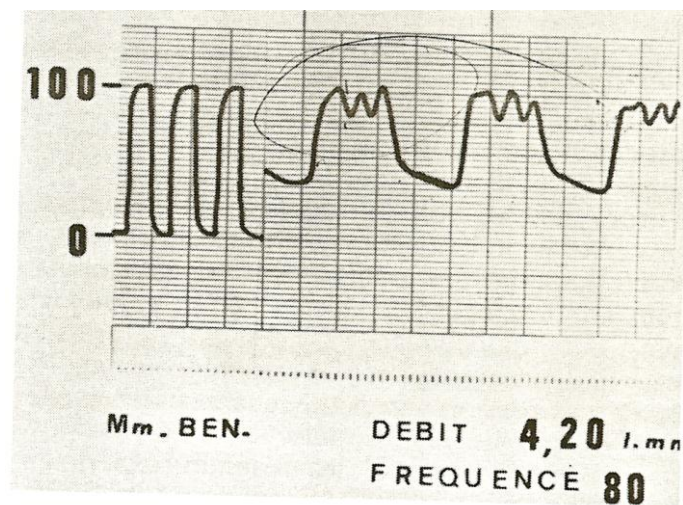


Figure 7. La pompe Solénoïde de Viallon<sup>3</sup>.

Parmi les pompes simples, seule la pompe solénoïde est capable de simuler une pression de type physiologique. D'autres pompes ont été utilisées pour la circulation extracorporelle (CEC). Nous avons étudié l'hémodynamique d'une CEC pulsée par l'intermédiaire d'une pompe Cobe-Stockert chez un patient bénéficiant d'un pontage coronarien. La pression artérielle est enregistrée au niveau de l'artère radiale droite (figure 8). Nous avons enregistré le débit de l'artère carotide primitive droite par Doppler pulsé<sup>4</sup>. A partir du signal du débit de la carotide nous avons calculé la différence de pression  $\Delta P$  à l'origine du débit en utilisant l'algorithme de Womersley.



*Exemple de gradient systolo-aortique obtenu à l'aide d'une pompe de type « Cobe Stockert ».*

Figure 8. Enregistrement de la pression artérielle au niveau de l'artère radiale droite<sup>4</sup>.

La figure 9 représente le débit au niveau de l'artère carotide primitive droite en fonction du temps. On remarque une succession de trains d'ondes trapézoïdales principales de durée  $T$  créant une période  $T'$ . C'est à partir de cette période  $T'$  que l'on calcule la fréquence  $N = \frac{1}{T'}$  de la pompe de CEC. On remarque cependant que les plateaux des ondes trapézoïdales sont eux-mêmes marqués par des ondelettes  $\nu$  de fréquence élevée  $f_1$ .

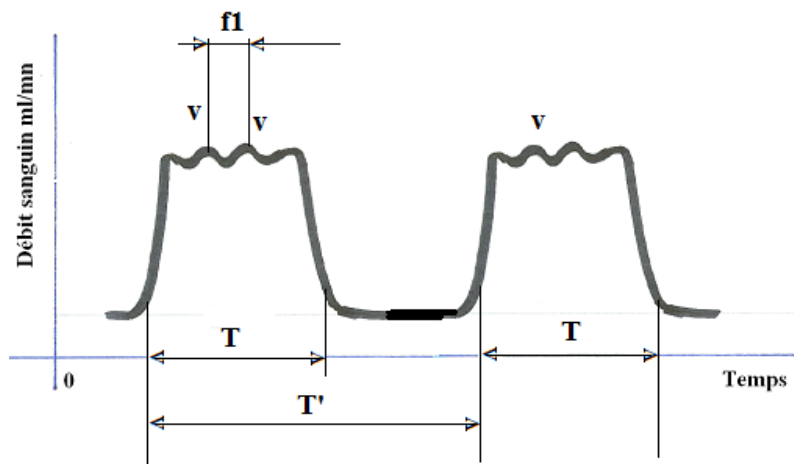


Figure 9. Débit enregistré au niveau de l'artère carotide primitive droite<sup>4</sup>.

Analysons maintenant la figure 10 qui est déterminée par l'analyse du signal de la figure 9 selon l'algorithme de Womersley<sup>5, 6, 7, 8</sup>. On remarque que les plateaux de chaque onde principale de période  $T'$  sont marqués par des ondes  $\alpha$  de grande amplitude et de fréquence élevée.

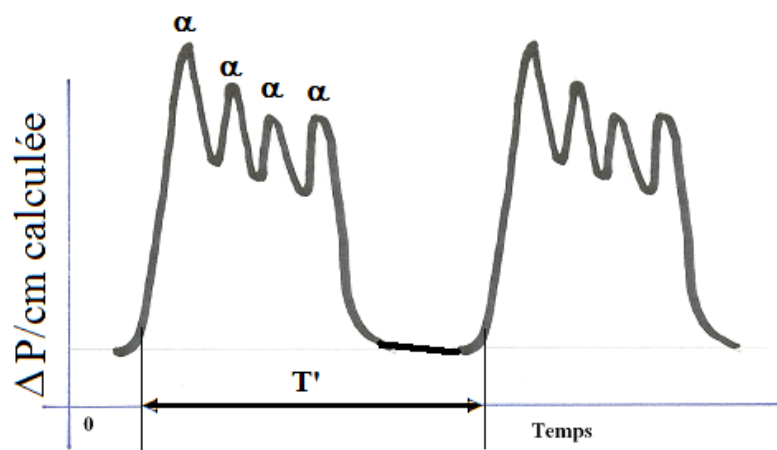


Figure 10. C.E.C. pulsée par pompe COBE STOCKERT pulsée. Détermination de la DP à partir du signal du débit sanguin enregistré au niveau de l'artère carotide primitive droite par Doppler pulsé de la figure 9.

Ces ondelettes  $\alpha$  sont le témoin des passages rapides des galets de la pompe de CEC. Il ne s'agit donc pas d'une similitude physiologique du débit pulsé du cœur natif. On voit toute la puissance du calcul de l'algorithme de Womersley<sup>5, 6, 7, 8</sup>.

#### Bibliographie :

1. DEVIN R. et all. Assistance circulatoire par prothèse ventriculaire gauche. La houille blanche. Numéro spécial : l'hydraulique du point de vue médical. 1966. 2. p 180
2. BERGERON L. Pompe solénoïde. In machines hydrauliques. Dunod. Paris. 1928. p 533-544
3. VIALON L.M. Journal de Physique. Paris. Tome III. 1798 (21 Messidor an V). p 688-697 (erreurs de pagination : 688, 289, 690 etc...)
4. A. PAVIE, F. BAUD, R. VENET, H. LASNIER, C. CABROL. La CEC pulsée. État actuel et perspectives. *Cœur*. XV, 1,41-45
5. R. VENET, P. LEGER, A. PAVIE : Débit sanguin pulsé. Relation pression-débit en régime pulsé. Algorithme de Womersley.  
<http://fr.calameo.com/books/000018760d3f33cbfc395>
6. R. VENET, P. LEGER, A. PAVIE : Evolution dans le temps du profil de la vitesse du sang dans une artère fémorale de chien.  
<http://fr.calameo.com/books/000018760376cffd5885b>
7. R. VENET, P. LEGER, A. PAVIE : Profil de la vitesse du sang dans une artère fémorale de chien. <http://fr.calameo.com/books/0000187605bba9d51a379>
8. R. VENET, P. LEGER, A. PAVIE : Profil des vitesses dans une artère en régime oscillatoire. <http://fr.calameo.com/books/000018760cead10f1cb80>

JOURNAL  
DE PHYSIQUE,  
DE CHIMIE,  
D'HISTOIRE NATURELLE  
ET DES ARTS,

AVEC DES PLANCHES EN TAILLE-DOUCE,

PAR J.-CL. DELAMÉTHÉRIE.

---

NIVOSE, an 6. (JANVIER 1798 v. st.).

---

TOME TROISIÈME.

*à Paris 46*



A PARIS,

Chez DUGOUR, Libraire, rue & maison Serpente.

---

AN 6 DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE.