

EXERCICE 4 : Traitement d'un électrocardiogramme

La propagation de l'activité électrique cardiaque provoque, à la surface du corps, l'apparition de différences de potentiels qui peuvent être enregistrées en différents points de référence. C'est un électrocardiogramme (noté ECG). La figure 1 présente un exemple classique ; les potentiels sont relevés par des électrodes placées sur les poignets du patient. La chaîne d'acquisition et de traitement est présentée en figure 2. Des électrocardiogrammes, issus de ce traitement, sont présentés en figure 3. Ils servent au diagnostic médical.

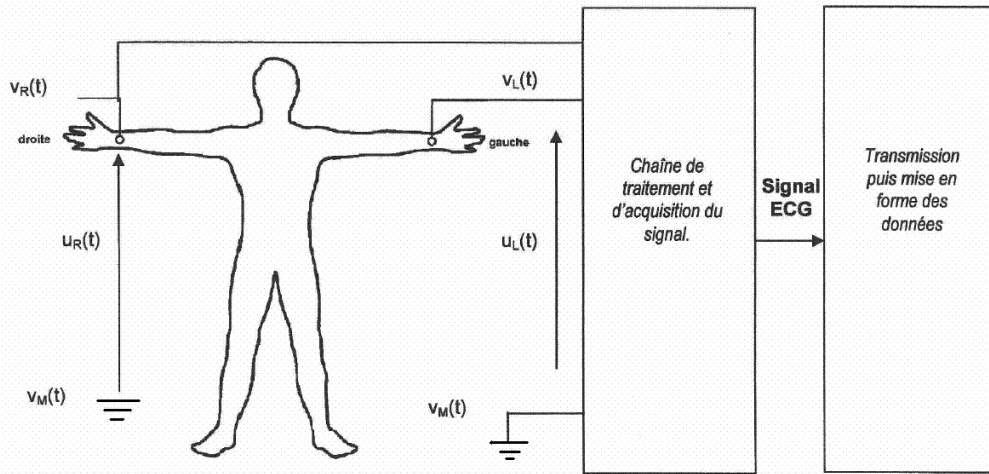


Figure 1 : principe de mesure et reproduction d'un ECG.

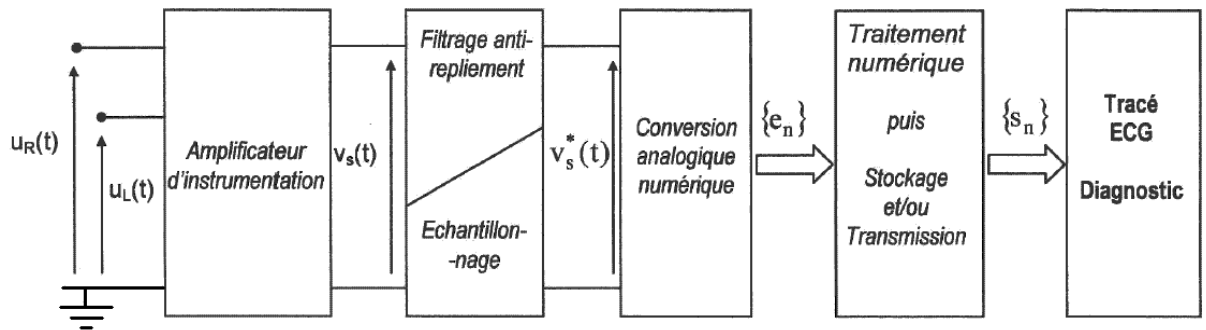


Figure 2 : schéma synoptique d'acquisition et de traitement du signal ECG.

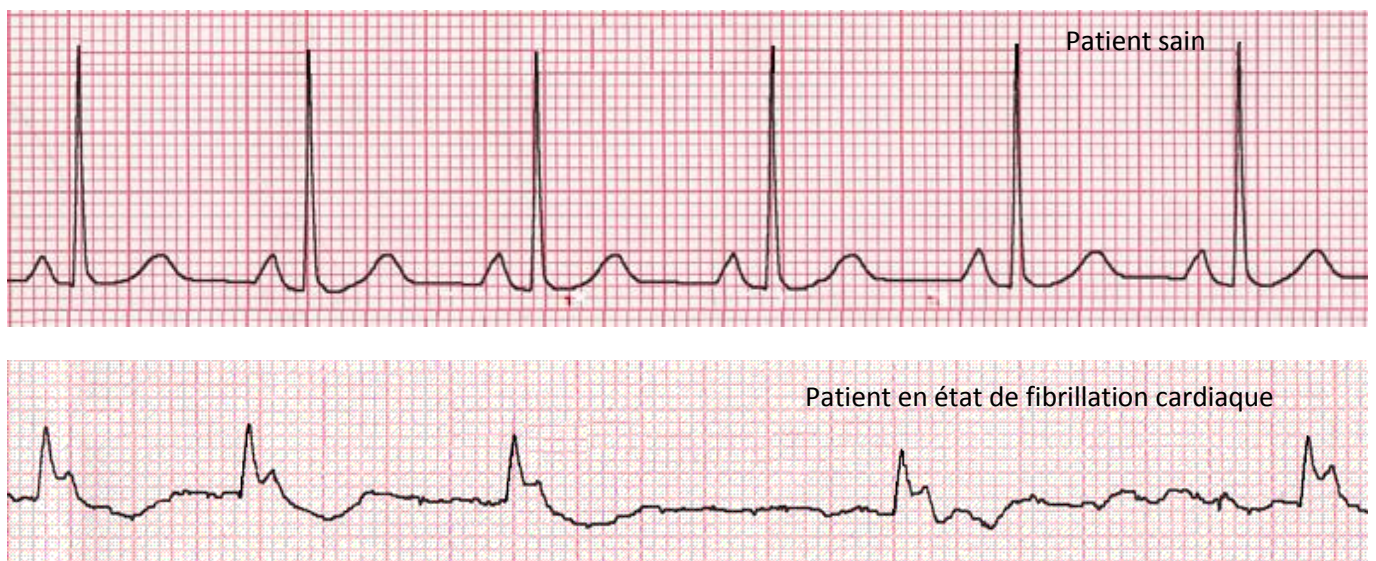


Figure 3 : tracés d'électrocardiogrammes à partir de $\{s_n\}$.

Sur la figure 2, le signal $v_s(t)$ est une image amplifiée et débruitée de l'activité cardiaque réelle. Dans cet exercice, on mettra en évidence quelques précautions à prendre sur les fonctions filtrage, échantillonnage et traitement pour que $\{s_n\}$ soit fidèle à $v_s(t)$ et donc fidèle à l'activité cardiaque réelle. Le tracé temporel de $v_s(t)$ est donné en figure 4.

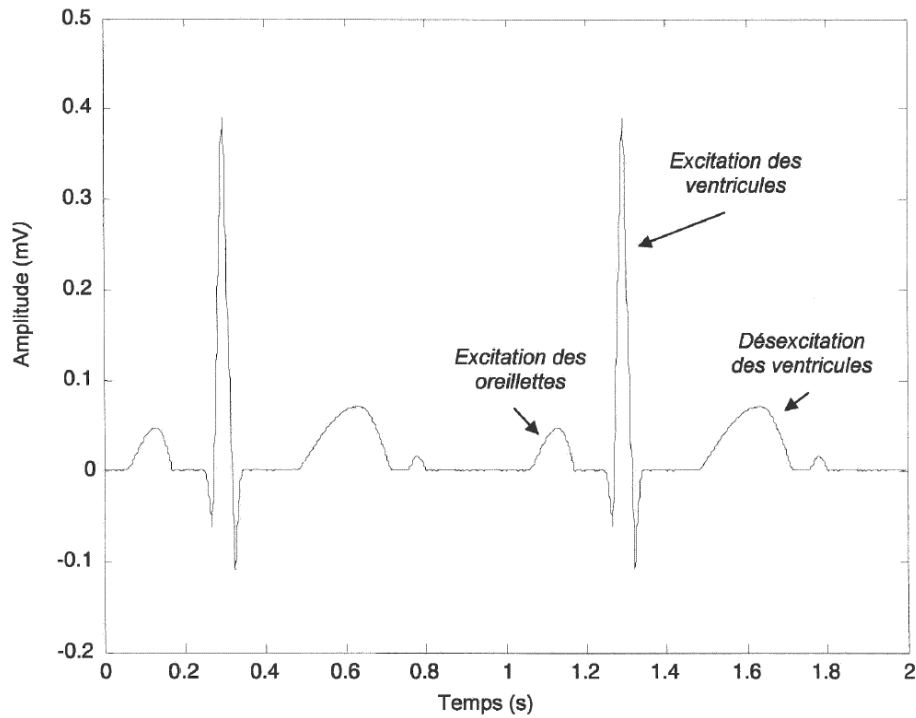


Figure 4 : $v_s(t)$, image de l'activité cardiaque réelle.

A – Choix de la fréquence d'échantillonnage.

A-1 A l'aide de la figure 4, relever la fréquence de l'activité cardiaque. Exprimer cette fréquence en battements du cœur par minutes.

A-2 Comparer cette fréquence à celle de la première raie du spectre de $v_s(t)$ représenté en figure 5. Quel nom particulier donne-t-on à cette fréquence ?

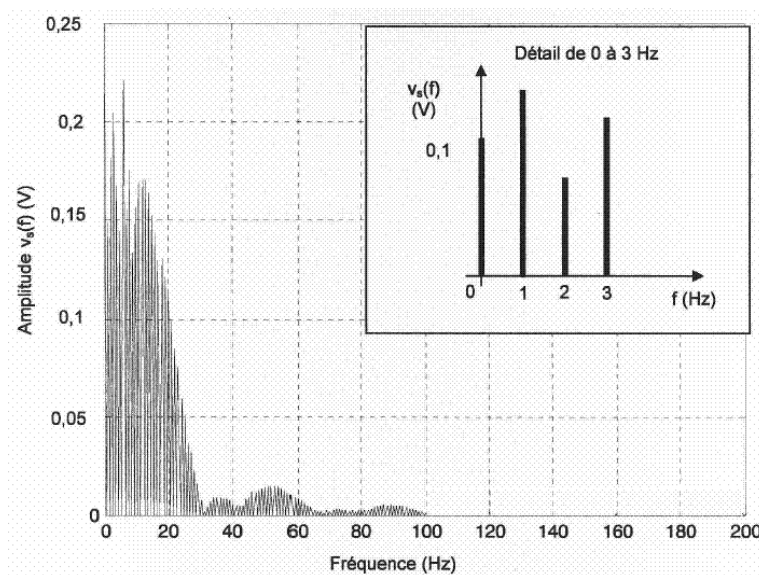


Figure 5 : spectre d'amplitude de $v_s(t)$.

A-3 D'après la condition de Shannon, donner la fréquence minimale d'échantillonnage F_{emin} de $v_s(t)$ pour que $\{s_n\}$ puisse reproduire l'activité cardiaque sans altération.

B – Conséquences d'une prise d'échantillon sans filtre anti-repliement.

La fréquence d'échantillonnage retenue est $F_e = 448$ Hz. On considère deux harmoniques parasites, issus de la tension secteur, de fréquence $f_1 = 150$ Hz et $f_2 = 400$ Hz. On donne figure 6 et figure 7 l'effet de l'échantillonnage sur l'analyse spectrale de v_s polluée par les deux harmoniques retenus.

B-1 Les fréquences f_1 et f_2 respectent-elles la condition de SHANNON ?

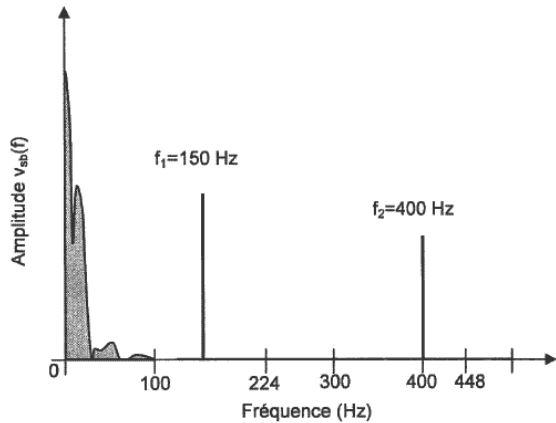


Figure 6 : spectre d'amplitude de la tension v_s polluée avant échantillonnage.

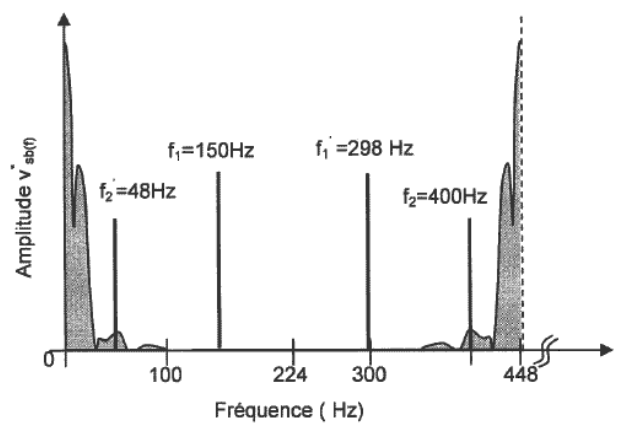


Figure 7 : spectre d'amplitude de la tension v_s polluée après échantillonnage.

B-2 A partir du spectre de la figure 7, sera-t-il possible de reconstruire une image fidèle de l'activité cardiaque ?

C – Filtrage anti-repliement.

On admet que la composante d'un signal est éliminée par le filtrage lorsque son amplitude est atténuée dans un rapport de 100.

C-1 .Calculer la valeur du gain en dB correspondant à une telle atténuation.

On donne en figure 8 les courbes de gain de filtres analogiques de Butterworth d'ordre 1, 4 et 12 avec une fréquence de coupure à -3 dB de 100 Hz.

C-2 Parmi ces trois filtres, préciser ceux à retenir pour obtenir une atténuation supérieure à 100 à la fréquence de 400 Hz. Justifier cette précaution.

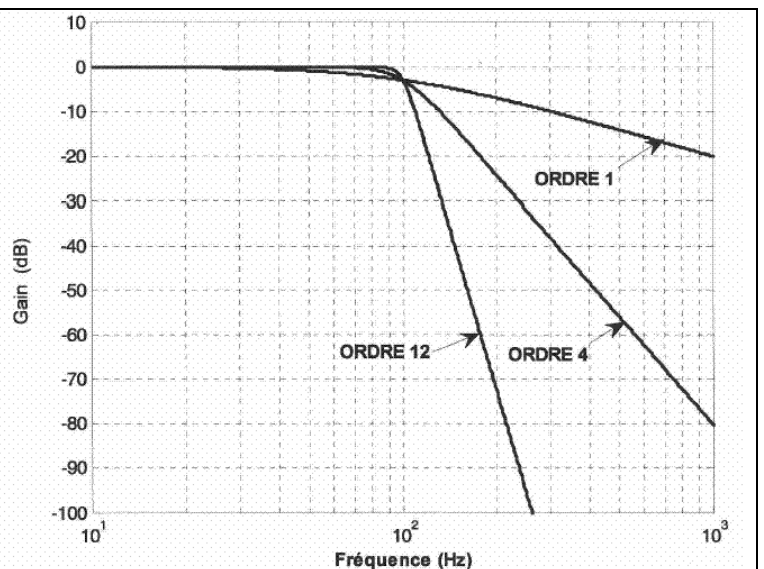


Figure 8 : gain de filtres de Butterworth.

C-3 Relever le gain du filtre d'ordre 4 à la fréquence f_1 de 150 Hz. Cette composante parasite est-elle éliminée par ce filtre anti-repliement

D – Traitement numérique.

Afin de débarrasser le signal utile des signaux parasites non éliminés par le filtre anti-repliement, le dispositif a recours au filtrage numérique. Ce traitement, réalisé par des circuits spécialisés dans le traitement du signal, permet d'obtenir des performances irréalisables en analogique. En figure 9, T_e est la période de l'horloge de cadencement de l'unité de traitement dédiée au filtrage numérique.

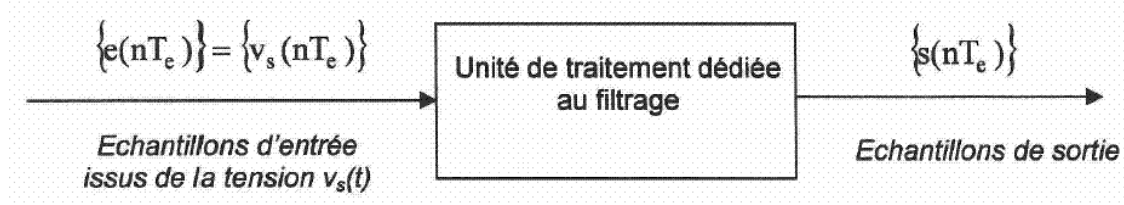


Figure 9 : schéma synoptique du filtre numérique.

On propose deux filtres caractérisés par leur équation de récurrence.

Pour le filtre 1 : $s(nT_e) = \sum_{k=0}^n a_k \cdot e([n-k]T_e)$ [les termes a_k sont des réels, coefficients du filtre].

Pour le filtre 2 : $s(nT_e) = \sum_{k=0}^n c_k \cdot e([n-k]T_e) + \sum_{k'=1}^n b_{k'} \cdot s([n-k']T_e)$ [les termes c_k et $b_{k'}$ sont des réels, coefficients du filtre].

D-1 Quel est le filtre récursif et quel est le filtre non récursif ? Justifier.

La figure 10 donne les réponses fréquentielles d'un filtre RIF à 60 coefficients symétriques et d'un filtre RII à 20 coefficients.

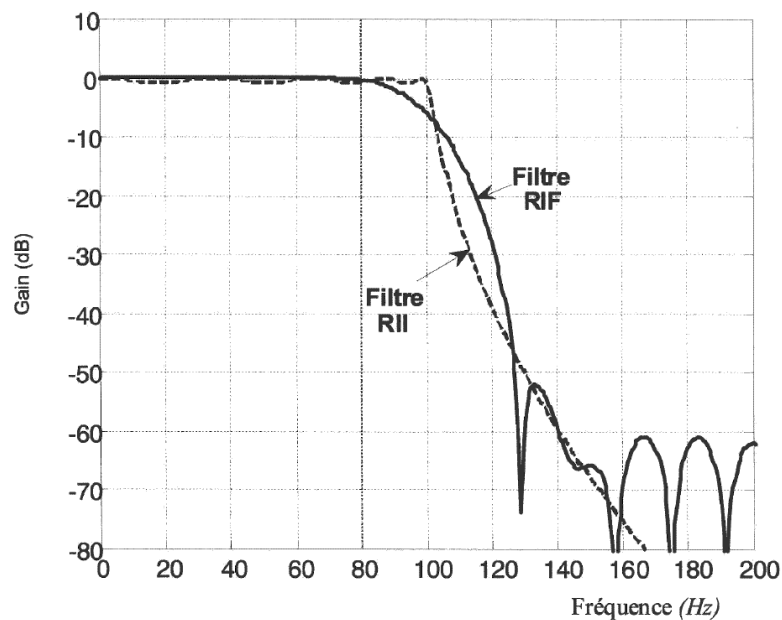


Figure 10 : courbes de gain d'un filtre RII et d'un filtre RIF.

D-2 Relever le gain à la fréquence $f_1 = 150$ Hz de ces deux filtres. Une composante à cette fréquence est-elle maintenant éliminée ?

Etude d'un cas particulier : les capacités de calcul des processeurs sont telles que les deux structures peuvent être envisagées. On se propose maintenant de comparer les performances de ces filtres pour des signaux dont le

spectre est contenu dans leur bande passante. Pour cela, on isole deux harmoniques significatifs du spectre de $v_s^*(t)$, de fréquence $f_3 = 10$ Hz et $f_4 = 20$ Hz. Les figures 11 et 12 donnent les réponses temporelles des filtres pour ces deux harmoniques.

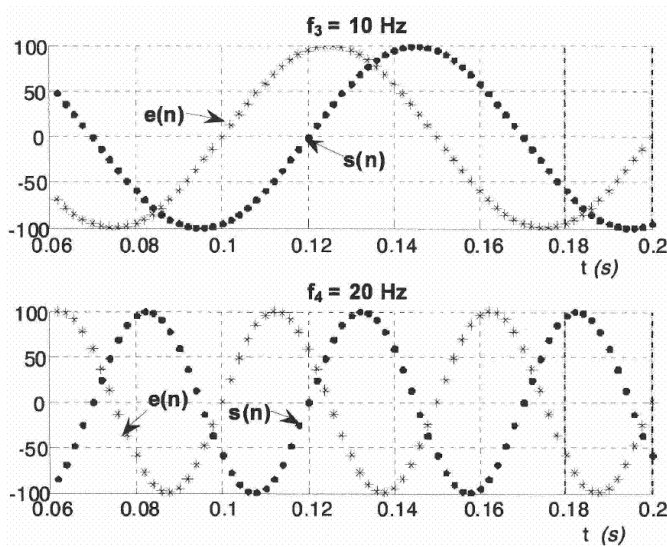


Figure 11 : réponses temporelles du filtre RIF à 10 Hz et 20 Hz.

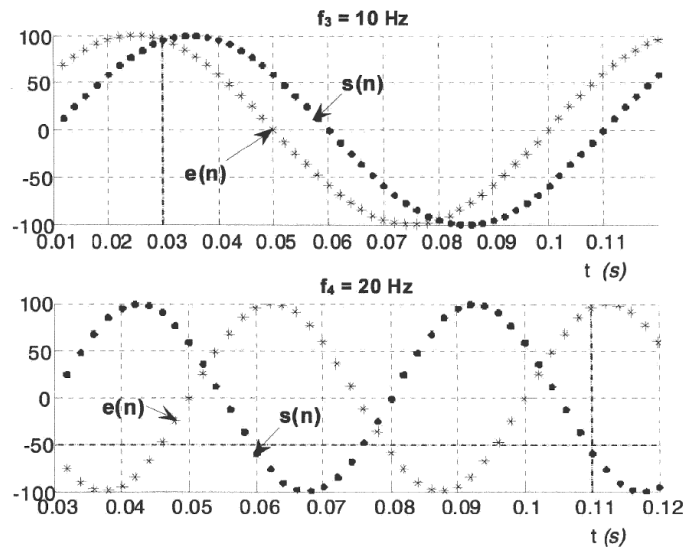


Figure 12 : réponses temporelles du filtre RII à 10 Hz et 20 Hz.

On appelle ϕ le déphasage en radians du signal de sortie par rapport au signal d'entrée et Δt le retard en secondes du signal de sortie par rapport au signal d'entrée.

D-3 Exprimer une relation entre ϕ , Δt et ω (pulsation des signaux).

D-4 Compléter le document réponse proposé ci-dessous.

		Filtre RIF		Filtre RII	
		Retard Δt (s)	Déphasage ϕ (rd)	Retard Δt (s)	Déphasage ϕ (rd)
Fréquence de l'harmonique	$f_3 = 10$ Hz				
	$f_4 = 20$ Hz				

D-5 Que remarque-t-on du retard temporel Δt introduit par le filtre RIF ? Qu'en est-il du retard introduit par le filtre RII ?

On relève la sortie $s(nT_e)$ des filtres RIF et RII pour l'entrée $e(nT_e) = A.\sin(2\pi.f_3.nT_e) + B.\sin(2\pi.f_4.nT_e)$. Les résultats sont reportés en figure 13.

D-6 Comparer les formes des trois signaux.

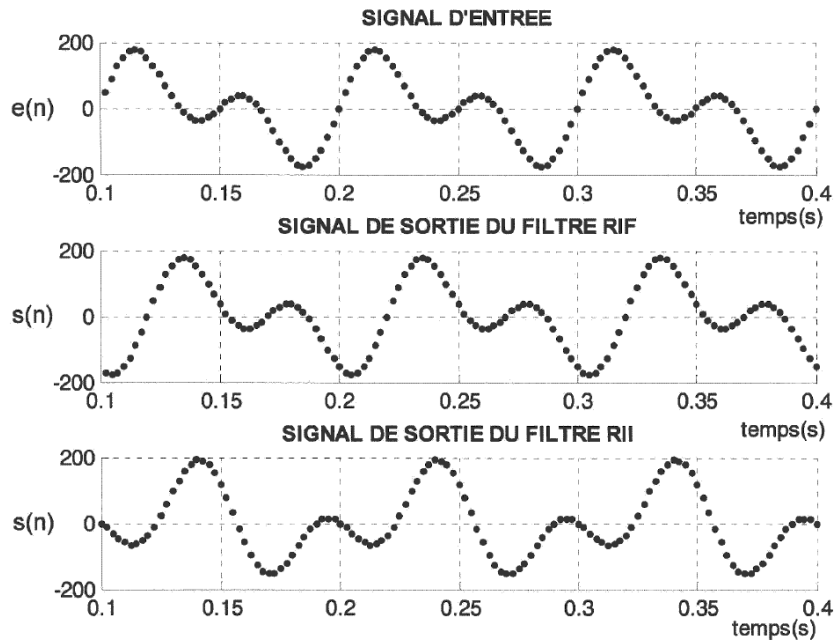


Figure 13 : réponses temporelles des deux filtres

Cas général : les courbes de phase pour les deux filtres numériques sont données en figure 14.

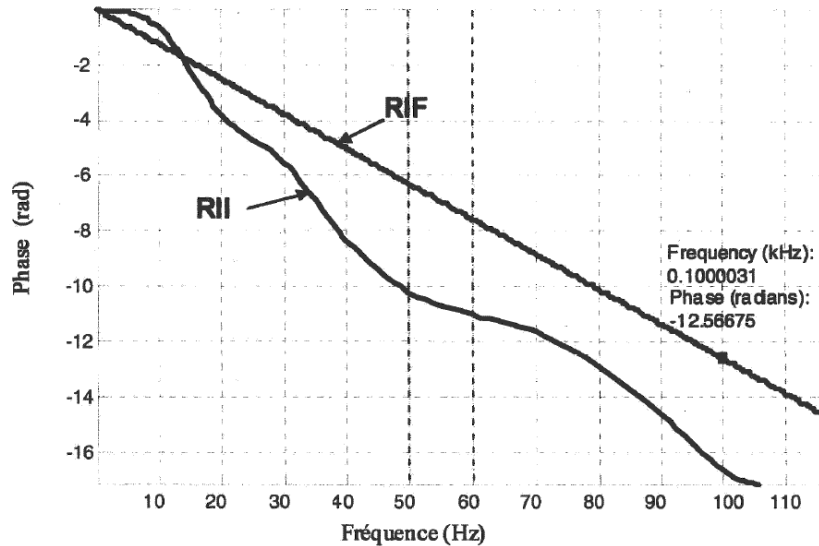


Figure 14 : courbes de phase des filtres étudiés.

D-7 Un des deux filtres peut être dit « à phase linéaire ». Pourquoi ?

D-8 Pour le filtre à phase linéaire, trouver la relation numérique liant la phase ϕ et la fréquence f .

D-9 Déduire alors le retard introduit par le filtre à phase linéaire entre les signaux d'entrée et de sortie.

D-10 Conclusion : au regard des résultats de cette partie D, quel filtre convient-il de choisir pour le filtrage numérique du signal ECG ?