

**DS PSI – Lycée du Parc des Loges**  
**8 octobre 2024**  
**Physique - Chimie**

**Durée : 4 heures**

*Les calculatrices sont autorisées.*

*NB. : Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.*

*Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.*

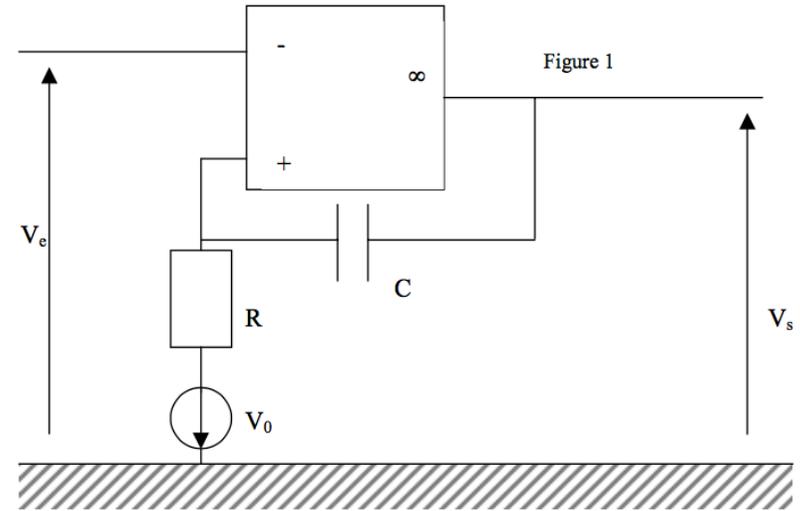
- Les résultats numériques exprimés sans unité ou avec une unité fautive ne seront pas comptabilisés.
- Les explications qualitatives des phénomènes interviennent dans la notation au même titre que les calculs.
- Tout résultat fourni dans l'énoncé peut être admis et utilisé par la suite, même s'il n'a pas été démontré par le candidat ou la candidate.

**Partie 1 : Compteur d'impulsions**

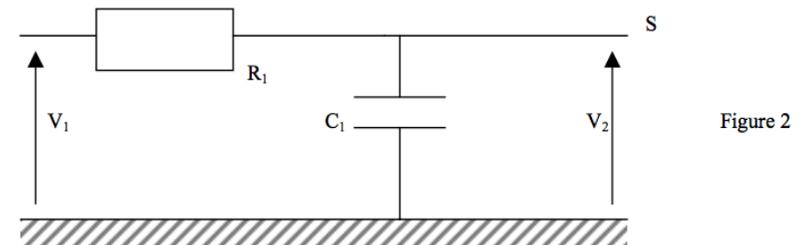
On se propose de concevoir un compteur d'impulsions analogique.

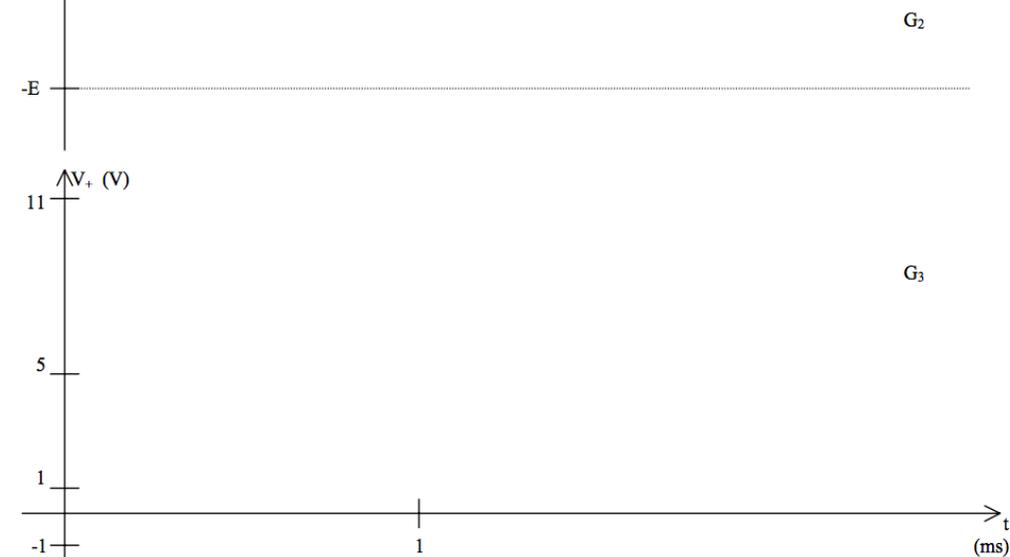
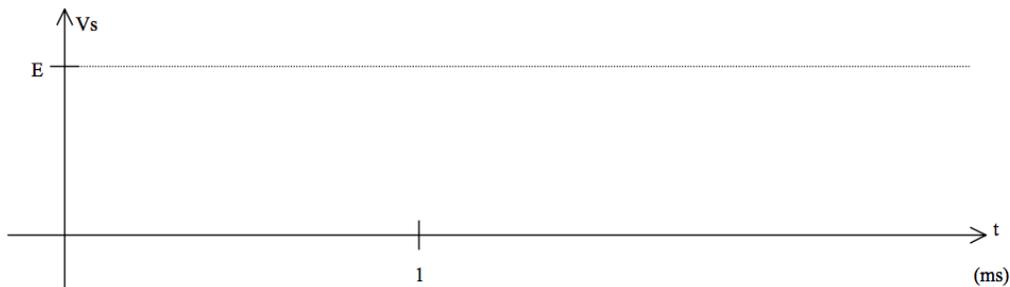
L'amplificateur opérationnel utilisé est idéal ; il est alimenté par une alimentation symétrique (-E, 0, +E) qui limite la tension de sortie:  $-E \leq v_s \leq +E$ . (E = 6,0 V)

On réalise le montage suivant, dans lequel  $V_0 = 1,0$  V.



- 1- L'amplificateur opérationnel fonctionne-t-il en régime linéaire ? Pourquoi ?
- 2- Montrer que lorsque le régime permanent  $v_e = \text{cte} = 0$  V est établi depuis longtemps, la tension de sortie vaut  $v_s = -E$ .
- 3- Rappeler la propriété de continuité (d'une grandeur électrique qu'on précisera) relative à un condensateur. A  $t = 0$ , on envoie une impulsion à l'entrée du montage (voir graphe  $G_1$  joint) : pendant une très courte durée,  $v_e$  prend la valeur  $-U$  ( $U > V_0$ ), puis revient à 0. Montrer que l'impulsion fait basculer la sortie à  $+E$  (on admettra que toute bascule est instantanée). Que vaut  $v_+$  (potentiel de l'entrée non inverseuse) juste après ce basculement ? Le retour de  $v_e$  à 0 engendre-t-il un nouveau basculement de la sortie ?
- 4- En l'absence de nouveau signal d'entrée ( $v_e = 0$ ), le système revient à l'état décrit au 1- : à quelle date  $t_0$  la sortie bascule-t-elle à  $-E$  ? Calculer la capacité C du condensateur pour que  $t_0 = 1,0$  ms ( $R = 1,0$  k $\Omega$ ). Décrire l'évolution de  $v_+$  (avant et après  $t_0$ ) ; compléter les graphes  $G_2$  et  $G_3$ . Justifier le nom de « Monostable » pour un tel montage.
- 5- On envoie maintenant périodiquement des impulsions (la période T des impulsions est assez grande pour qu'on puisse considérer que le système est revenu en régime permanent avant l'arrivée d'une nouvelle impulsion). Compléter le graphe  $G_5$ . Exprimer la tension de sortie moyenne ( $v_m$ ) en fonction de E,  $t_0$  et f (fréquence des impulsions).
- 6- Pour mesurer  $v_m$ , on filtre la tension  $v_s$  par un circuit  $R_1 C_1$  :





NOM  
Prenom

Calculer la fonction de transfert  $H(j\omega) = \frac{V_2}{V_1}$  en régime harmonique de pulsation  $\omega$ , en fonction de  $R_1$ ,  $C_1$  et  $\omega$ .  
Etudier et tracer l'allure du graphe  $G_{dB}(\omega)$  où  $G_{dB}$  représente le gain en décibels de ce filtre (on utilisera l'échelle logarithmique pour les impulsions). Comment appelle-t-on un tel filtre ?

- 7- On branche maintenant le filtre du 5- à la sortie du monostable :  $V_s = V_1$  (voir figure 3). Comment doit-on choisir  $R_1$  et  $C_1$  pour que  $V_2 \approx \text{cte} = V_m$  lorsqu'on envoie les impulsions décrites au 4- ? Dans ce cas, on branche un voltmètre (de résistance considérée comme infinie) entre le point S et la borne -E de l'alimentation symétrique. Montrer que la tension lue ( $V_L$ ) est proportionnelle à la fréquence  $f$  des impulsions.

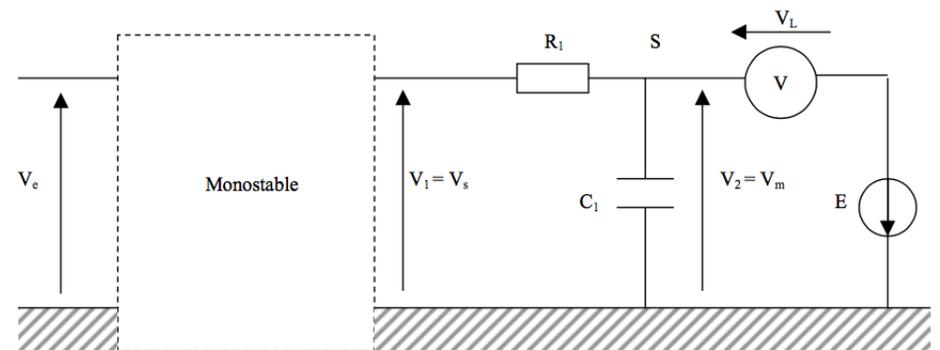
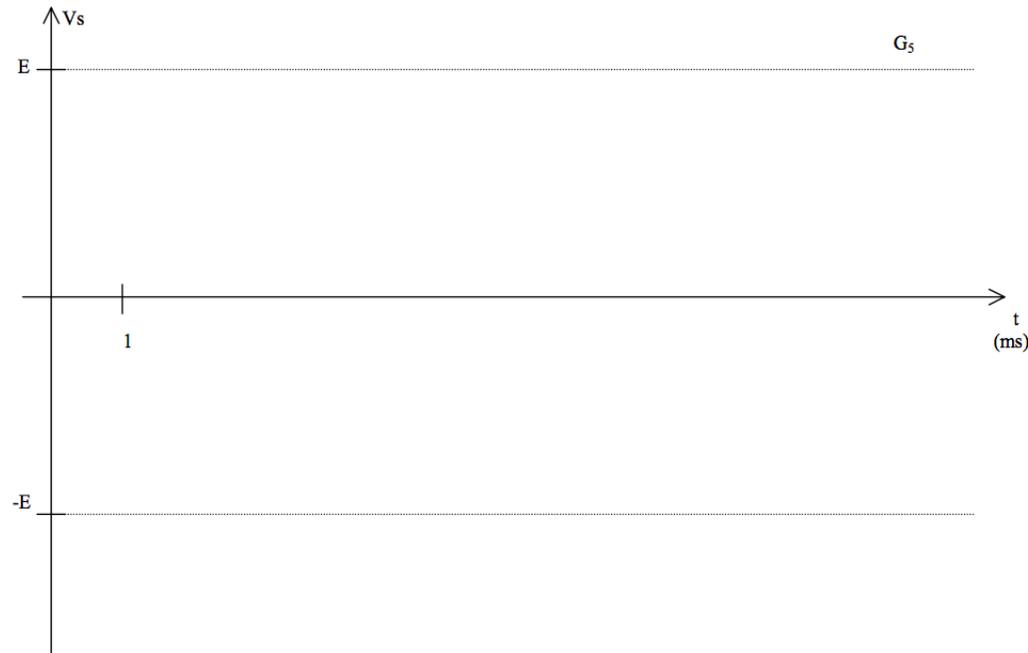
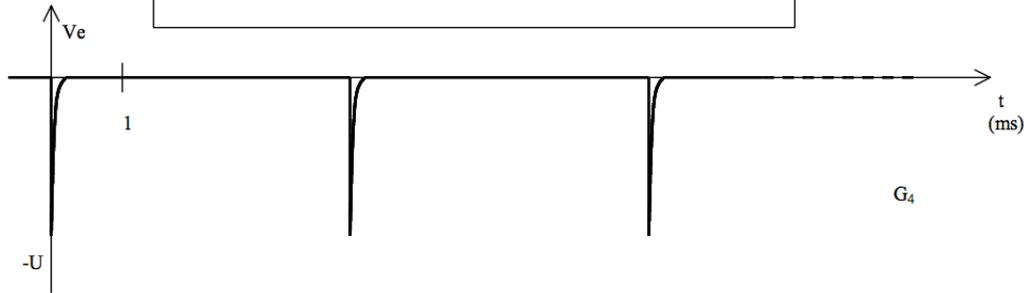


Figure 3

- 8- AN : Le compteur ainsi obtenu sert de compte-tours à un moteur d'automobile. Un moteur à 4 cylindres doit recevoir 2 impulsions par tour pour alimenter les bougies. Quel sera le domaine des tensions  $V_L$  mesurées, sachant que le moteur tourne à des régimes pouvant aller de 100 à 8000 tr/min ? Comment doit-on choisir  $C_1$  si  $R_1 = 1,0 \text{ M}\Omega$  ?

NOM  
Prenom

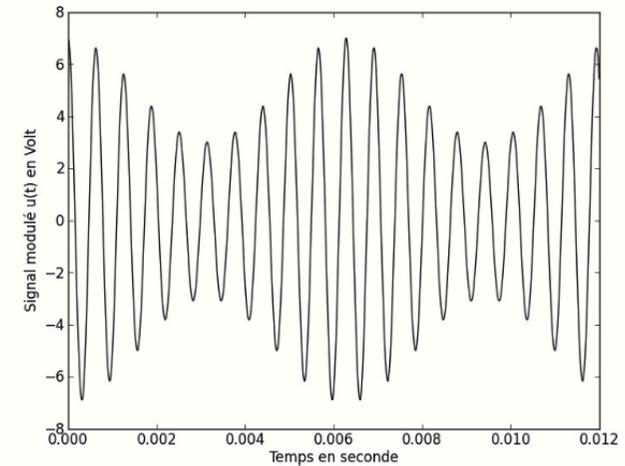


La modulation d'amplitude MA (AM en anglais) est une technique de modulation d'un signal. On considère ici un signal informatif, sinusoïdal de pulsation  $\omega_0$ , modulé en amplitude par une onde porteuse de pulsation  $\omega_p$ , avec  $\omega_0 \ll \omega_p$ .

Ce signal modulé évolue au cours du temps selon l'expression

$$u(t) = U(1 + m \cos(\omega_0 t)) \cos(\omega_p t)$$

où  $m$  est le taux de modulation. Son allure est représentée sur la **figure 8**.



**Figure 8** – Allure du signal  $u(t)$

**Q21.** Déterminer les valeurs numériques du taux de modulation  $m$  et des fréquences  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$  et

$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$ , utilisées pour tracer l'allure du signal  $u(t)$  représentée sur la **figure 8**. (En pratique, le décalage entre ces deux fréquences est plus important !)

On s'intéresse maintenant à l'opération de démodulation qui permet de retrouver le signal informatif  $s_{inf}(t)$ .

#### Démodulation par détection synchrone

On suppose ici qu'on dispose, au niveau du récepteur, de l'onde porteuse qui a pour expression :  $e_p(t) = E_p \cos(\omega_p t)$ .

## **Partie 2 : Communications**

Nous nous intéressons ici aux communications radio et satellite entre un véhicule et son milieu extérieur.

On envoie l'onde porteuse et le signal modulé dans un multiplieur, comme indiqué sur la figure 9.

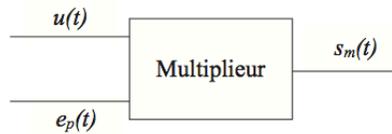


Figure 9 – Multiplication de l'onde porteuse et signal modulé

Le multiplieur fournit en sortie la tension :  $s_m(t) = k u(t) \cdot e_p(t)$ , où  $k$  est une constante dimensionnée.

- Q22.** Préciser l'unité de  $k$  et donner simplement la valeur numérique de la constante  $k$  pour le multiplieur que vous avez dû utiliser en Travaux Pratiques.
- Q23.** Déterminer l'expression du signal  $s_m(t)$  délivré en sortie du multiplieur et représenter son spectre. On supposera  $0 < m < 1$  pour le tracé du spectre.
- Q24.** Indiquer quelle(s) opération(s) de traitement du signal est (sont) encore nécessaire(s) pour retrouver le signal informatif  $s_{inf}(t)$ .

#### IV.2 - Communications radio, modulation de fréquence

On peut réaliser une modulation de fréquence MF (FM en anglais) suivant le schéma d'Armstrong (figure 10) qui utilise un montage intégrateur, un réseau déphaseur, un multiplieur et un soustracteur.

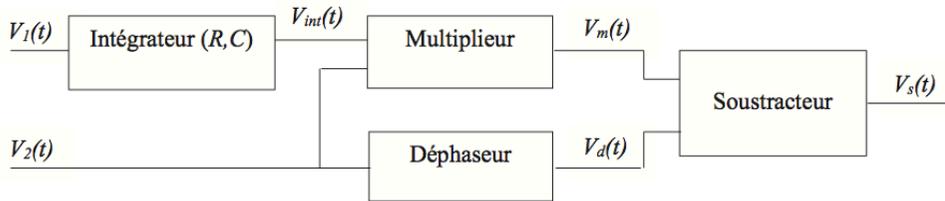


Figure 10 – Modulateur d'Armstrong

Dans toute la suite, les Amplificateurs Linéaires Intégrés (ALI) sont supposés idéaux de gain infini et fonctionnent en régime linéaire.

Le multiplieur fournit en sortie la tension :  $V_m(t) = k \cdot V_{int}(t) \cdot V_2(t)$ .

Le déphaseur est réglé pour provoquer un retard de phase de  $\pi/2$  de la tension  $V_d(t)$  par rapport à la tension  $V_2(t)$ .

On suppose qu'à  $t = 0$ ,  $V_{int}(0) = 0$ . On impose par ailleurs, à l'entrée de l'ensemble, les deux tensions :  $V_1(t) = V_{1m} \cos(\omega_1 t)$  et  $V_2(t) = V_{2m} \cos(\omega_2 t)$  avec :  $\omega_2 \gg \omega_1$ .

#### Étude du soustracteur

On considère le montage de la figure 11.

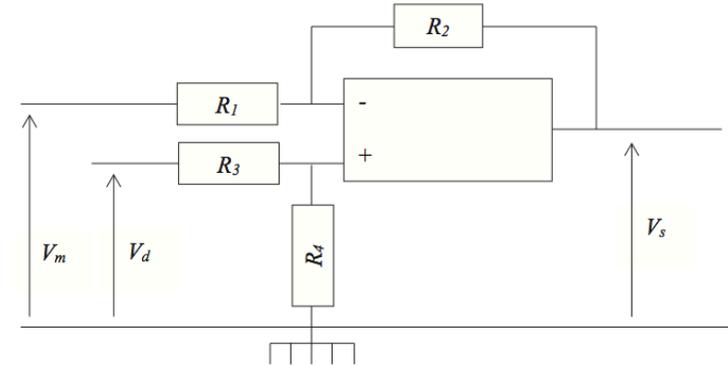


Figure 11 – Montage du soustracteur

- Q25.** Quelle considération de câblage permet de considérer ce montage comme potentiellement stable ?
- Q26.** Déterminer l'expression liant les différentes résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  et les tensions  $V_m(t)$ ,  $V_d(t)$  et  $V_s(t)$ . Donner une condition simple entre  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  et  $R_4$  pour que  $V_s(t) = V_d(t) - V_m(t)$ . On considèrera par la suite cette relation vérifiée.

#### Étude de l'intégrateur

L'intégrateur est réalisé à partir d'un ALI, d'un condensateur de capacité  $C$  et d'une résistance  $R$ .

- Q27.** Proposer un schéma du montage intégrateur et préciser la relation théorique qui lie  $V_1(t)$ ,  $V_{int}(t)$ ,  $R$  et  $C$ .

#### Étude du montage global

- Q28.** Montrer que la tension à la sortie du modulateur d'Armstrong peut se mettre sous la forme :

$$V_s(t) = V_{2m} \sqrt{1 + \varepsilon^2 \sin^2(\omega_1 t)} \sin(\omega_2 t + \varphi(t)).$$

Préciser les expressions de  $\varepsilon$  et de  $\tan(\varphi(t))$  en fonction de  $k$ ,  $V_{1m}$ ,  $R$ ,  $C$ ,  $\omega_1$  et de  $t$ .

- Q29.** Lorsque  $\varepsilon$  et  $\varphi(t)$  sont petits devant 1, la tension de sortie peut se mettre sous la forme

$$V_s(t) = V_{2m} \sin(\omega_2 t + m \sin(\omega_1 t)) = V_{2m} \sin(\psi(t))$$

où  $\omega_2$  est la pulsation élevée de la porteuse,  $m$  le taux de modulation de pulsation modulante  $\omega_1$  et  $\psi(t)$  la phase instantanée.

Préciser l'expression de  $m$  en fonction de  $k$ ,  $V_{1m}$ ,  $R$ ,  $C$  et  $\omega_1$ .

**Q30.** On appelle pulsation instantanée du signal  $V_s(t)$  la grandeur :  $\Omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt}$ . Établir la relation liant  $\Omega(t)$ ,  $\omega_2$ ,  $k$ ,  $R$ ,  $C$  et  $V_1(t)$ . Justifier le nom de modulation de fréquence associé à ce traitement du signal.

#### IV.3 - Effet de l'ionosphère, positionnement satellite et taille des antennes

L'ionosphère est la couche atmosphérique comprise entre 60 km et 800 km d'altitude. Exposée au rayonnement solaire, elle s'ionise et constitue un plasma. Pour les ondes électromagnétiques, l'ionosphère est un milieu dispersif. La relation de dispersion est de la forme

$$k^2 = \frac{\omega^2 - \omega_{plasma}^2}{c^2}$$

où  $\omega$  est la pulsation de l'onde électromagnétique,  $\omega_{plasma}$  la pulsation propre du plasma et  $c$  la célérité de la lumière dans le vide.

On a  $\omega_{plasma} = 2\pi f_{plasma}$  avec  $f_{plasma}$  de l'ordre de 10 MHz.

**Q31.** Parmi les deux fréquences suivantes  $f_1 = 162$  kHz et  $f_3 = 1\,227$  MHz, déterminer celle qui correspond à une fréquence radio MA et celle utilisée pour les communications par satellite.

**Q32.** L'une des antennes les plus utilisées dans les équipements portables est l'antenne "quart d'onde", sa longueur théorique est d'un quart de longueur d'onde. Déterminer l'ordre de grandeur de la longueur d'une antenne de voiture, susceptible de capter les ondes MF (FM en anglais), dont la fréquence de la porteuse est de l'ordre de 100 MHz. Avez-vous déjà prêté attention à l'antenne du dispositif du système GPS ? Qu'en déduisez-vous ?

### Données

#### Formules trigonométriques

$\forall (a, b) \in \mathbb{R}^2$ , on a :

$$a \cos \theta + b \sin \theta = \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\theta + \varphi)$$

$$\text{avec } \cos \varphi = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \text{ et } \sin \varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$$\cos a \cdot \cos b = \frac{1}{2} (\cos(a - b) + \cos(a + b))$$

## Partie 3 : Numérisation d'un signal analogique

Dans tout système de stockage numérique de données, la première étape est celle de la numérisation. Les signaux du monde réel sont analogiques, pour les transformer en signaux numériques on utilise un convertisseur numérique analogique, noté CAN par la suite.

**I.A** – Au cœur de tous les convertisseurs se trouve un compteur (noté F sur la figure 2), commandé par un signal d'horloge (noté D) qui incrémente le compteur à chaque bip d'horloge (le compteur est lui-même commandé par une logique de commande notée E). La fréquence du signal d'horloge est de l'ordre de quelques GHz, on la suppose parfaitement stable. Le compteur compte à partir de zéro, dès que la commande de compter lui a été donnée, au rythme imposé par le signal d'horloge. Il fournit en sortie un nombre codé sur  $N$  bits.

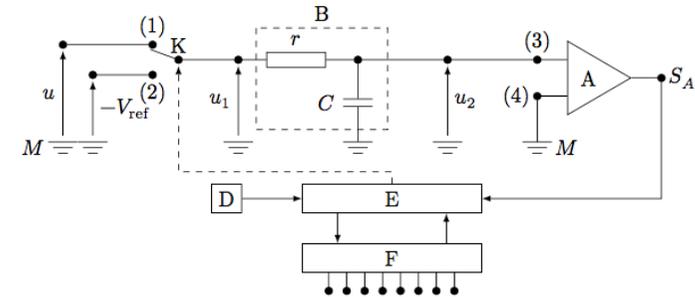


Figure 2

**I.A.1)** Avec quelle précision maximale mesure-t-on une durée à l'aide d'un compteur dont le signal d'horloge a une fréquence  $f_{ck} = 1$  GHz ?

**I.A.2)** L'architecture des premiers CAN était de type « série », elle est modélisée par le dispositif schématisé sur la figure 2. La tension positive  $u$  dont la valeur est comprise entre 0 V et  $V_{ref}$  ( $V_{ref} = 2$  V), supposée constante pendant la durée de la numérisation, est convertie en un nombre  $s_N$ .

Le convertisseur est composé d'un circuit  $r, C$  formant le bloc B, d'un comparateur A, et d'éléments intégrés parmi lesquels le bloc logique de commande E, le générateur de signal d'horloge D et le compteur sur  $N$  bits F. Les résistances d'entrée des blocs A, E et F sont infinies.

Le module A compare les potentiels des nœuds (3) et (4). Lorsque  $V_{(3)} > V_{(4)}$ , son potentiel de sortie  $v_{S_A}$  est au niveau haut, de sorte que  $v_{S_A} = V_{S_A} - V_M = 5$  V. Lorsque  $V_{(3)} < V_{(4)}$ , son potentiel de sortie est au niveau bas ( $v_{S_A} = 0$  V). Il commande ainsi le bloc logique E.

L'interrupteur K est commandé par le bloc logique E, ce qui est symbolisé par un trait pointillé.

a) Préciser ce qu'on appelle masse dans un montage électrique.

b) Représenter le graphe de la tension  $v_{S_A} = V_{S_A} - V_M$  en fonction de  $u_2$ .

**I.A.3)** Partant d'une situation où le condensateur est déchargé, E commande à l'instant  $t = 0$  la mise en position (1) de l'interrupteur K. L'interrupteur reste dans cette position pendant une durée  $t_1 = \frac{2^N - 1}{f_{ck}}$  qui correspond à un cycle complet de comptage du compteur sur  $N$  bits. Étudier  $u_2$  en fonction du temps entre  $t = 0$  et  $t_1$ . Faire apparaître une constante  $\tau$ , homogène à un temps, caractéristique du bloc B.

**I.B -** Pour toute la suite, on choisit les valeurs de  $r$  et  $C$  de sorte que  $t_1 \ll \tau$ .

**I.B.1)**

a) Donner alors l'expression simplifiée de  $u_2$  en fonction du temps, ainsi que le lien simplifié entre  $u_1$  et  $\frac{du_2}{dt}$ .

b) Quelle est alors la fonction du bloc B ?

c) Que vaut  $v_{S_A}$  entre 0 et  $t_1$  ?

**I.B.2)** Le bloc de commande fait basculer l'interrupteur K en position (2) à l'instant  $t_1$  et déclenche le comptage. Celui-ci dure jusqu'à l'instant  $t_1 + t_2$  tel que le signal  $v_{S_A}$  soit modifié.

a) Exprimer  $t_2$  en fonction de  $u$ ,  $t_1$  et  $V_{ref}$ .

b) Représenter sur un même graphe  $u_2$  et  $u_1$  en fonction du temps, entre  $t = 0$  et  $t = t_1 + t_2$ .

c) Quel est le lien entre  $s_N$  et  $t_2$  ?

**I.B.3)** Quelle est la durée maximale de la conversion analogique numérique pour un convertisseur 8 bits commandé par un signal d'horloge de fréquence  $f_{ck} = 1$  GHz ?

En déduire une condition sur la fréquence des signaux qu'on peut numériser avec un tel convertisseur. Commenter.

**I.C -** Les convertisseurs plus récents ont une architecture parallèle.

**Partie C – Hors Barème – facultative : Bonus**

La figure 3 représente un convertisseur 3 bits, qui convertit une tension  $u$  qui vérifie  $0 < u < V_{ref}$ . Il est composé de 7 comparateurs, d'une logique de commande et de résistances de valeur  $r$ ,  $2r$  et  $3r$ . Les comparateurs ont une impédance d'entrée infinie et délivrent un signal logique qui est au niveau haut lorsque la patte reliée à  $u$  a un potentiel supérieur à celui de la patte reliée à  $V_{ref}$  par l'intermédiaire des résistances.

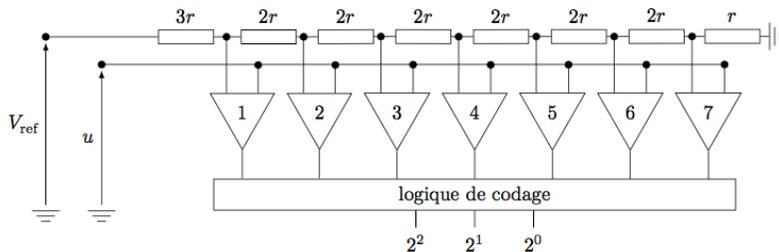


Figure 3

**I.C.1)** Expliquer le fonctionnement de ce convertisseur.

On note  $u_N$  la tension numérisée, reconstituée à partir de  $s_N$ . Comment passe-t-on de  $s_N$  à  $u_N$  ?

**I.C.2)** Pour un convertisseur 8 bits, combien faut-il de comparateurs ?

Quels sont les avantages et inconvénients comparés des convertisseurs série et parallèle ?

**I.D -** La figure 4 représente le signal numérisé  $s_N$  en fonction de la tension à numériser  $u$ .

**I.D.1)** Que vaut  $N$  dans l'exemple donné ?

**I.D.2)** Donner les valeurs de  $s_N$  en base 2 et de  $u_N$  pour  $u = 1,28$  V.

**I.D.3)** Quelle type d'erreur induit la numérisation ? Préciser l'écart maximal entre la valeur de la tension numérisée  $u_N$  et  $u$ .

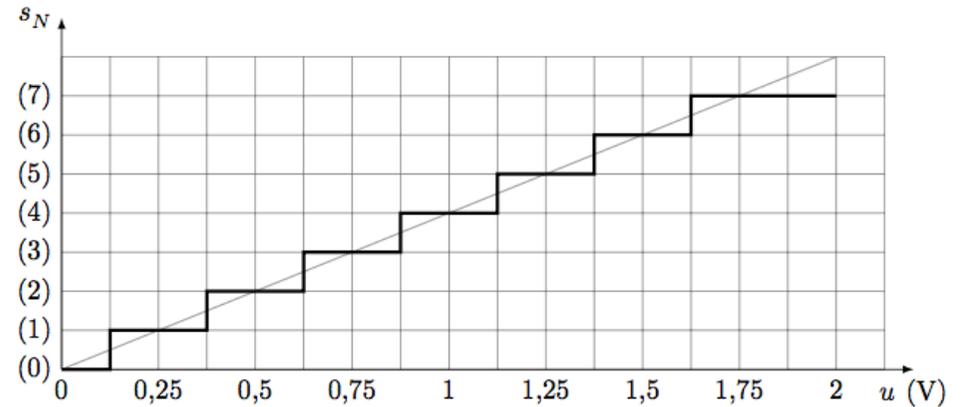


Figure 4

## Partie 4 : Elaboration d'un béton routier

**Données :** Constante du gaz parfait  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Atome	Hydrogène H	Carbone C	Oxygène O	Silicium Si	Calcium Ca
Masse atomique ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	1	12	16	28	40

Constituant	$\text{CO}_2, \text{gaz}$	$\text{CaCO}_3, \text{solide}$	$\text{SiO}_2, \text{solide}$	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5, \text{solide}$
Enthalpie molaire de formation ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	- 393	- 1 206	- 910	- 2 930
Entropie standard molaire ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	213,6	92,29	41,28	130,5

Constituant	$\text{N}_2, \text{gaz}$	$\text{O}_2, \text{gaz}$	$\text{H}_2\text{O}, \text{gaz}$	$\text{CH}_4, \text{gaz}$	$\text{CO}_2, \text{gaz}$
Capacité thermique molaire isobare standard ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	29,1	29,4	33,6	35,3	37,1

**Consignes :** on supposera l'enthalpie et l'entropie standards de réaction comme des grandeurs indépendantes de la température.

Une chaussée en béton dure plusieurs décennies de plus que son équivalent en asphalte. Elle nécessite moins d'entretien et de réhabilitation et sa surface rigide donne naissance à moins d'ornières ou nids de poule. Le béton est obtenu par mélange de ciment, d'eau, de sable et autres granulats. En usine, on produit du « clinker » qui, mis en poudre très fine avec des ajouts, constitue le ciment. Le ciment Portland est le plus utilisé au monde. Son « clinker » est fabriqué dans un four à 1 700 K par la réaction entre du calcaire  $\text{CaCO}_3$  et de l'argile assimilée à de la silice  $\text{SiO}_2$ . Il y a formation de gaz carbonique  $\text{CO}_2$ .

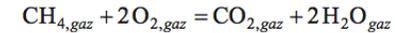
**Q32.** Écrire le bilan réactionnel (réaction (1)) entre la silice et le carbonate qui engendre une mole du constituant solide principal du ciment, c'est-à-dire une mole de silicate de calcium  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ .

**Q33.** Calculer, à partir des données, l'enthalpie standard de réaction  $\Delta H_{r,1}^0$  pour une mole de silicate formée.

**Q36.** Calculer l'énergie thermique nécessaire  $Q_p$  pour produire une tonne de ciment assimilé à du silicate de calcium pur (à 1 700 K, 1 bar).



**Q37.** Cette énergie thermique est apportée par la réaction (2), de combustion du méthane, supposée totale :



dont l'enthalpie standard de réaction vaut  $\Delta H_{r,2}^0 = -830 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  à 298 K.

Elle est réalisée sous 1 bar entre le méthane et l'air pris à 298 K dans les proportions stœchiométriques pour la réaction (2). L'air est considéré comme un mélange d'un volume de dioxygène  $\text{O}_2$  et de quatre volumes de diazote  $\text{N}_2$ . Calculer la température atteinte en supposant que l'énergie thermique de la combustion n'a pas le temps de s'évacuer et en supposant que les capacités thermiques molaires standards sont indépendantes de la température.

**Q38.** On veut utiliser l'énergie thermique fournie par le retour à 1 700 K des constituants engendrés par la réaction (2).

- Quelle est la quantité  $n$  de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  produite par tonne de ciment ?
- Commenter sachant que la production de ciment dans le monde représente 4,6 milliards de tonnes par an (aucun calcul supplémentaire n'est requis).