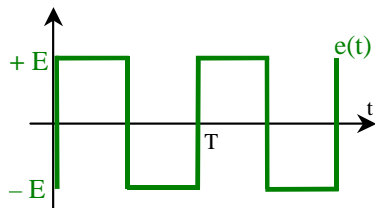


Nom Etudiant-e : .....

Date : .....

**A – Travail Préparatoire.** (activité(s) : étude préparatoire / rédaction - temps maximal = 35 min)

On souhaite filtrer un signal rectangulaire  $e(t)$  (représenté ci-dessous), de valeur crête (ou amplitude)  $E = 2,5V$ , de période  $T = 1ms$ , pour récupérer uniquement sa composante fondamentale.



Sa décomposition en série de Fourier s'écrit :

$$e(t) = \frac{4E}{\pi} \sin(\omega t) + \frac{4E}{3\pi} \sin(3\omega t) + \frac{4E}{5\pi} \sin(5\omega t) + \dots$$

On réalisera, pour cela, **un filtre passe-bas à réponse de Butterworth** (construit à partir d'un circuit à capacités commutées « MF10 » (voir datasheet en ligne) alimenté en +/- 5 V).

A la sortie du filtre, on souhaite que l'amplitude de l'harmonique fondamentale filtrée soit :

- égale à **2,25 V** (condition 1).
- **au moins 100 fois plus grande** que celle des harmoniques suivantes (condition 2).

**Q.1) Calculer** l'atténuation  $A_{\max}$  (en dB) et la fréquence correspondante  $f_p$ , que doit posséder le filtre, pour réaliser la condition 1. **Calculer** l'atténuation  $A_{\min}$  (en dB) et la fréquence correspondante  $f_a$ , que doit posséder le filtre, pour réaliser la condition 2 (voir aussi le Chapitre 3 – page 1).

.....

.....

.....

.....

.....

↳ **Appel n°1**

**Q.2)** On indique qu'un filtre du 4<sup>ème</sup> ordre, dont la fonction de transfert  $H(p)$  suivante, convient :

$$H(p) = \frac{H_0}{\left[1 + \frac{1,8478}{\omega_p} \cdot p + \left(\frac{p}{\omega_p}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \frac{0,7653}{\omega_p} \cdot p + \left(\frac{p}{\omega_p}\right)^2\right]}$$

**Calculer** la valeur à donner à  $H_0$  pour respecter la condition 1. **Vérifier** (par le calcul) que la condition 2 est respectée. **Montrer** que ce filtre peut être réalisé avec 2 cellules (de filtrage) adaptées en impédances et mises en cascade, dont vous préciserez, pour chacune d'elles : fonction, ordre, et valeurs des paramètres caractéristiques (amplification statique, fréquence propre et coefficient d'amortissement - voir aussi le Chapitre 2 – page 7).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**B – Manipulation.**

(activité(s) : simulation / câblage / exploitation de résultats / rédaction - temps maximal = 3h 25min)

**Prise en main du logiciel PSPICE (version 9.2)** (pour accéder à une librairie de composants plus riche).→ Avant de réaliser la saisie du schéma sous le logiciel de simulation « PSPICE »<sup>®</sup> :

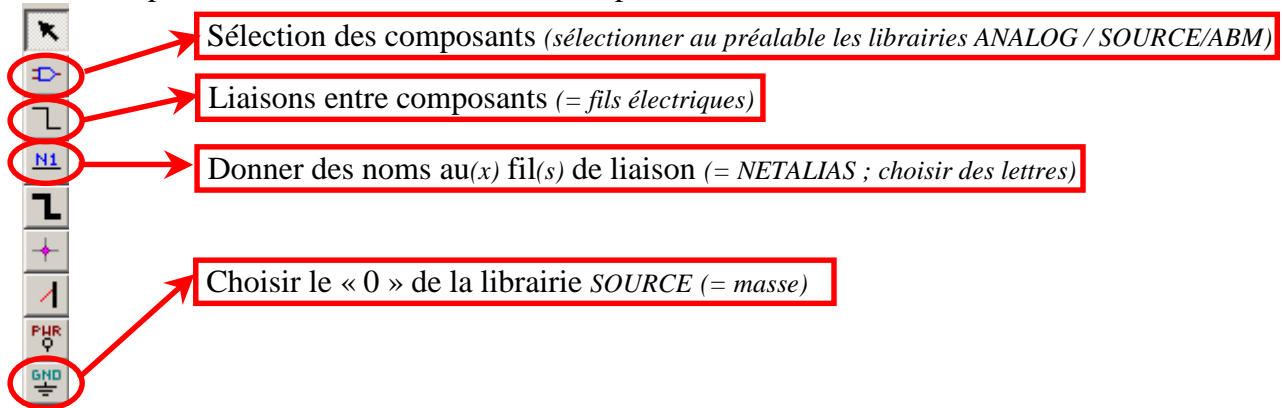
- **Créer** un répertoire « TP2\_nom » sur le bureau du PC ;
- **Lancer** l'application « Capture Lite Edition » (depuis Menu Démarrer – Rechercher) ;
- **Sélectionner** le menu « File → New → Project » ;
- A l'ouverture de la fenêtre « New project » :
  - **donner** un nom (TP2 par exemple),
  - **sélectionner** « Analog or Mixed A/D »,
  - **sélectionner** « Browse » et **retrouver** la racine du répertoire précédemment créé puis **valider** « OK » ;
- A l'ouverture de la fenêtre « Create Pspice project » :
  - **sélectionner** « Create a blank project »,
  - **valider** « OK » : la fenêtre de saisie de schéma est ouverte.

**Attention sous Pspice :**

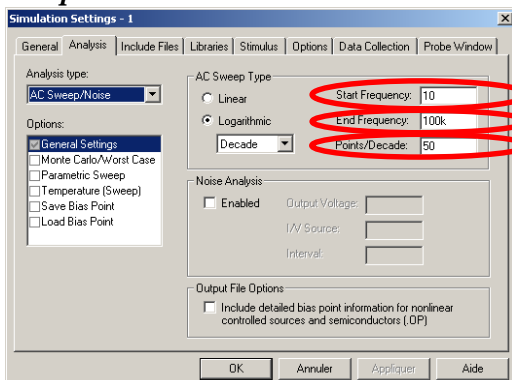
- chaque nom ou valeur s'écrit sans espace entre les caractères,
- les nombres décimaux s'écrivent au format américain (un point à la place de la virgule).

**B.1) Expérience n°1 : vérification du respect du gabarit du filtre à réaliser.**

→ Sur la partie droite de la fenêtre « Orcad Capture - Lite Edition », vous trouverez une barre d'outils :



- La « compilation » du circuit saisi précédent s'effectue avec la fonction du menu « PSpice » → « Create Netlist » (⚡ **Fonction à utiliser à chaque modification du circuit, avant d'effectuer une simulation**).
- **Choisir** et **paramétrer** le générateur VAC (VI), afin qu'il délivre une tension sinusoïdale alternative de 1V efficace. **Choisir** un NETALIAS (**E** sur la sortie du générateur, la masse du générateur étant relié à une masse électrique « 0 »).
- **Choisir** et **paramétrer** 2 blocs LAPLACE mis en cascade, afin que leur fonction laplacienne respective, correspondante aux résultats trouvés en **Q.2**. **Choisir** deux NETALIAS (**SI** sur la sortie du 1<sup>er</sup> bloc de Laplace et **S** sur la sortie du 2<sup>nd</sup> bloc, une résistance de charge de 10kΩ sera placée entre **S** et la masse).
- **Valider** la « compilation » du circuit saisi.
- **Sélectionner** dans le menu « PSpice » → « New Simulation Profil » → **donner** un nom (I par exemple) et **compléter** dans la fenêtre « Simulation Settings » qui apparaît, les valeurs manquantes.



fréquence de début de la simulation  
fréquence de fin de la simulation.  
Pas d'incréméntation fréquentielle de la simulation.

Appliquer et valider « OK ».

→ **Appel n°3**

→ Sur la barre de menus, on observe :



→ **Lancer la phase de simulation.** Une seconde fenêtre s'est ouverte : c'est la fenêtre de simulation !

SCHEMATIC1-1 - PSpice A/D Lite - [tp1-SCHEMATIC1-1.dat (active)]

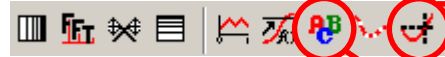
→ A l'ouverture de la fenêtre de simulation « Schematic ... », sur la barre de menus, on observe :



Icône de raccourci pour **afficher des courbes**

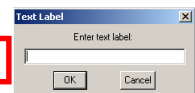
Mesure des caractéristiques fréquentielles des signaux :

A l'aide du menu « Plot » puis « Label » et « Mark » et en utilisant :



Faire des mesures

Entrer du texte



→ Permet de se déplacer sur les courbes (click sur la légende  $DB(x)$  ou  $P(x)$  en bas de fenêtre pour choisir la courbe) et d'effectuer des mesures (dans la fenêtre de dialogue « Probe Cursor » ouverte :  $A1$  = abscisse, ordonnée du point).

→ Un double-click sur une valeur de l'axe des abscisses ou des ordonnées ouvre une fenêtre « Axis Settings » à 4 onglets, permettant d'utiliser les paramètres automatiques (liés au profil de simulation) ou de paramétrer manuellement le calibre des axes et/ou le quadrillage de fond d'écran.

**Pour chaque question, réaliser une copie d'écran de votre circuit et une copie du résultat de votre simulation. En effectuant des mesures, indiquer, pour ces études toutes les mesures utiles.**

**Q.3) Représenter**, sur un document-réponse que vous créerez, la réponse en amplitude et en phase (Diagramme de Bode) de chaque cellule du 2<sup>nd</sup> ordre constituant le filtre à réaliser, ainsi que la réponse du filtre complet. **Préciser**, sur les graphiques, les valeurs remarquables obtenues, correspondantes aux conditions 1 et 2. **Vérifier** que le gabarit du filtre à réaliser répond au cahier des charges.

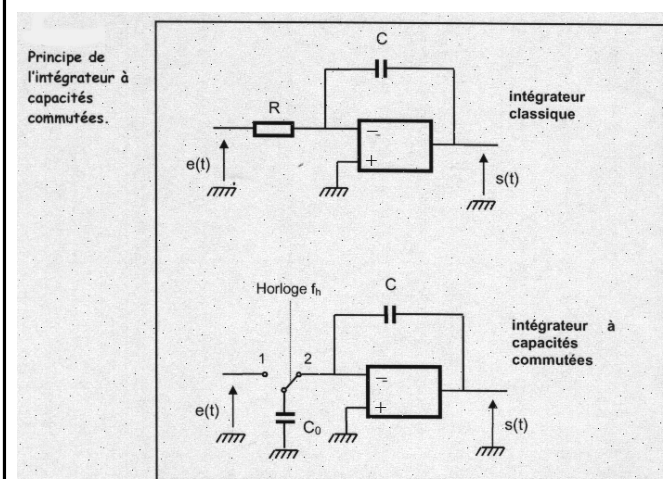
## B.2) Expérience n°2 : Réalisation pratique du filtre à réaliser.

Principe des filtres dit « à commutation ».

L'utilisation de résistances/capacités commutées est particulièrement intéressante pour des cellules (de filtrage) du type **Rauch** et/ou **Sallen-Key** (voir Chapitre 2 – page 11), où il est facile de faire varier de la même façon plusieurs résistances/capacités et donc de réaliser des filtres dont **la fréquence de coupure varie lorsqu'on modifie un rapport cyclique ou une fréquence d'un signal d'horloge**.

Il est possible de faire encore bien mieux, en remplaçant dans une cellule :

- Soit les résistances classiques, par des **résistances commutées** et commandées **à la même fréquence, mais avec des rapports cycliques différents**. La fonction de transfert peut être modifiée à volonté en agissant sur ces rapports cycliques (il est très facile de générer numériquement des signaux de rapport cyclique connu, il suffit d'utiliser un compteur suivi d'un comparateur de nombres binaires).
- Soit les résistances classiques, par des **capacités commutées** et commandées **au même rapport cyclique, mais avec des fréquences différentes**. La fonction de transfert peut être modifiée à volonté en agissant sur ces fréquences (il est encore plus facile de générer numériquement des signaux de fréquence connue, il suffit d'utiliser un compteur).



Exemple de l'intégrateur à capacité commutée :

On remplace **R** par un **condensateur à capacité variable**, en fonction d'une fréquence d'« horloge »  $f_h$  au moyen d'un condensateur de capacité  $C_0$  et d'un commutateur dont la fréquence de commutation est  $f_h$ .

Le commutateur est naturellement électronique (CMOS) et cette technique réalisant des filtres à capacités commutées est mise en jeu dans différents circuits intégrés dédiés (MF5 ; MF10 ; ...).

**Q.4)** Le signal d'horloge (qui commandera les commutateurs du circuit MF10) est généré par un **circuit astable** (oscillateur numérique), construit autour d'une porte NAND trigger (voir datasheet du circuit **CD4093** alimenté en 0 / 5 V – pages 4 et 5 notamment).

**Donner** la valeur du produit « **R.C** » permettant de générer le signal d'horloge :  $f_{CLK} = 50 \cdot f_p$  (trouvée en Q1). On fixe **C = 2,2 nF**. **Calculer** la valeur théorique à donner à R.

.....

.....

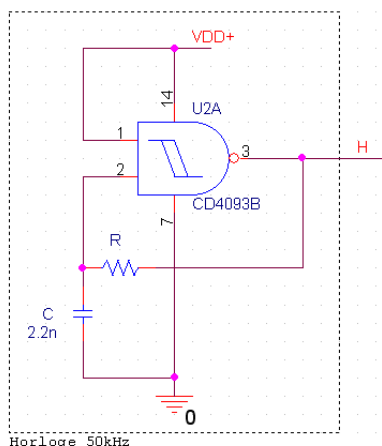
.....

.....

.....

.....

**Q.5)**



→ **Câbler, sources éteintes**, le circuit complet de l'horloge (voir ci-contre et la datasheet du circuit **CD4093** alimenté en 0 / 5 V – pages 4 et 5 notamment).

➔ **Appel n°4**

→ **Observer** le signal d'horloge créé,  $u_H(t)$ , à l'oscilloscope.

→ **Mesurer** la valeur de la fréquence  $f_{CLK}$  du signal d'horloge obtenu.

→ **Ajuster** la fréquence d'horloge, pour obtenir  $f_{CLK} = 50 \cdot f_p$ , à l'aide de condensateurs placés en parallèle sur C, ou bien à l'aide d'un potentiomètre en série avec R.

➔ **Appel n°5**

**Q.6)** On utilise un circuit MF10 (circuit MF10 = 2 circuits MF5 (pour faire un filtre du 4ème ordre)) pour réaliser le filtre de la question Q.2), suivant **le mode 1** (voir datasheet du circuit MF10 – pages 6 à 9 notamment). Le rapport «  $f_{CLK} / f_{-3dB}$  » est fixé à **50**. La résistance d'entrée  $R_1$  est fixée à **15 kΩ**.

(Rappel :  $1/Q = 2.m$  - Analogie entre le modèle mathématique LowPass vu en cours et la doc. du MF10)

**Calculer** les valeurs des résistances  $R_2$  et  $R_3$  constitutifs de chaque filtre du 2<sup>nd</sup> ordre à réaliser (on pourra utiliser des résistances de valeurs normalisées afin de s'approcher de chacune des valeurs calculées).

.....

.....

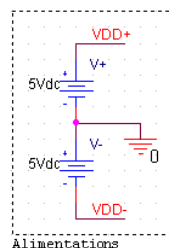
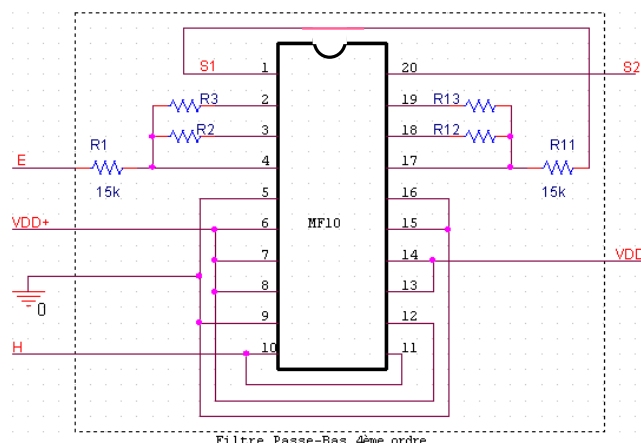
.....

.....

.....

.....

**Q.7)**



→ **Câbler, sources éteintes**, le circuit complet du filtre (voir ci-contre et la datasheet du circuit **MF10** alimenté en +5V/-5V), à la suite du circuit de l'horloge.

➔ **Appel n°6**

**Q.8) Etude en régime harmonique** (le signal appliquée (en entrée E)  $u_E(t)$  est **sinusoïdal**, d'amplitude  $E = 1\text{ V}$ )

→ **Relever** le diagramme de Bode du filtre (sortie S2) en visualisant les signaux à l'oscilloscope (prendre une quinzaines de points judicieusement choisis), en **effectuant** les mesures :

- des valeurs efficaces de  $u_E(t)$  et  $u_{S2}(t)$  :  $U_{E\text{eff}}$  et  $U_{S2\text{eff}}$ ,
- de la phase de  $u_{S2}(t)$  (on prendra  $u_E(t)$  comme référence des phases) :  $\theta_{u_{S2}/u_E}$

(Tracé manuel : doc-réponses en fin de sujet – Tracé automatique : s'aider d'un tableur (Tutoriel du logiciel « Synchronie » disponible en ligne)).

→ **Appel n°7**

→ Le filtre répond – il au gabarit de départ ? **Justifier** les écarts éventuels.

.....

.....

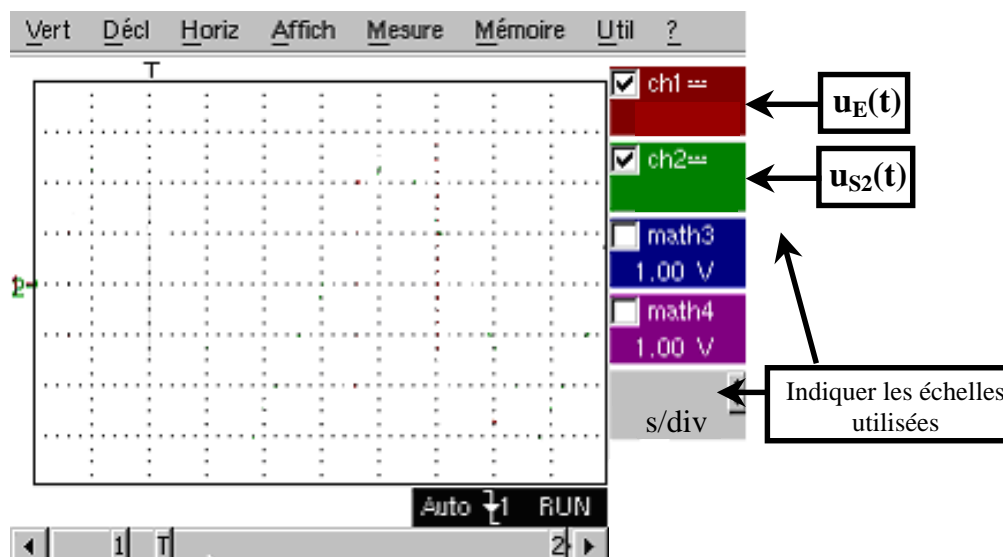
.....

.....

.....

**Q.9) Le signal d'entrée, à filtrer, est un signal rectangulaire** (évolution +/- 2,5 V, de fréquence égale à 1 kHz).

→ **Observer** et **représenter** simultanément  $u_E(t)$  et  $u_{S2}(t)$ , en entrée / sortie du filtre.



→ **Appel n°8**

→ **Commenter** le résultat obtenu et **justifier** la (les) cause(s) des écarts qui apparaissent entre les résultats expérimentaux et théoriques

.....

.....

.....

.....

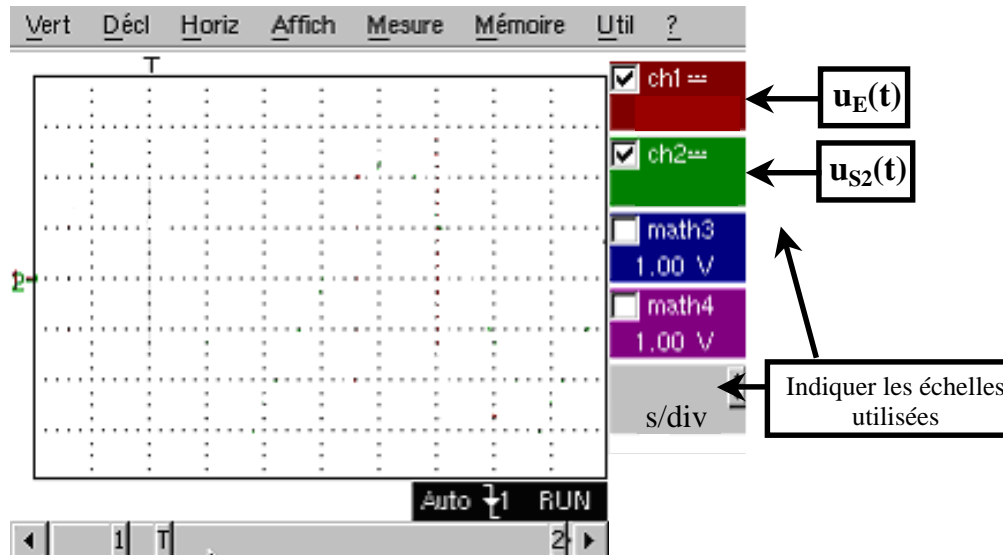
.....

### B.3) Expérience n°3 : Effets de la commutation.

**Q.10) Le signal d'entrée, à filtrer, est un signal sinusoïdal** (évolution +/- 2,5 V, de fréquence égale à 1 kHz).

→ **Observer** et **représenter** (page 7) simultanément  $u_E(t)$  et  $u_{S2}(t)$ , en entrée / sortie du filtre (vous réglerez les échelles horizontale (base de temps) et verticale (en V/div) de manière à faire apparaître les discontinuités de tension autour du passage à 0 V).

Le signal observé en sortie du filtre présente « des paliers » (ou discontinuités) dus à la commutation et au blocage du signal durant  $T_{CLK}$  (du signal d'horloge commandant les commutateurs des capacités commutées).



→ Appel n°9

**Q.11)** Il est possible d'atténuer ces discontinuités en plaçant, à la sortie du filtre à commutation, un filtre analogique de lissage. Il s'agit d'un filtre passe-bas de type  $\{R_s ; C_s\}$  dont la constante de temps est égale à la période d'échantillonnage  $T_{CLK}$ . **Calculer** la fréquence de coupure de ce filtre  $\{R_s ; C_s\}$  et **proposer** des valeurs pour  $R_s$  et  $C_s$ .

.....

.....

.....

→ Câbler, ce filtre de lissage et observer les allures des tensions avant et après ce filtre. → Appel n°10

→ **Conclure** sur son efficacité (On pourra interpréter ses performances à partir d'une observation des représentations fréquentielles des signaux).

.....

.....

.....

.....

.....

#### B.4) Expérience n°4 : Conséquences du sous-échantillonnage.

**Q.12)** Le signal d'entrée, à filtrer, est un **signal sinusoïdal** (amplitude de 1V, de fréquence égale à 1 kHz).

Si la fréquence  $f$  du signal appliqué en entrée du filtre est supérieure à «  $f_{CLK} / 2$  », on observera en sortie du filtre, un signal non plus à la fréquence  $f$  mais à  $|f_{CLK} - f|$ , du fait du sous-échantillonnage : c'est le repliement spectral (ou aliasing).

Si  $|f_{CLK} - f|$  est dans la Bande-Passante du filtre, alors c'est ce signal à  $|f_{CLK} - f|$  qui est « vu » par le filtre à l'entrée et traité par celui-ci. Le signal observé en sortie, dès lors qu'il se trouve dans la Bande-Passante du filtre, sera atténué au maximum de  $A_{max}$  (voir page 1).

→ **Rappeler** les valeurs de  $f_{CLK}$  (signal d'Horloge) et de la Bande-Passante du filtre étudié :

.....



→ **Effectuer** les réglages successifs de la fréquence  $f$ , correspondant aux valeurs du tableau ci-dessous puis **compléter** le tableau.

Fréquence $f$ du signal appliqué en entrée $u_E(t)$	Signal observé en sortie du filtre $u_{S2}(t)$ (forme, fréquence, amplitude, déphasage)	Justification
1 kHz		
20 kHz		
30 kHz		
49 kHz		
50 kHz		
51 kHz		

→ Appel n°11

**Q.13)** Pour remédier aux conséquences du sous-échantillonnage, on utilise un filtre anti-repliement.

→ **Indiquer** quel doit être la position de ce filtre anti-repliement (avant ou après le filtre MF10 ?), ainsi que sa fonction (passe-bas, passe-haut, passe-bande ou coupe-bande ,)

.....

→ **Justifier** , pour l'application de ce T.P., l'encadrement de la valeur de sa fréquence de coupure.

.....

.....

.....

→ **Proposer** un circuit de filtre anti-repliement simple (on supposera qu'il est du 1<sup>er</sup> ordre), avec des valeurs de composants à indiquer (vous prendrez garde à ce que ce filtre propose une adaptation d'impédances éventuelle).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Nom : .....

Date : .....

Document-réponse

