



Relevé d'électrocardiogramme

La contraction du muscle cardiaque est commandée par un signal électrique qui prend naissance dans l'oreillette droite et se propage aux ventricules le long de nerfs appelés faisceau de Hiss

Ce signal électrique appelé ECG(électrocardiogramme) peut être capté au niveau de la peau par 2 électrodes placées sur la poitrine ou sur les bras.

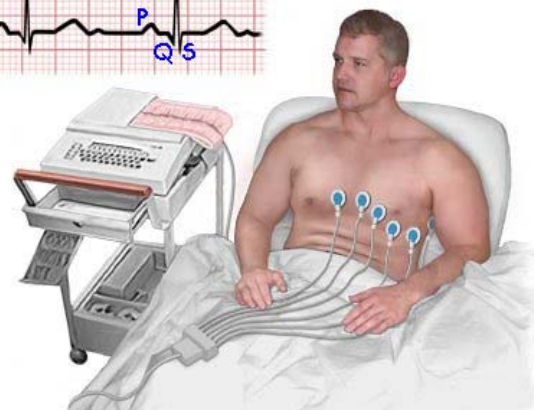
Le signal ECG est constitué d'impulsions de forme particulière :

onde P : contraction des oreillettes, le sang est chassé dans les ventricules

onde QRS : contraction des ventricules, le sang est chassé vers les poumons (cœur droit) et vers les organes (cœur gauche)

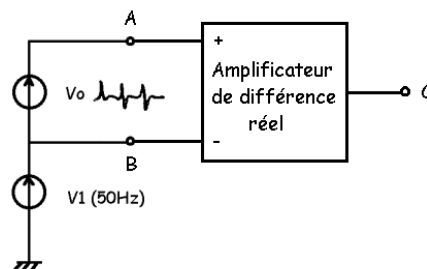
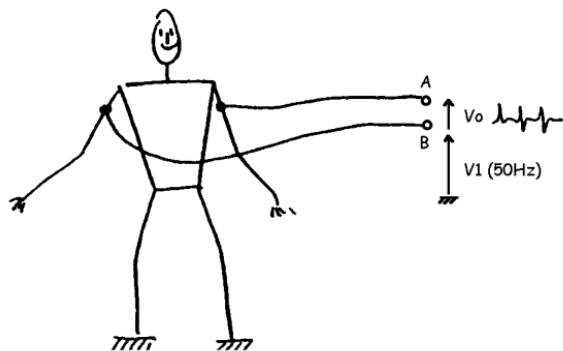
la fréquence fondamentale $f = 1/T$ ou rythme cardiaque est de l'ordre $f \approx 1 \text{ Hz}$

le signal recueilli est faible ($V_0 = 1 \text{ mV}$ crête environ) et très fortement perturbé par le 50 Hz du secteur



Pour s'affranchir du 50 Hz parasite, l'ECG est recueilli par un amplificateur de différence : $v_c(t) = A_d \cdot v_0(t) + A_c \cdot v_1(t)$

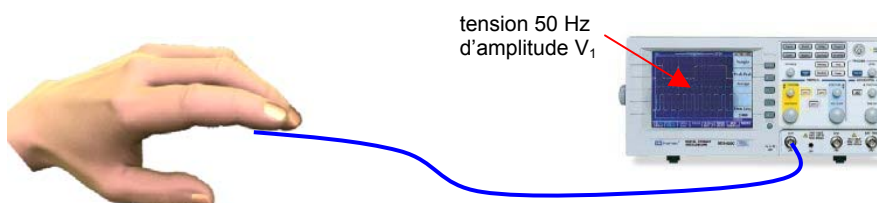
- le coefficient A_d est appelé amplification différentielle
- le coefficient A_c est l'amplification de mode commun ($A_c = 0$ pour un ampli parfait, $A_c \ll A_d$ pour un bon ampli)



Sachant que le signal parasite $v_1(t)$ à 50 Hz a une amplitude bien plus forte que le signal du $v_0(t)$ du cœur, il faut pour relever l'ECG un amplificateur ayant une amplification de mode commun la plus faible possible.

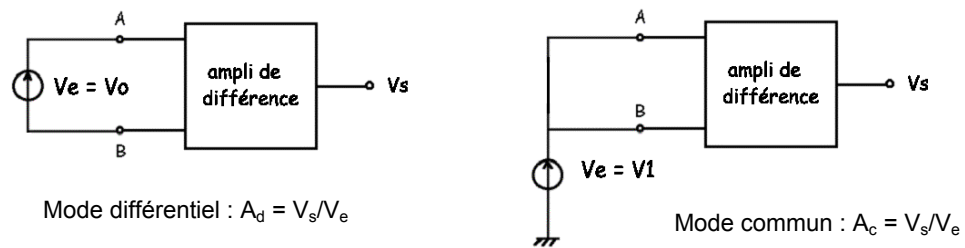
Activité 1 : caractérisation de l'amplificateur de différence

En touchant l'entrée de l'oscilloscope avec la main sans relier de masse, mesurer la tension de mode commun V_1 maximale qu'on peut avoir sur la peau.



On recherchera la situation qui donne un signal parasite maximal (sans aller jusqu'à mettre le doigt dans une prise 220V !).

On désire avoir en sortie de l'amplificateur un signal cardiaque de valeur 1V crête et un signal parasite à 50 Hz limité à une amplitude de 50 mV. Calculer les amplifications A_d du signal V_0 (cœur) et A_c du signal V_1 (50Hz) qu'il faudrait pour cela.

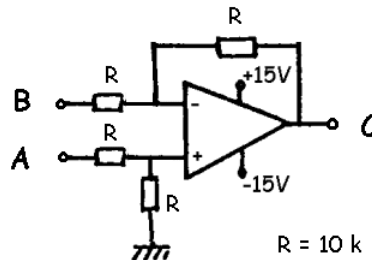


On définit le taux de réjection du mode commun d'un amplificateur de différence par : $T_{RMC} = 20 \cdot \log\left(\frac{A_d}{A_c}\right)$

En déduire le taux de réjection de mode commun minimal T_{RMC} que devrait avoir l'amplificateur de différence pour pouvoir relever correctement l'ECG.

Activité 2 : TRMC d'un amplificateur opérationnel

Une première solution envisageable est un montage soustracteur à AOp selon le schéma suivant :



Donner l'expression de la tension de sortie en fonction de v_A et v_B et en déduire les valeurs théoriques des amplifications différentielle et de mode commun A_{d1} et A_{c1} .

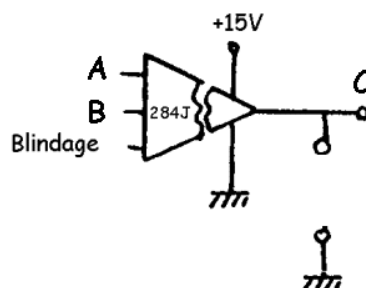
Brancher un GBF entre A et B et mesurer l'amplification différentielle A_{d1} à 50 Hz. Relier les entrées A et B et mesurer l'amplification en mode commun A_{c1} à 50 Hz en injectant un signal entre ce point A-B et la masse.

En déduire le T_{RMC1} de ce montage à 50 Hz. Ce montage peut-il convenir pour faire le relevé de l'ECG ?

Activité 3 : TRMC de l'amplificateur isolé 284J

Pour avoir une meilleure réjection du 50 Hz, on utilise un amplificateur isolé 284J de Analog Devices dont le circuit d'entrée est complètement isolé ou flottant par rapport à la masse (voir **Annexe 1**). Il est caractérisé par :

- amplification différentielle réglable entre 1 et 10 (câblé pour $A_d = 10$ sur la maquette)
- taux de réjection en mode commun pouvant aller jusqu'à 110 dB
- tension d'isolement 2500 V continu et courant de fuite très faible (inférieur à $2\mu A$)
- résiste à des pics de tension pouvant aller jusqu'à 6500V (réanimation par défibrillateur voir **Annexe 2**)



Comme dans l'activité 2, mesurer les amplifications différentielle A_{d2} et en mode commun A_{c2} à 50 Hz. En déduire le T_{RMC2} de ce montage à 50 Hz. Ce montage peut-il convenir pour faire le relevé de l'ECG ?

Activité 4 : caractérisation de l'amplificateur isolé 284J

Brancher un GBF entre les entrées A et B et mesurer les paramètres T_0 et f_0 de la transmittance $\underline{T}(jf)$ de l'amplificateur isolé 284J :

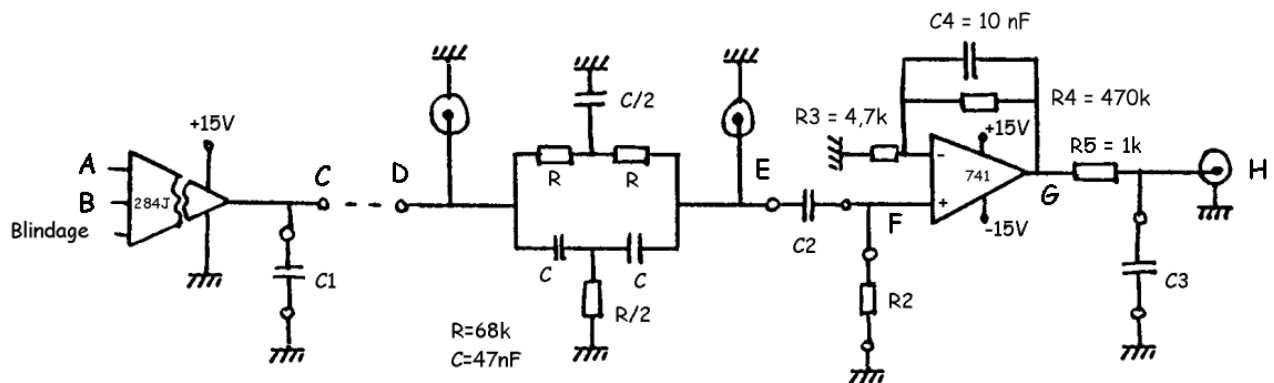
$$\underline{T}(jf) = \frac{T_0}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$

A une fréquence de l'ordre de 500 Hz, faire une mesure de niveau de sortie à vide, puis avec une charge de $1k\Omega$. En déduire la valeur de la résistance de sortie R_s du 284J et dessiner le schéma équivalent de l'amplificateur.

Activité 5 : limitation de bande du 284J

Pour ne pas déformer le signal, on s'impose de passer une trentaine d'harmoniques. Quelles devront être les fréquences de coupure basse f_b et haute f_h de la chaîne de mesure ?

Le schéma complet de la chaîne est le suivant :



On branche un condensateur $C1 = 4,4\mu F$ en sortie du 284J. Calculer alors la fréquence de coupure f_1 de l'étage amplificateur à 284J et donner l'expression de la transmittance $\underline{T}_1(jf)$ du premier étage. Est-elle compatible avec la bande passante souhaitée ?

Activité 6 : caractérisation du filtre réjecteur

L'étage entre D et E est un réjecteur à double T qui élimine le résidu de 50 Hz que l'amplificateur isolé n'a pas pu supprimer.

Sa transmittance s'écrit :

$$\underline{T}_2(jf) = \frac{1 - \frac{f^2}{f_2^2}}{1 + 4j \frac{f}{f_2} - \frac{f^2}{f_2^2}} \quad \text{avec} \quad f_2 = \frac{1}{2\pi RC}$$

Calculer la valeur numérique de la fréquence propre f_2 et de l'amortissement m . Que vaut la transmittance à $f = f_2$?

A l'aide du logiciel Bode, simuler ce filtre et tracer sa courbe de réponse.

Activité 7 : caractérisation du filtre R2,C2

Donner la transmittance $\underline{T}_3(j\omega)$ du filtre entre E et F constitué par R_2 et C_2 . Pour ne pas trop charger ce réjecteur, on prendra $R_2 = 150k\Omega$. Calculer alors C_2 pour que ce filtre ait une fréquence de coupure de $f_3 = 1\text{Hz}$.

Activité 8 : caractérisation de l'étage à amplificateur opérationnel

La transmittance $\underline{T}_4(j\omega)$ de l'étage à amplificateur opérationnel (entre F et G) se met sous la forme :

$$\underline{T}_4(jf) = T_{40} \frac{1 + j \frac{f}{f_4}}{1 + j \frac{f}{f_5}} \quad \text{avec } T_{40} = 1 + \frac{R_4}{R_3}, \quad f_4 = \frac{R_3 + R_4}{2\pi R_3 R_4 C_4} \quad \text{et} \quad f_5 = \frac{1}{2\pi R_4 C_4}$$

Calculer les fréquences des deux cassures f_4 et f_5 . Que vaut l'amplification du filtre aux basses-fréquences ? quelle est sa fréquence de coupure ? est-elle compatible avec la bande passante désirée ?

A l'aide du logiciel Bode, simuler ce filtre et tracer sa courbe de réponse.

Sachant que la gamme de fréquences utiles est telle que $f \ll f_4$, proposer une simplification pour $\underline{T}_4(jf)$.

Activité 9 : caractérisation du filtre R5,C3

Sachant que $C3 = 4,4\mu\text{F}$, calculer la fréquence de coupure f_6 de la dernière cellule entre G et H et donner l'expression de sa transmittance $\underline{T}_5(jf)$.

Activité 10 : courbe de réponse de la chaîne de mesure

En utilisant toutes les expressions des différents étages, donner l'expression de la transmittance $\underline{H}(jf)$ de la chaîne de mesure complète (sans la développer).

La transmittance de Laplace de la chaîne complète développée s'écrit :

$$\underline{H}(p) = \frac{A.p^4 + B.p^3 + C.p^2 + D.p}{p^6 + E.p^5 + F.p^4 + G.p^3 + H.p^2 + I.p + J} \quad \text{avec}$$

- A = 1,05648.E+6
- B = 6,63469.E+9
- C = 1,04165.E+11
- D = 6,54154.E+14
- E = 1829
- F = 9,29210.E+5
- G = 2,02930.E+8
- H = 2,02674.E+10
- I = 7,84134.E+11
- J = 4,17388.E+12

A l'aide du logiciel Bode, tracer la courbe de réponse de la chaîne de mesure complète (on prendra les échelles suivantes : de 10^{-2} Hz à 10^3 Hz / de -20 dB à $+60$ dB)

Sur la courbe de gain de la chaîne obtenue par simulation, placer les asymptotes correspondant à la transmittance $\underline{H}(jf)$.

Brancher un GBF à l'entrée de la chaîne de mesure et relever quelques valeurs de gain en les plaçant sur la courbe obtenue par simulation. Conclure.

Activité 11 : relevé de l'électrocardiogramme

On remplace maintenant le GBF par les deux électrodes placées sur les bras (biceps) en intercalant une goutte de produit de contact.

Observer à l'oscilloscope et enregistrer l'ECG avant puis après un effort et déterminer dans chaque cas le rythme cardiaque en battements/minute.

Annexe 1 : caractéristiques de l'amplificateur isolé

Dans le cas de très fortes tensions de mode commun (>2kV) ou de tensions de mesure très faibles (<mV), on est amené à utiliser des amplificateurs d'isolement.

L'étage d'entrée n'est plus relié à la masse du montage mais il est « flottant » :

- la tension d'alimentation lui parvient par l'intermédiaire d'un transformateur
- le signal mesuré est haché et transmis à la sortie de l'ampli par une second transformateur

Une isolation « physique » est ainsi réalisée entre l'entrée différentielle et la sortie, grâce à laquelle le composant peut à la fois résister aux fortes tensions (défibrillateurs) et être insensible au 50 Hz.

Amplificateur 284J

GAIN (NONINVERTING)

Range	1 to 10V/V
vs. Temperature, G = 1V/V	$\pm 75\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Nonlinearity	$\pm 0.05\%$

INPUT VOLTAGE RATINGS

Linear Differential Range, G = 1V/V	$\pm 5\text{V min}$
Max Safe Differential Input	
Continuous	240V rms max
Pulse, 10ms Duration, 1 Pulse/10sec	$\pm 6500\text{V pk max}$
Max CMV, Inputs to Outputs	
ac, 60Hz, One Minute Duration	2500V rms max
Continuous Operation	$\pm 2500\text{V pk max}$
CMR, Inputs to Outputs, 60Hz	
Balanced Source Impedance	114dB

MAX LEAKAGE CURRENT

Inputs to Pwr Com @ 115V ac, 60Hz	2.0 $\mu\text{A rms max}$
-----------------------------------	---------------------------

OFFSET VOLTAGE, REFERRED TO INPUT

Initial, @ +25°C	$\pm (5 \pm 20/G)\text{mV max}$
vs. Temperature, G = 100V/V	$\pm 35\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (G = 10V/V)

INPUT IMPEDANCE

Differential	$10^8\Omega \parallel 70\text{pF}$
Overload	300k Ω

INPUT DIFFERENCE CURRENT

Initial, @ +25°C	+ 7nA max
vs. Temperature	$\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}$

INPUT NOISE, GAIN = 100V/V

Voltage, 0.01Hz to 10Hz	8 $\mu\text{V pk-pk}$
Voltage, 10Hz to 1kHz	10 $\mu\text{V rms}$

FREQUENCY RESPONSE

Small Signal Bandwidth, -3dB	1kHz
Full Power Response, G = 1V/V	700Hz

ISOLATED POWER SUPPLY

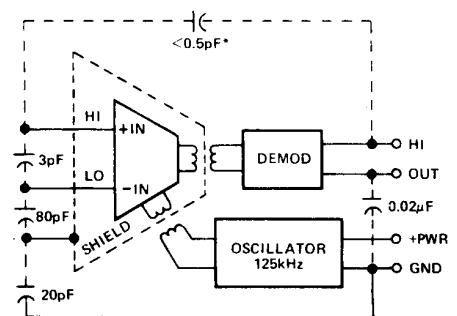
	$\pm 8.5\text{V dc} / \pm 5\text{mA}$
--	---------------------------------------

RATED OUTPUT

Voltage	$\pm 5\text{V min}$
Output Impedance	1k Ω
Max CMV, Output Terminals to Pwr Com	$\pm 50\text{V dc max}$

POWER SUPPLY

Voltage Range, Operating	+ (8.5 to 15.5)V dc
Current, Quiescent	+ 10mA

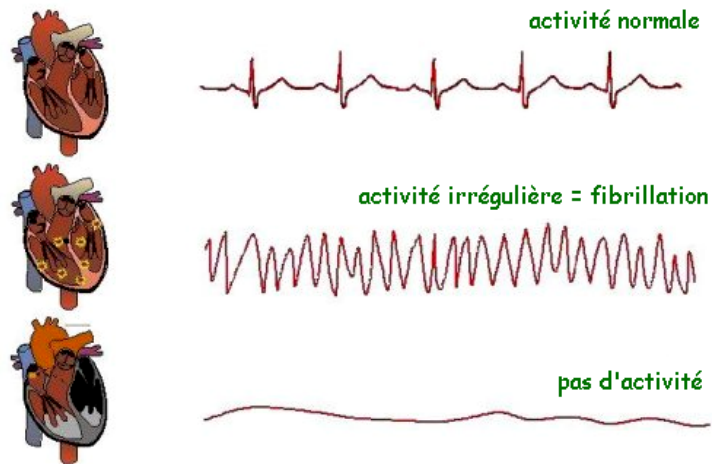


Annexe 2 : réanimation cardiaque par défibrillateur

Suite à une électrisation, à un manque d'oxygène ou à des désordres chimiques (maladie, accident, crise, infarctus) le cœur peut se mettre en état de **fibrillation ventriculaire** : les contractions sont totalement désordonnées, leur activité n'est plus synchronisée.

Il n'y a plus de contraction ordonnée des ventricules mais seulement un tremblement inefficace des parois musculaires.

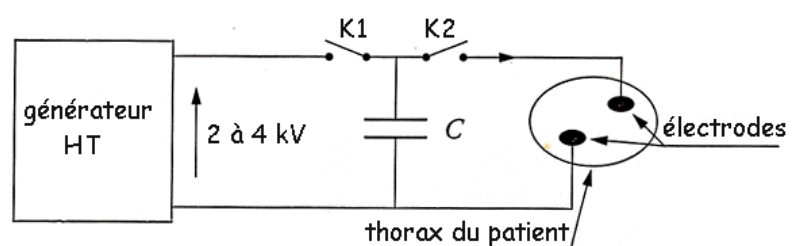
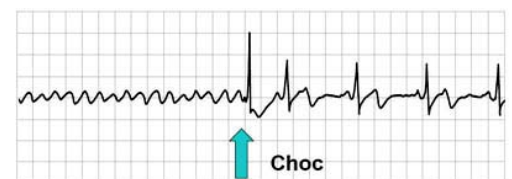
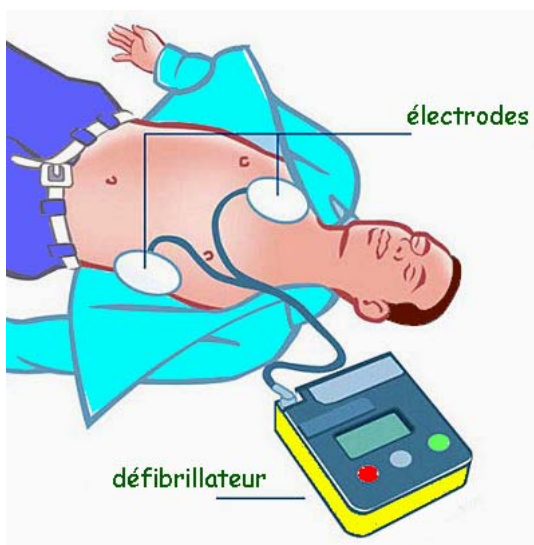
La victime perd immédiatement connaissance puis faute de circulation du sang dans le corps (et donc d'oxygénation des cellules) fini par décéder.



La **défibrillation** consiste à délivrer un **choc électrique** instantané de haute énergie :

- on charge un condensateur sous haute tension (K1 fermé)
- on décharge le condensateur à travers le thorax (K2 fermé)

On réalise ainsi une remise à zéro électrique de toutes les cellules du cœur pour leur permettre de retrouver leur synchronisation initiale.



► Relevé d'électrocardiogramme: réponses

Rédacteur :

Binôme :

Date :

Activité 1 : caractérisation de l'amplificateur de différence

Tension de mode commun relevée : $V_1 = \dots\dots\dots$

⇒ Le signal cardiaque doit passer de $V_0 = 1 \text{ mV}$ à $V_s = 1 \text{ V}$, soit : $A_d = \dots\dots\dots$

⇒ Le signal 50 Hz doit passer de $V_1 = \dots\dots\dots$ à $V_s = 50 \text{ mV}$, soit : $A_c = \dots\dots\dots$

Taux de réjection de mode commun minimal : $T_{RMC} = \dots\dots\dots$

Activité 2 : TRMC d'un amplificateur opérationnel

Valeur théorique du T_{RMC} :

Pour le soustracteur, la tension de sortie s'écrit : $v_c(t) = \dots\dots\dots$

soit : $v_c(t) = A_{d1} \cdot v_0(t) + A_{c1} \cdot v_1(t)$ avec $A_{d1} = \dots\dots\dots$ et $A_{c1} = \dots\dots\dots$

Mesure du T_{RMC} :

⇒ Mesure de A_{d1} : $V_A - V_B = \dots\dots\dots$ $V_c = \dots\dots\dots$ $A_{d1} = \dots\dots\dots$

⇒ Mesure de A_{c1} : $V_A = V_B = \dots\dots\dots$ $V_c = \dots\dots\dots$ $A_{c1} = \dots\dots\dots$

Taux de réjection de mode commun de ce soustracteur : $T_{RMC1} = \dots\dots\dots$

Conclusion :

.....

Activité 3 : TRMC de l'amplificateur isolé 284J

Mesure du T_{RMC} :

⇒ Mesure de A_{d2} : $V_A - V_B = \dots\dots\dots$ $V_c = \dots\dots\dots$ $A_{d2} = \dots\dots\dots$

⇒ Mesure de A_{c2} : $V_A = V_B = \dots\dots\dots$ $V_c = \dots\dots\dots$ $A_{c2} = \dots\dots\dots$

Taux de réjection de mode commun de ce soustracteur : $T_{RMC2} = \dots\dots\dots$

Conclusion :

.....

Activité 4 : caractérisation de l'amplificateur isolé 284J

Amplification aux basses-fréquences : $T_0 = \dots\dots\dots$

Fréquence de coupure : $f_c = \dots\dots\dots$

A 500 Hz, tension de sortie : à vide $V_s = \dots\dots\dots$ en charge $V_s = \dots\dots\dots$

Calcul de la résistance de sortie et schéma équivalent de la sortie du 284J :

Activité 5 : limitation de bande du 284J

Pour traiter le signal et une trentaine de ses harmoniques, il faut une fréquence de coupure :

\Rightarrow basse $f_b = \dots\dots\dots$ \Rightarrow haute $f_h = \dots\dots\dots$

Transmittance $T_1(jf)$ du premier étage :

Fréquence de coupure f_1 de l'étage amplificateur à 284J :

Commentaire :

Activité 6 : caractérisation du filtre réjecteur

Fréquence propre du réjecteur : $f_2 = \dots\dots\dots$

Amortissement du réjecteur : $m = \dots\dots\dots$

Transmittance théorique à $f = f_2$ $T_2(jf_2) = \dots\dots\dots$

\Rightarrow **Diagramme de Bode simulé du filtre** : > voir courbe n°

Commentaire :

Activité 7 : caractérisation du filtre R2,C2

Transmittance $\underline{T}_3(j\omega)$:

Calcul de C2 :

Activité 8 : caractérisation de l'étage à amplificateur opérationnel

Fréquence de la cassures f_4 : $f_4 = \dots\dots\dots$

Fréquence de la cassures f_5 : $f_5 = \dots\dots\dots$

Amplification du filtre aux basses-fréquences :

Fréquence de coupure :

Commentaire :

⇒ Diagramme de Bode simulé du filtre : > voir courbe n°

Transmittance simplifiée :

Activité 9 : caractérisation du filtre R5,C3

Transmittance $\underline{T}_5(jf)$:

Fréquence de coupure f_6 :

Activité 10 : courbe de réponse de la chaîne de mesure

Transmittance $\underline{H}(jf)$ de la chaîne de mesure complète :

$\underline{H}(jf) =$

⇒ **Diagramme de Bode simulé de la chaîne complète** : > voir courbe n°

Comparaison entre courbe simulée et relevés expérimentaux :

.....
.....

Activité 11 : relevé de l'électrocardiogramme

⇒ **Relevé de l'ECG au repos** : > voir courbe n°

période des pulsations cardiaques : $T =$

rythme cardiaque : $F =$ battements / minute

⇒ **Relevé de l'ECG après un effort** : > voir courbe n°

période des pulsations cardiaques : $T' =$

rythme cardiaque : $F' =$ battements / minute

Conclusions :
.....
.....

