

À rendre le vendredi 3 octobre 2025

Partie I — Dictée d'un message : principe de l'échantillonnage

La communication via les téléphones portables a fait évoluer les pratiques. Si autrefois, on « passait un coup de fil », désormais les messages SMS ont révolutionné la communication : 200 000 SMS sont envoyés chaque seconde dans le monde, soit le chiffre de 6100 milliards expédiés sur l'année! Mais ce n'est pas pour autant que l'utilisateur pianote sur son clavier : le texte ne se tape plus, on le dicte à son téléphone qui le retranscrit en message textuel. Dans cette partie, on s'intéresse à ce système de reconnaissance vocal (*speech-to-text*) en mettant en évidence quelques critères pour assurer une traduction correcte de la dictée.

1 Échantillonnage par échantillonneur bloqueur

On considère dans un premier temps un signal $s(t)$ composé d'une composante sinusoïdale, d'amplitude crête à crête 3 V et de fréquence $f = 1/T = 100$ Hz, et d'une composante continue dont la valeur de tension est 1,5 V.

On souhaite échantillonner ce signal avec une période T_e .

1. Dessiner soigneusement l'allure du signal $s(t)$. Expliquer le principe de l'échantillonnage de ce signal analogique. On pourra faire apparaître la période T_e sur le dessin.

Pour réaliser cette opération, on utilise un interrupteur commandé CD4016 appelé *échantillonneur bloqueur à tension positive*. La figure I-1 reproduit un extrait des caractéristiques de ce composant.

General Description

The CD4016BM/CD4016BC is a quad bilateral switch intended for the transmission or multiplexing of analog or digital signals. It is pin-for-pin compatible with CD4066BM/CD4066BC.

Features

- Wide supply voltage range 3V to 15V
 - Wide range of digital and analog switching $\pm 7.5 V_{PEAK}$
 - "ON" resistance for 15V operation 400 Ω (typ.)
 - Matched "ON" resistance over 15V signal input $\Delta R_{ON} = 10 \Omega$ (typ.)
 - High degree of linearity 0.4% distortion (typ.)
 - Extremely low "OFF" switch leakage 0.1 nA (typ.)
- @ $f_{IS} = 1$ kHz, $V_{IS} = 5 V_{p-p}$,
 $V_{DD} - V_{SS} = 10V$, $R_L = 10 k\Omega$
 @ $V_{DD} - V_{SS} = 10V$
 $T_A = 25^\circ C$

- Extremely high control input impedance 10¹² Ω (typ.)
- Low crosstalk between switches -50 dB (typ.)
@ $f_{IS} = 0.9$ MHz, $R_L = 1 k\Omega$
- Frequency response, switch "ON" 40 MHz (typ.)

Applications

- Analog signal switching/multiplexing
 - Signal gating
 - Squelch control
 - Chopper
 - Modulator/Demodulator
 - Commutating switch
- Digital signal switching/multiplexing
- CMOS logic implementation
- Analog-to-digital/digital-to-analog conversion
- Digital control of frequency, impedance, phase, and analog-signal gain

Schematic and Connection Diagrams

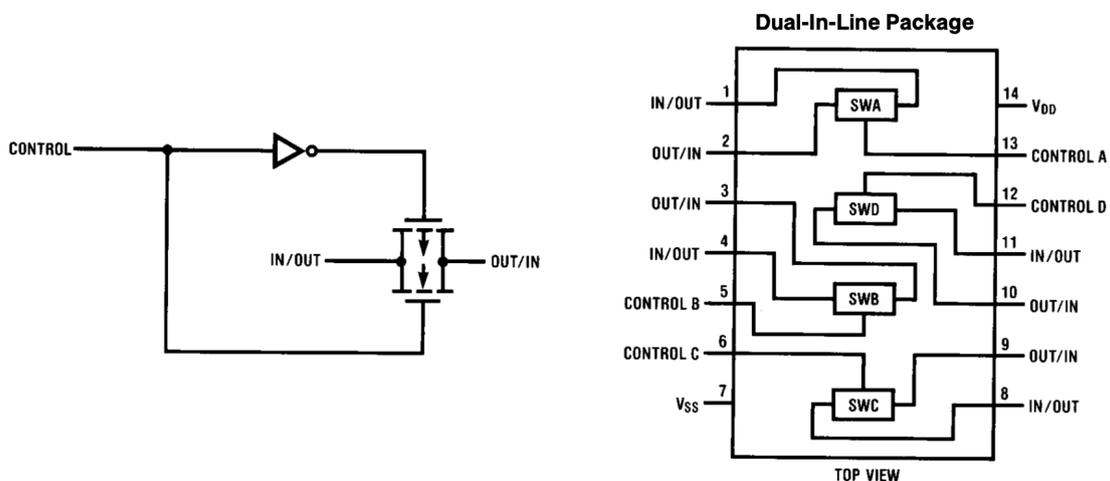


FIGURE I-1 – Extrait des caractéristiques du CD4016

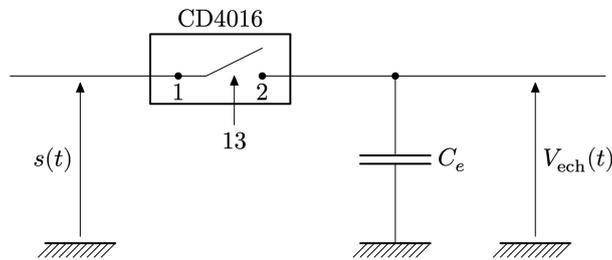


FIGURE I-2 – Montage échantillonneur bloqueur à tension positive

Le montage proposé pour échantillonner le signal $s(t)$ utilise les voies 1 et 2 et la borne de contrôle 13 reçoit le signal d'horloge. À la sortie du CD4016, on récupère le signal $V_{ech}(t)$ aux bornes d'un condensateur (figure I-2).

2. Expliquer l'intérêt de récupérer le signal échantillonné $V_{ech}(t)$ aux bornes du condensateur de capacité C_e .

Le signal d'horloge $h(t)$ appliqué sur la borne 13 est généré par un signal logique de fréquence $f_e = 1/T_e = 1,0$ kHz d'amplitude crête à crête de 10 V et de composante continue 5 V (ainsi le signal horloge évolue entre 0 V et 10 V). Il est utilisé en mode pulse dont on peut régler le rapport cyclique α , qui est le rapport entre la durée pendant laquelle le signal délivre une tension de 10 V pendant une période et la période du signal.

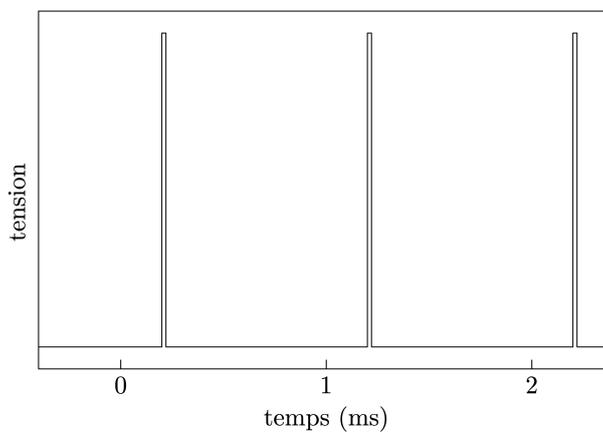


FIGURE I-3 – Signal d'horloge

3. La figure I-3 représente l'oscillogramme du signal d'horloge, dont le rapport cyclique vaut $\alpha = 2\%$. Déterminer la valeur de la durée du pic.

4. Les allures du signal échantillonné $V_{ech}(t)$ et du signal $s(t)$ sont représentées sur la figure I-4. Commenter l'allure de l'oscillogramme ainsi obtenu.

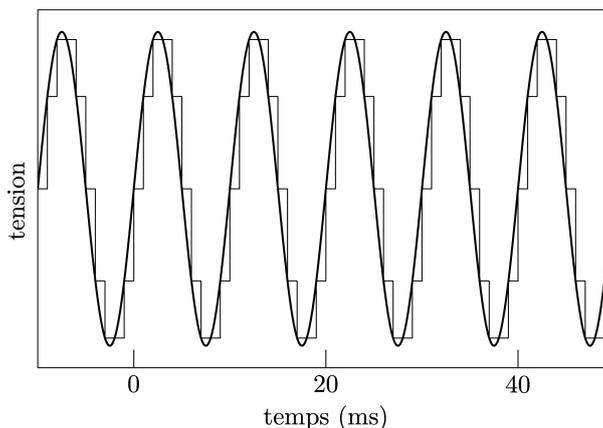


FIGURE I-4 – Superposition du signal $s(t)$ et du signal échantillonné $V_{ech}(t)$

On réalise l'analyse spectrale du signal échantillonné $V_{ech}(t)$ sur l'oscilloscope. On obtient alors les spectres (figure I-5) dont on relève l'amplitude des différents pics dans le tableau 1.

5. Expliquer l'existence des pics de fréquence supérieure à 100 Hz. Commenter les valeurs des fréquences obtenues dans le spectre de $V_{ech}(t)$.

pic	1	2	3	4	5	6	7
fréquence (Hz)	100	900	1100	1900	2100	2900	3100

TABLE 1 – Relevé des harmoniques du spectre de $V_{ech}(t)$

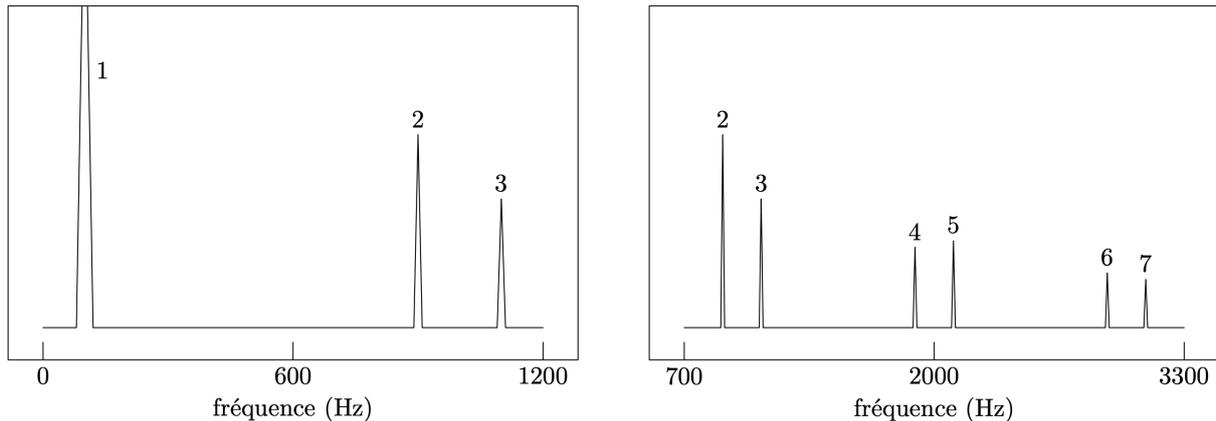


FIGURE I-5 – Analyse spectrale du signal échantillonné $V_{ech}(t)$

On reprend le même montage que précédemment et le même signal d'horloge $h(t)$, signal logique de fréquence $f_e = 1/T_e = 1,0$ kHz. Désormais le signal $s(t)$ est un signal de fréquence $f = 1/T = 110$ Hz de la forme

$$s(t) = \frac{S}{2} + \frac{2S}{\pi} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\sin[(2k+1)2\pi f t]}{2k+1}.$$

6. Représenter l'allure temporelle et spectrale du signal $s(t)$. On se limitera à un nombre fini d'harmoniques (rang $k = 3$).
7. Représenter le spectre du signal échantillonné $V_{ech}(t)$ de ce nouveau signal $s(t)$ par le même signal d'horloge $h(t)$.
8. Quel phénomène voit-on apparaître? Proposer un critère quantitatif pour y remédier afin d'assurer une retranscription correcte du signal $s(t)$. Comment s'appelle ce critère?

2 Filtrage numérique du bruit ambiant

Une source récurrente d'erreurs de retranscription de la dictée est le bruit ambiant. Dans cette partie on se propose de mettre en place un algorithme permettant une filtration efficace des bruits parasites et notamment des bruits blancs de « hautes » fréquences.

9. Rappeler comment on peut réaliser un filtre passe-bas du premier ordre avec un circuit RC .
10. Donner la forme canonique de la fonction de transfert de ce circuit en faisant apparaître la pulsation de coupure ω_c .
11. En déduire l'équation différentielle liant l'entrée $s_e(t)$ à la sortie $s_s(t)$ dans le cas d'un filtre passe-bas du premier ordre de temps caractéristique τ que l'on liera à ω_c .

Le filtrage numérique correspond à la chaîne de traitement du signal présenté en figure I-6.

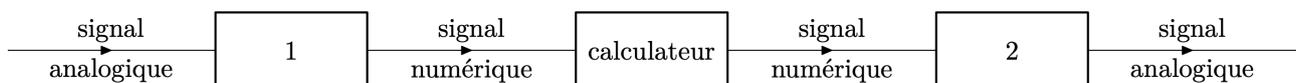


FIGURE I-6 – Chaîne de traitement du signal

12. Citer deux avantages d'une telle technique de filtrage vis-à-vis d'un filtre analogique. Citer l'inconvénient majeur du filtrage numérique.

On note T_e la période d'échantillonnage des signaux $S_e[n]$ et $S_s[n]$, les valeurs respectives de $s_e(t)$ et $s_s(t)$ à l'instant d'échantillonnage $t_n = nT_e$ où n est un entier positif ou nul. À l'entrée du calculateur, le signal numérisé se présente sous la forme d'un tableau de valeurs. Le calculateur génère un tableau de valeurs $S_s[n]$ pour la sortie à partir du tableau de valeurs $S_e[n]$ de l'entrée.

13. Si l'on suppose la période d'échantillonnage T_e « petite » par rapport à τ , donner une approximation d'ordre un de la dérivée à l'instant t_n faisant intervenir $S_s[n]$ et $S_s[n-1]$.
14. En déduire la relation donnant $S_s[n]$ en fonction de $S_s[n-1]$ et $S_e[n-1]$ pour un filtre passe-bas d'ordre un.
15. Quelle information supplémentaire faut-il fournir au calculateur pour qu'il puisse calculer tous les $S_s[n]$?

Pour illustrer la fonction de filtrage numérique, l'expérimentateur dicte la phrase « je passe le concours Centrale-Supélec ». L'analyse spectrale du texte dicté est réalisée à partir de deux enregistrements du texte, l'un dicté au calme, l'autre en présence de cris d'enfants (figure I-7).

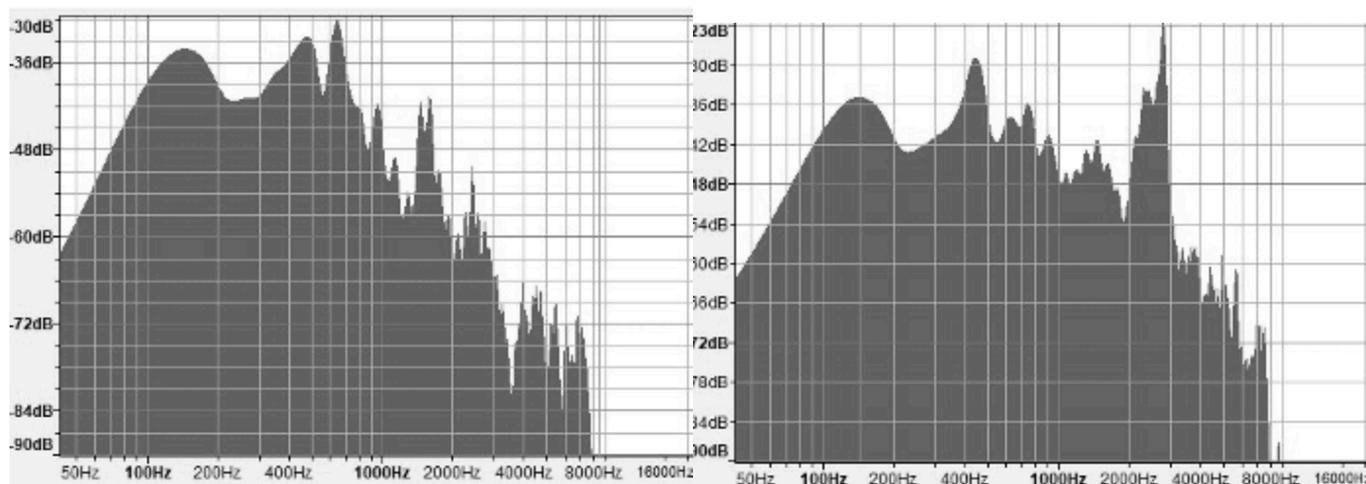


FIGURE I-7 – Spectre de la dictée « je passe le concours Centrale-Supelec »

16. Identifier la zone de fréquences à filtrer et proposer une valeur de fréquence de coupure pour le filtre passe-bas d'ordre un.

On dispose d'un fichier monophonique `dictee.wav` au format WAV/LPCM contenant l'enregistrement de la phrase. Ce fichier est chargé dans un vecteur Python à l'aide du programme suivant :

```
import numpy as np
import scipy.io.wavfile

fe, Se =scipy.io.wavfile.read('dictee.wav")
```

La fonction `scipy.io.wavfile.read` lit un fichier audio au format WAV/LPCM. Elle renvoie la fréquence d'échantillonnage (en Hz) utilisée dans le fichier et un vecteur contenant les échantillons du signal.

17. Compléter le programme précédent de façon à produire un signal de sortie privé des cris d'enfants.

Partie II - Combustion du bois

Un solide, en particulier le bois, passe par plusieurs phases au cours de son échauffement avant de brûler, avec apparition des flammes. D'abord l'eau qu'il contient s'évapore autour de 100 °C à la pression atmosphérique, puis les constituants du bois commencent à se décomposer ; il s'agit du phénomène de pyrolyse, généralement observé entre 250 °C et 500 °C, qui conduit à la formation de gaz. C'est une partie de l'énergie dégagée par la combustion de ces gaz de pyrolyse dans le dioxygène de l'air qui permet de perpétuer l'ensemble de ces étapes. Lorsque le processus de pyrolyse est terminé et qu'il n'y a plus de substances volatiles, il subsiste un résidu charbonneux rougeoyant qui dégage encore beaucoup d'énergie, sa surface extérieure atteignant 800 °C.

Le bois de chêne est composé principalement d'environ 25 % de lignine ($C_{40}H_{44}O_6$) et 75 % de carbohydrates $C_n(H_2O)_m$ (cellulose $(C_6H_{10}O_5)_p$ et hemicellulose).

1. Une analyse élémentaire a fourni les pourcentages massiques respectifs en élément carbone, hydrogène et oxygène de 50 %, 6 % et 44 %. Montrer que, si le bois pouvait être considéré comme un corps pur, sa formule chimique serait $CH_{1,44}O_{0,66}$. Dans la suite, on assimilera le bois à un corps pur de formule brute $CH_{1,44}O_{0,66}$.

2. Écrire l'équation bilan de la réaction de combustion du bois avec l'oxygène de l'air. La combustion est supposée complète et conduire à la formation de CO_2 et H_2O .

On appelle pouvoir calorifique inférieur (PCI) l'énergie dégagée par la combustion complète d'un kilogramme de combustible à pression constante, l'eau produite étant sous forme de vapeur.

3. Pour le chêne, on mesure un PCI de $19 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Quelle serait la valeur numérique de l'enthalpie de réaction de combustion ?

4. En admettant qu'en fin de pyrolyse, les gaz libérés soient pour l'essentiel du dihydrogène H_2 et du monoxyde de carbone CO , retrouver, à partir des données tabulées, la valeur de l'enthalpie standard de réaction de la combustion de ces gaz de pyrolyse dans le dioxygène de l'air. Conclure.

5. Dans une pièce calorifugée et fermée, initialement à la température 20 °C et de capacité thermique totale de l'ordre de $6,0 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, brûle une buche de bois de chêne de 1 kg. Quelle est la température maximale atteinte dans la pièce ? Commenter.



FIGURE II-1 – Différentes phases de combustion du bois

Données

Constantes

Constante des gaz parfaits $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

Constante d'Avogadro $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Données thermodynamiques et autres caractéristiques

Masses volumiques dans les conditions usuelles de température et de pression :

eau liquide	$1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
air	$1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Données atomiques

Élément	H	C	O	Pb
Numéro atomique	1	6	8	82
Masse molaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	1,0	12,0	16,0	207,2

Capacité thermique dans les conditions usuelles de températures et de pression (on admet que ces grandeurs ne dépendent pas de la température)

eau liquide	$c_p = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
eau vapeur	$c_p = 1850 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
air sec	$c_p = 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
air saturé en vapeur d'eau	$c_p = 1030 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Enthalpie massique standard de vaporisation de l'eau à $100 \text{ }^\circ\text{C}$: $\Delta_{\text{vap}} H^\circ = 2257 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Enthalpies de formation standard à 298 K :

Espèces	$\Delta_f H^\circ (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
$\text{H}_2(\text{g})$	0
$\text{O}_2(\text{g})$	0
$\text{H}_2\text{O}(\ell)$	-285,1
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241,8
$\text{CO}(\text{g})$	-110,6
$\text{CO}_2(\text{g})$	-393,5