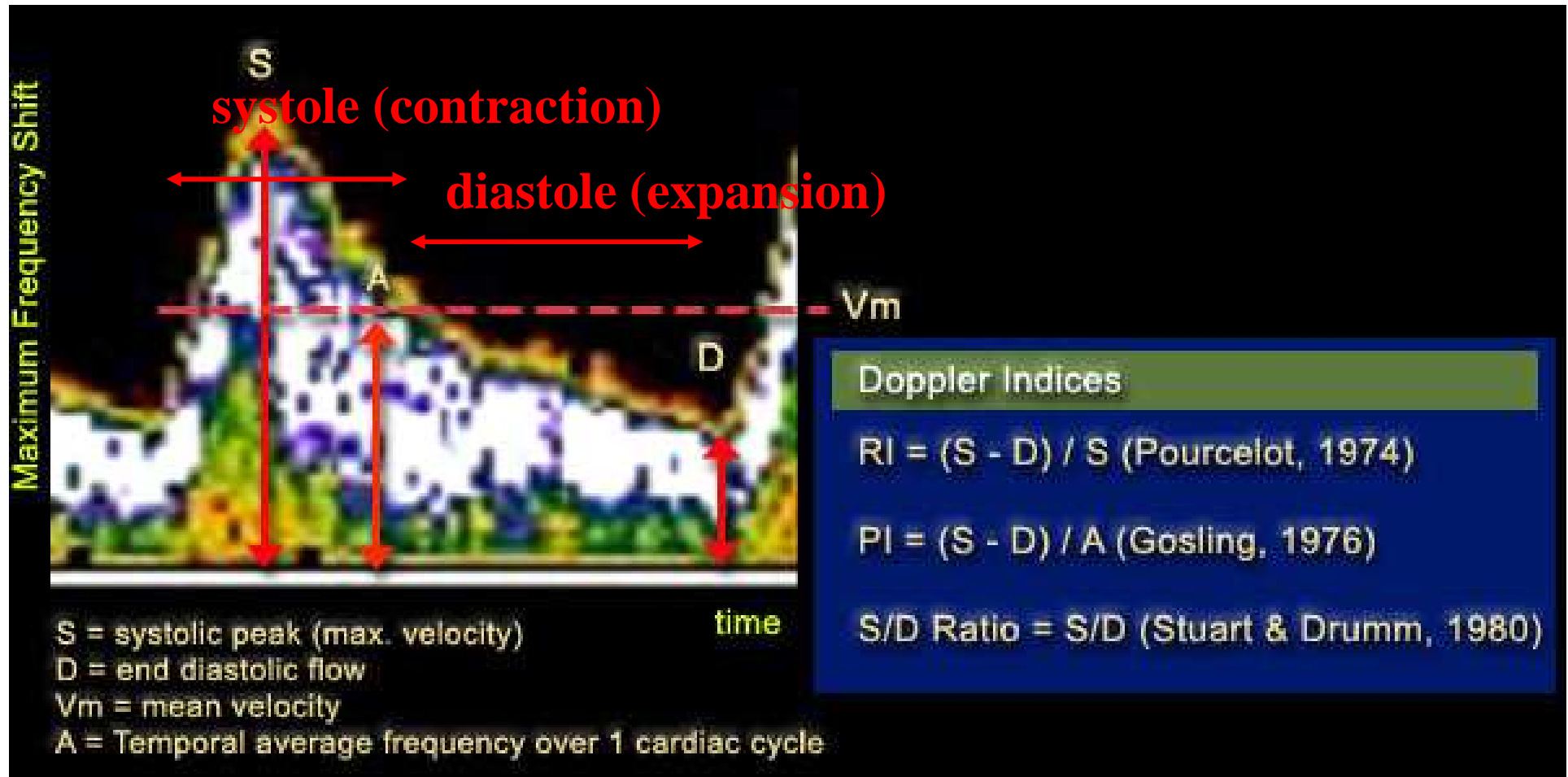


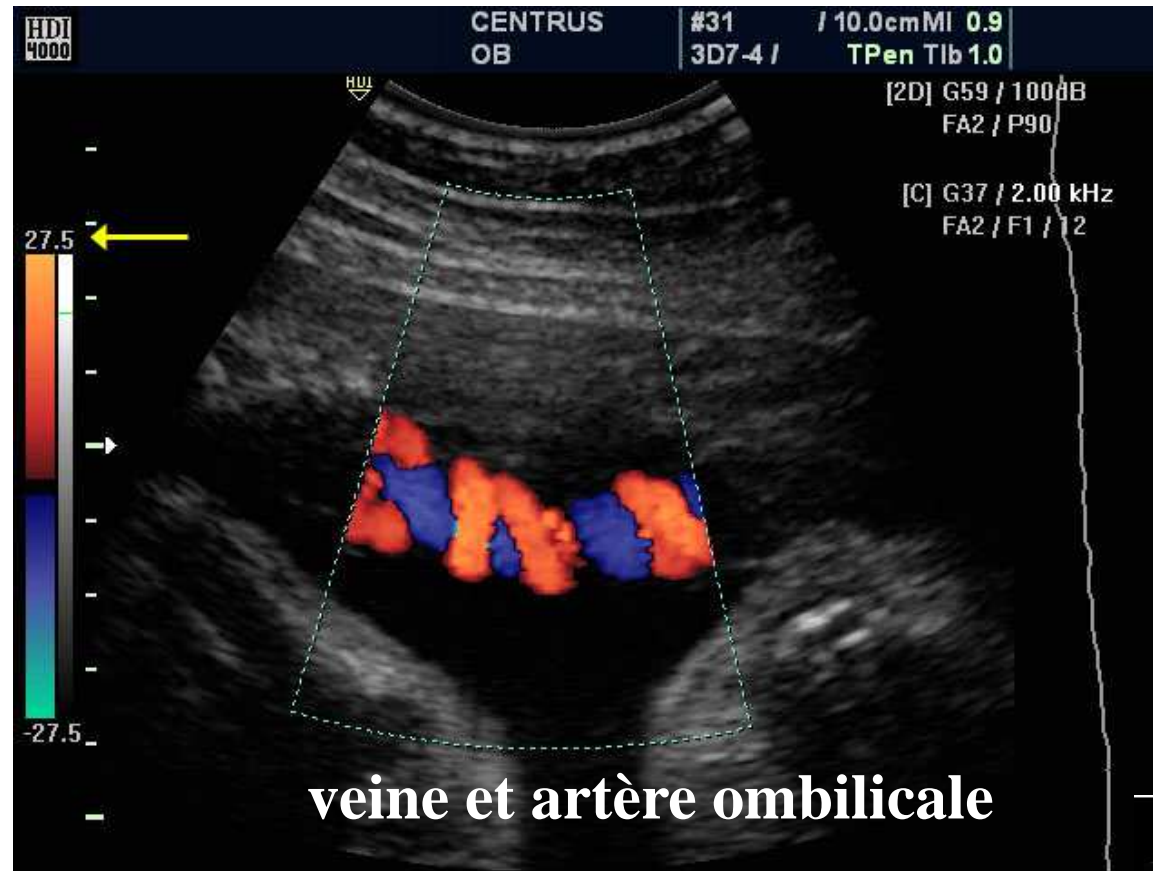
La vélocimétrie ultrasonore

Les différents mode d'imagerie des vitesses

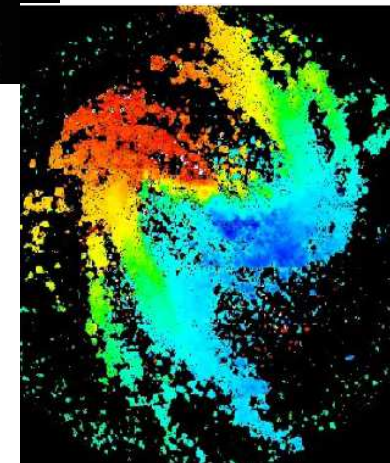
Sonogramme



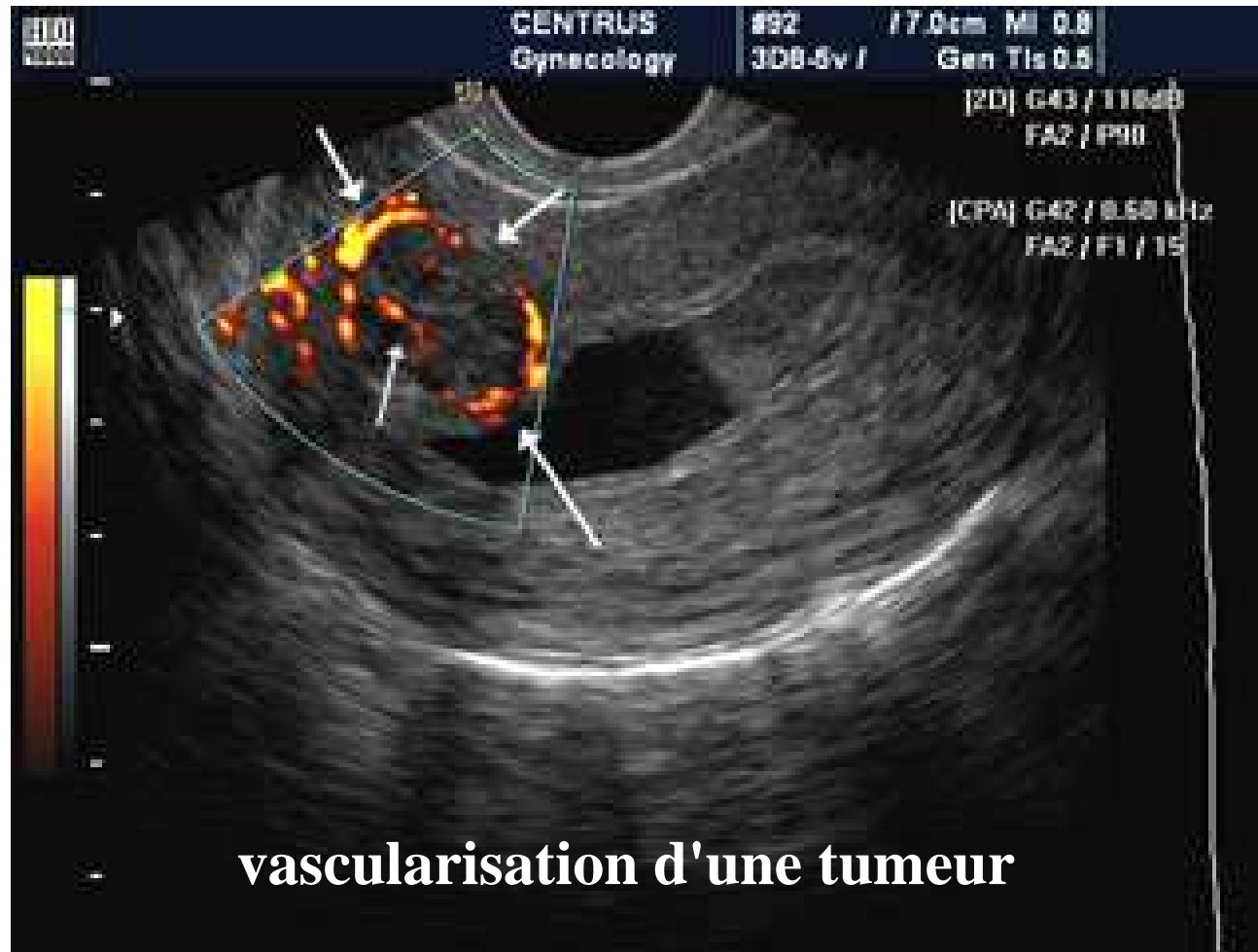
Doppler couleur



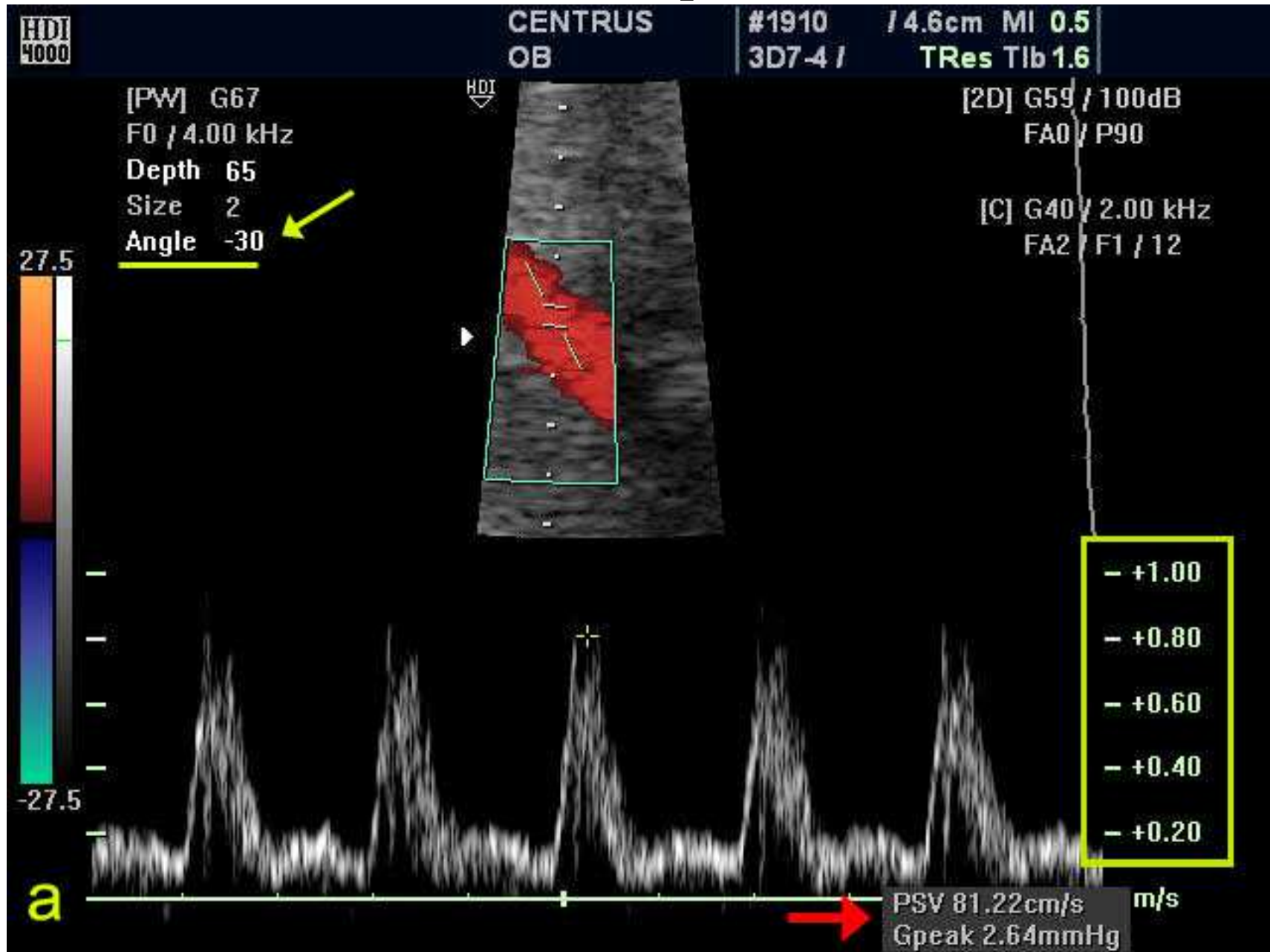
Par convention en astronomie : *Les zones rouges traduisent un mouvement d'éloignement* contrairement *aux zones bleues qui, elles, traduisent un mouvement de rapprochement.*



Doppler puissance

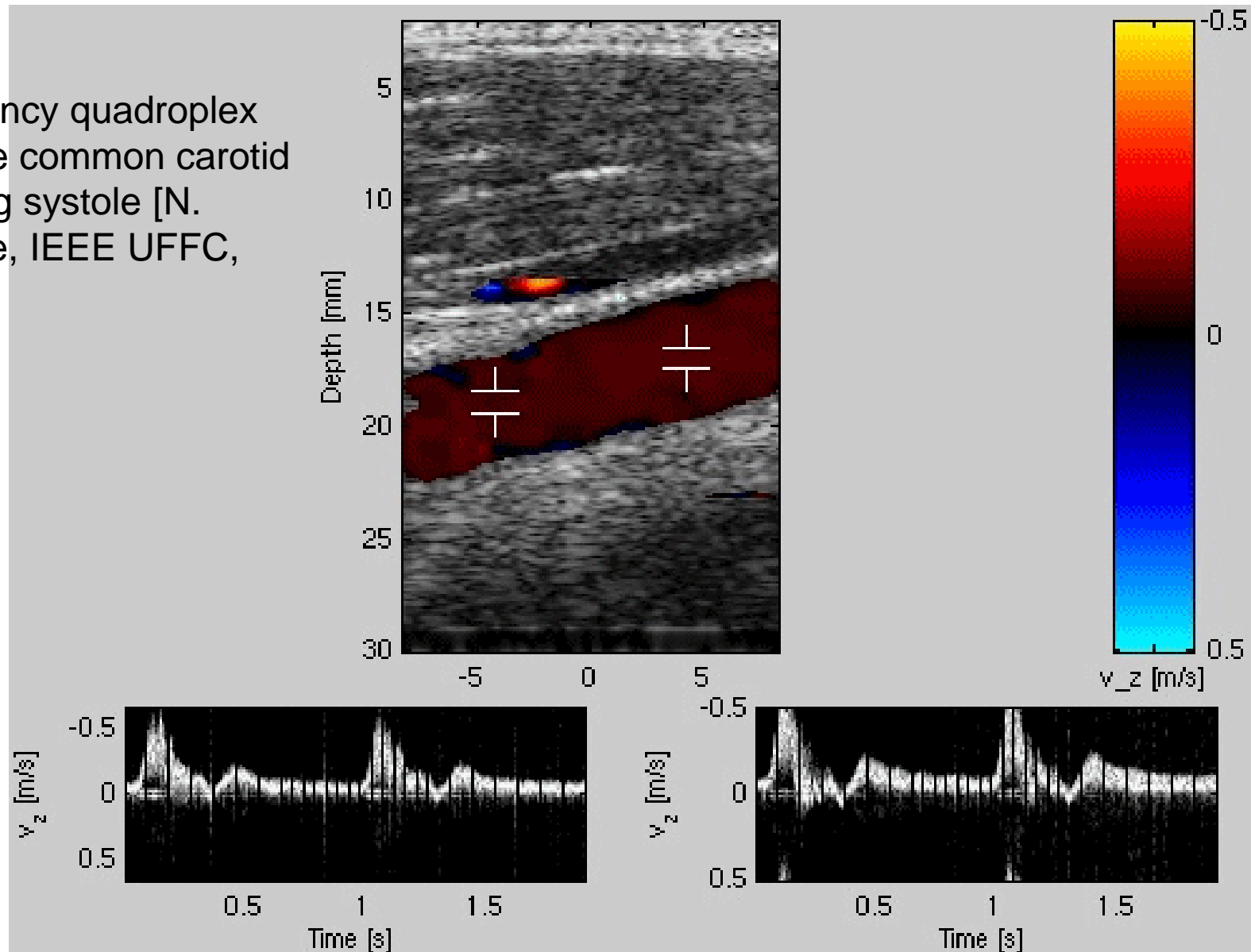


Mode triplex

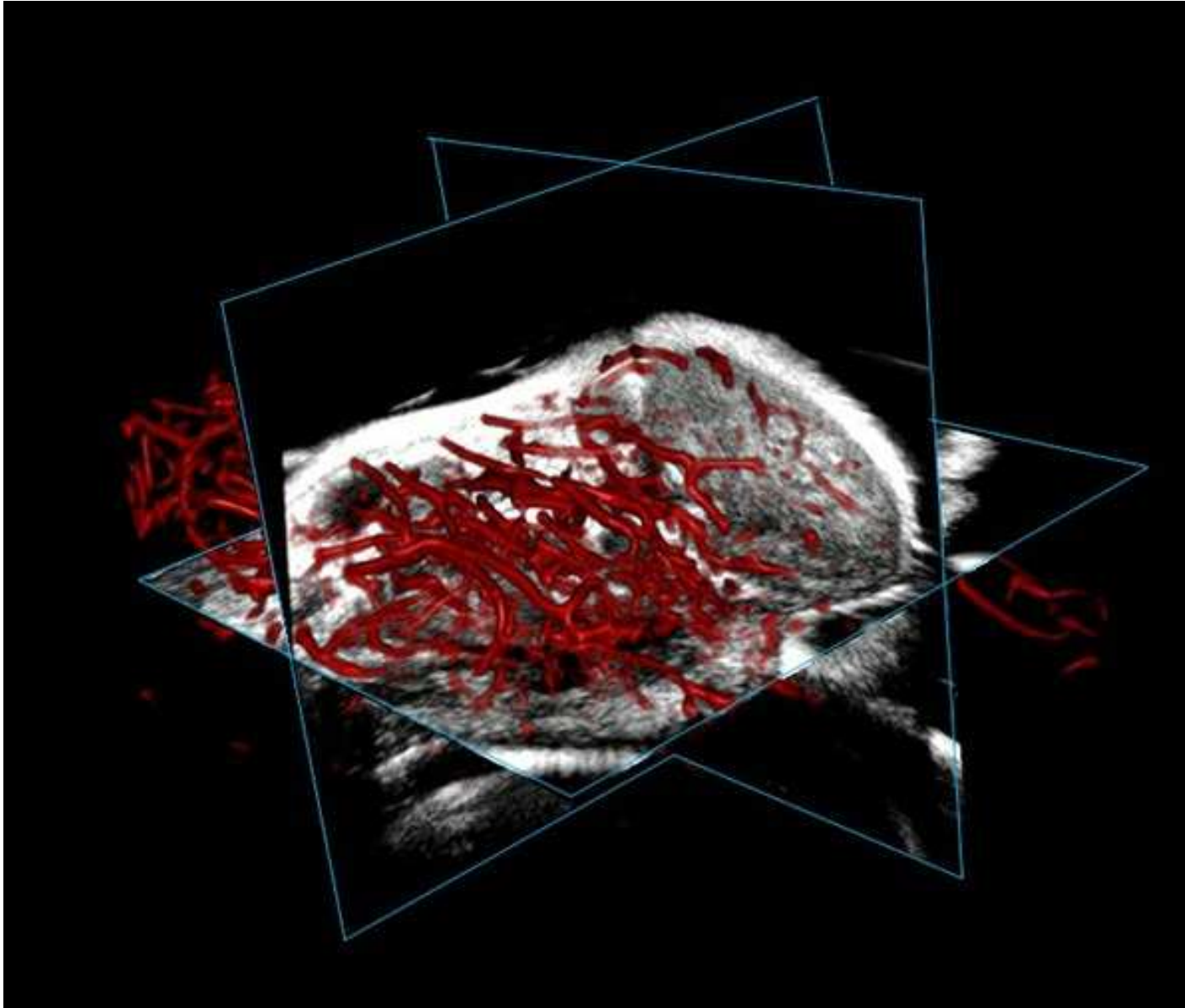


Mode quadroplex (2008)

Multi-frequency quadroplex image of the common carotid artery during systole [N. Oddershede, IEEE UFFC, 2008]



Angiographie acoustique

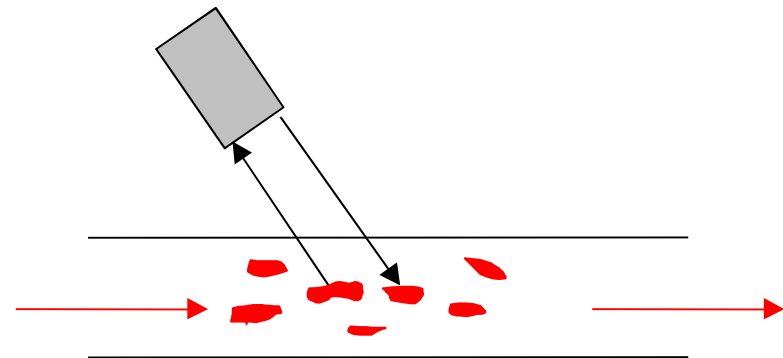


Equipements Doppler

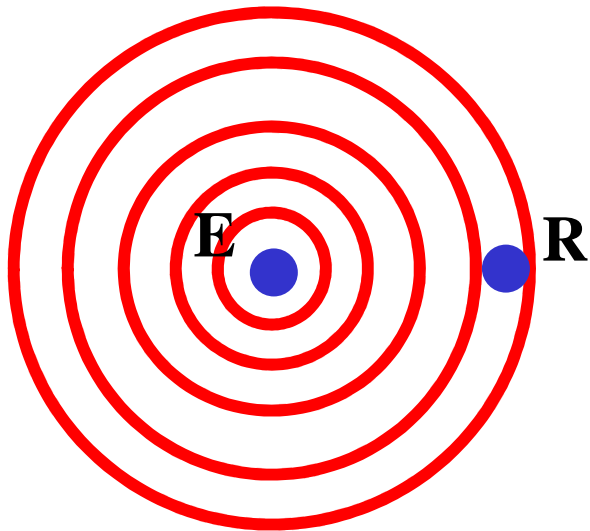


VELOCIMETRIE DOPPLER

- Principe de l'effet Doppler
- Système vasculaire
- Physique des flux
- Interaction des ultrasons avec le sang
- Système à émission continue
- Système à émission pulsée
- Doppler couleur

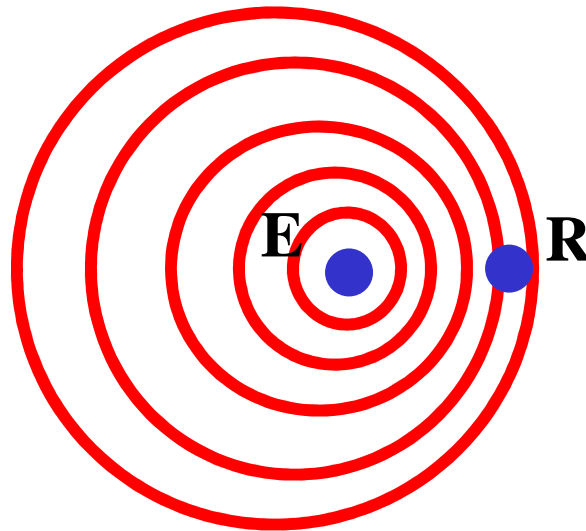


L'effet Doppler



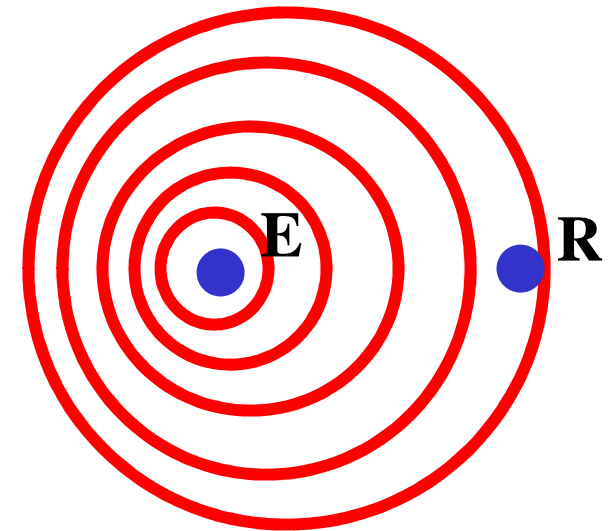
Émetteur et
récepteur fixe

$$f_r = f_0$$



Émetteur se
rapprochant du récepteur

$$f_r > f_0$$



Émetteur s'éloignant
du récepteur

$$f_r < f_0$$

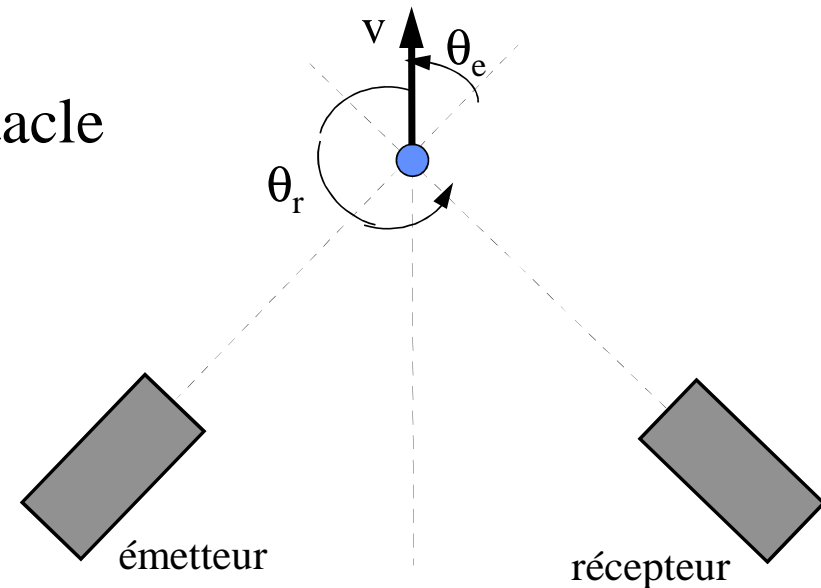
Principe de l'effet Doppler

La fréquence des ultrasons réfléchis par une particule en mouvement diffère de la fréquence des ultrasons émis

$$\lambda = \frac{c}{f_0} = \frac{c - v \cos \theta_e}{f_1}$$

onde émise à la fréquence f_1 par l'obstacle

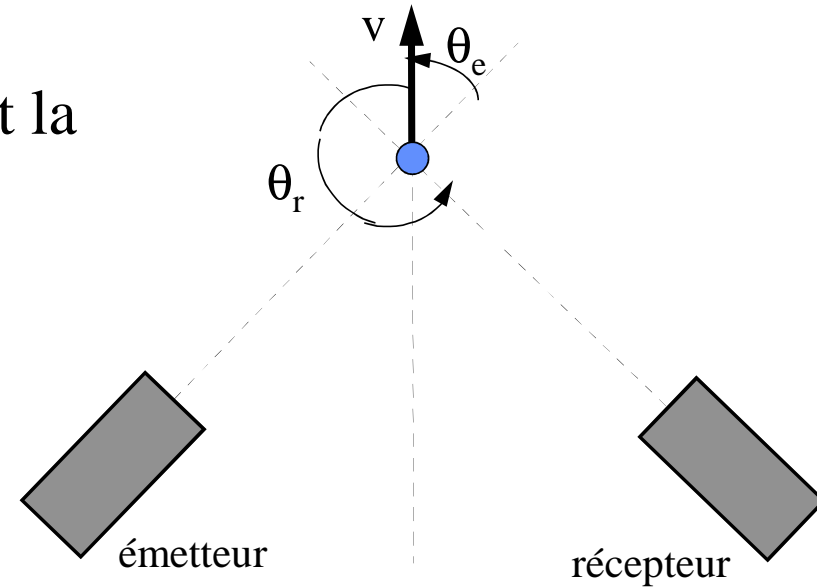
$$\frac{c - v \cos \theta_r}{f_1} = \frac{c}{f_r}$$



Principe de l'effet Doppler

Fréquence Doppler :
différence entre la fréquence reçue et la
fréquence émise.

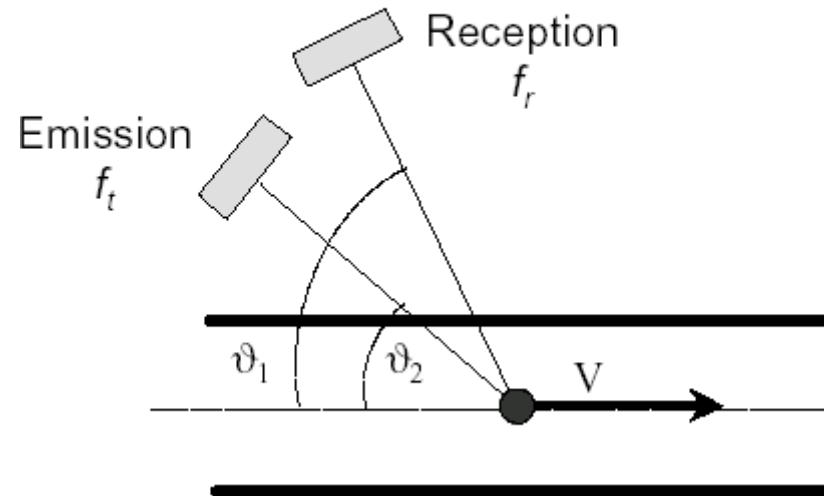
$$F = f_r - f_0 = f_0 \frac{v (\cos\theta_r - \cos\theta_e)}{c - v \cos\theta_r}$$



Si $c \gg v \cos \theta_r$ alors

$$F = f_r - f_0 = f_0 \frac{v}{c} (\cos\theta_r - \cos\theta_e)$$

Principe de l'effet Doppler



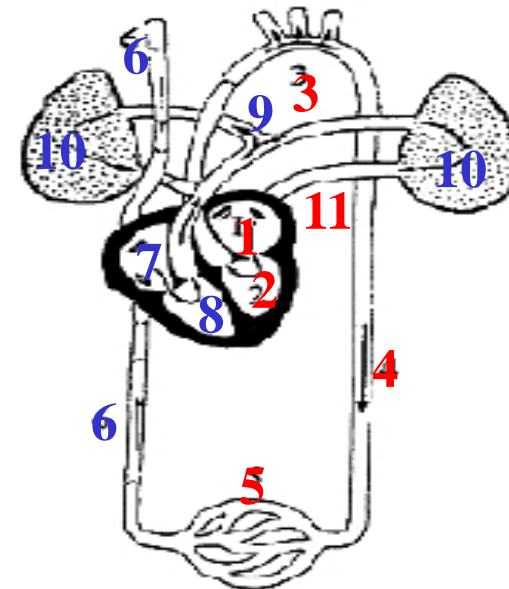
Si un seul transducteur en émission-réception, alors $\theta_r = \pi - \theta_e$

$$\mathbf{F} = -2\mathbf{f}_0 \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}} \cos\theta_e \quad \text{ou:} \quad \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{f}_0} = \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}} (-2 \cos\theta_e)$$

Système vasculaire

Vitesse du sang

Vaisseau	vitesses	
	extrêmes (cm/s)	moyenne (cm/s)
aorte montante	20 - 290	10 - 40
aorte descendante	25 - 250	10 - 40
aorte abdominale	50 - 60	8 - 20
artère fémorale	100 - 120	10 - 15
artérioles	0.5 - 1	
capillaires sanguins	0.02 - 0.17	
veine cave inférieure	15 - 40	



Interaction des ultrasons avec le sang

transducteur émetteur récepteur de 3 MHz incliné de 45°.

vitesse du sang (m/s)	0.01	0.10	1.00
décalage Doppler (Hz)	28	280	2800

Physique des flux

- Le comportement d'un fluide est caractérisé par :
 - des grandeurs internes : densité, viscosité
 - des grandeurs externes : pression

- Modèle vasculaire simplifié

Ecoulement de Poiseuille :

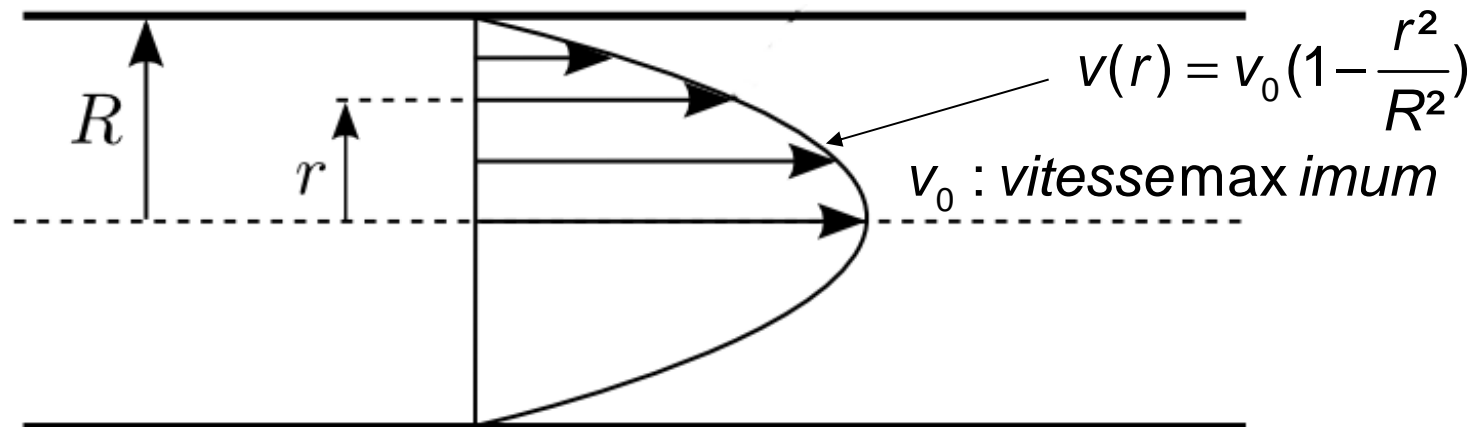
- fluide newtonien (relation linéaire entre tenseurs des contraintes et des déformations)
- Ecoulement Laminaire (non turbulent)
 - > nombre de Reynolds $R_e < 2000$

Exemple : viscosité du sang $\mu = 4.10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, densité $\rho = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
vitesse de l'écoulement : $v = 30 \text{ cm.s}^{-1}$ diamètre $2R = 1 \text{ mm}$

$$R_e = \frac{2R\rho v}{\mu} = \frac{0.3}{4.10^{-3}} = 75$$

Écoulement de Poiseuille

- Coupe longitudinale d'un tube à section constante, mettant en évidence le profil parabolique des vitesses

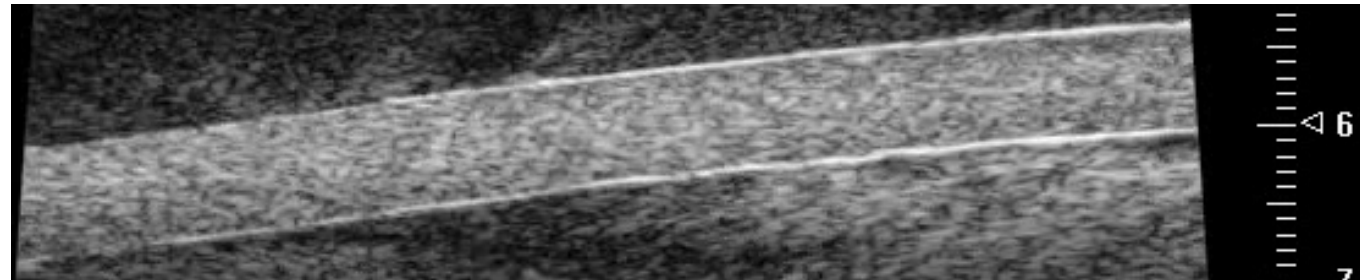


- Vitesse spatiale moyenne

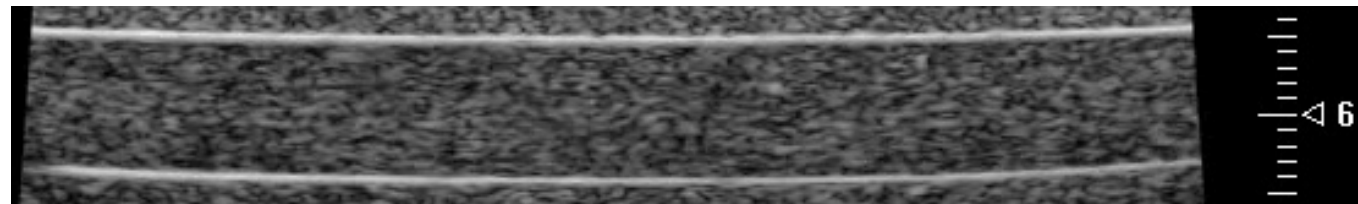
$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v(r) 2\pi r dr = \frac{V_0}{2}$$

Exemples de flux

Écoulement laminaire
non pulsé

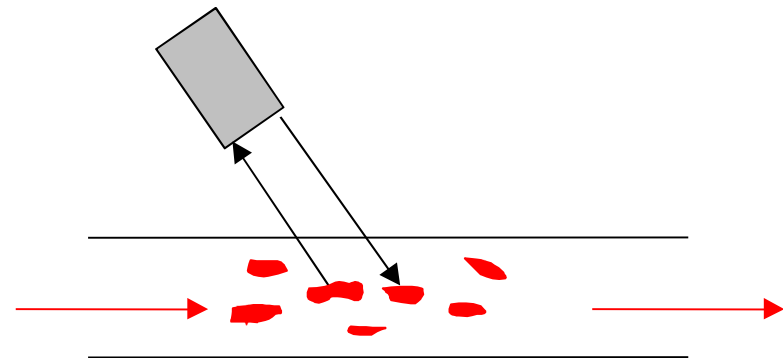


Écoulement laminaire
pulsé



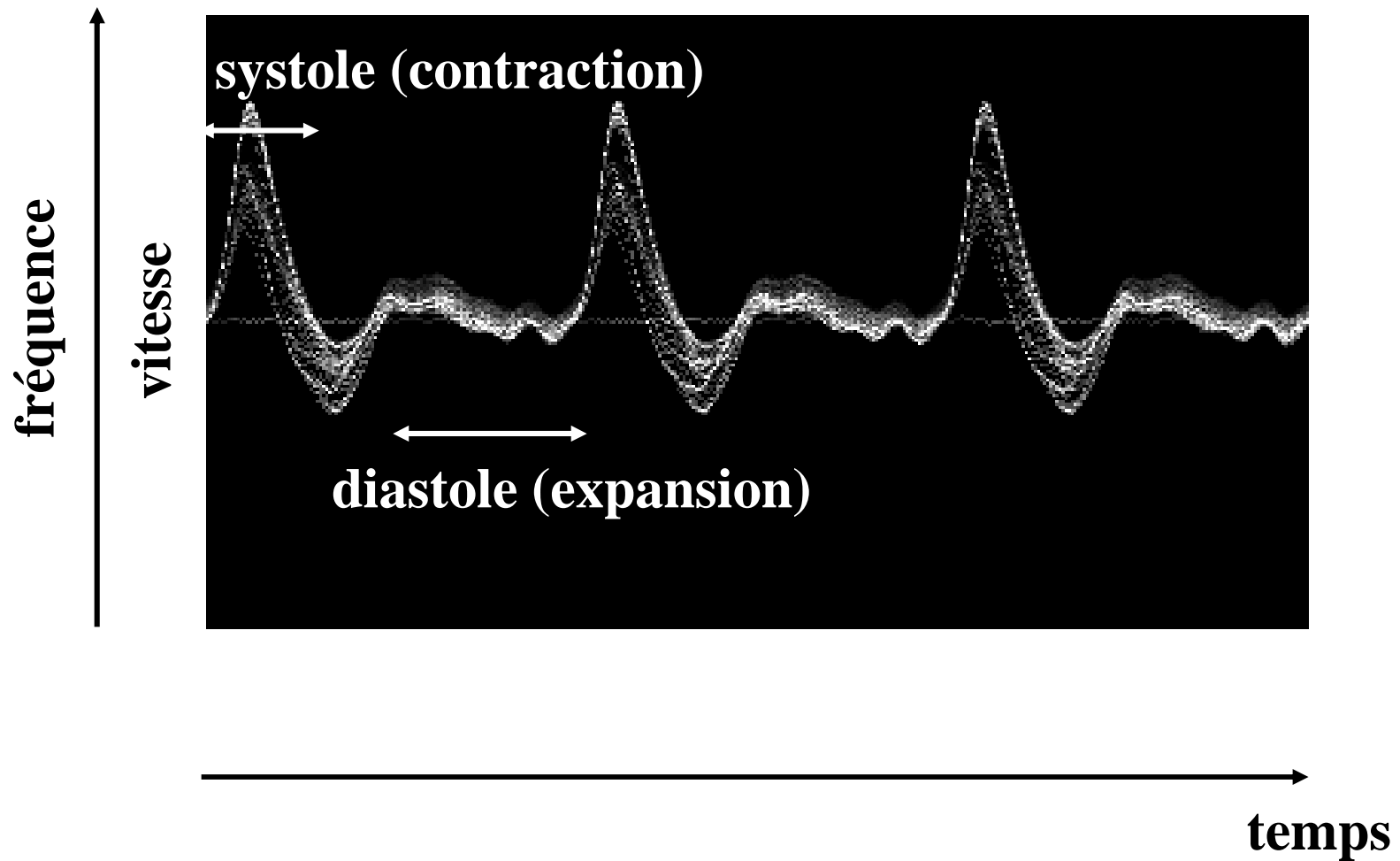
VELOCIMETRIE DOPPLER

- Principe de l'effet Doppler
- Système vasculaire
- Physique des flux
- Interaction des ultrasons avec le sang
- **Système à émission continue**
- Système à émission pulsée
- Doppler couleur



OBJECTIF

Affichage du spectre Doppler instantané : sonogramme

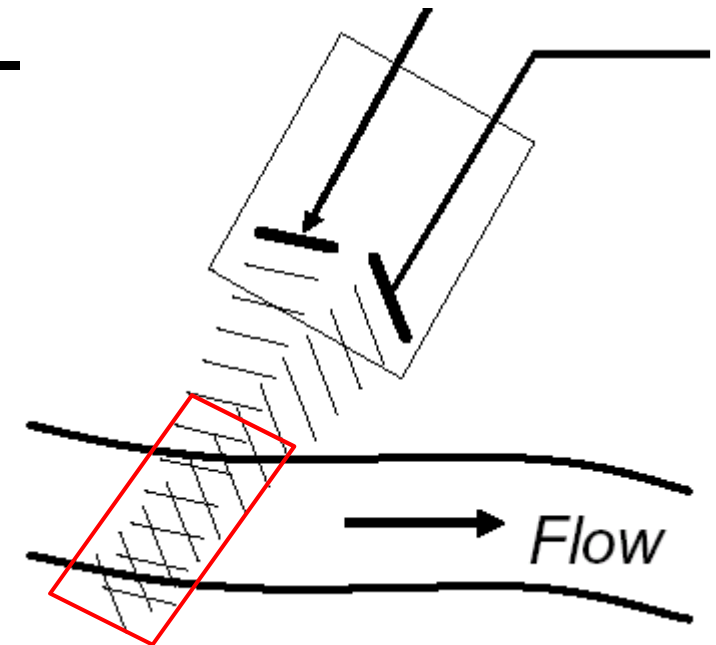


Systeme à emission continue

un emetteur qui fonctionne en permanence

un recepteur en ecoute

le volume de mesure est defini par l'intersection des faisceaux ultrasonores des deux traducteurs



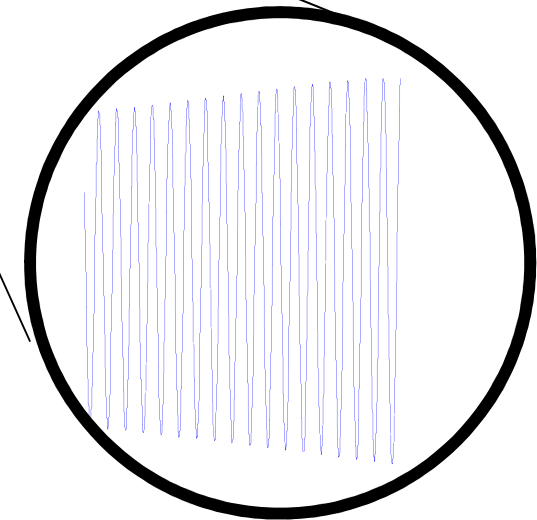
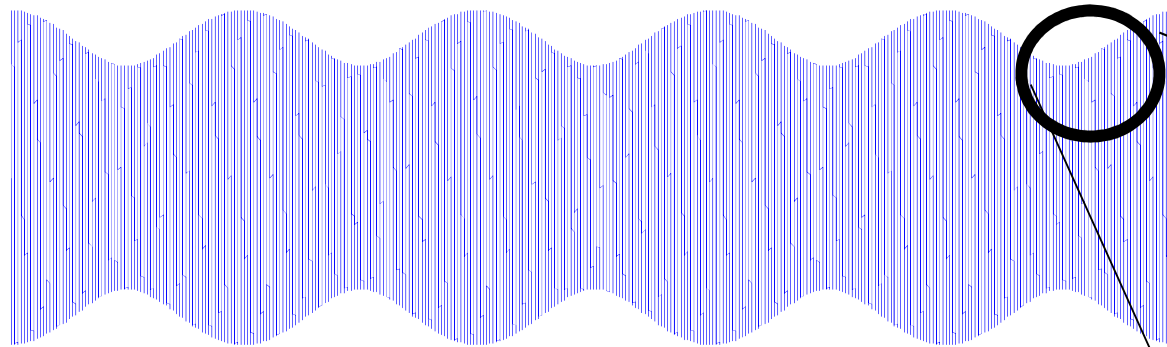
$$s_R(t) = p(t) + d(t) = P_0 \cos \omega_0 t + D_0 \cos(\omega_0 t + \omega_D t)$$

$p(t)$: signal retrodiffuse par les structures fixes, il est a la frequence du signal emis

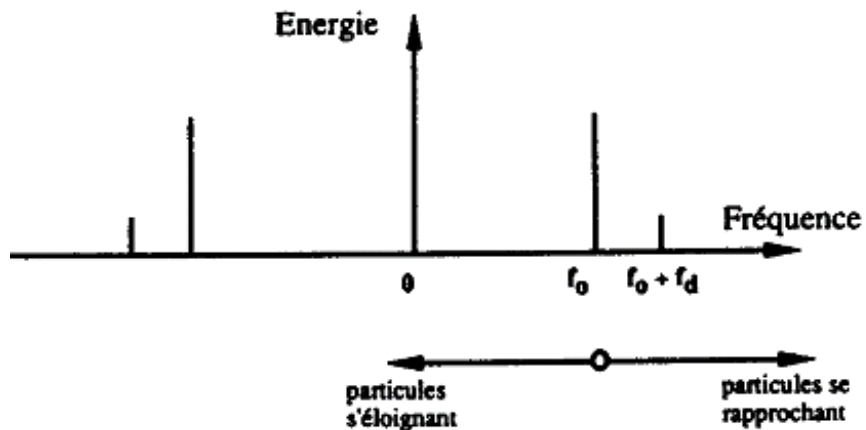
$d(t)$: signal retrodiffuse par les structures mobiles, il contient l'information Doppler

Systeme à emission continue

a – signal reçu $s_R(t) = p(t) + d(t) = P_0 \cos \omega_0 t + D_0 \cos(\omega_0 t + \omega_D t)$



b – spectre du signal reçu



un filtrage sélectif du signal n'est pas envisageable

Démodulation analogique

- Le signal reçu est multiplié par deux signaux en quadrature sur deux voies 1 et 2 en parallèle :

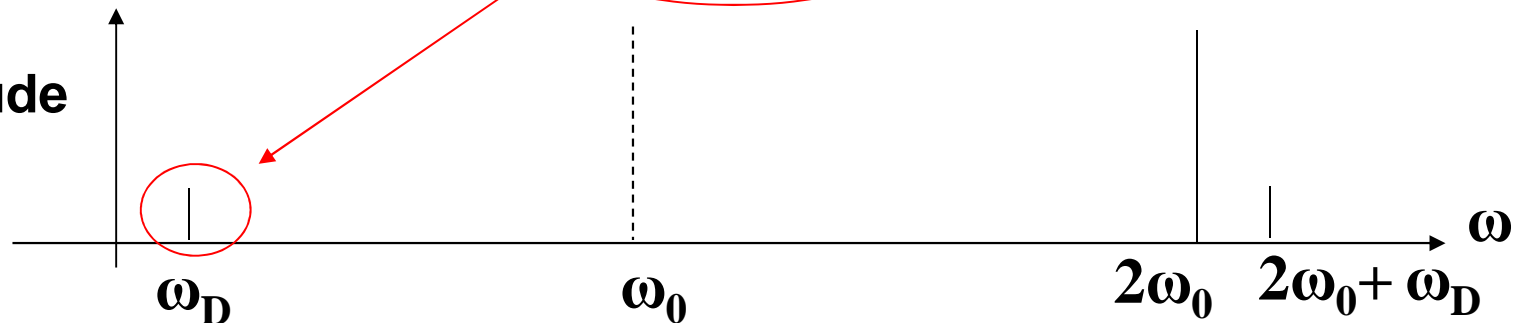
$$r_1(t) = R_0 \cos \omega_0 t \quad r_2(t) = R_0 \sin \omega_0 t$$

- Calcul des signaux obtenus après le multiplieur.

$$s_R(t)r_1(t) = [p_0 \cos \omega_0 t + D_0 \cos(\omega_0 t + \omega_D t)] R_0 \cos \omega_0 t$$

$$= \frac{p_0 R_0}{2} \cos 2\omega_0 t + \frac{D_0 R_0}{2} \cos(\omega_D t) + \frac{D_0 R_0}{2} \cos(2\omega_0 t + \omega_D t)$$

spectre
d'amplitude



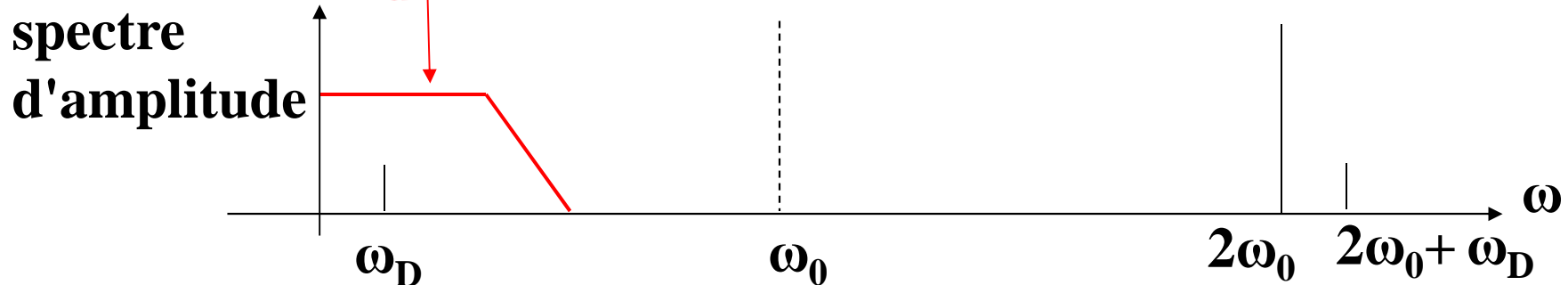
Filtrage du signal démodulé

$$\begin{aligned}
 s_R(t)r_2(t) &= [p_0 \cos \omega_0 t + D_0 \cos(\omega_0 t + \omega_D t)] R_0 \sin \omega_0 t \\
 &= \frac{p_0 R_0}{2} \sin 2\omega_0 t + \frac{D_0 R_0}{2} \sin(\omega_D t) + \frac{D_0 R_0}{2} \sin(2\omega_0 t + \omega_D t)
 \end{aligned}$$

Les multiplieurs sont suivis de filtres passe bas afin d'éliminer les composantes hautes fréquences :

$$w_1(t) = \frac{R_0 D_0}{2} \cos \omega_D t \qquad w_2(t) = \frac{R_0 D_0}{2} \sin \omega_D t$$

Un filtre passe bas à 10 kHz.

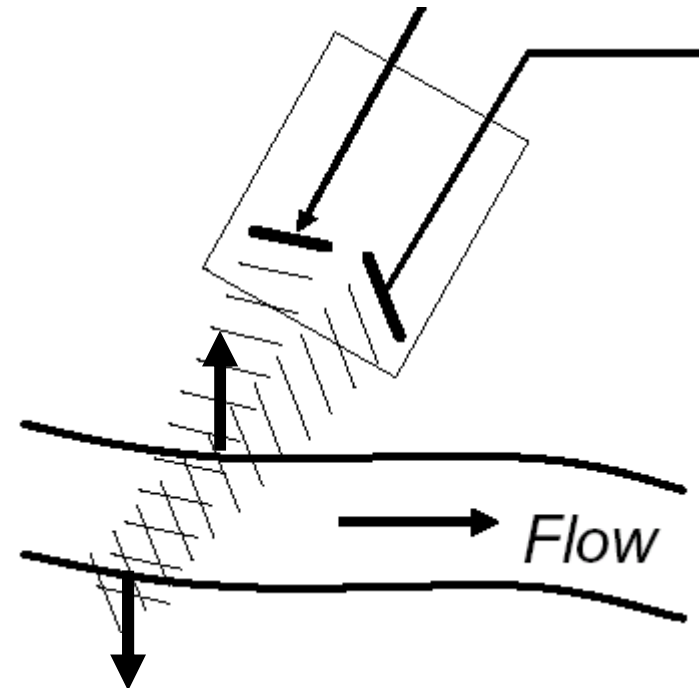


Mouvement des organes

Influence du mouvement des parois du vaisseau qui se déplace à une vitesse de 5 à 10 mm/s ?

Une fréquence Doppler de 10 à 30 Hz

Filtre de paroi (passe haut) réglable



Spectre fréquentiel d'un signal Doppler

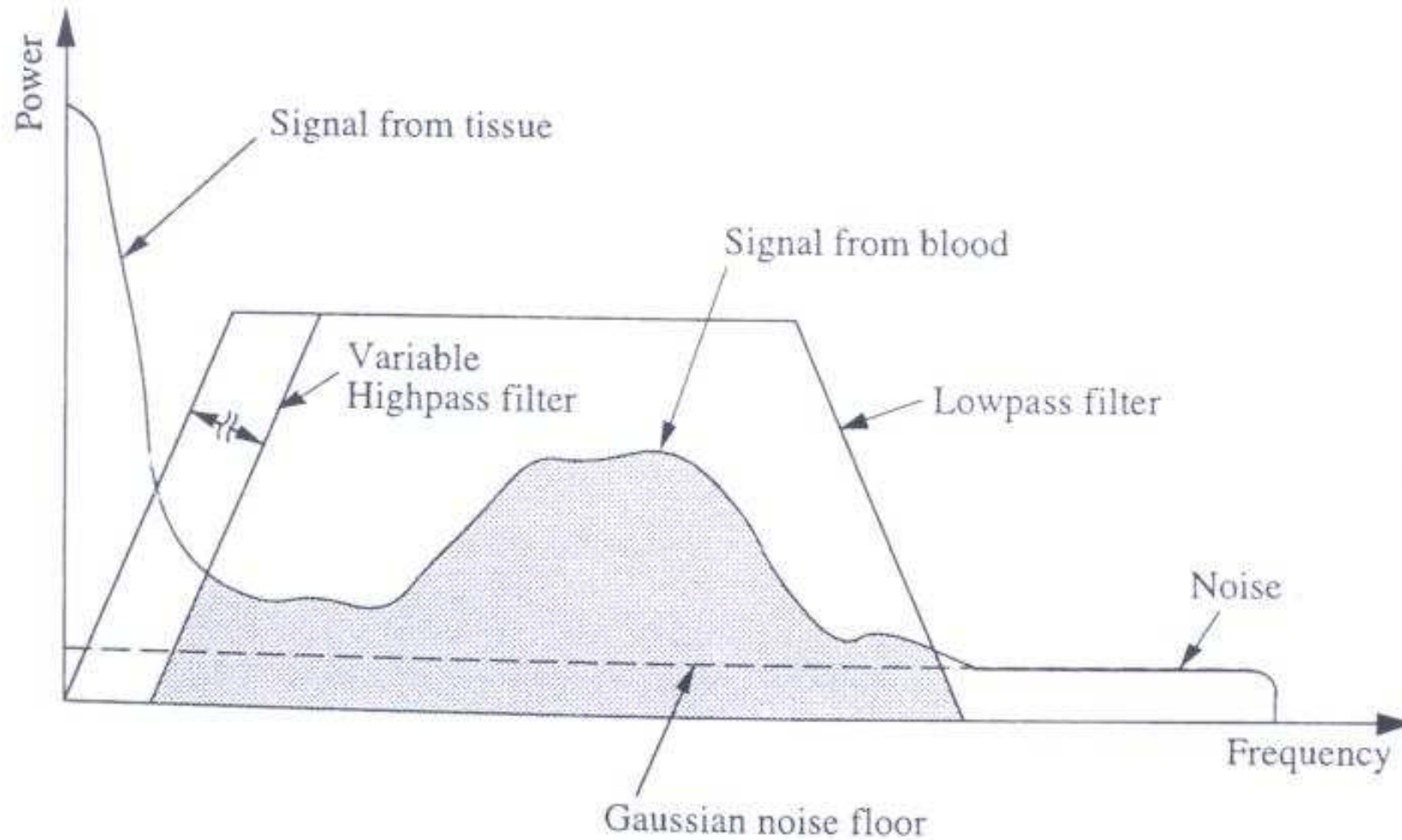
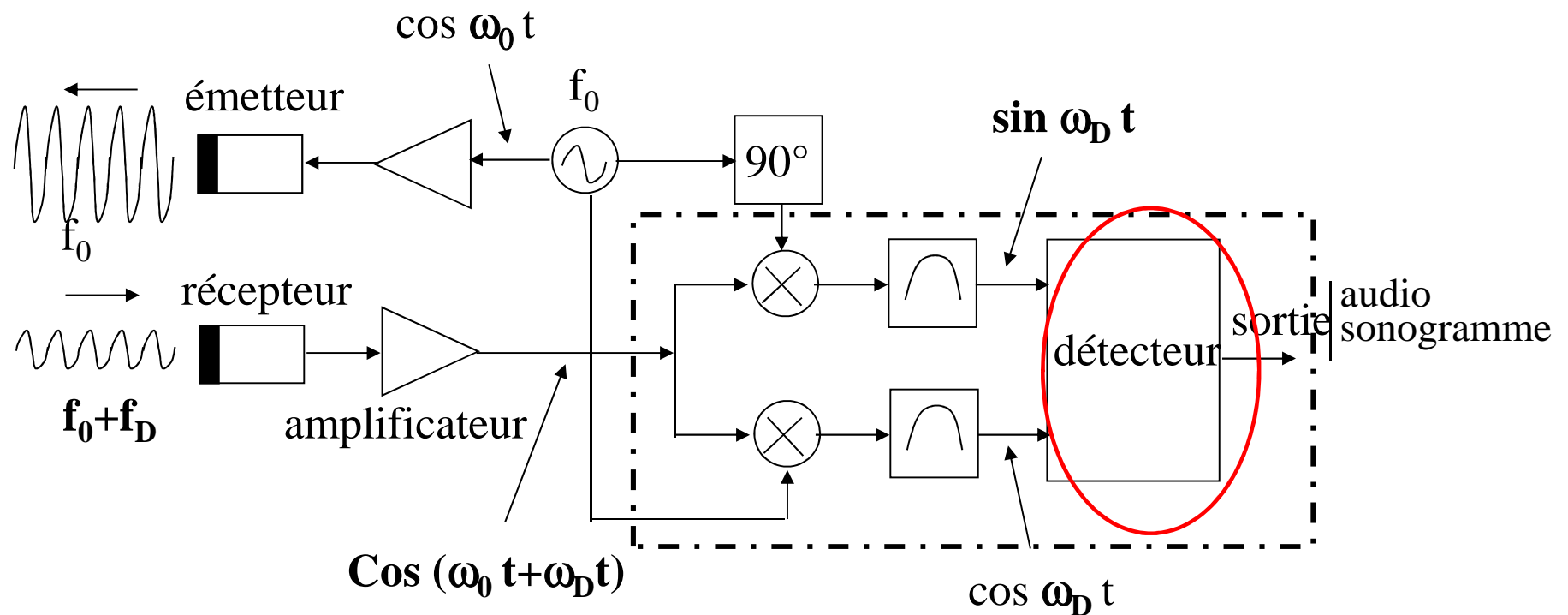
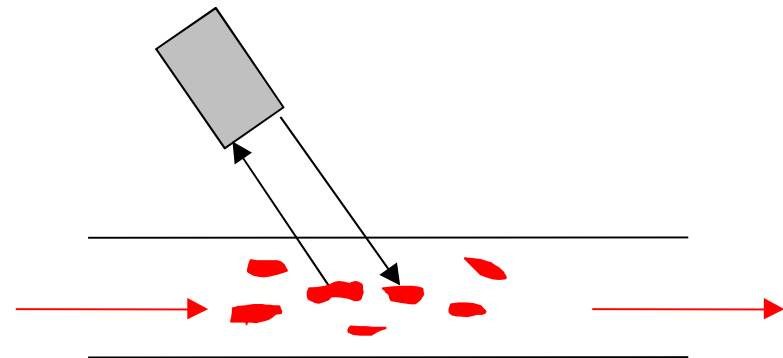


Schéma d'un vélocimètre à émission continue



VELOCIMETRIE DOPPLER

- Principe de l'effet Doppler
- Système vasculaire
- Physique des flux
- Interaction des ultrasons avec le sang
- Système à émission continue
- Système à émission pulsée
- Doppler couleur



Systeme à émission pulsée

un émetteur émet périodiquement un train d'ondes de courte durée

un seul transducteur fonctionnant en émetteur-récepteur est nécessaire

pour limiter les erreurs la vitesse est généralement calculée sur un signal moyenné correspondant à 128 tirs

La fréquence de répétition des tirs est appelée PRF (*Pulse Repetition Frequency*)

Le volume de mesure

Doppler continu

le volume de mesure est défini par l'intersection des faisceaux ultrasonores des deux traducteurs.

le signal Doppler contient les fréquences relatives à toutes les cibles en mouvement dans ce volume.

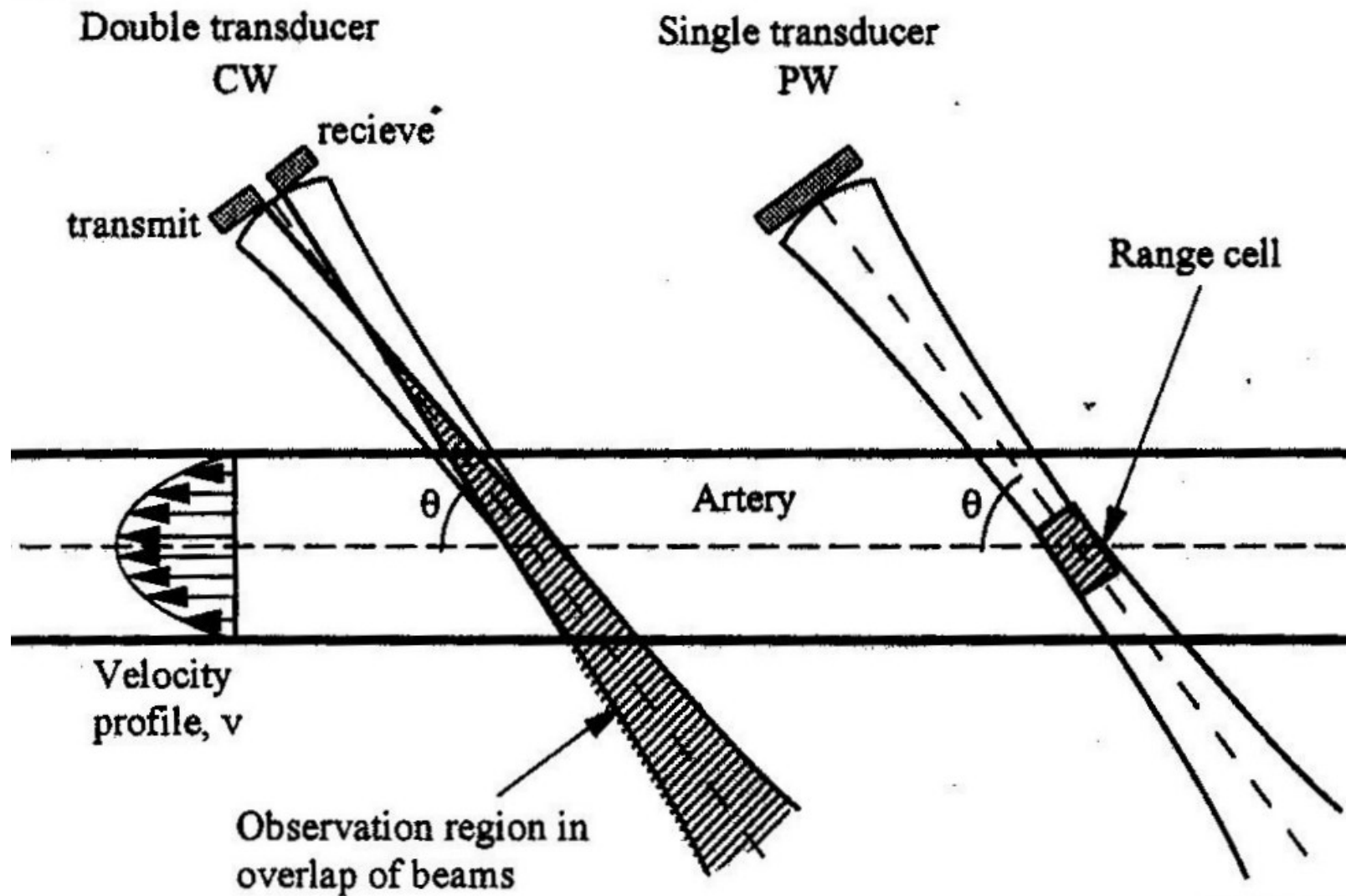
Doppler pulsé

le volume de mesure est défini par la section du faisceau ultrasonore et la durée de la fenêtre temporelle choisie par l'opérateur.

la fenêtre temporelle doit être ajusté à la largeur du vaisseau
si la dimension est inférieure au diamètre du vaisseau le spectre fréquentiel du signal Doppler est amputé d'une partie des composantes.

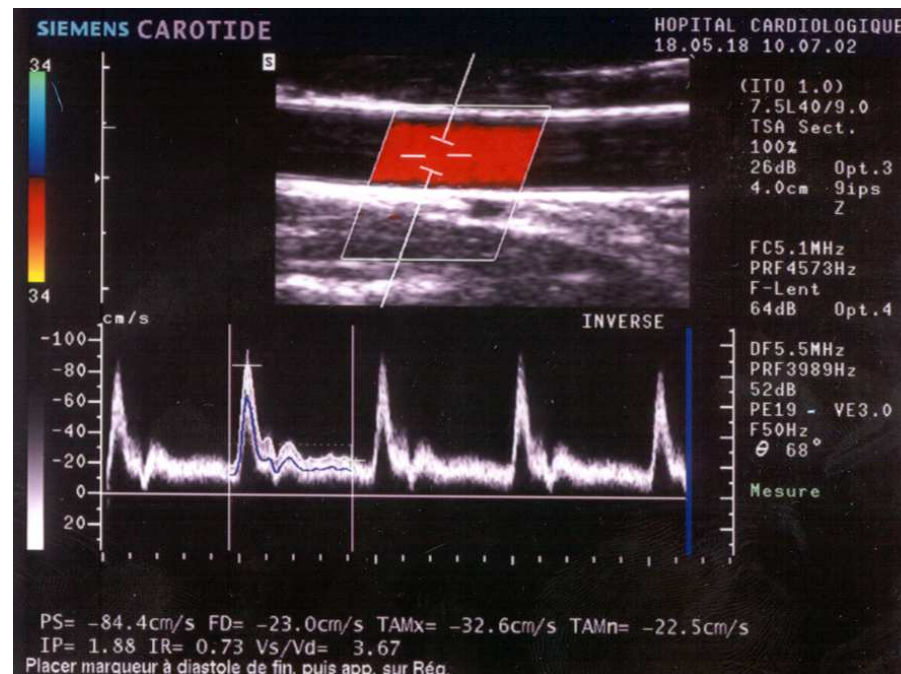
si la fenêtre est trop large le signal peut être parasité par la présence d'un autre vaisseau.

Doppler continu ou Doppler pulsé

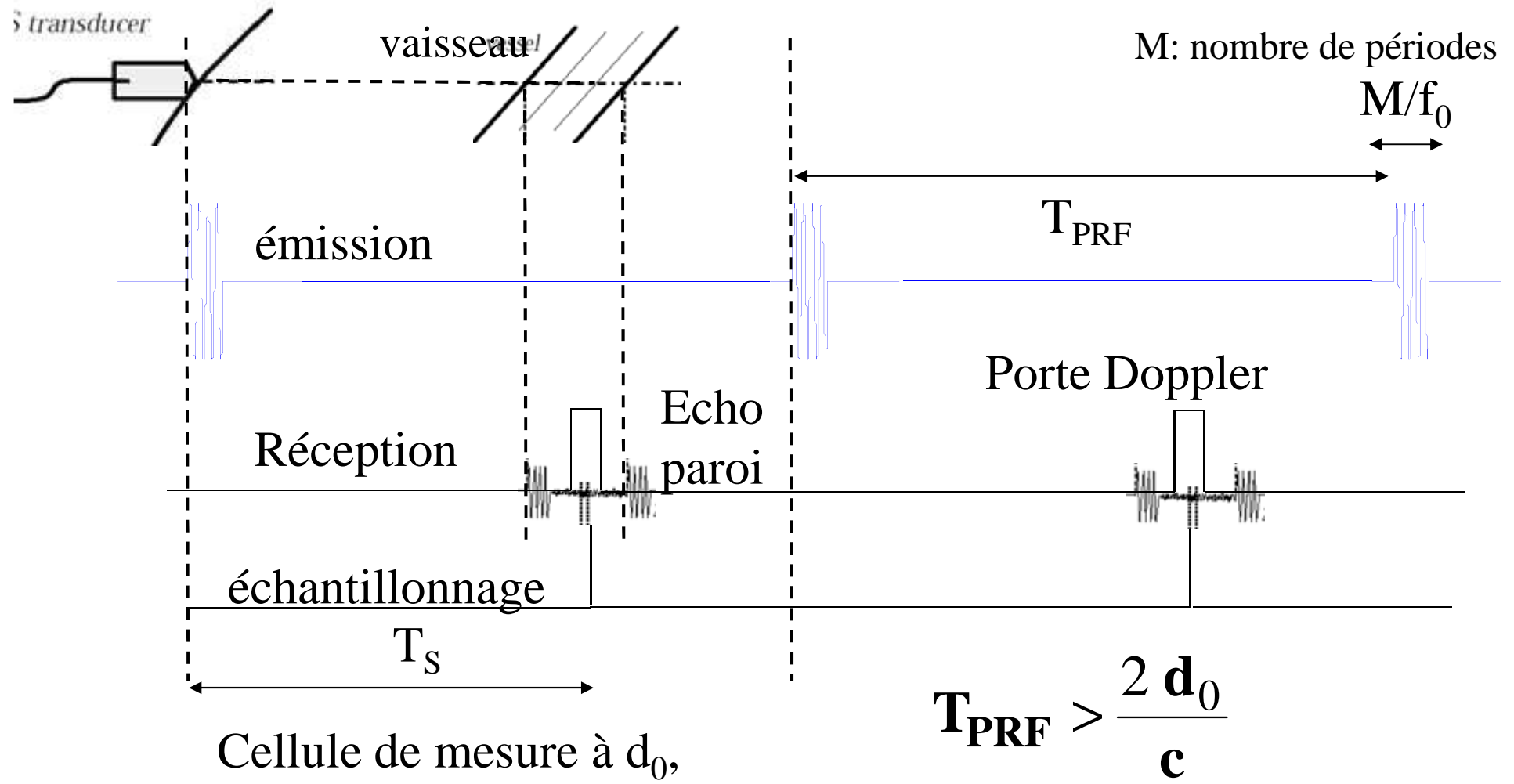


Doppler continu ou pulsé

- Le mode pulsé :
 - Avantage : mesure locale de la vitesse définie dans une fenêtre réglable par l'utilisateur
 - Inconvénient : mesure par effet Doppler impossible à cause de l'élargissement en fréquence du signal émis et de l'atténuation



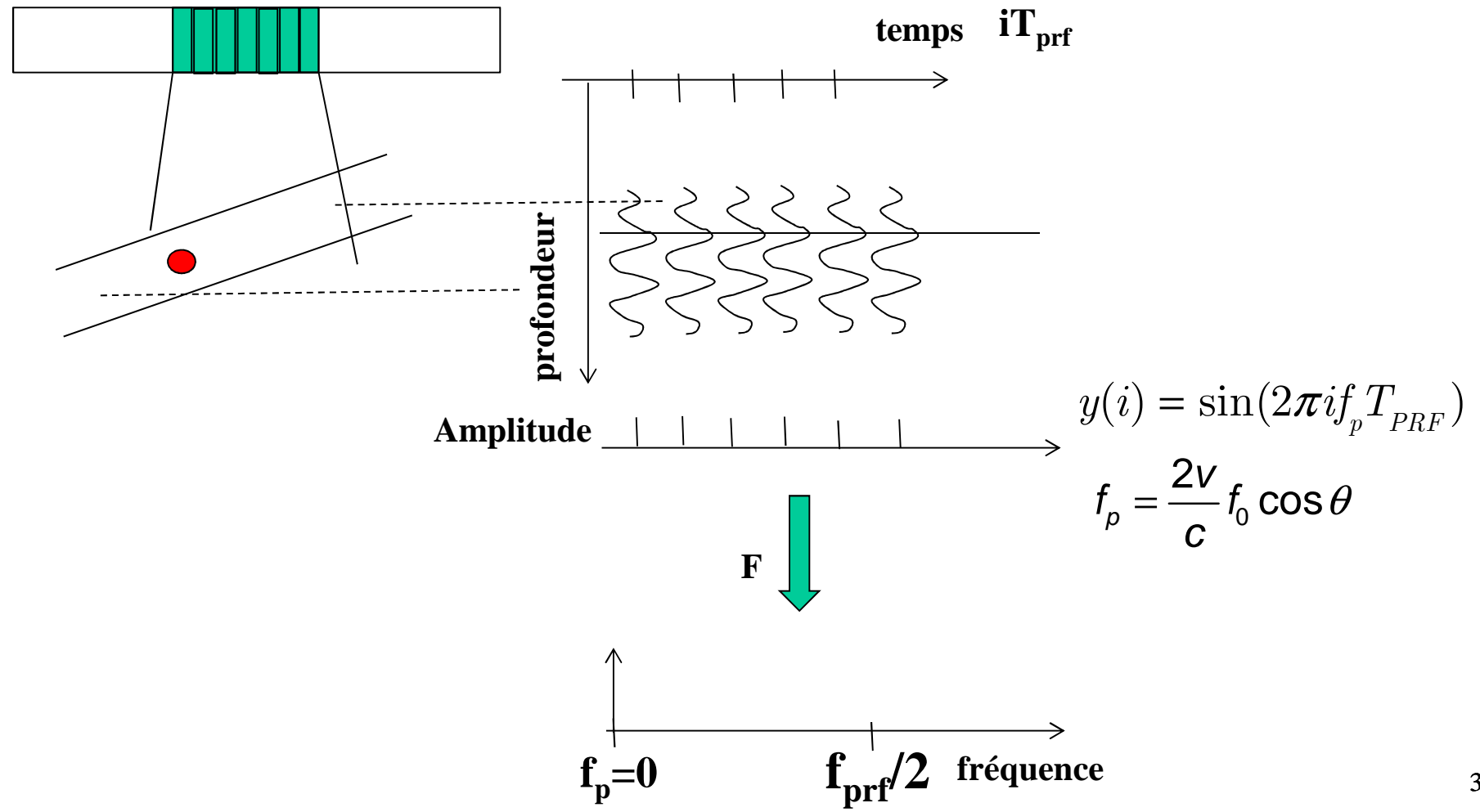
Systeme à emission pulsée Émission-réception



Pulse Repetition Frequency : $1 / T_{PRF}$

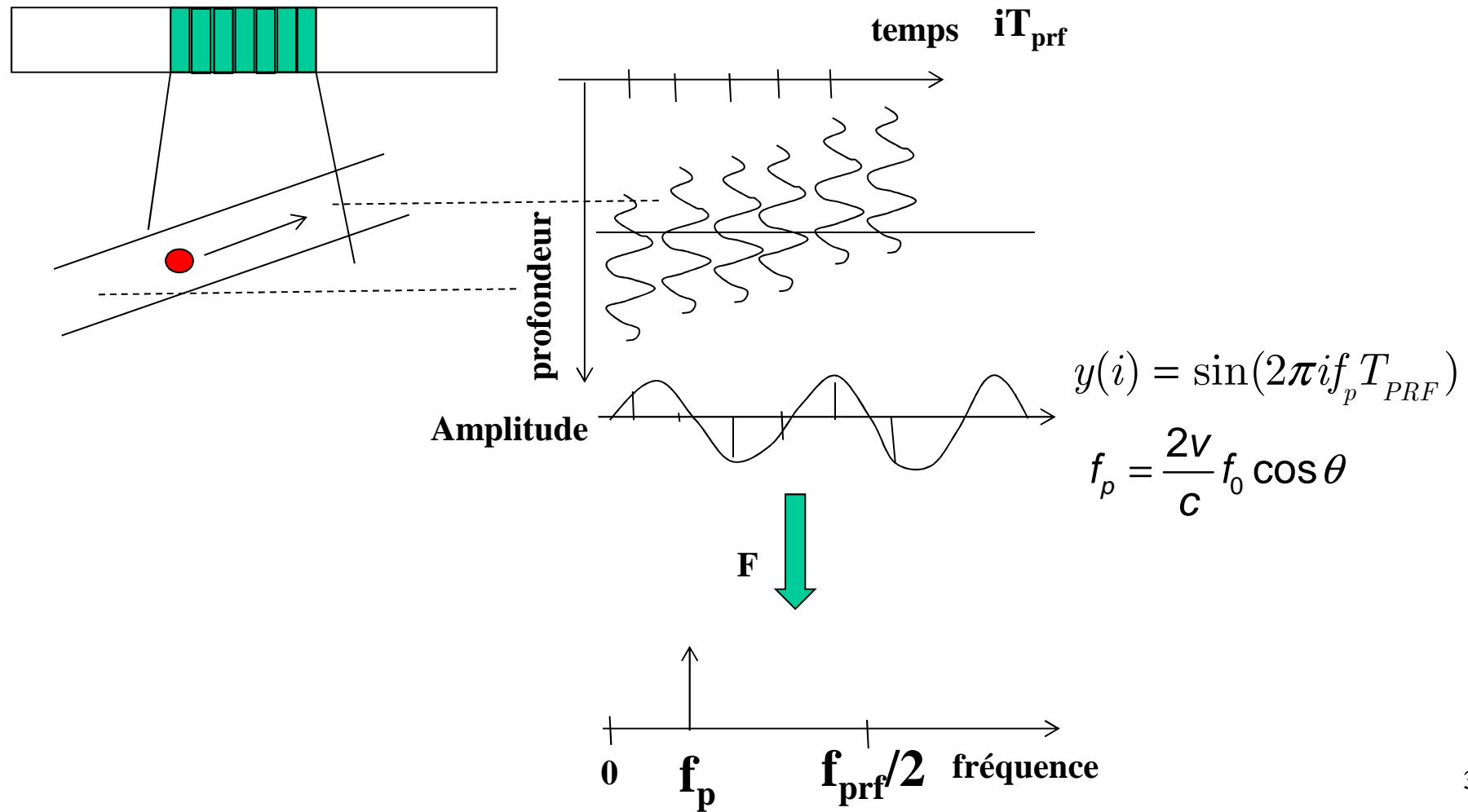
Système à émission pulsée Echantillonnage

Objet fixe vitesse $v=0$



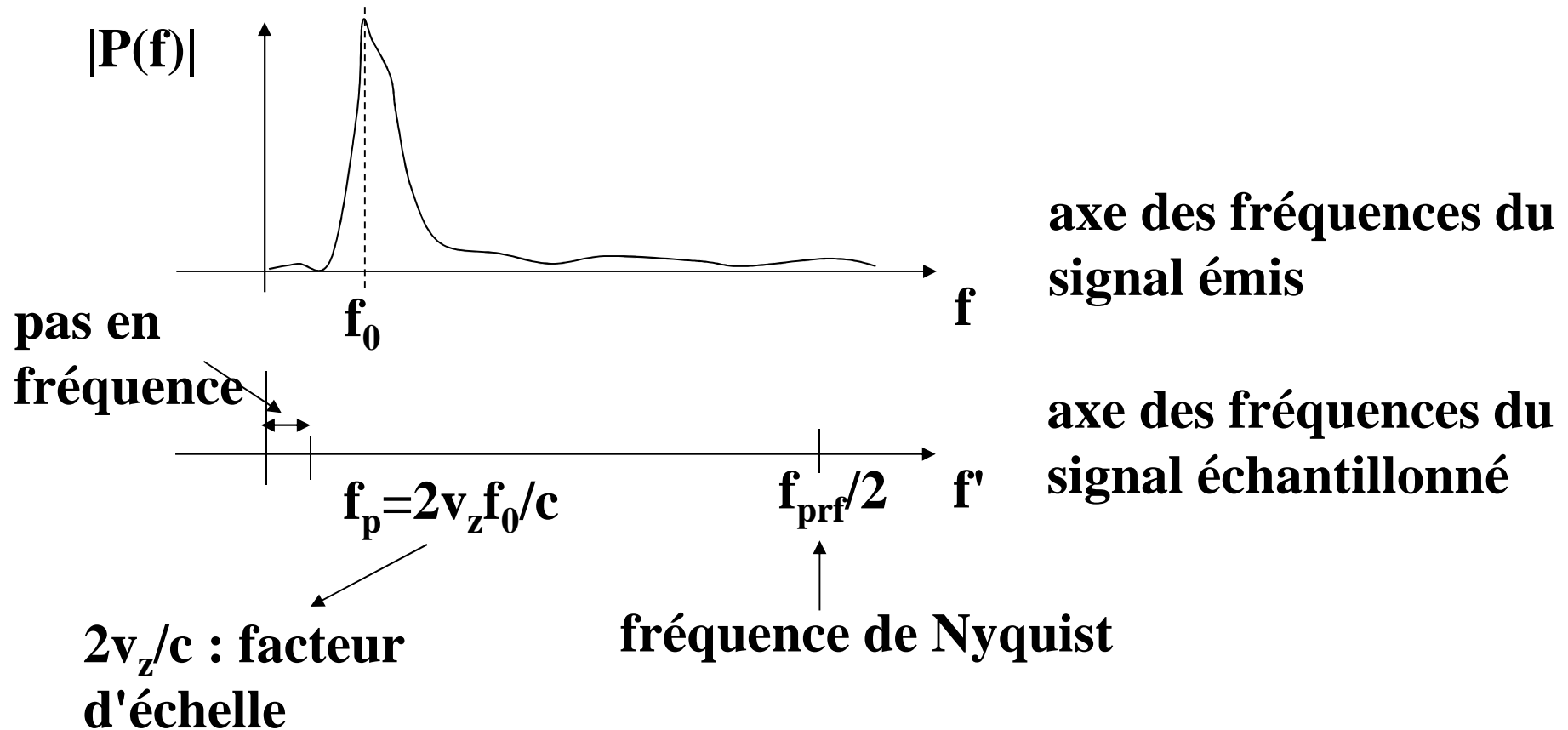
Systeme à emission pulsee Echantillonnage

Objet mobile vitesse v



Interprétation en fréquence

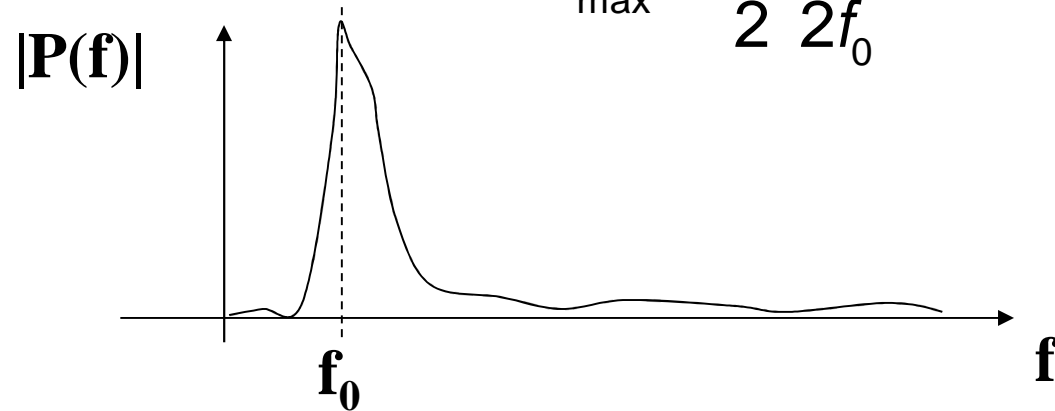
changement d'échelle de l'axe des fréquences du signal échantillonné en réception pour un flux de vitesse $v_z = v \cdot \cos(\theta)$



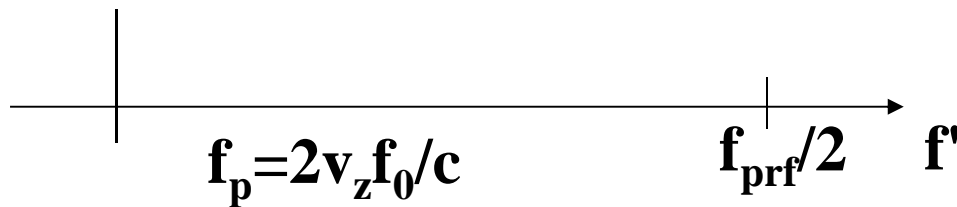
Vitesses limites

D'après l'axe des fréquences et la condition de Shannon $2 \frac{V_{\max}}{c} f_0 \leq \frac{f_{PRF}}{2}$

$$\Rightarrow V_{\max} = \frac{c f_{PRF}}{2 \cdot 2f_0}$$



axe des fréquences du signal émis



axe des fréquences du signal échantillonné

$2v_z/c$: facteur d'échelle

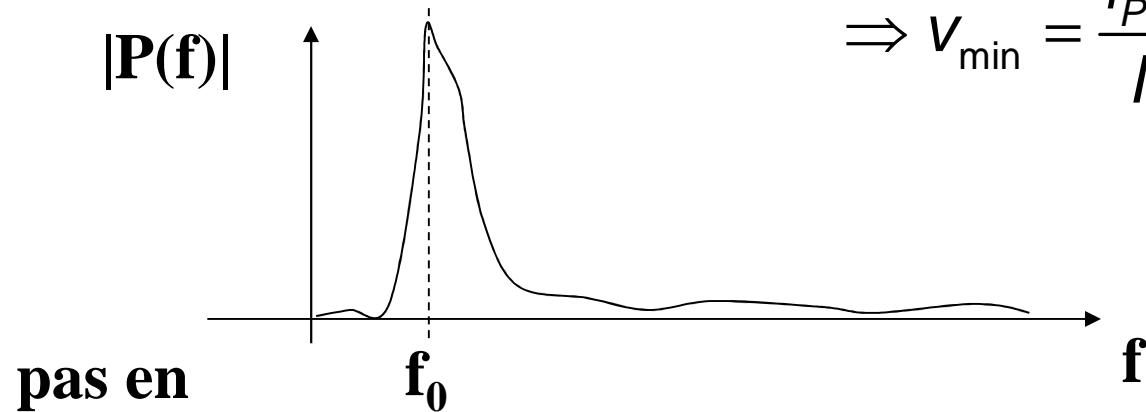
fréquence de Nyquist

Vitesses limites

D'après le pas en fréquence

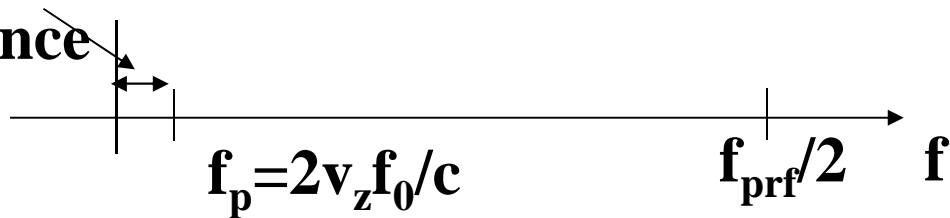
$$2 \frac{V_{\min}}{c} f_0 \geq \frac{f_{PRF}}{N}$$

$$\Rightarrow V_{\min} = \frac{f_{PRF}}{N} \frac{c}{2f_0}$$



axe des fréquences du signal émis

pas en fréquence



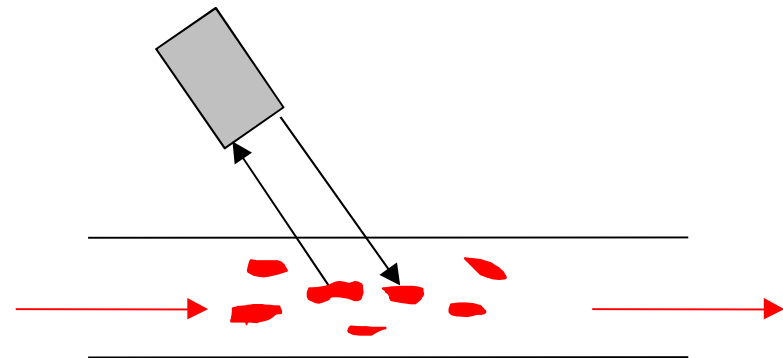
axe des fréquences du signal échantillonné

$2v_z/c$: facteur d'échelle

fréquence de Nyquist

VELOCIMETRIE DOPPLER

- Principe de l'effet Doppler
- Système vasculaire
- Physique des flux
- Interaction des ultrasons avec le sang
- Système à émission continue
- Système à émission pulsée
- Doppler couleur



Doppler couleur

Doppler couleur (ou imagerie en Doppler bi-dimensionnelle)

L'information Doppler est calculée sur plusieurs lignes RF adjacentes

Définition par l'utilisateur d'une aire sur laquelle la vitesse est calculée

Les informations en provenance des diffuseurs en mouvement sont codées en couleur et sont superposées aux images mode B en niveau de gris.

les éléments de l'image en mode B en mouvement sont codés en rouge ou en bleu:

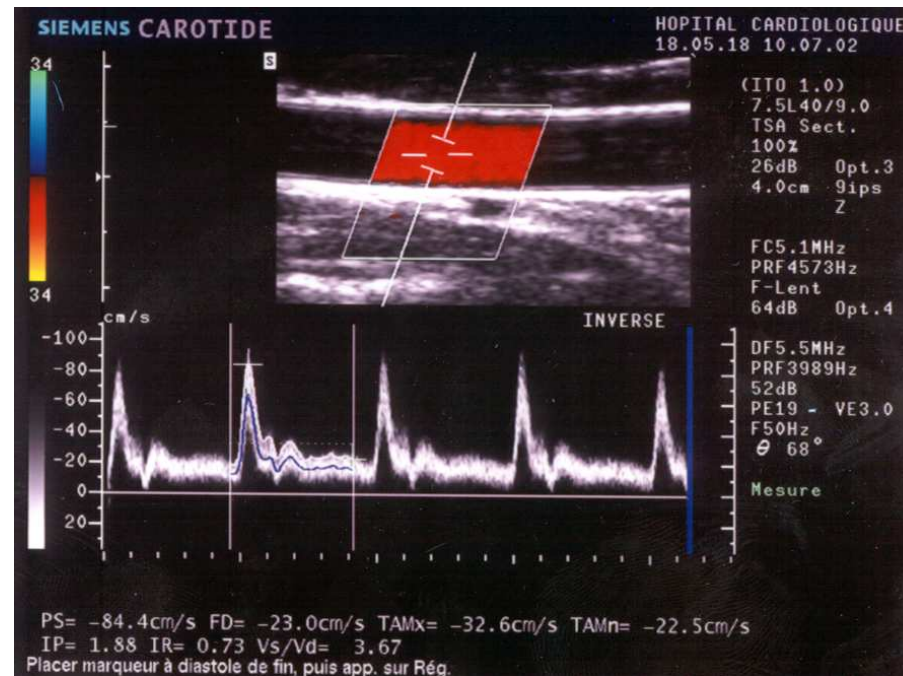
les flux se dirigeant vers la sonde sont visualisés en rouge

les flux s'éloignant de la sonde en bleu.

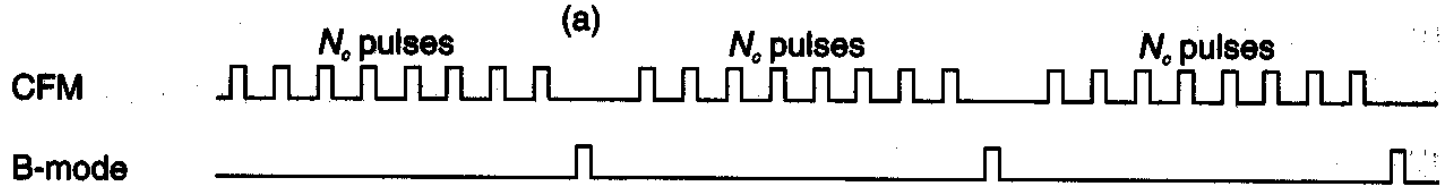
Doppler couleur

Deux types différents d'émission ultrasonore sont nécessaires:
l'un pour obtenir l'image B en échelle de gris,
l'autre pour obtenir le décalage spatial.

La fréquence "Doppler" est calculée sur la moyenne de 15 à 16 tirs

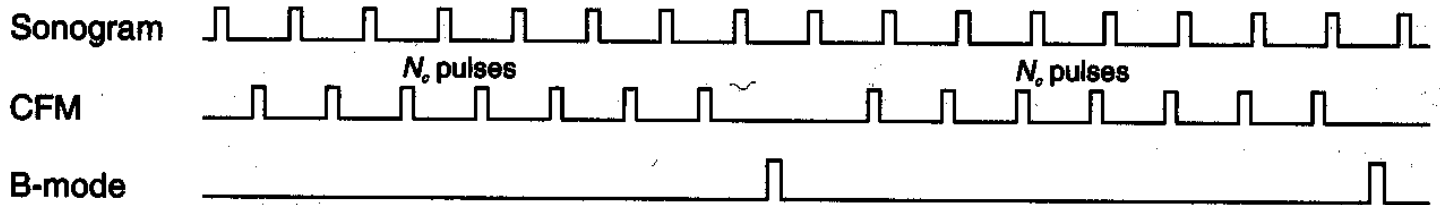


Duplex B-mode and CFM Imaging

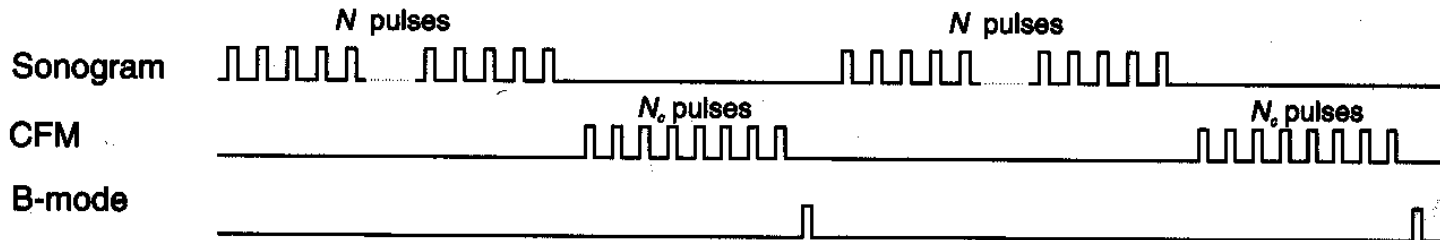


Triplex imaging

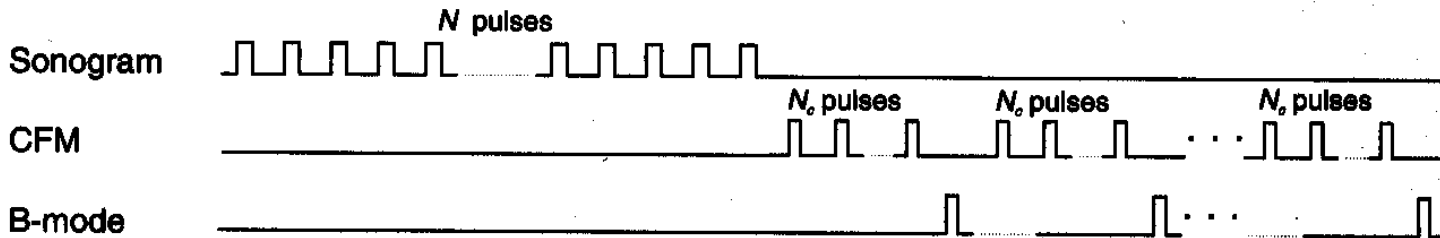
(b) Low f_{prt} pulsing, low depth



(c) High f_{prt} pulsing



(d) Low f_{prt} pulsing, large depth



Les facteurs techniques sources d'erreurs

La vitesse de la cible est fonction :

de la fréquence Doppler,

de la fréquence d'émission,

de la célérité des ultrasons dans le corps humain

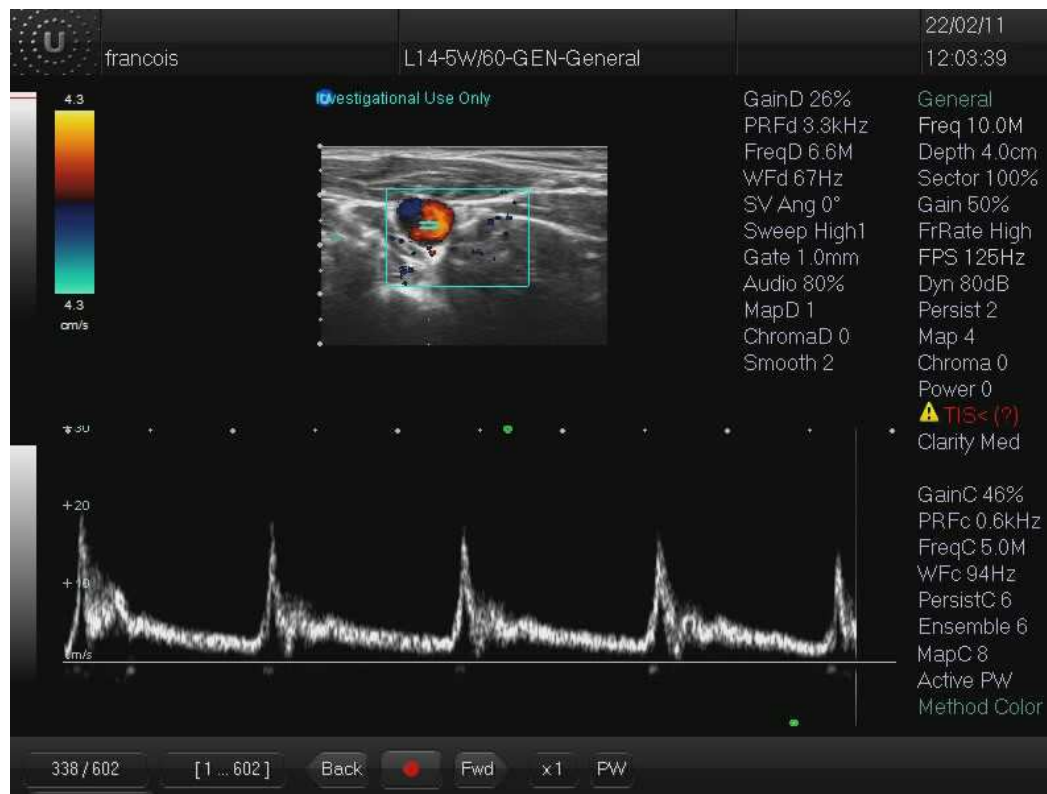
de l'angle formé entre la direction de déplacement de la cible et le faisceau ultrasonore.

$$F = -2f_e \frac{v}{c} \cos \theta_e$$

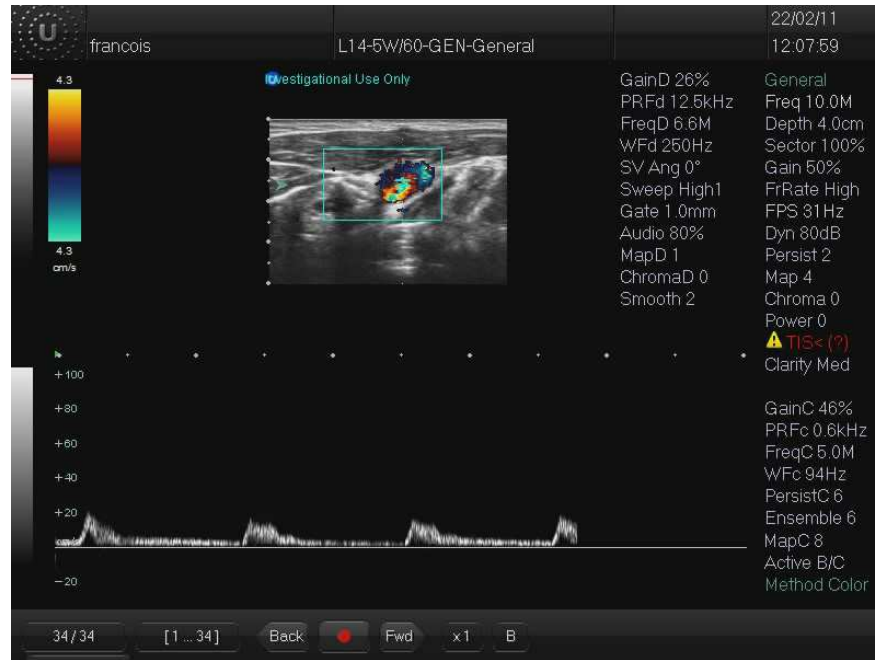
L'erreur commise sur la valeur de chacun de ces paramètres se retrouve directement sur l'estimation de la vitesse.

L'échelle de vitesses

- La vitesse minimale est fixée par le choix de la fréquence de coupure du filtre de paroi.
- en Doppler pulsé la gamme de vitesses est fonction de la PRF.
- plus la PRF est élevée, plus la vitesse maximale mesurable est importante; en cas d'échelle de vitesse insuffisante, il y a un repliement du spectre Doppler.



Résultats obtenues avec une PRF de 3.3 KHz



Résultats obtenues avec une PRF de 12.5 KHz

Résultats obtenues avec une PRF de 1.3 KHz

