

ACQUERIR

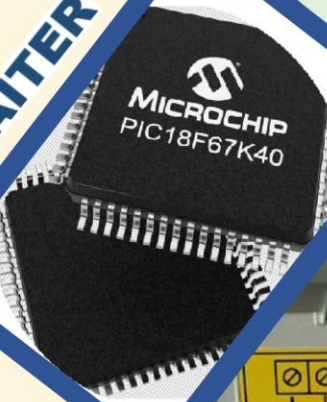


SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

CHAINE D'INFORMATION

- 2^e STE -

TRAITER



COMMUNIQUER

2026/2027

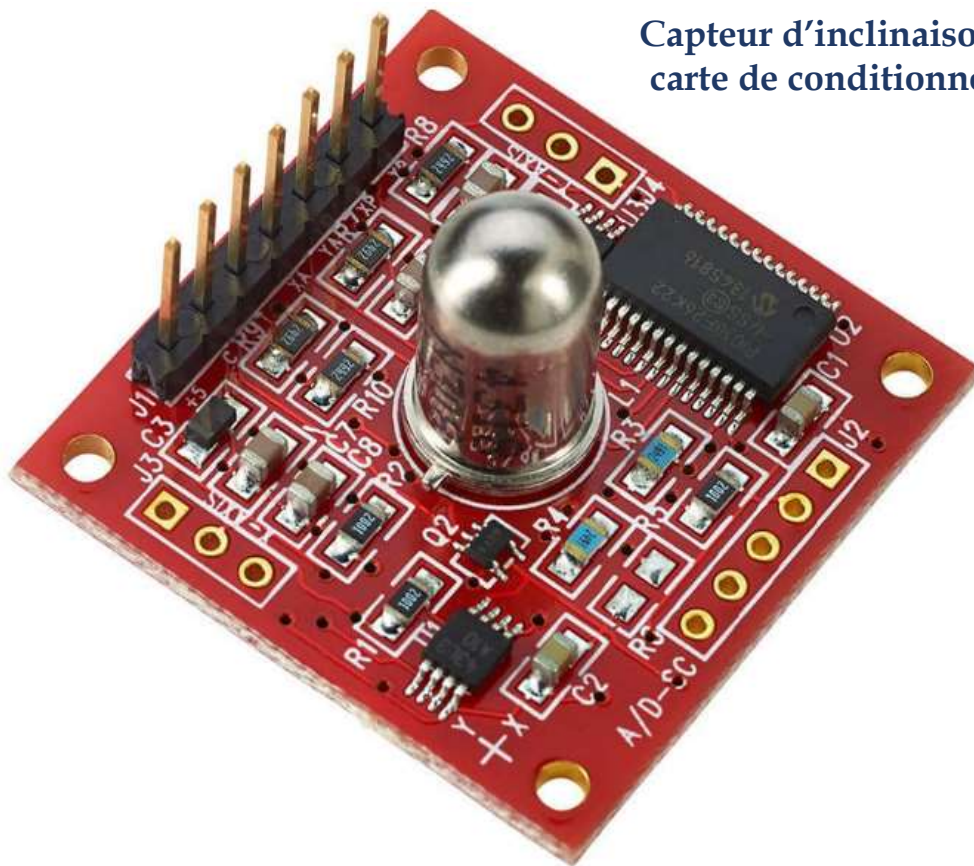
Nom de l'élève :

Classe :

PARTIE

1

Fonction ACQUERIR



Capteur d'inclinaison et sa
carte de conditionnement

1

CAPTEURS**Mise en situation**

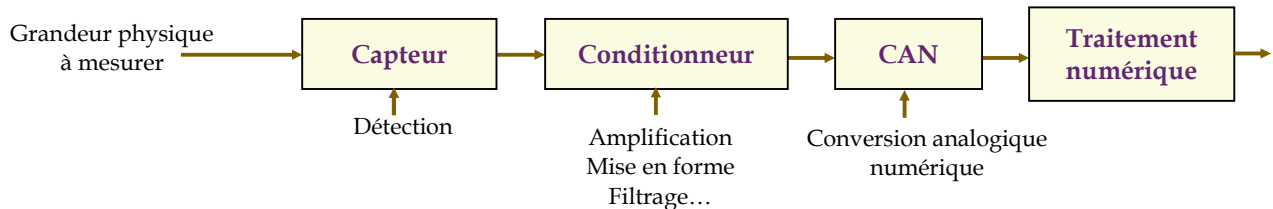
En automobile, tout devient électronique, l'injection, l'allumage, la climatisation, l'indicateur de vitesse du véhicule, la position des sièges, le freinage...

Tout cela est géré par des calculateurs à base de microprocesseur.

Cependant, pour fonctionner, ces calculateurs ont besoin d'informations qui sont prélevées sur le moteur, la boîte de vitesse, les roues... ; c'est le rôle des capteurs.

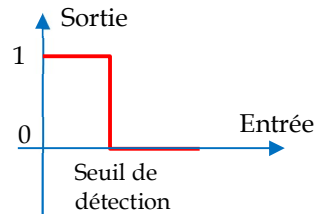
Rappel de la chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition d'un système technique permet de transformer une grandeur à mesurer en un signal électrique exploitable. Dans la chaîne d'acquisition, le capteur est l'élément sensible à la grandeur physique :



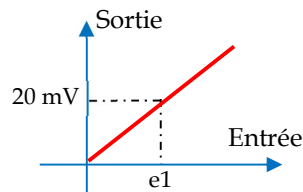
Selon la nature du signal de sortie, on peut classer les capteurs en 3 grandes catégories :

- Capteur **logique** ou Tout Ou Rien (TOR) : la sortie est binaire (information vraie ou fausse).
Exemples : détecteur de fin de course, thermostat



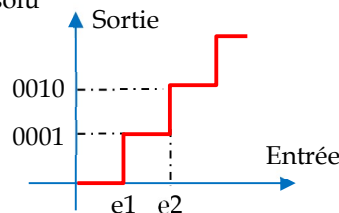
Exemple de caractéristique de transfert d'un capteur logique

- Capteur **analogique** : la sortie varie de façon progressive (variation continue).
Exemples : thermocouple, dynamo tachymétrique



Exemple de caractéristique de transfert d'un capteur analogique linéaire

- Capteur **numérique** : la sortie varie par échelons.
Exemple : codeur absolu



Exemple de caractéristique de transfert d'un capteur numérique

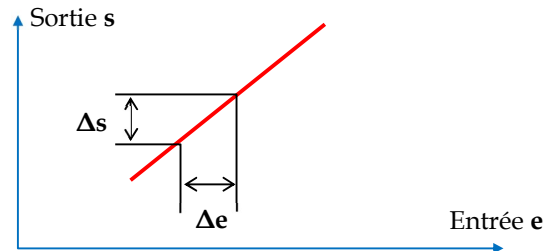
Caractéristiques des capteurs

⇒ Sensibilité

C'est le rapport entre la variation de la grandeur de sortie et celle de la grandeur d'entrée $S = \Delta s / \Delta e$.

⇒ Linéarité

Un capteur est linéaire si sa caractéristique de transfert $s = f(e)$ est linéaire donc si sa sensibilité est constante dans toute sa plage d'emploi.



⇒ Autres caractéristiques : étendue de mesure, précision, fidélité et rapidité.

Les capteurs numériques

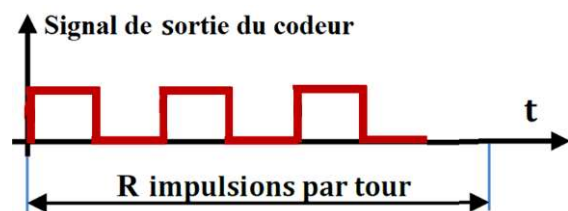
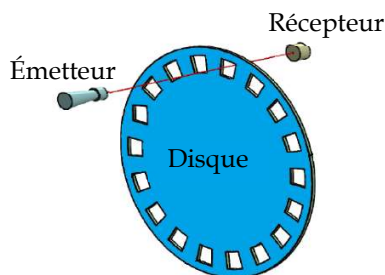
1. Codeur Incrémental

L'élément principal est un disque portant une piste divisée régulièrement en secteurs alternativement opaques et transparents.

Autour de la piste, sont installés un émetteur et un récepteur de lumière.

Les impulsions émises par le codeur peuvent renseigner sur :

- La **position** ;
- La **vitesse** ;
- Le **sens de mouvement**.



Résolution :

Précision angulaire :

Vitesse de rotation :

R = nombre de points/tour

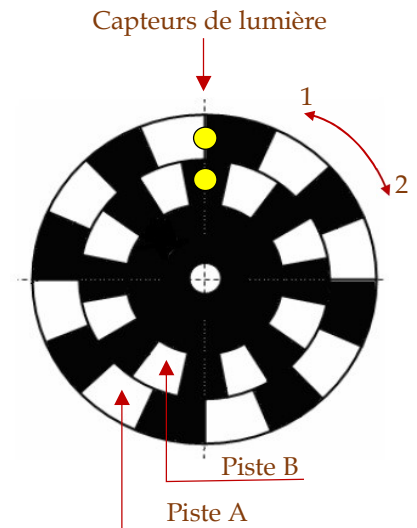
c'est l'angle de rotation qui correspond à une seule impulsion ; c'est donc la plus petite position angulaire détectée ; soit $\theta = \frac{360^\circ}{R}$ ou $\theta = \frac{2\pi}{R}$

$N = 60 \cdot \frac{f}{R}$ (N en tr/min ; f : fréquence du signal de sortie)

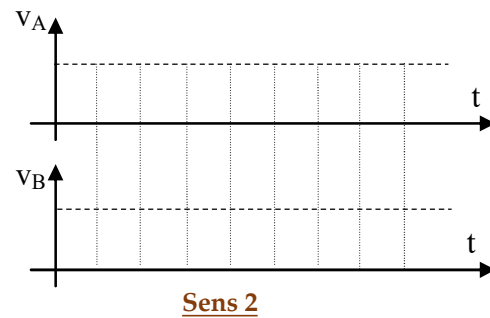
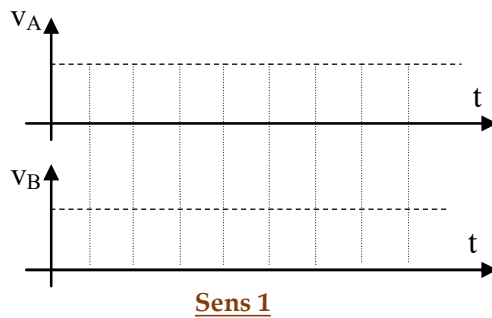
Application 3 : détection de sens de rotation

Principe : Analyse du déphasage entre les signaux des voies A et B

Le codeur est équipé de 2 pistes A et B décalées comme l'indique la figure. Chacune des pistes est dotée d'un capteur de lumière à base d'émetteur-récepteur.

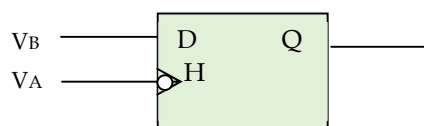


- Tracer l'allure des signaux v_A et v_B issus des capteurs A et B.



- On relie les 2 sorties v_A et v_B à une bascule D ; constater l'état de la sortie Q à chaque front descendant de l'horloge.

Rappel : pour une bascule D, à chaque front sur H, l'état de l'entrée D est transféré à la sortie Q.



	$V_A = H$	$V_B = D$	Q
Sens 1		0	.....
Sens 2		1	.....

- Conclure

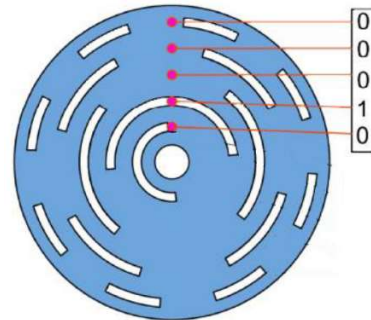
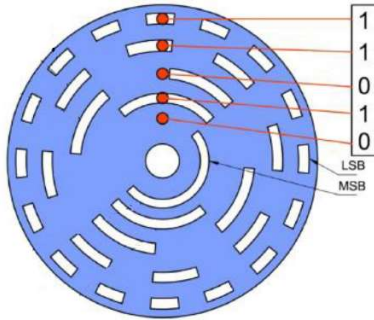
On obtient une information logique qui correspond au sens de rotation. En effet, la sortie Q se maintient toujours à :

..... pour le sens 1
 pour le sens 2

2. Codeur absolu

Le codeur absolu génère le **code numérique** sur **n bits** correspondant à la **position** d'un mobile, moyennant :

- Un disque codé le plus souvent en Gray et comportant **n pistes** ;
- Un ensemble de **n capteurs** optiques (un capteur par piste).



Résolution :

$$R = 2^n \text{ positions/tour} \quad (\text{nombre de positions possibles})$$

Précision angulaire :

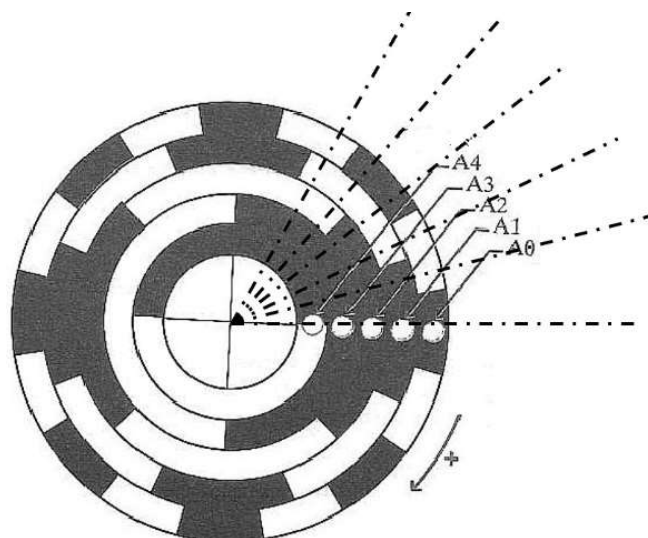
$$\theta = \frac{360^\circ}{2^n} \quad (\text{angle qui provoque un changement du code de sortie})$$

Exercice

Pour le codeur absolu fourni ci-dessous, donner :

- Le nombre de pistes :
- La résolution :
- La précision en degrés :
- Les codes numériques correspondant aux angles 22,5°, 45° et 46° :

Angle (°)	0	22,5	45	46
Sortie numérique	0 0 0 0	.....	.....	.....

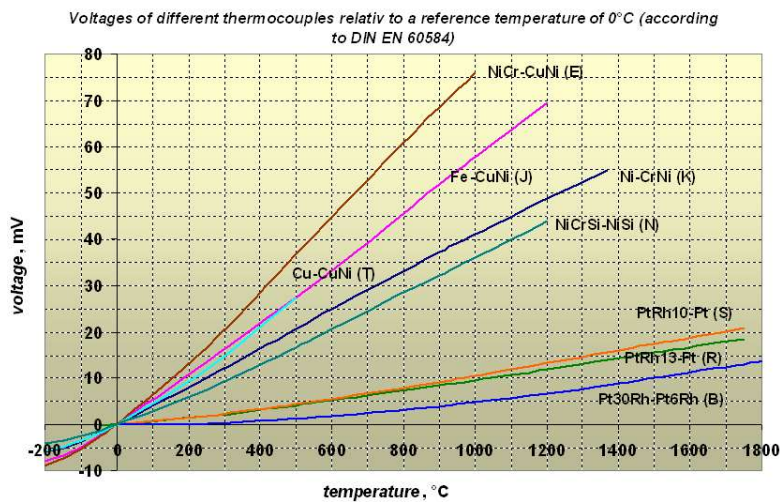
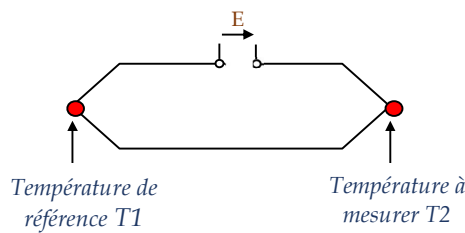


Capteurs analogiques

1. Capteur de température

⇒ Mesure par thermocouple

Un thermocouple est constitué de deux conducteurs de natures différentes reliés en 2 points.
Une f.é.m E , fonction de la différence des températures T_1 et T_2 , apparaît entre ces deux points.



⇒ Mesure par thermistance

Une thermistance est constituée d'un matériau semi-conducteur. Sa résistance varie en fonction de la température.

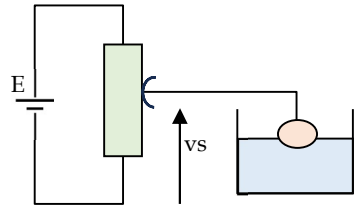
On distingue deux types de thermistances : les CTN et les CTP

- Les **CTN** (Coefficient de Température Négatif) sont des thermistances dont la résistance diminue de façon uniforme avec la température.
- Les **CTP** (Coefficient de Température Positif) sont des thermistances dont la résistance augmente fortement avec la température.

4. Capteur de déplacement ou de position

⇒ Capteur résistif linéaire ou angulaire

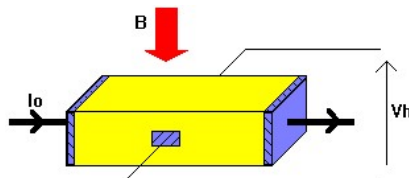
Essentiellement utilisé pour mesurer des déplacements linéaires ou angulaires (Jauge de carburant, niveau de cuve...), il utilise le principe du montage potentiométrique permettant d'obtenir une relation directe entre la tension de sortie v_s et le déplacement.



5. Effet Hall

Si un courant I_0 traverse un barreau conducteur immergé dans un champ magnétique B perpendiculaire à I_0 , une tension V_h dite de Hall, proportionnelle au champ magnétique et au courant I_0 , apparaît sur les faces latérales. Les capteurs à Effet Hall permettent de :

- Réaliser des capteurs de position et de vitesse sans contact, utilisés notamment dans l'automobile (boîte à vitesse, cardans, etc) ;
- Mesurer les champs magnétiques (Teslamètres) ;
- Mesurer l'intensité des courants électriques (capteurs de courant à Effet Hall).



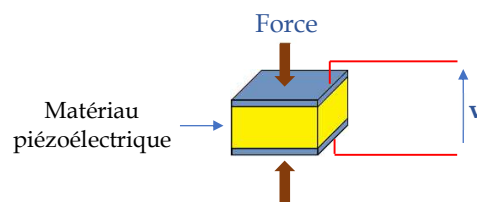
6. Piézoélectricité

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de :

- Générer une tension sous l'action d'une contrainte mécanique ;
- Se déformer sous l'effet d'une tension électrique (effet piézoélectrique inverse).

Le plus connu des matériaux piézoélectriques est sans doute le quartz, toujours utilisé aujourd'hui dans les montres pour générer des impulsions d'horloge.

Application : capteur de pression, d'accélération, de force, etc.



Exercices

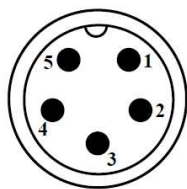
Exercice 1 : examen national 2021, session de rattrapage

Tâche 2 : Acquisition et conditionnement du signal

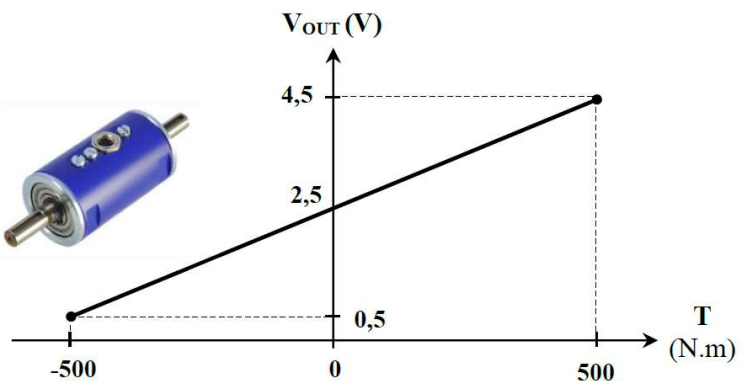
Le moteur **M3** du concasseur fournit un couple nominal T_N de **240 N.m**. Un capteur de couple mesure en permanence le couple **T** du moteur pour arrêter le concasseur en cas de surcharge ou de blocage des mâchoires de concassage.

Couplemètre SM 2200-500 de la série 2000 :

Le SM 2200-500 est un capteur de couple rotatif sans contact à électronique intégrée. Alimenté en **9-12V**, le SM 2200 délivre une sortie analogique de **0,5 à 4,5 V** lorsque le couple mesuré varie de **- 500 à +500 N.m**.



- 1- Supply voltage V_{CC} .
- 2- Signal output V_{OUT} .
- 3- Ground GND.
- 4- Not used.
- 5- Reference voltage V_{ref} .



Brochage et fonction de transfert du couplemètre

Q39- Calculer la sensibilité de ce capteur $s = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta T}$ et préciser son unité.

1 pt

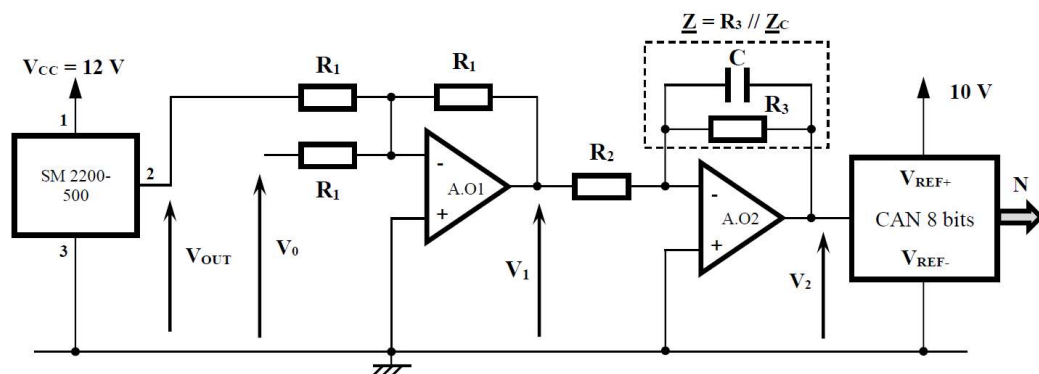
Q40- Donner alors l'expression de la tension V_{OUT} (en volt) en fonction du couple T (N.m).

1 pt

Conditionnement du signal :

La tension V_{OUT} image du couple moteur T à la sortie du couplemètre est conditionnée (décalage, amplification et filtrage) avant d'être numérisée par un convertisseur analogique numérique (CAN 8 bits).

Le circuit de conditionnement de la page 8 fournit une tension V_2 , proportionnelle à la tension V_{OUT} .



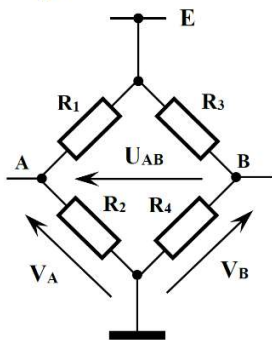
Exercice 2 : examen national 2023, session normale**Tâche 2 : Acquisition, adaptation et conditionnement du signal**

Le moteur utilisé dans l'escalier fournit un couple nominal C_N de **72,2 N.m**. La mesure du couple permet de vérifier la puissance réelle du moteur.

Le système de sécurité contrôle en permanence le couple moteur pour arrêter l'escalier en cas de surcharge ou de blocage.

Acquisition du couple moteur (couplemètre DM-DR1) :

Ce couplemètre est un capteur de couple à jauges extensométriques inséré sur l'arbre, entre le moteur et la charge à entraîner. Il est constitué d'un barreau cylindrique sur lequel sont collées quatre jauges métalliques identiques.



- ✓ Etendu de mesure : 160 N.m (E.M)
- ✓ Sensibilité : 2 mV/V
- ✓ Résistance du pont : 350 Ω
- ✓ Grande précision : 0,1% de l'E.M
- ✓ Couple ultime minimal de rupture : 250% de l'E.M

Les paires de jauges sont diamétralement opposées de telle sorte qu'une torsion du barreau, proportionnelle au couple exercé sur l'arbre, entraîne une variation symétrique de leurs résistances respectives :

$$R_1 = R_4 = R - \Delta R \text{ et } R_2 = R_3 = R + \Delta R$$

- R est la résistance au repos ($R = 350 \Omega$) ;
- ΔR est la variation de résistance proportionnelle au couple à mesurer C_u selon la relation $\frac{\Delta R}{R} = K \cdot C_u$.
- Les quatre jauges sont interconnectées en pont de Wheatstone qui est alimenté en continu sous la tension $E = 10 \text{ V}$.

Q.31-Exprimer les tensions V_A et V_B en fonction de E , R et ΔR .

2 pts

Q.32-Montrer alors que la tension de déséquilibre U_{AB} s'écrit sous la forme : $U_{AB} = E \cdot \frac{\Delta R}{R}$.

1 pt

En pleine charge ($C_u = 160 \text{ N.m}$), la valeur numérique de la tension de déséquilibre est : $U_{AB} = 20 \text{ mV}$.

Q.33-Mettre l'expression de U_{AB} sous la forme $U_{AB} = \alpha \cdot C_u$. Calculer alors, la valeur du coefficient α en précisant son unité.

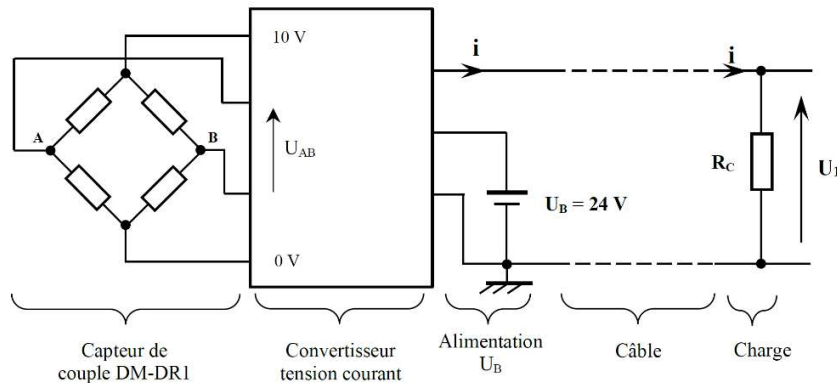
2 pts

Q.34-Déterminer C_r le couple ultime minimal de rupture en N.m.

1 pt**Adaptation du signal :**

Le capteur de couple DM-DR1 est relié à un convertisseur tension-courant délivrant un courant d'intensité qui varie linéairement avec le couple.

La figure ci-dessous représente le câblage du capteur associé au convertisseur tension-courant.



On a branché une résistance de charge R_C de $180\ \Omega$ dans la boucle de courant.

On donne l'expression du courant i (mA) en fonction du couple C_u (N.m) : $i = 0,16.C_u + 4$

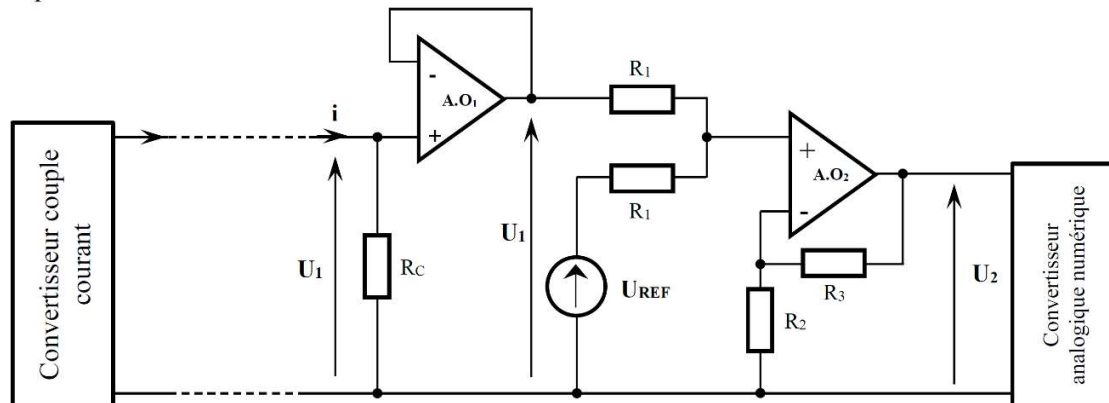
Q.35- Donner l'expression de la tension U_1 (mV) en fonction du couple C_u (N.m). **1,5 pt**

Q.36- En déduire la sensibilité s du montage et donner son unité. **1,5 pt**

Amplification et décalage du signal analogique U_1 :

Le signal U_1 image du couple C_u , doit être numérisé par un convertisseur analogique numérique (CAN). Le signal à l'entrée du CAN doit être compris entre 0 et 5 V, lorsque le couple C_u varie de 0 à 100 N.m.

L'objectif est de conditionner le signal U_1 pour la conversion analogique numérique, alors on utilise le montage représenté ci-dessous :



Les amplificateurs opérationnels sont supposés parfaits.

On donne :

- U_{REF} tension continue, avec $U_{REF} = -0,72\text{ V}$.
- $U_1\text{ (V)} = 29.10^{-3}. C_u + 0,72$.

Q.37- Donner l'expression de U_2 en fonction de U_1 , U_{REF} , R_2 et R_3 . **3 pts**

Q.38- En déduire l'expression de U_2 en fonction du couple moteur C_u . **1 pt**

Q.39- On veut que U_2 soit égale à 5 V pour $C_u = 100\text{ N.m}$ pour exploiter toute l'échelle du CAN, calculer alors la résistance R_3 , sachant que $R_2 = 3,3\text{ K}\Omega$. **1,5 pt**

[illegible]

Exercice 3 : examen national 2023, session de rattrapage**⇒ Acquisition du taux d'oxygène dissous**

L'oxygène dissous dans l'eau du bassin d'aération est mesuré à l'aide d'une sonde oxygène dont voici un extrait de ses caractéristiques techniques :

Sonde pour oxygène dissous	
Précision de mesure	$\pm 0,1$ mg/L (milligrammes par litre)
Tension d'alimentation	18 ... 30 V DC
Signal de sortie	4-20 mA correspondant à la plage de mesure
Principe de mesure	Optique
Plage de mesure	0,1 ... 20 mg/L



Q.31) À partir de la fiche technique du capteur, ci-dessus, compléter le tableau.

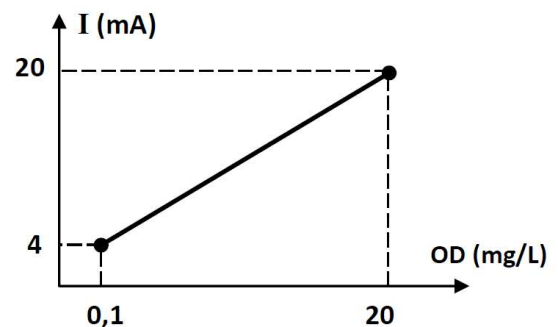
2 pts

La sortie **4-20 mA** présente l'avantage de maintenir la précision malgré les chutes de tension dues aux résistances des fils de liaison.

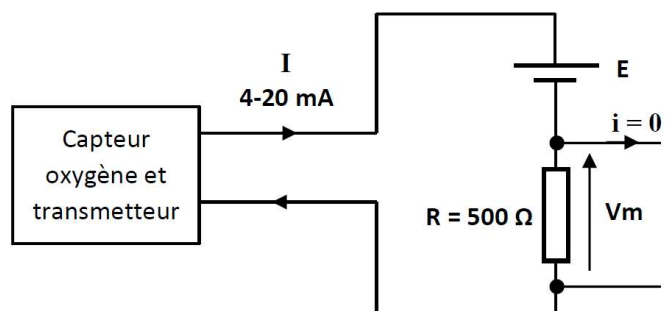
La courbe ci-contre est la caractéristique de transfert **I** en fonction de l'oxygène dissous **OD** du capteur

On note que la courbe a pour équation : $I = a \cdot OD + 3,92$

(**OD** en **mg/L** et **I** en **mA**)



Le schéma ci-contre est d'un montage typique de conversion du courant **I** délivré par le capteur en une tension **V_m**.



Q.32) Pour une consigne typique d'oxygène dissous **OD = 2 mg/L**, calculer l'intensité du courant **I** délivrée par le capteur.

1,5 pt

Q.33) En déduire la tension **V_m** correspondante

1 pt

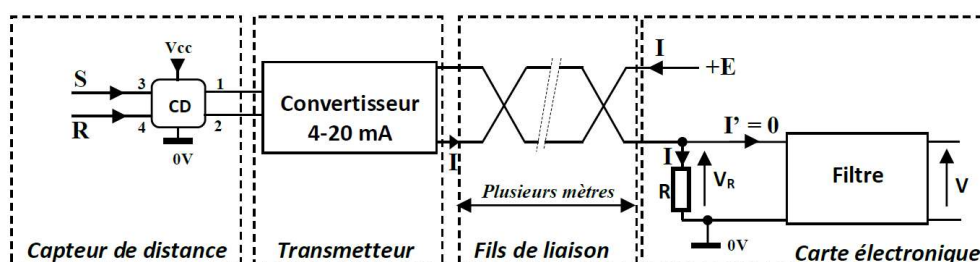
Grandeur mesurée	.....
Étendue de mesure	.....
Grandeur de sortie	☐ Tension ☐ Courant ☐ Impédance
Nature de la sortie	☐ Analogique ☐ Numérique ☐ TOR

Exercice 4 : examen national 2024, session de rattrapage

Le capteur de distance (**CD**) a une étendue de mesure de **0 à 4800 mm**. Il est situé assez loin de l'armoire de commande contenant l'ensemble de l'appareillage ainsi que les cartes électroniques.

Pour éliminer l'effet négatif de la chute de tension due à la longueur importante des câbles, on utilise un transmetteur de type « **4-20 mA** ».

Le schéma de principe du transmetteur est donné ci-dessous.



Le capteur analogique de distance **CD**, qui mesure la longueur du tube à découper, possède six bornes : deux sorties pour la mesure, deux entrées **S** et **R** (**S** : lancement de la mesure ; **R** : réinitialisation de la mesure) et deux bornes d'alimentation **Vcc** et **0 V**.

Tâche 1 : Étude du transmetteur

Le transmetteur comporte un convertisseur qui génère un courant **I** analogique, image de la longueur mesurée, qui varie entre **4 mA** et **20 mA** :

- **I = 4 mA** pour la première valeur de l'échelle de mesure (**L = 0 mm**)
- **I = 20 mA** pour la dernière valeur de l'échelle de mesure (**L = 4800 mm**).

Exercice 5 : examen national 2025, session normale

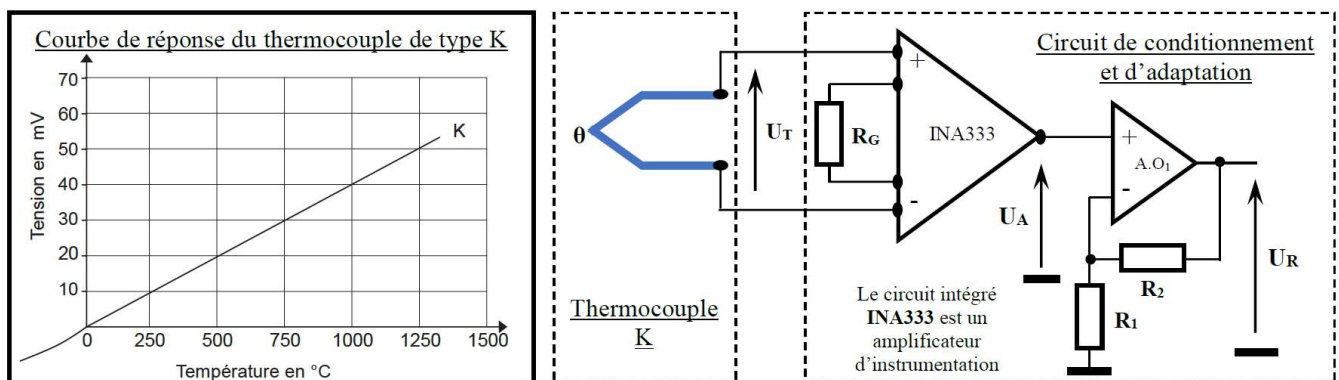
La puissance thermique fournie par le brûleur est commandée par une vanne à gaz dont le débit est commandé analogiquement par une tension continue U_V .

La mesure de la température de l'air chaud est réalisée par un thermocouple de type **K**.

La température θ , prélevée par le thermocouple, est comparée à la température consigne θ_c . Selon le résultat de cette comparaison, le régulateur génère un signal de commande appliqué à la vanne qui agit sur le débit du gaz.

Tâche 2 : Étude de la chaîne de retour

On donne ci-dessous le circuit de prélèvement, de conditionnement et d'adaptation de la chaîne de retour de la régulation. Le thermocouple génère une tension U_T proportionnelle à la température θ . Sa courbe de réponse est assimilée à une droite d'équation $U_T = a \cdot \theta$; avec U_T en V et θ en $^{\circ}\text{C}$ (figures ci-dessous).

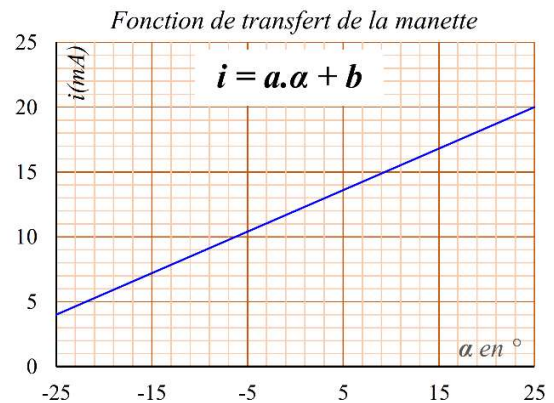
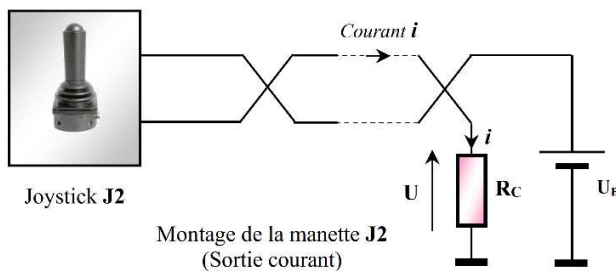


Exercice 6 : examen national 2026, session normale

Tâche 2 : Acquisition de la position de la manette et conditionnement

ADAPTATION DU SIGNAL

La manette de commande de la poche (Joystick **J2**) est de type analogique. Alimentée en **30 V**, elle délivre une sortie analogique **i** de **4 à 20 mA** lorsque la position du manche **α** varie de **-25° à +25°**.



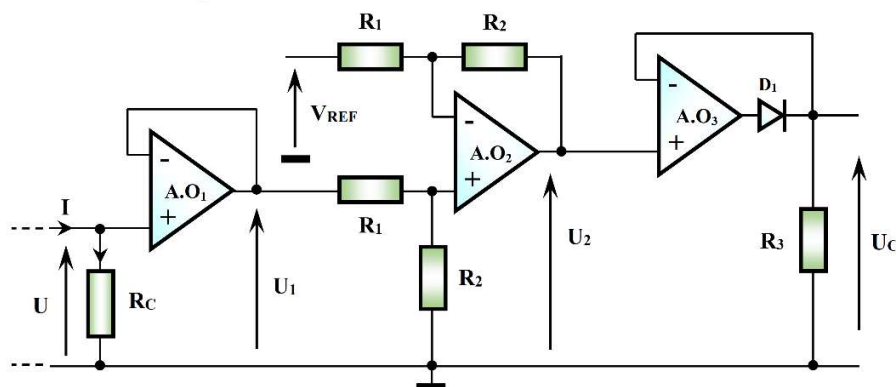
Q35) A partir de la fonction de transfert de la manette **i** en fonction de la position **α** , calculer les coefficients **a** et **b** et préciser leurs unités. **2 pts**

Q36) Sachant que **$R_C = 100 \Omega$** (la résistance **R_C** est un convertisseur courant-tension), montrer que **$U = 0,032.\alpha + 1,2$** (**U** en volt et **α** en °). **1 pt**

AMPLIFICATION ET DÉCALAGE

On souhaite adapter le signal **U** de façon à obtenir une tension de consigne de position de la poche **U_C** de **0 V à 5 V** lorsque la position du manche **α** varie de **0° à +25°** et d'obtenir **0 V** lorsque **α** varie de **-25° à 0°**.

Pour cela, on applique la tension **U** au circuit électronique ci-dessous, réalisé autour de trois amplificateurs opérationnels (A.OP) considérés parfaits.



V_{REF} est une tension continue de décalage.

Q37) Donner l'expression de la tension U_2 en fonction des tensions U_1 et V_{REF} .

2 pts

Q38) Sachant que $U_1 = U$, déduire des relations précédentes l'expression de la tension U_2 en fonction de la position du manche de la manette α , puis calculer la valeur de la tension continue de référence V_{REF} pour avoir $U_2 = 0,032 \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \alpha$.

1,5 pt

Le montage autour de l'AO3 est un redresseur sans seuil.

On donne sur le document réponses **page 19/23** la courbe de la tension U_2 en fonction de la position α .

Q39) Compléter le tableau proposé en exprimant U_C en fonction de U_2 et tracer la courbe de la tension de consigne U_C en fonction de la position α de la manette du joystick J_2 .

1,5 pt

Q40) Déterminer la valeur de R_2 , sachant que $R_1 = 5,6 \text{ k}\Omega$.

1,5 pt

Tâche 3 : Acquisition et détermination de la position de la poche

ACQUISITION DE LA POSITION DE LA POCHE

Le codeur incrémental d'acquisition de la position angulaire β de la poche a une résolution **N** de **128 points**.

Le principe de fonctionnement du codeur incrémental rotatif est donné en document ressources **DRES 04**.

La position β de la poche pendant la coulée est déterminée par le comptage ou le décomptage des fronts descendants du signal **EncA** selon le sens de rotation du décodeur.

L'état logique du signal **EncB** lors des fronts descendants du signal **EncA** indique le sens de rotation du codeur : sens horaire (basculement de la poche en avant) ou sens anti horaire (basculement de la poche en arrière).

Q41) Sachant que $F_C = 4 \cdot F_P$, calculer le déplacement angulaire minimal (précision angulaire) **P** en **degré (°)** de la poche détectable par ce capteur (codeur **128 points** par tour).

1 pt

Q42) Calculer le **nombre n** de fronts descendants du signal **EncA** fournis par le codeur pour que la poche parcoure sa course maximale qui est de **100°** ?

1 pt

Q43) Déduire le nombre de **bits** nécessaires pour représenter la position de la poche ; **Justifier** votre réponse ?

1 pt

Rappel du principe de fonctionnement du codeur incrémental rotatif

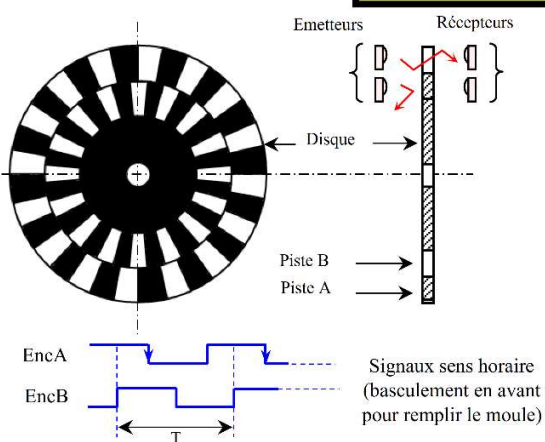
DRES 04

Constitution

- Un disque comportant deux pistes A et B décalées et divisées chacune, en 256 secteurs équidistants et alternativement opaques et transparents ;
- Deux éléments optoélectroniques (une diode infrarouge et un phototransistor) disposés de part et d'autre de chaque piste ;

Fonctionnement

- Pour un tour complet du codeur, le faisceau lumineux est interrompu 128 fois et délivre **128 impulsions EncA et EncB** en quadrature ;
- Le déphasage de 90° électrique des signaux **A** et **B** permet de déterminer le **sens** de rotation.



On donne :

$$N = \frac{360}{P} \cdot \frac{F_P}{F_C} \text{ avec :}$$

N : nombre de points du codeur.

F_P : fréquence de rotation du la poche.

P : précision angulaire en degré (°).

F_C : fréquence de rotation du codeur.

2 pts

Q35) Coefficients *a* et *b* et leurs unités.



1 pt

Q36) Expression de la tension *U* :



2 pts

Q37) Expression de la tension U_2 .

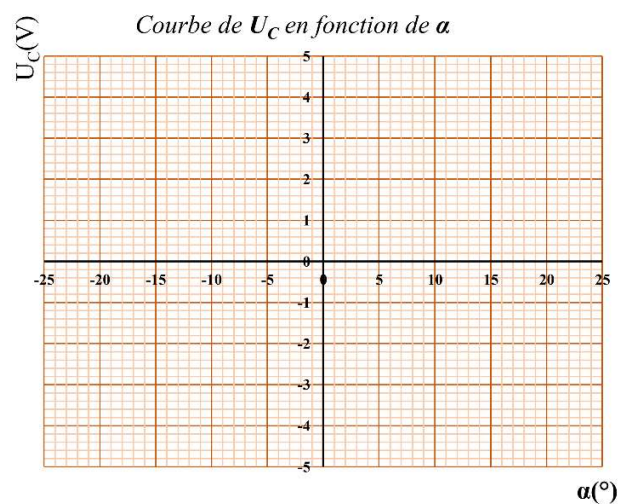
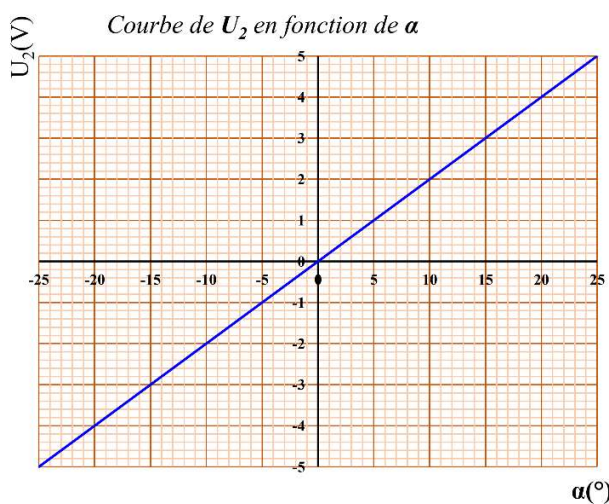
1.5 pt

Q38) Expression de la tension U_2 en fonction de α et valeur de V_{REF} :

1.5 pt

Q39) Tableau à compléter et traçage de la courbe U_C en fonction de α :

	$U_2 \geq 0 \text{ V}$	$U_2 < 0 \text{ V}$
	D_1 Conductrice	D_1 Bloquée
Tension U_C	.....	.....



1.5 pt

Q40) Expression et valeur de R_2 :

1 pt

Q41) Déplacement angulaire minimal P .

1 pt

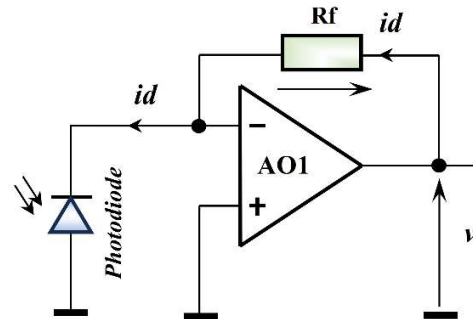
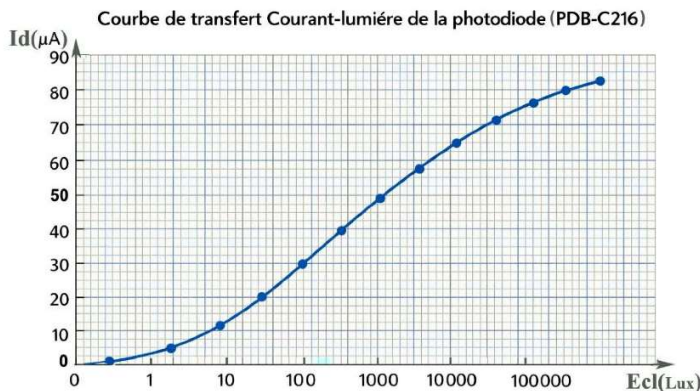
Q42) Nombre N de fronts descendants du signal **EncA** :

1 pt

Q43) Nombre de **bits** et **Justification** :**Exercice 7 : examen national 2026, session de rattrapage****Tâche 1 : Étude du détecteur des rayons X**

Chaque photodiode transforme l'intensité de l'éclairement (rayon **X**) en un courant électrique **id**, ce courant est converti en tension **v** par le montage autour de l'amplificateur opérationnel **AO1**, supposé parfait (comme l'indique la figure ci-dessous).

On donne ci-dessous la courbe de transfert de la photodiode.



Q31) Indiquer **les grandeurs** d'entrée et de sortie de ce capteur en précisant l'unité de chaque grandeur. **1 pt**

Q32) Ce capteur est-il **actif** ou **passif**? Justifier votre réponse. **1 pt**

Q33) A partir de la courbe, relever la valeur du courant **id** pour un éclairement de **100 Lux** puis calculer la valeur de la tension **v** qui lui correspond, sachant que **Rf = 82 KΩ**. **1,5 pt**

1 pt	Q31) Les grandeurs d'entrée et de sortie du capteur.	
------	---	--

Grandeur d'entrée :

Unité :

Grandeur de sortie :

Unité :

1 pt	Q32) Type du capteur (actif ou passif) et justification.	
------	---	--

☐ Capteur actif

☐ Capteur passif

Justification :

1.5 pt	Q33) Valeur du courant id et valeur de la tension v pour un éclairement de 100 Lux .	
--------	--	--

id =

.....

2

FILTRAGE ANALOGIQUE**Généralités**

La fonction filtrage consiste à atténuer les signaux de fréquences indésirables.

L'intervalle des fréquences autorisées par le filtre s'appelle bande passante.

On distingue :

- Les filtres **passifs** : constitués seulement de dipôles passifs (résistances, condensateurs, bobines) ;
- Les filtres **actifs** : constitués de dipôles passifs et de dipôles actifs (amplificateurs opérationnels, transistors...).

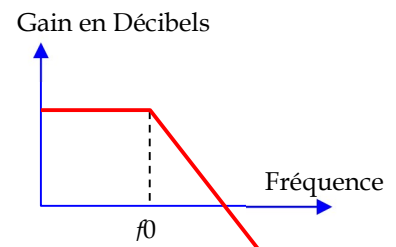
Les filtres actifs ont l'avantage de :

- Avoir des caractéristiques indépendantes de la charge ;
- Avoir une amplification possible dans la bande passante.

1. Types de filtres

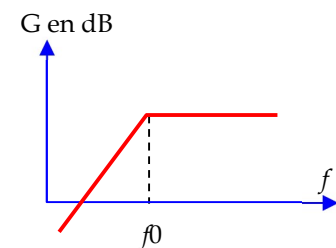
⇒ Filtre passe-bas

Laisse passer les signaux de fréquence **inférieure** à une fréquence déterminée f_0 dite **fréquence de coupure**.



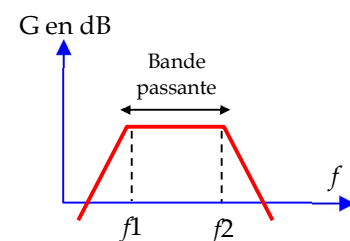
⇒ Filtre passe-haut

Laisse passer les signaux de fréquence **supérieure** à sa fréquence de coupure f_0 .



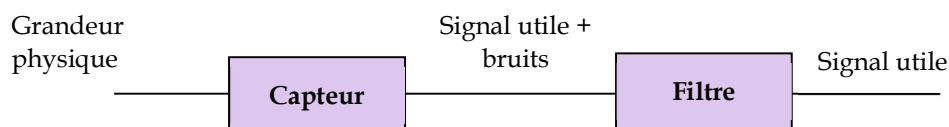
⇒ Filtre passe-bande

Laisse passer les signaux de fréquence **comprise** entre ses deux fréquences de coupure f_1 et f_2 .



Parmi les principales applications des filtres, on peut citer :

- Extraire la valeur moyenne d'un signal périodique par un passe-bas ;
- Changer la tonalité d'un son (éliminer les sons aigus par un passe-bas, éliminer les sons graves par un passe-haut) ;
- Sélectionner une fréquence ou une bande de fréquence par un passe-bande (télévision, radio...).

Cas de la chaîne d'acquisition

Lois mathématiques et électriques utiles

- Quelques propriétés de la fonction logarithme décimal

$$\log(ab) = \log a + \log b$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b$$

$$\log\left(\frac{1}{a}\right) = -\log a$$

$$\log(a^n) = n \cdot \log a$$

$$\log 1 = 0 \quad \log 10 = 1 \quad \log 100 = 2 \dots$$

- Quelques propriétés des nombres complexes

Soit z un nombre complexe, $z = a + jb$ où a, b sont des réels et $j^2 = -1$

Module de z : $\|z\| = \sqrt{a^2 + b^2}$

Argument de z : $\arg(z) = \arctg\left(\frac{b}{a}\right)$

$$\|z_1 \cdot z_2\| = \|z_1\| \cdot \|z_2\|$$

$$\arg(z_1 \cdot z_2) = \arg(z_1) + \arg(z_2)$$

$$\left\| \frac{z_1}{z_2} \right\| = \frac{\|z_1\|}{\|z_2\|}$$

$$\arg\left(\frac{z_1}{z_2}\right) = \arg(z_1) - \arg(z_2)$$

- Impédances en notation complexe

L'impédance d'une résistance R est :

$$\underline{Z}_R = R$$

L'impédance d'une bobine d'inductance L est :

$$\underline{Z}_L = jL\omega$$

L'impédance d'un condensateur de capacité C est :

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{jC\omega}$$

2. Fonction de transfert



La fonction de transfert d'un filtre, en notation complexe $\underline{A}_v = \frac{V_s}{V_e}$

- **L'amplification $\underline{A}_v$** est le module de $\underline{A}_v$ soit :

$$A_v = \|\underline{A}_v\|$$

- **La phase φ** (déphasage entre l'entrée et la sortie) est l'argument de $\underline{A}_v$ soit :

$$\varphi = \arg(\underline{A}_v)$$

Plutôt que d'utiliser l'amplification $\underline{A}_v$, on préfère parler du **gain G** en décibels dB :

$$G = 20 \log(A_v)$$

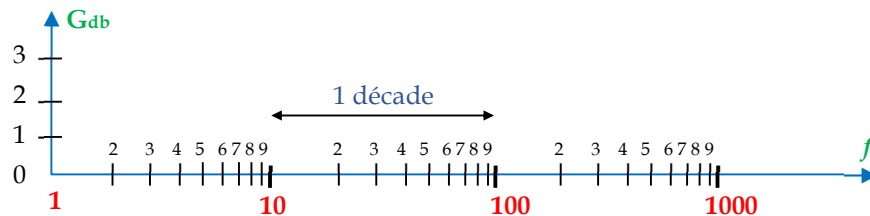
D'où l'amplification en fonction du gain :

$$A_v = 10^{\frac{G}{20}}$$

3. Diagramme de Bode

Un axe gradué linéairement est mal adapté pour représenter une grandeur qui s'étend sur un intervalle très large, c'est le cas du domaine des fréquences d'un filtre. Pour cela, on recourt à une échelle logarithmique.

Le diagramme de Bode est la représentation du gain dB et de la phase en fonction de la fréquence sur une échelle semi-logarithmique.



Une décade se définit par l'intervalle $[f, 10.f]$.

Par exemple, $[20 \text{ Hz}, 200 \text{ Hz}] = 1 \text{ décade}$ et $[15 \text{ kHz}, 15 \text{ MHz}] = 3 \text{ décades}$

4. Fréquence de coupure à -3dB

La **fréquence de coupure à -3 dB** d'un filtre est telle que $A_v = A_{v0}/\sqrt{2}$

En décibels, cela se traduit par $G = G_0 - 3\text{dB}$.

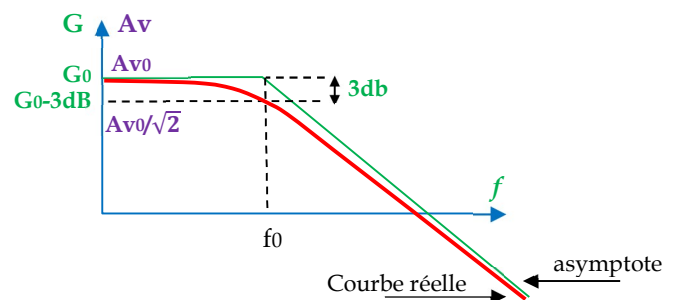
En effet, $A_v = A_{v0}/\sqrt{2}$

$$\Rightarrow G = 20 \cdot \log(A_{v0}/\sqrt{2})$$

$$\Rightarrow G = 20 \log(A_{v0}) - 20 \log\sqrt{2} \\ = G_0 - 3\text{dB}$$

G_0 : gain maximal (ou gain dans la bande passante ou encore gain statique)

A_{v0} : amplification maximale

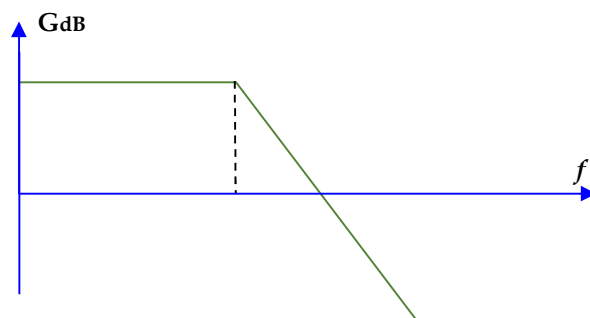
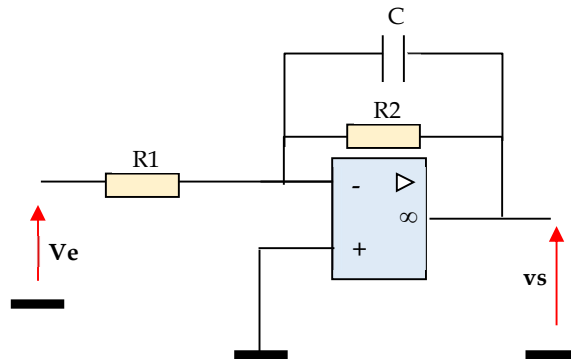


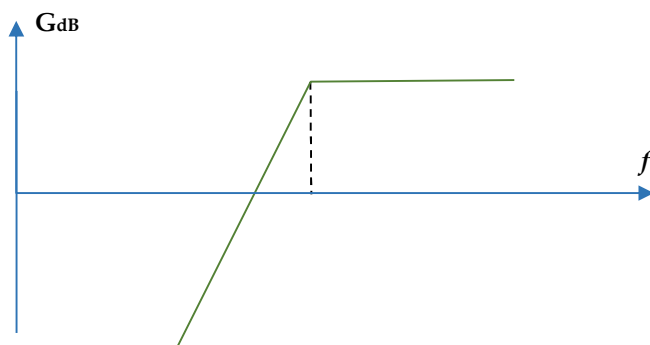
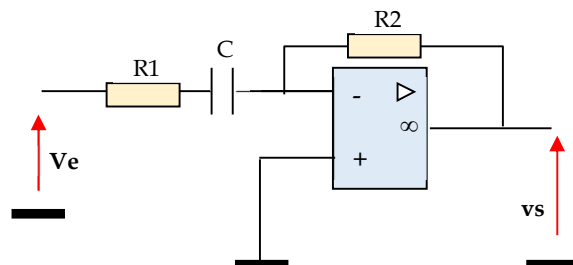
5. Formes canoniques des filtres du 1^e ordre

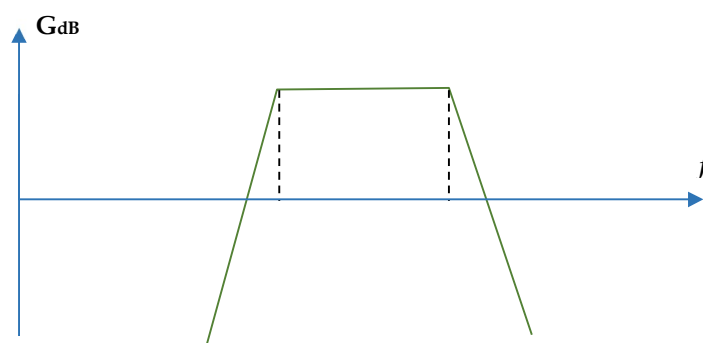
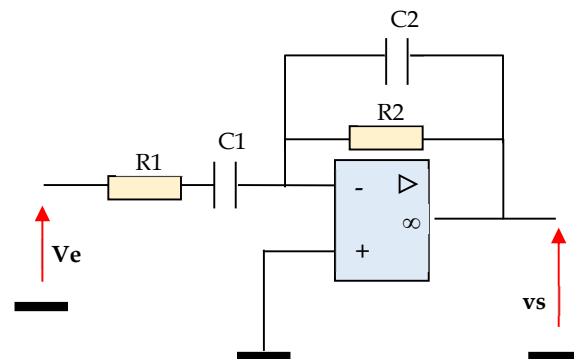
Les fonctions de transferts, en notation complexe, des filtres du 1^e ordre peuvent s'exprimer sous les formes canoniques suivantes :

Passe-bas	Passe-haut	Passe-bande
$\underline{A_v} = A_{v0} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$	$\underline{A_v} = A_{v0} \cdot \frac{j\frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$	$\underline{A_v} = A_{v0} \cdot \frac{1}{(1 + j\frac{\omega}{\omega_2})} \cdot \frac{j\frac{\omega}{\omega_1}}{(1 + j\frac{\omega}{\omega_1})}$
A_{v0} : Amplification maximale $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$: fréquence de coupure	A_{v0} : Amplification maximale f_0 : fréquence de coupure	A_{v0} : Amplification maximale f_1 : fréquence de coupure basse f_2 : fréquence de coupure haute ($f_2 \gg f_1$)

Étude de filtres actifs

Filtre passe-bas

Filtre passe-haut

Filtre passe-bande

Exercice 4 : examen national 2024, session de rattrapage**Tâche 2 : Étude du Filtre**

Pour réduire les parasites probables à la réception, on utilise un filtre **RC** dont la fonction de transfert est :

$$\underline{T} = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

Q38. Préciser la nature de ce filtre : passe-bas ou passe-haut. **1 pt**

Q39. Déterminer le module **T** de la fonction de transfert de ce filtre en fonction de **f** et **f₀** ; avec **f₀** fréquence de coupure à -3 db. **2 pts**

Q40. Monter que le gain **G (en db)** peut se mettre sous la forme suivante : $G = -10 \cdot \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right)$. **2 pts**

Q41. Calculer le gain **G** pour **f = 0**, **f = 10.f₀** et **f → ∞** et tracer le diagramme asymptotique **G** en fonction de la fréquence **f** (Diagramme de Bode). **3,5 pts**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

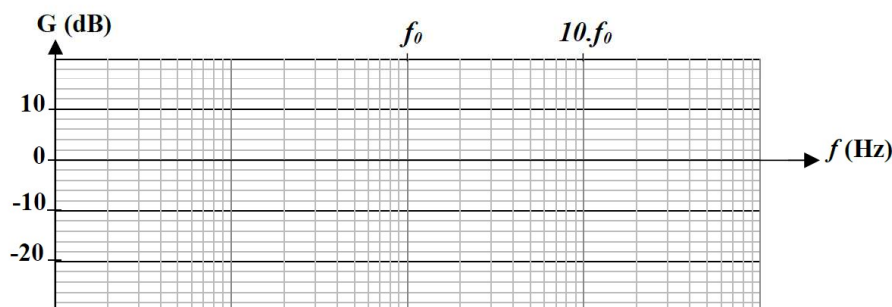
.....

.....

.....

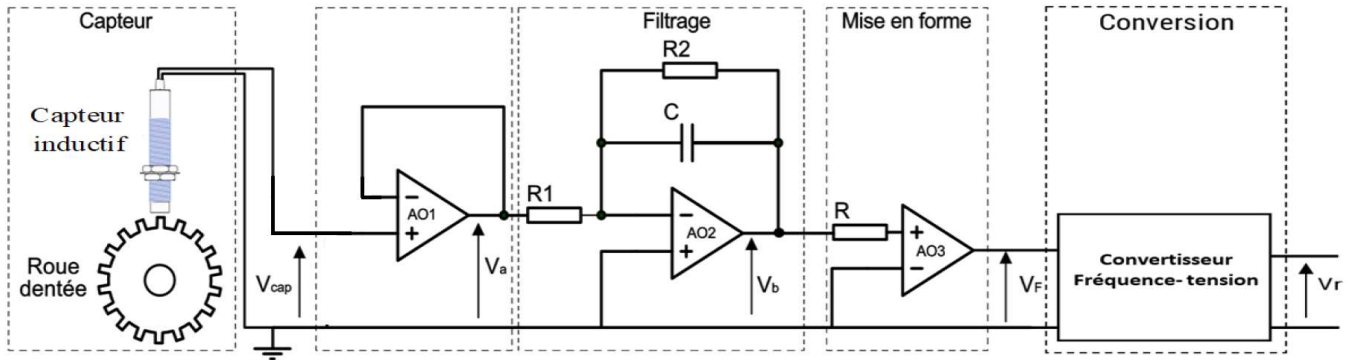
Q41.

Fréquence f	0	10.f ₀	f → ∞
Gain G (en dB)			



Exercice 5 : examen national 2025, session de rattrapage**B- Étude de la chaîne d'acquisition de vitesse**

La chaîne d'acquisition de la vitesse du moteur **M1**, pour un éventuel traitement, est donnée par le schéma ci-dessous :

**Tâche 2 : Étude du capteur inductif et du circuit de conditionnement**

Les amplificateurs opérationnels sont supposés parfaits. **AO1** et **AO2** sont alimentés en **-15 V, 0 V, +15 V** alors que **AO3** est alimenté en **0 V, +5 V**.

Q34) En exploitant le document **DRES 02**, déterminer le nombre de dents **n** de la roue dentée du capteur. **1 pt**

Q35) Donner le nom et le rôle du montage réalisé autour de l'amplificateur **AO1**. **0,5 pt**

Tâche 3 : Étude du filtre (montage autour de l'amplificateur AO2)

Les impédances complexes des éléments du filtre sont :

$$\underline{Z}_{R1} = R_1; \underline{Z}_{R2} = R_2 \text{ et } \underline{Z}_C = \frac{1}{jC\omega}.$$

On prend : $R_1 = 350 \, \Omega$ et $C = 0,1 \, \mu\text{F}$.

Q37) Exprimer l'impédance complexe $\underline{Z}_{eq}$ de la mise en parallèle de $\underline{Z}_{R2}$ et $\underline{Z}_C$ en fonction de R_2 , C et ω . **0,5 pt**

Q38) Sachant que la fonction de transfert $\underline{T} = \frac{V_b}{V_a} = -\frac{\underline{Z}_{eq}}{\underline{Z}_{R1}}$, la mettre sous la forme $\underline{T} = \frac{T_0}{1+j\frac{f}{f_0}}$ et préciser les expressions de T_0 et f_0 en fonction des composants du filtre. **2 pts**

Q39) Préciser le type et la nature du filtre réalisé en cochant les bonnes réponses ; **1 pt**

Q40) Sachant que la fréquence de coupure $f_0 = 2,25 \, \text{kHz}$, calculer la valeur de la résistance R_2 , en déduire la valeur de l'amplification T_0 . **1 pt**

[illegible]

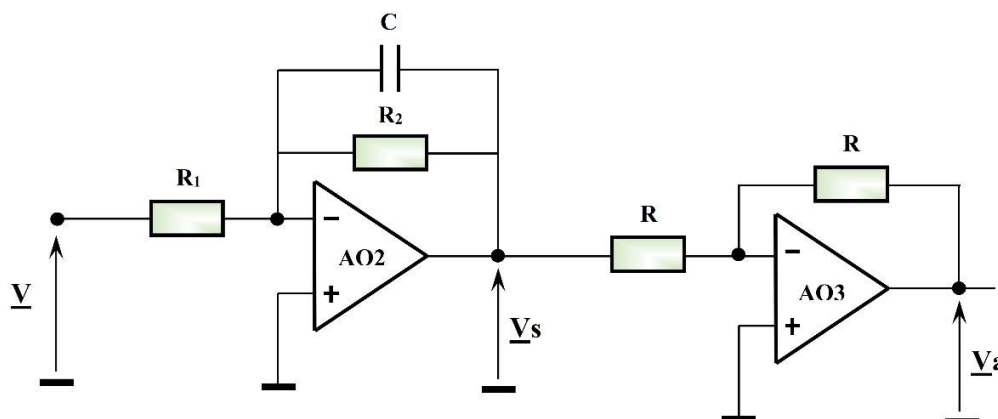
Q39)

Nature du filtre		Type du filtre		
☐ Filtre Passif	☐ Filtre Actif	☐ Passe Bande	☐ Passe Bas	☐ Passe Haut

Exercice 6 : examen national 2026, session de rattrapage

Tâche 2 : Étude du conditionneur de signal issu du détecteur des rayons X

Le schéma ci-dessous est utilisé pour le filtrage du signal v avant d'entamer sa conversion analogique numérique et son traitement numérique par microcontrôleur.



On donne $\underline{A}_V = \frac{v_a}{v} = \frac{Z}{R_1}$ avec $\underline{Z} = R_2 // \underline{Z}_C$

Q34) Préciser la nature (actif ou passif) du filtre proposé. Justifier.

1 pt

Q35) Exprimer $\underline{A}_V$ en fonction de R_2 , R_1 et C .

1,5 pt

Q36) Mettre l'expression de $\underline{A}_V = \frac{v_a}{v}$ sous la forme $\underline{A}_V = \frac{A_0}{1 + j\frac{f}{f_0}}$ et donner les expressions de A_0 et de f_0 en

fonction de R_2 , R_1 et C .

2 pts

On donne $R_1 = 50 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$ et $C = 80 \text{ nF}$.

Q37) Calculer la valeur de la fréquence de coupure f_0 et la valeur de l'amplification maximale A_0 .

1,5 pt

Q38) Calculer la valeur de V_a , lorsque $V = 2,5 \text{ V}$ et $f = 200 \text{ Hz}$ (Prendre $f_0 = 20 \text{ Hz}$).

1,5 pt

1 pt

Q34) Nature (actif ou passif) du filtre proposé et justification.


☐ Filtre actif

☐ Filtre passif

Justification :

1.5 pt

Q35) Expression de $\underline{A_v}$.

.....

.....

.....

.....

2 pt

Q36) $\underline{A_v} = \frac{V_a}{\underline{V}}$ sous la forme $\underline{A_v} = \frac{A_0}{1+j\frac{f}{f_0}}$, expression de A_0 et expression de f_0 .



.....

.....

.....

.....

.....

1.5 pt

Q37) Valeur de la fréquence de coupure f_0 et d'amplification A_0 .

.....

.....

.....

.....

1.5 pt

Q38) Valeur de V_a , lorsque $V = 2,5 \text{ V}$ et $f = 200 \text{ Hz}$.

.....

.....

.....

3

MISE EN FORME : COMPARETEURS**Régimes de fonctionnement de l'amplificateur opérationnel****1. Régime linéaire**

Ce régime est obtenu lorsque la sortie de l'AOP est reliée à son entrée inverseuse (-). On parle alors de contre-réaction négative. Dans ce cas, $v_+ \approx v_-$

⇒ Exemples d'application du régime linéaire : amplificateur, suiveur de tension, filtre.

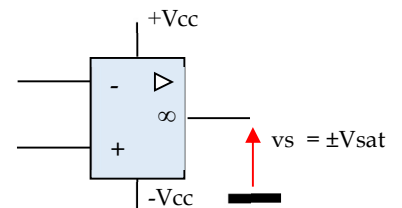
2. Régime non linéaire (ou de saturation)

Ce régime est obtenu lorsque la sortie de l'AOP est reliée à son entrée non inverseuse + (contre-réaction positive) ou lorsque l'AOP est en boucle ouverte.

La sortie de l'AOP ne peut alors prendre que deux valeurs possibles :

$$\begin{array}{ll} v_s = +V_{sat} & \text{si } v_+ > v_- \\ v_s = -V_{sat} & \text{si } v_+ < v_- \end{array}$$

⇒ Exemple d'application du régime de saturation : comparateur.

**Notes**

Si l'AOP est alimenté en $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$ (alimentation symétrique), la tension de sortie peut saturer à $+V_{sat}$ et $-V_{sat}$;

Si l'AOP est alimenté en $+V_{cc}$ et 0 V (**masse**) (alimentation simple), la tension de sortie peut saturer à $+V_{sat}$ et 0 V ;

En pratique, la tension de saturation V_{sat} est légèrement inférieure à la tension d'alimentation V_{cc} .

On considère généralement que : $V_{sat} \approx V_{cc}$.

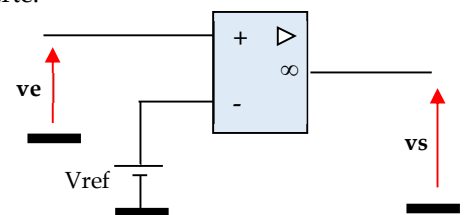
Les comparateurs sont des applications de l'AOP fonctionnant en régime de saturation (régime non linéaire). Ils permettent de comparer une tension d'entrée v_e à une tension de référence V_{ref} .

Comparateur à un seul seuil

Le comparateur est réalisé à l'aide d'un AOP fonctionnant en boucle ouverte.

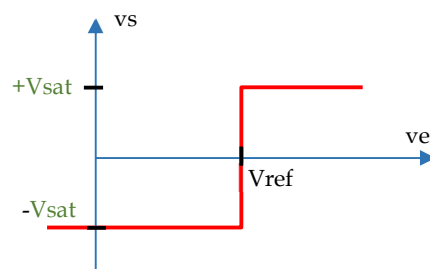
1. Comparateur à un seuil non inverseur

Le signal d'entrée v_e est appliqué à l'entrée non inverseuse (+) de l'AOP.



Deux cas sont possibles :

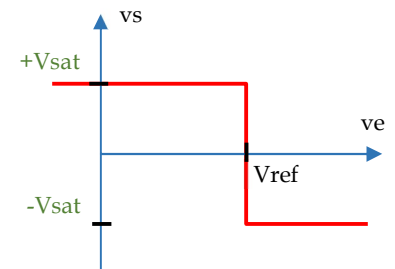
$$\begin{array}{ll} \text{Si } v_e > V_{ref} & \text{alors } v_s = +V_{sat} \\ \text{Si } v_e < V_{ref} & \text{alors } v_s = -V_{sat} \end{array}$$



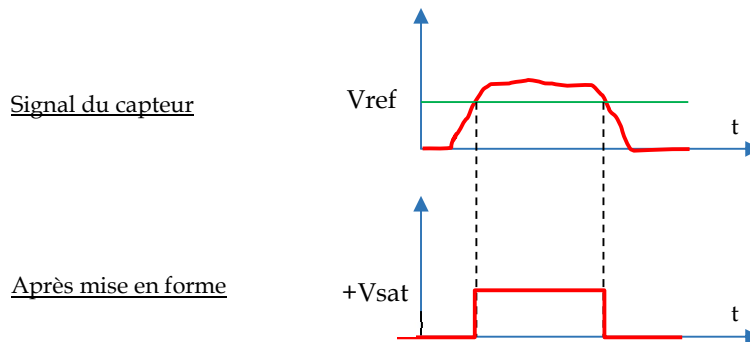
Caractéristique de transfert du comparateur

2. Comparateur à un seuil inverseur

Lorsque le signal d'entrée v_e est appliqué à l'entrée inverseuse (-), on obtient un comparateur inverseur dont la caractéristique de transfert est donnée ci-contre:



Application : mise en forme du signal d'un capteur



Comparateur à deux seuils

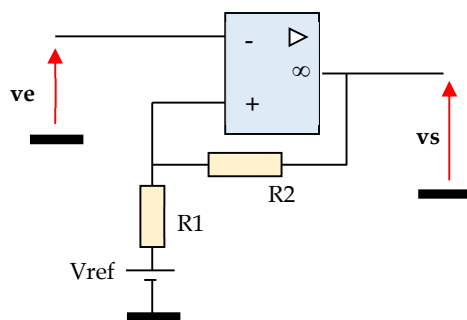
Lorsqu'on relie la sortie de l'AOP à son entrée non inverseuse + (contre-réaction positive), on obtient un **comparateur à deux seuils**, appelé aussi **comparateur à hystérésis** ou **trigger de Schmitt**.

Contrairement au comparateur à un seuil, le potentiel v_+ de l'entrée non inverseuse dépend de l'état de la sortie.

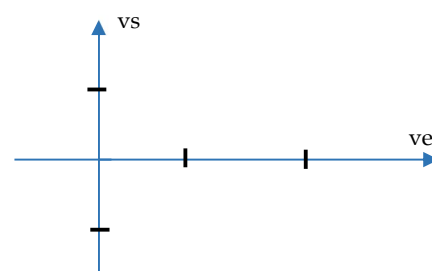
Comme la sortie ne peut prendre que deux valeurs ($+V_{sat}$ ou $-V_{sat}$), il apparaît deux seuils de basculement :

V_h : seuil haut et V_b : seuil bas.

1. Trigger inverseur



Caractéristique de transfert



Calcul des seuils de basculement

.....

.....

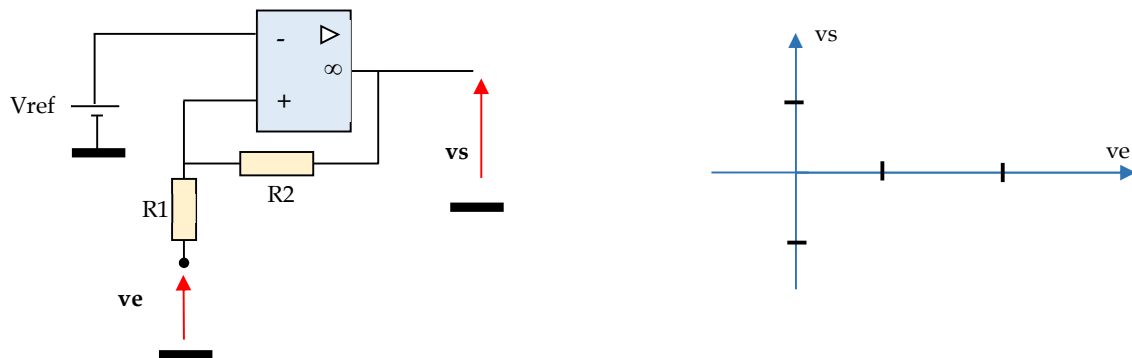
.....

.....

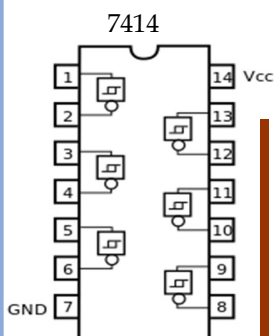
.....

.....

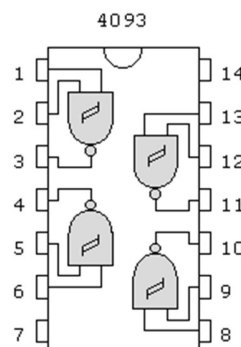
2. Trigger non inverseur



Réalisation à l'aide de circuits logiques



Le circuit intégré 7414 fait partie de la série des circuits intégrés 7400 utilisant la technologie TTL. Ce circuit est composé de six portes logiques inverseuses avec trigger de Schmitt.



Le 4093 fonctionne comme un 4011 (quadruple NAND) dont toutes les entrées seraient dotées d'un trigger de Schmitt.

Exercices

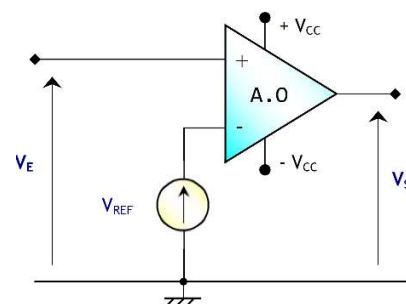
Exercice 1 : comparateur à un seuil

Le montage ci-contre est d'un comparateur.

L'entrée inverseuse est prise comme référence.

Le signal d'entrée V_E est appliqué à l'entrée non inverseuse.

$$\pm V_{CC} = \pm 12 \text{ V}; \quad V_E(t) = 8 \sin(2\pi f t) \quad (\text{en V}).$$



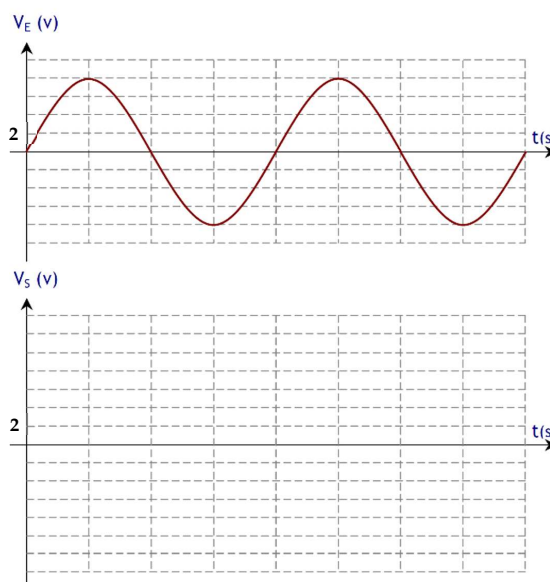
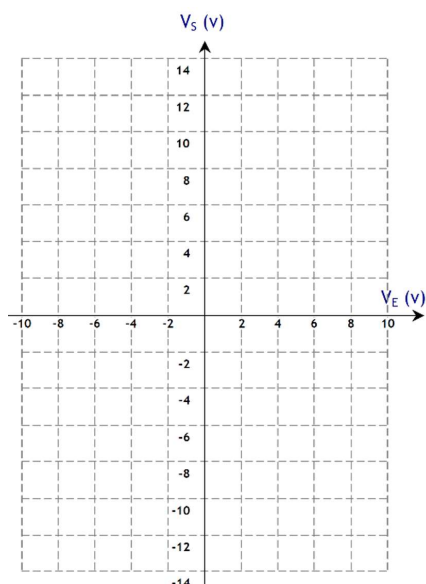
Compléter :

C'est un comparateur

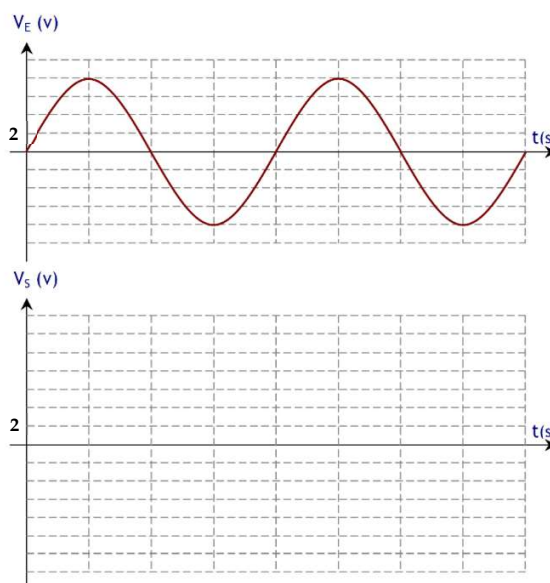
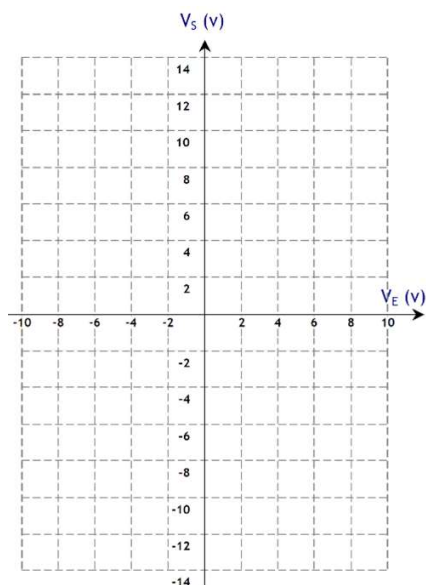
Pour $V_E < V_{REF}$

Pour $V_E > V_{REF}$

- Pour $V_{REF} = 0 \text{ V}$, tracer la caractéristique de transfert du comparateur ainsi que la courbe $V_S(t)$.



- Mêmes questions pour $V_{REF} = 6 \text{ V}$



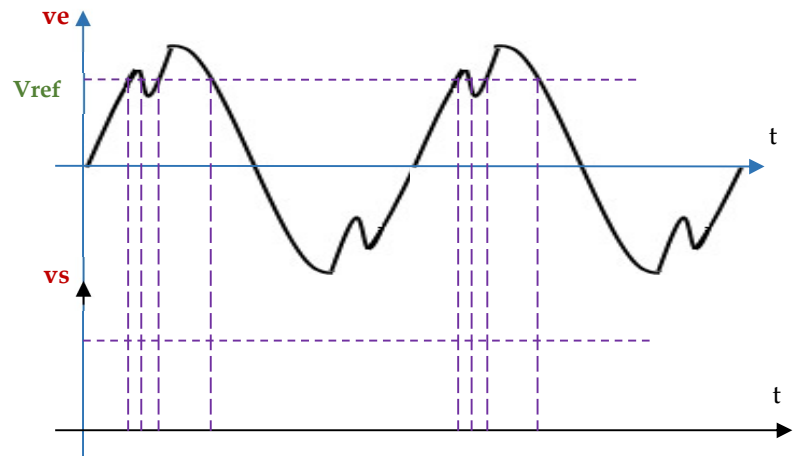
Exercice 2 : Avantage du trigger

Dans les deux cas, l'AOP est alimenté en **12 V** et **0 V**. L'entrée v_e est un signal sinusoïdal bruité. Tracer la réponse $v_s(t)$ pour les deux cas puis conclure.

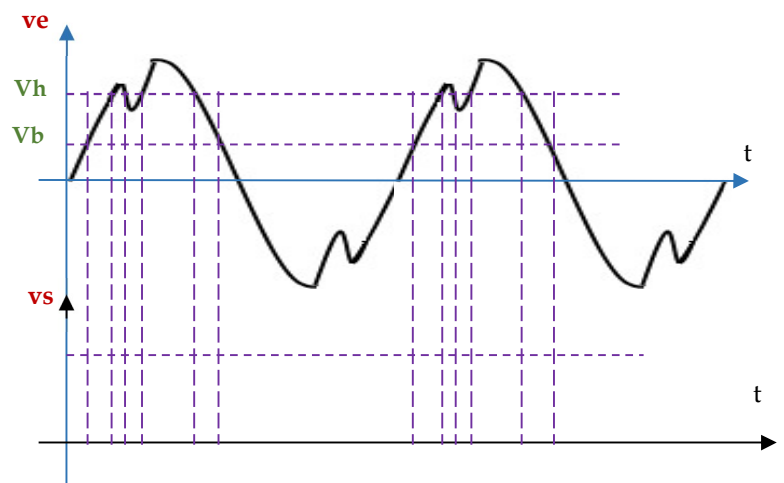
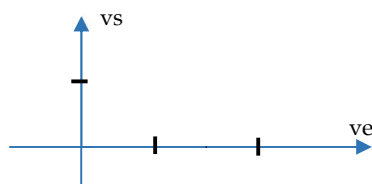
1^{er} cas : comparateur à un seuil non inverseur

Si $v_e < V_{ref}$, $v_s = \dots\dots\dots$

Si $v_e > V_{ref}$, $v_s = \dots\dots\dots$



2^e cas : trigger non inverseur

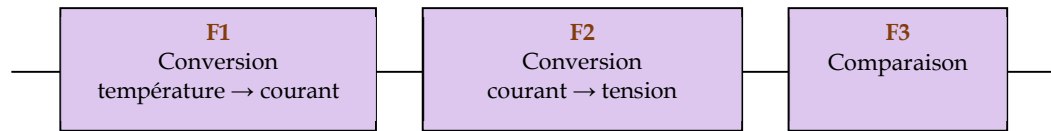


Conclusion :

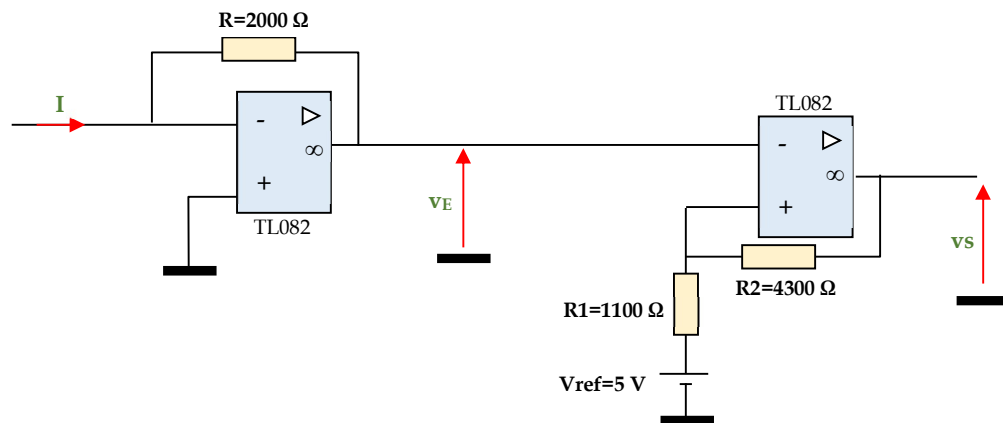
.....

Exercice 3 : régulation TOR de température

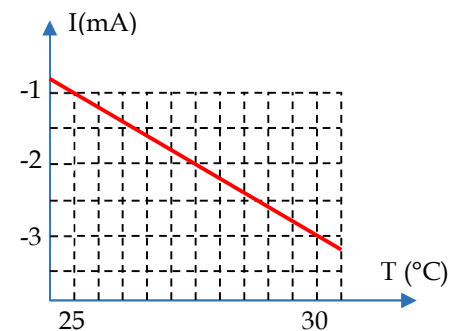
Soit la chaîne fonctionnelle d'une régulation de température:



et le schéma électronique correspondant :



L'étude du capteur matérialisant la fonction F1 n'est pas demandée. On fournit, ci-contre, sa caractéristique de transfert.



Étude fonctionnelle

- Entourer sur le schéma les parties qui matérialisent les fonctions F2 et F3.

Étude de F2

- Exprimer V_E en fonction de I .

.....

.....

- Que vaut V_E pour les températures $T = 25^\circ\text{C}$ et $T = 30^\circ\text{C}$?

.....

.....

.....

.....

Étude de F3

- Quel est le régime de fonctionnement de l'AOP ?

.....

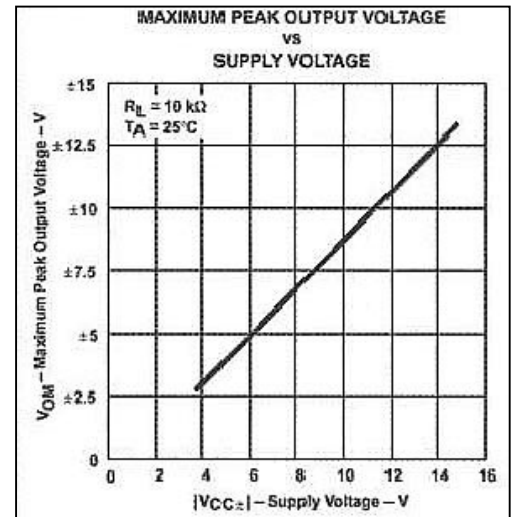
.....

- Cet AOP est un TL082. D'après sa documentation technique, relever la valeur de V_{sat} (Maximum Peak Output Voltage), sachant qu'il est alimenté (Supply Voltage) sous $\pm 11V$.

.....

.....

.....



- Donner les expressions des potentiels v_+ et v_- .

.....

.....

.....

- Déduire les valeurs des seuils de basculement V_{SH} et V_{SL} du comparateur.

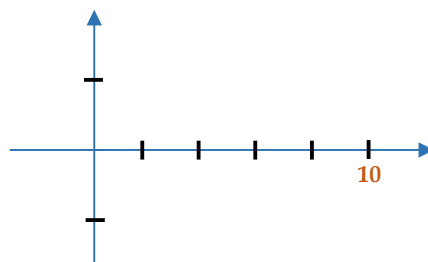
.....

.....

.....

.....

- Tracer le cycle d'hystérésis de $v_s = f(V_E)$ pour V_E variant entre 0 et 10 V.



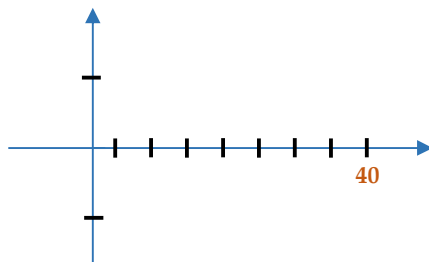
Étude de l'ensemble

- À quelle température correspond chacun des deux seuils de basculement ?

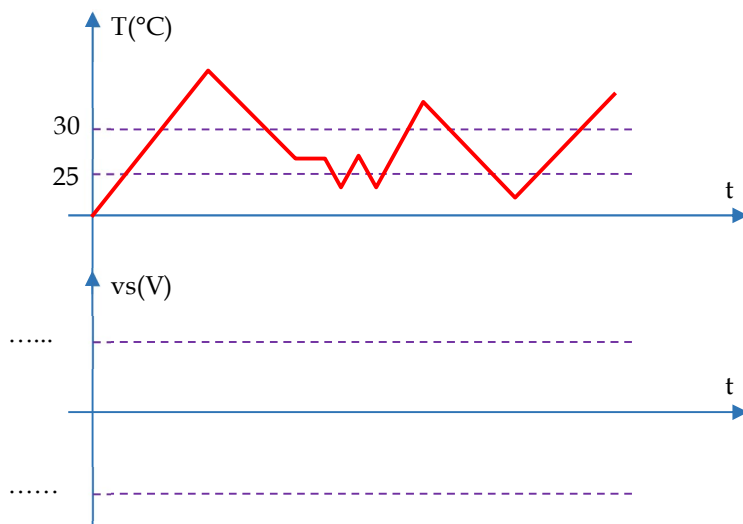
.....

.....

- Tracer le cycle d'hystérésis de $vs = f(T)$ pour T variant entre 0 et 40° C.



- Compléter la courbe de la sortie $vs(t)$.



- Si la sortie vs commande le chauffage d'une pièce, expliquer le principe de la régulation de température dans cette pièce.

.....

.....

.....

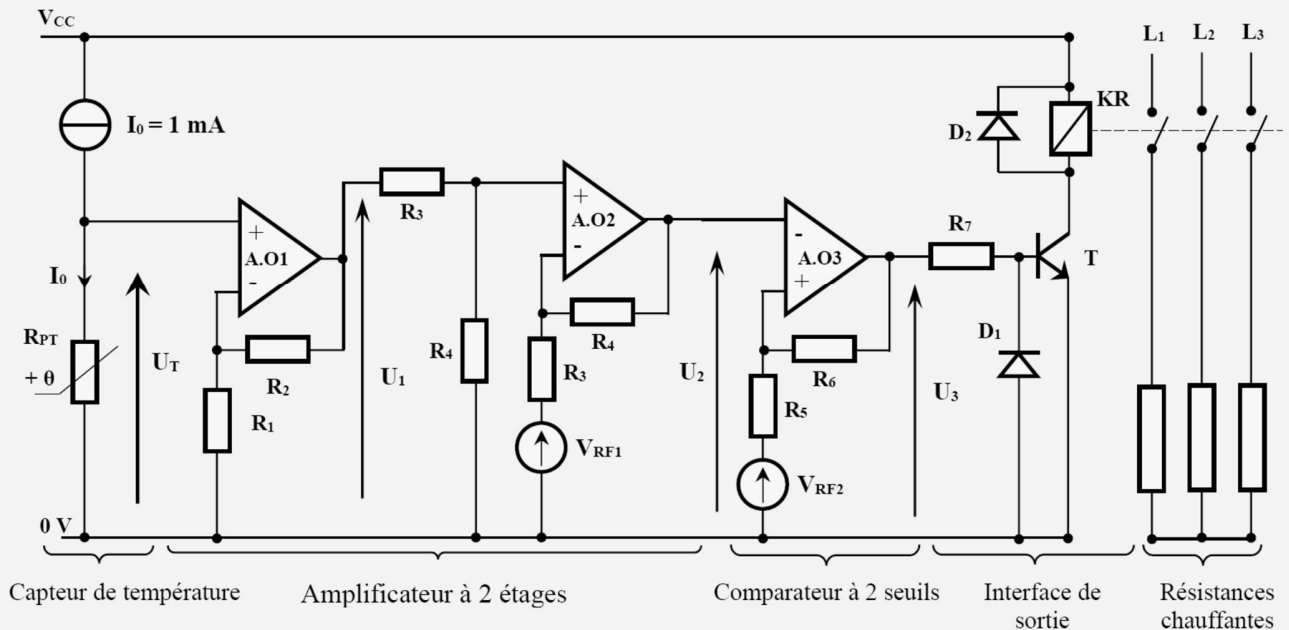
.....

Exercice 4 : examen national 2020, session normale

Le mélange des produits s'effectue à une température comprise entre 60°C et 80°C.

Tâche 1 : Commande du circuit de chauffage

Le chauffage est assuré par 3 résistances chauffantes. La température est prélevée par le capteur PT100 dont la résistance R_{PT} varie avec la température. Le schéma de commande du dispositif de chauffage est le suivant :



On considère que :

- Les amplificateurs opérationnels sont parfaits avec $\pm V_{sat} = \pm V_{CC} = \pm 15 \text{ V}$;
- Le générateur de courant fournit un courant $I_0 = 1 \text{ mA}$;
- V_{RF1} et V_{RF2} sont des tensions continues de référence.

Étude du comparateur à 2 seuils (montage autour de AO3) :

Le comparateur à 2 seuils (**trigger inverseur**) agit de la façon suivante :

- Si la température est inférieure à 60 °C, le contacteur **KR** est fermé donc les résistances chauffantes sont alimentées et la température θ augmente ;
- Si la température est supérieure à 80 °C, le contacteur **KR** est ouvert donc les résistances chauffantes ne sont plus alimentées et la température θ baisse.

On donne :

- $U_2 = 100 \cdot 10^{-3} \cdot \theta$.
- $R_5 = 3,3 \text{ K}\Omega$
- L'expression du seuil haut du trigger : $V_{SH} = \frac{V_{RF2} \cdot R_6 + V_{CC} \cdot R_5}{R_6 + R_5}$.
- L'expression du seuil bas du trigger : $V_{SL} = \frac{V_{RF2} \cdot R_6 - V_{CC} \cdot R_5}{R_6 + R_5}$.

Q43- Calculer les valeurs des seuils V_{SH} et V_{SL} (le trigger bascule à $\theta = 80^\circ C$ et à $\theta = 60^\circ C$).

2 pts

Q44- Tracer la fonction de transfert du trigger U_3 en fonction de U_2 .

2 pts

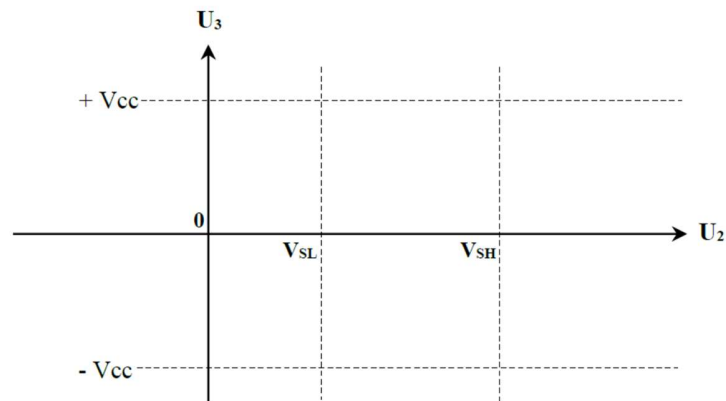
Q45- Sachant que $V_{SH} - V_{SL} = 2 V$, calculer la valeur de la résistance R_6 .

1,5 pt

Q46- Sachant que $V_{SH} + V_{SL} = 14 V$, calculer la valeur de la tension V_{RF2} .

1,5 pt

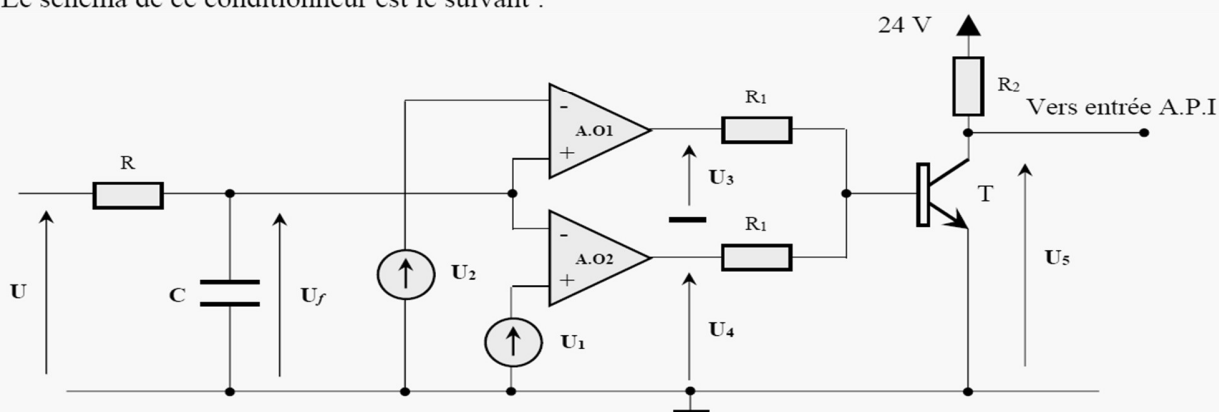
Q44- [2 pts]



Exercice 5 : examen national 2020, session de rattrapage**Conditionnement du signal**

Le circuit de conditionnement du signal de sortie du capteur à ultrasons est constitué d'un filtre, d'un comparateur à fenêtre et d'un adaptateur de tension.

Le schéma de ce conditionneur est le suivant :



Le conditionneur (montage page 07) fournit une information logique lorsque la pièce à détecter se trouve à une distance du capteur comprise entre les distances limites **d1** et **d2**.

Les amplificateurs **A.O1** et **A.O2**, ainsi que le transistor **T** sont considérés parfaits. On donne :

- Tensions de saturation des amplificateurs A.O1 et A.O2 : $V_{sat}^+ = 12\text{ V}$ et $V_{sat}^- = 0\text{ V}$
- Tensions de référence : $U_1 = 1,76\text{ V}$ et $U_2 = 8,81\text{ V}$

Q43. Donner le nom du montage autour de l'**A.O1** et tracer sa caractéristique de transfert (U_3 en fonction de U_f). **1,5 pt**

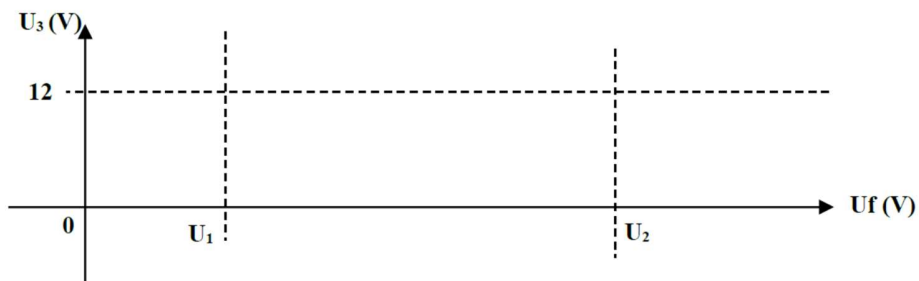
Q44. Donner le nom du montage autour de l'**A.O2** et tracer sa caractéristique de transfert (U_4 en fonction de U_f). **1,5 pt**

Q45. Le transistor **T** fonctionne en commutation. Compléter le tableau des valeurs de U_5 pour les valeurs de U_3 et U_4 . **3 pts**

Q46. Tracer, à partir des deux graphes précédents, le graphe U_5 en fonction de U_f . **1 pt**

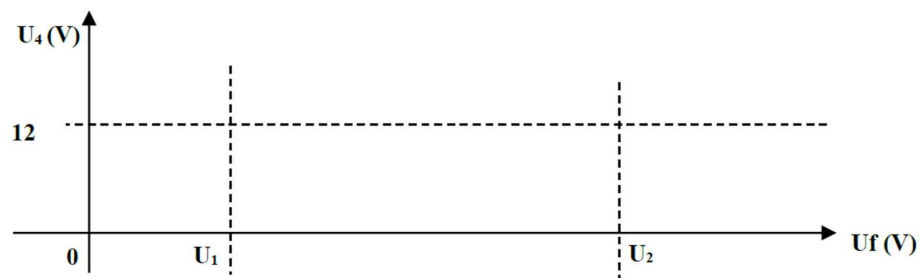
Q43- [1,5 pt]

Nom du montage :



Q44- [1,5 pt]

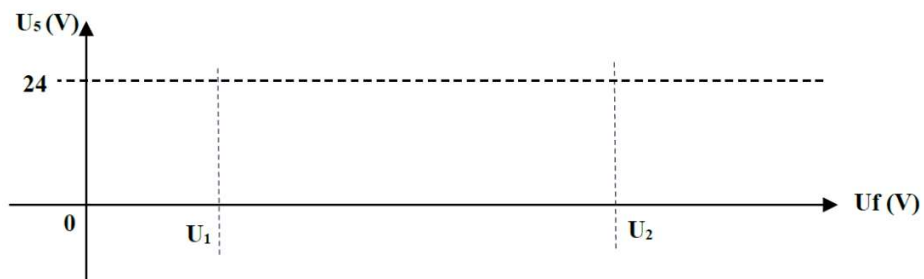
Nom du montage :



Q45- [3 pts]

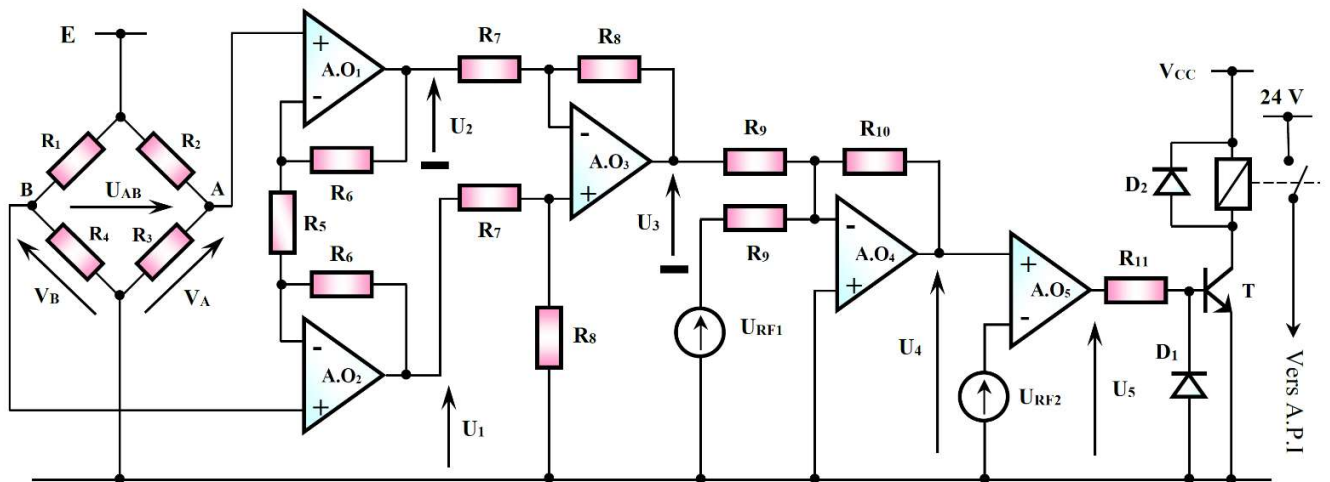
$U_3(V)$	$U_4(V)$	T (bloqué ou saturé)	$U_5(V)$
0	0	.....	.....
0	12	.....	.....
12	0	.....	.....

Q46- [1 pt]



Exercice 6 : examen national 2022, session normale

Le montage ci-dessous représente le circuit de conditionnement du signal U_{AB} permettant d'informer l'A.P.I en cas de surcharge.



Les amplificateurs opérationnels sont supposés parfaits avec $\pm V_{SAT} = \pm V_{CC} = \pm 15 \text{ V}$.

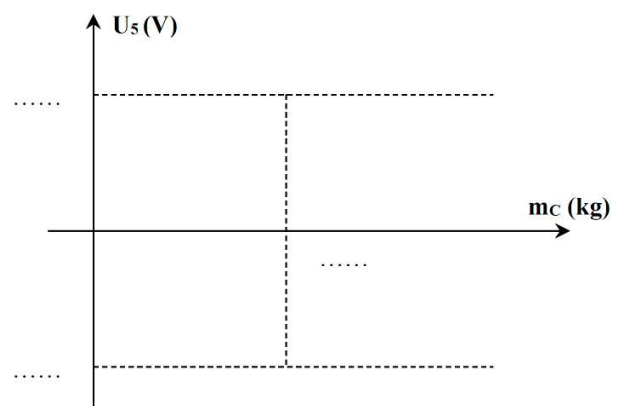
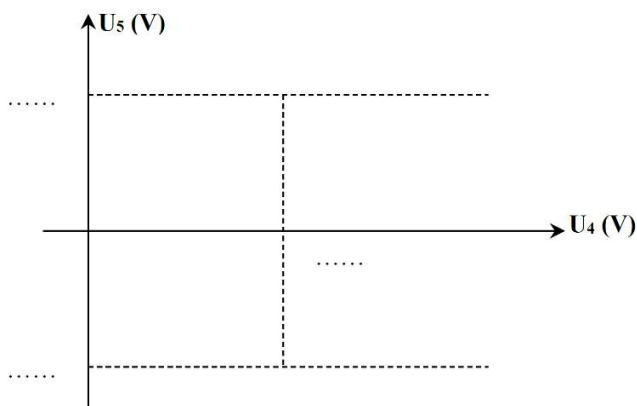
$$U_4 = 2,02 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_{10}}{R_9} \cdot m_C \quad \text{et} \quad R_9 = 22 \text{ k}\Omega$$

Q.45 - Sachant que le comparateur à seuil (montage autour de AO5) bascule lorsque la charge à déplacer m_C est supérieure à **700 kg** et que $R_{10} = 68 \text{ k}\Omega$, calculer la valeur de la tension continue de référence U_{RF2} .

1,5 pt

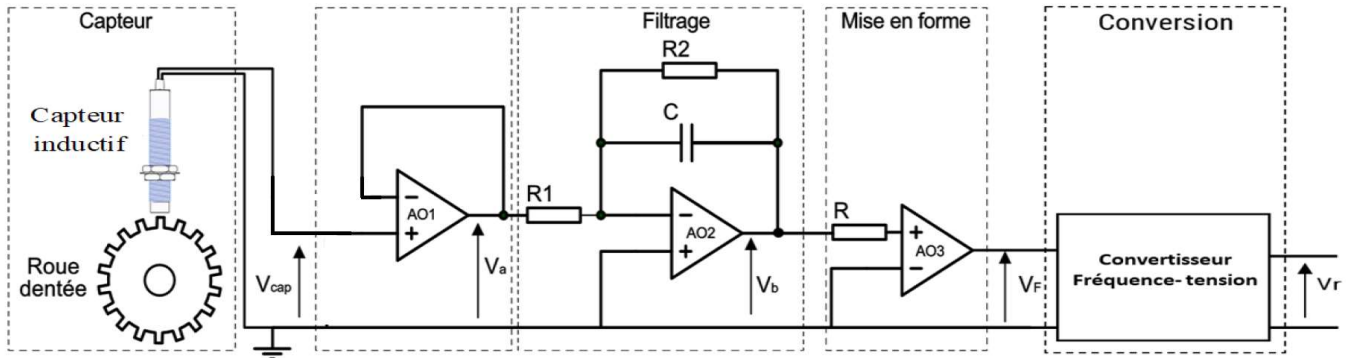
Q.46 - Tracer la fonction de transfert du comparateur à seuil U_5 en fonction de U_4 , en déduire alors la caractéristique $U_5 = f(m_C)$.

3 pts



Exercice 7 : examen national 2025, session de rattrapage**B- Étude de la chaîne d'acquisition de vitesse**

La chaîne d'acquisition de la vitesse du moteur **M1**, pour un éventuel traitement, est donnée par le schéma ci-dessous :



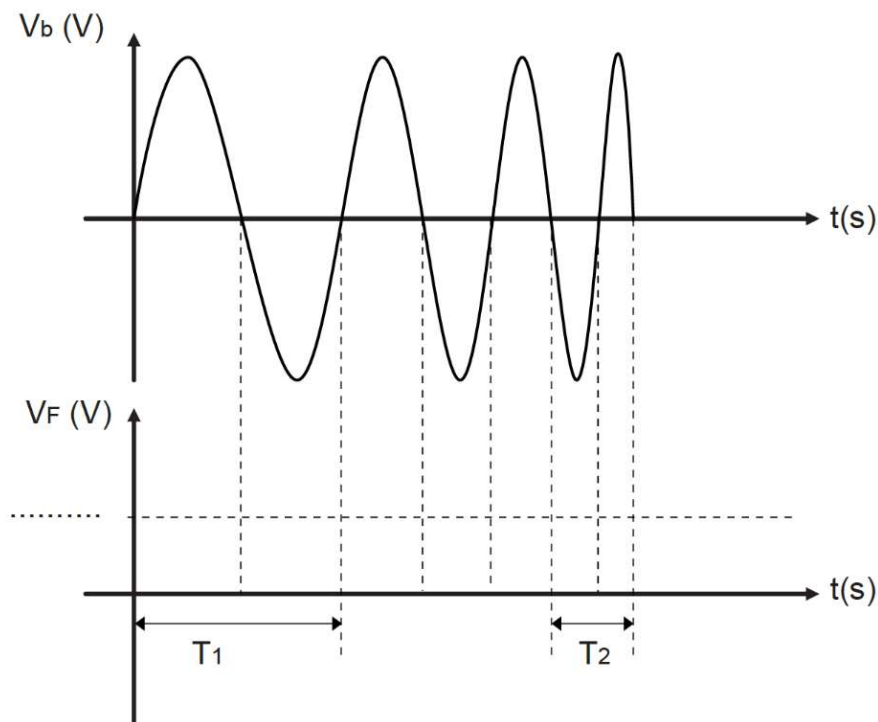
La tension $V_b(t)$ à l'entrée du montage AO3 (Comparateur à 1 seul seuil) est une tension sinusoïdale ;

Q36) Tracer la forme de la tension de sortie $V_F(t)$ et préciser la valeur de son amplitude.

1 pt

AO3 est alimenté en 0 V, +5 V.

Q36)



4

CONVERTISSEURS

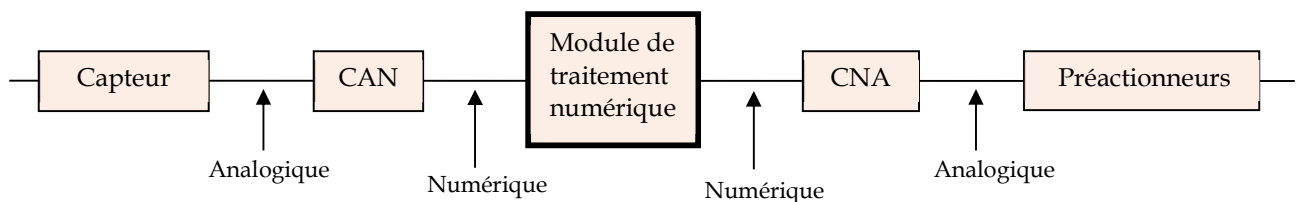
La chaîne d'information utilise différents convertisseurs pour transformer une information électrique d'une forme à une autre. Ceux étudiés dans cette leçon sont :

- Les convertisseurs **numérique-analogique** et **analogique-numérique** ;
- La convertisseurs **courant-tension** ;
- Les convertisseurs **tension-fréquence** et **fréquence-tension**.

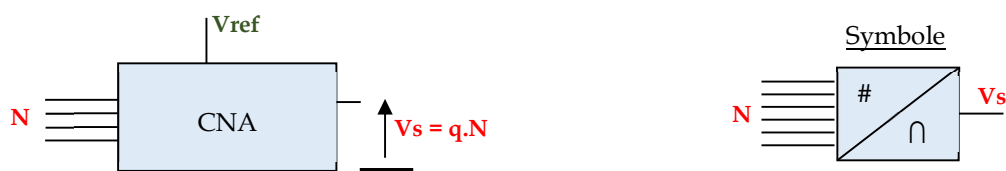
Conversion numérique-analogique

De plus en plus, les systèmes techniques utilisent la technologie numérique à base de microprocesseur du fait des avantages qu'elle présente.

Ainsi, lorsque les signaux issus des capteurs sont analogiques ou que les actionneurs doivent être commandés par des signaux analogiques, il est nécessaire de procéder à des conversions.

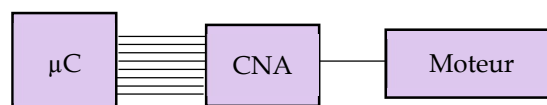


Un CNA transforme une valeur numérique (mot binaire) en une autre analogique (tension ou courant).

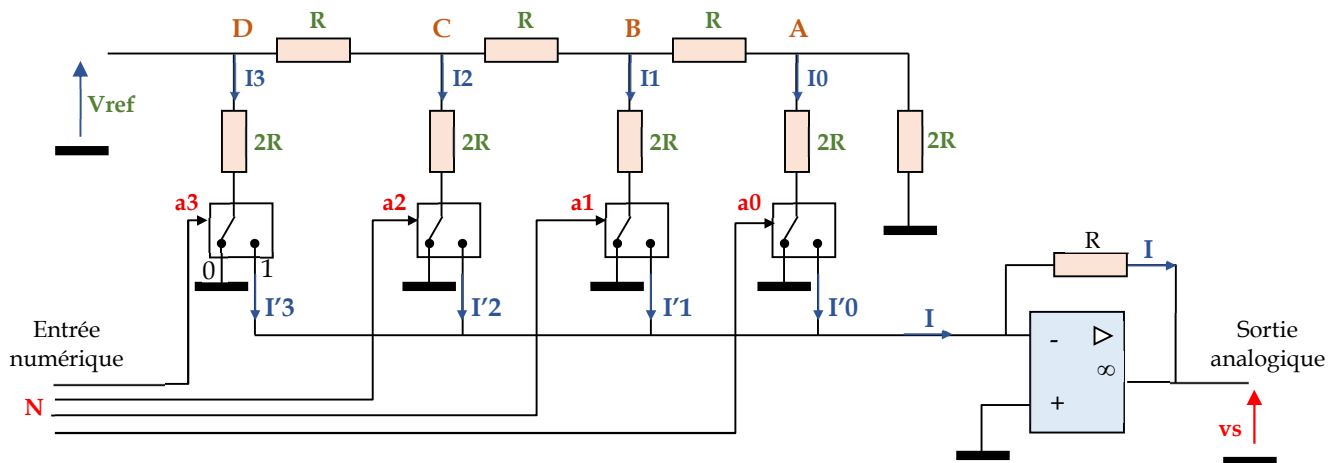


V_{ref} : tension de référence
 n : nombre de bits du convertisseur
 q : quantum (ou résolution analogique)

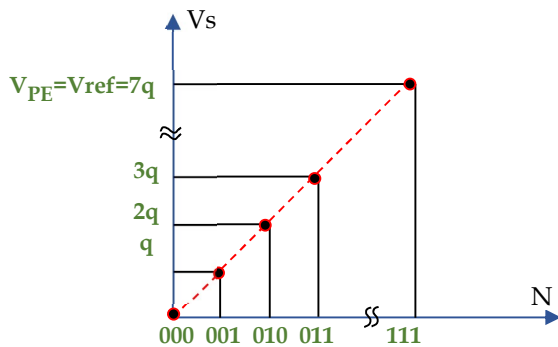
Exemple d'application : variation de vitesse d'un moteur électrique par microcontrôleur



⇒ CNA à réseau R/2R



Caractéristique de transfert (cas de $n = 3$ bits)



Quantum q et fonction de transfert

Le **quantum q** est la plus petite variation de la tension de sortie v_s : v_s augmente de q lorsque N augmente de 1

$$q = \frac{V_{ref}}{2^n - 1}$$

$$V_s = q \cdot N$$

$$N_{max} = 2^n - 1$$

n : nombre de bits

V_{ref} : tension de référence. Elle fixe la tension pleine V_{PE} , tension maximale que peut prendre la sortie ($V_{PE} = V_{ref}$)

Exercice 1 On applique $V_{ref} = 8 \text{ V}$ à un CNA 6 bits. Calculer V_s pour $N = 100101$, 001001 et 111111

.....

.....

.....

.....

.....

Exercice 2 Sachant que $V_{ref} = 10 \text{ V}$ et que c'est CNA 8 bits, calculer V_s pour $N = 10011001$ et $N = 00010110$

.....

.....

.....

.....

Exercice 3

Quelle est la **pleine échelle** d'un CNA qui fournit $vs = 1\text{ V}$ pour $N = 00010111$?

.....

.....

.....

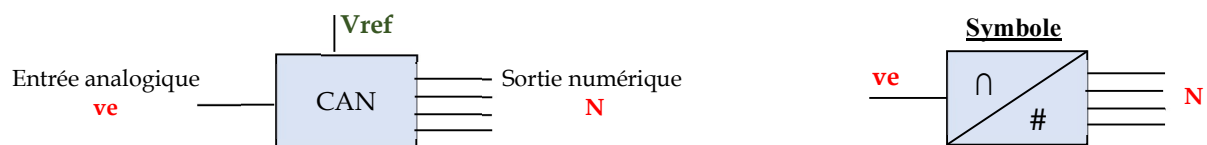
.....

.....

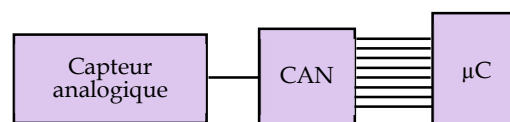
.....

Conversion analogique-numérique

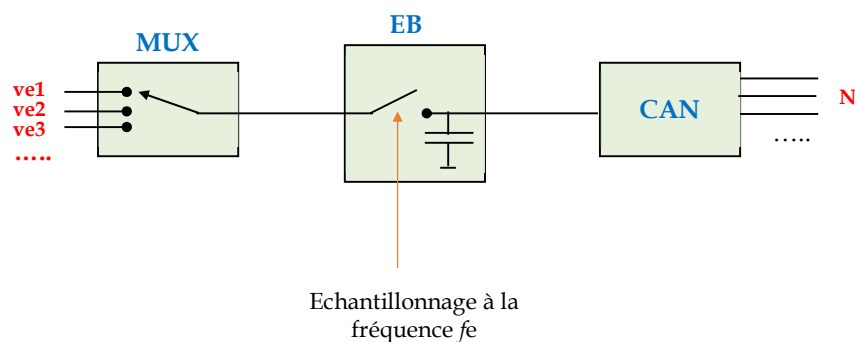
Le CAN permet d'obtenir en sortie une grandeur numérique codée sur n bits dont la valeur est représentative de la grandeur analogique présente à l'entrée.



Exemple d'application : traitement numérique du signal issu d'un capteur analogique



Chaîne de conversion



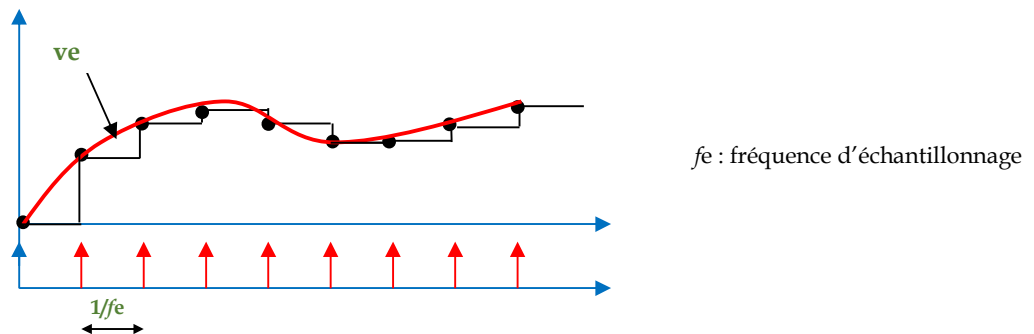
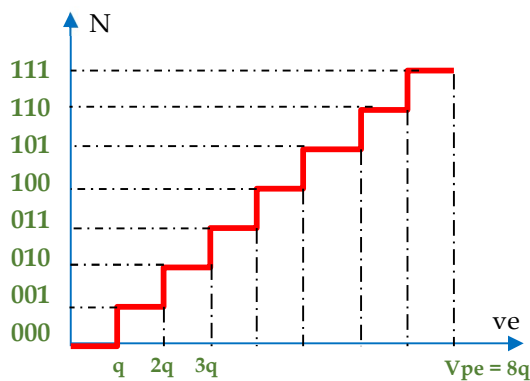
MUX : multiplexeur

Le multiplexeur est nécessaire lorsqu'il s'agit de convertir des signaux analogiques provenant de plusieurs sources. Il permet d'utiliser, en temps réel, un même convertisseur CAN.

EB : échantillonneur bloqueur

L'EB assure l'échantillonnage qui consiste à prélever, à divers instants, une valeur de l'entrée v_e et la bloquer pour la conversion puisque celle-ci n'est pas instantanée.

- Le prélèvement d'un échantillon s'obtient par fermeture de l'interrupteur électronique ;
- Pendant que l'interrupteur s'ouvre, le condensateur conserve l'échantillon lors de la conversion.

**Caractéristique de transfert (Cas de $n=3$ bits)****Quantum et fonction de transfert**

Le **quantum** q est la plus petite variation de v_e qui provoque une incrémentation du code numérique N de sortie.

$$q = \frac{V_{ref}}{2^n}$$

$$V_e = q.N$$

n : nombre de bits

V_{ref} : tension de référence. Elle fixe la tension pleine V_{PE} , tension maximale tolérée en entrée.

Exercice

On applique à l'entrée d'un **CAN 8 bits** une tension d'entrée $v_e = 7,224 \text{ V}$, la tension de référence est de **10 V**.

- Calculer le quantum.
- Déterminer, en décimal puis en binaire, le résultat N de la conversion.

.....

.....

.....

.....

.....

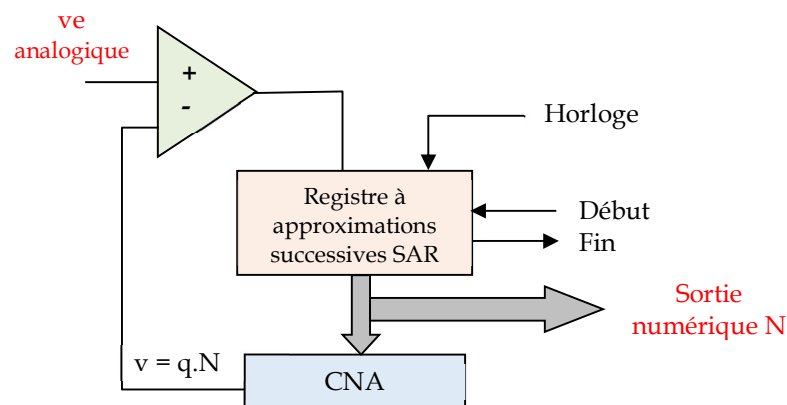
⇒ CAN à approximations successives

Principe

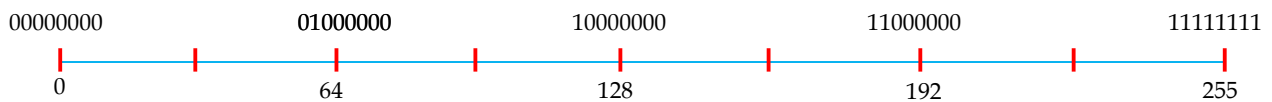
On teste bit après bit en commençant par celui de poids fort (MSB).

À chaque fois, la valeur N proposée est convertie par le CNA interne pour être comparée à v_e .

- Si $v \leq v_e$, le bit est conservé
- Si $v > v_e$, le bit est rejeté



Exemple (cas de 8 bits)



- Au début, le registre SAR génère le mot **1**0000000. La tension v délivrée alors par le CNA est comparée à v_e :
 - Si $v \leq v_e$, le SAR propose **1**1000000 (bit b7 conservé) ;
 - Si $v > v_e$, le SAR propose **0**1000000 (bit b7 rejeté).
- Supposons que $v \leq v_e$, le CNA reçoit **1**1000000 et v sera de nouveau comparée à l'entrée v_e :
 - Si $v \leq v_e$, le SAR essaie **1**1100000 (bit b6 conservé) ;
 - Si $v > v_e$, le SAR essaie **1**0100000 (bit b6 rejeté).
- Le cycle de comparaison se poursuit jusqu'au dernier bit.

Exercice

Soit à convertir une tension $v_e = 1,705 \text{ V}$ par un CAN à approximations successives.

Le CAN est à 8 bits et possède un quantum $q = 0,01 \text{ V}$.

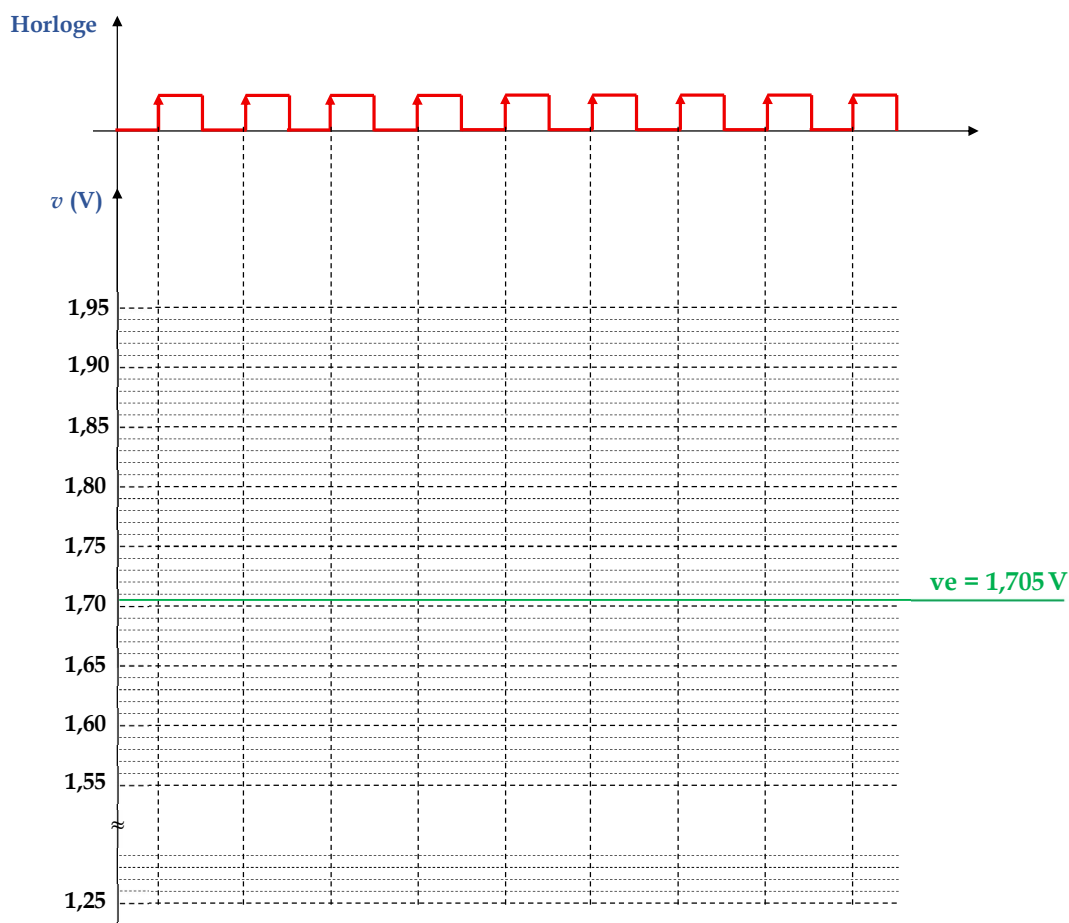
$v_e = 1,705 \text{ V}$

CAN
 $q = 0,01 \text{ V}$
8 bits

Compléter le tableau de conversion et tracer la courbe $v(t)$ correspondante.

N	$v = q.N$	Comparateur
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		

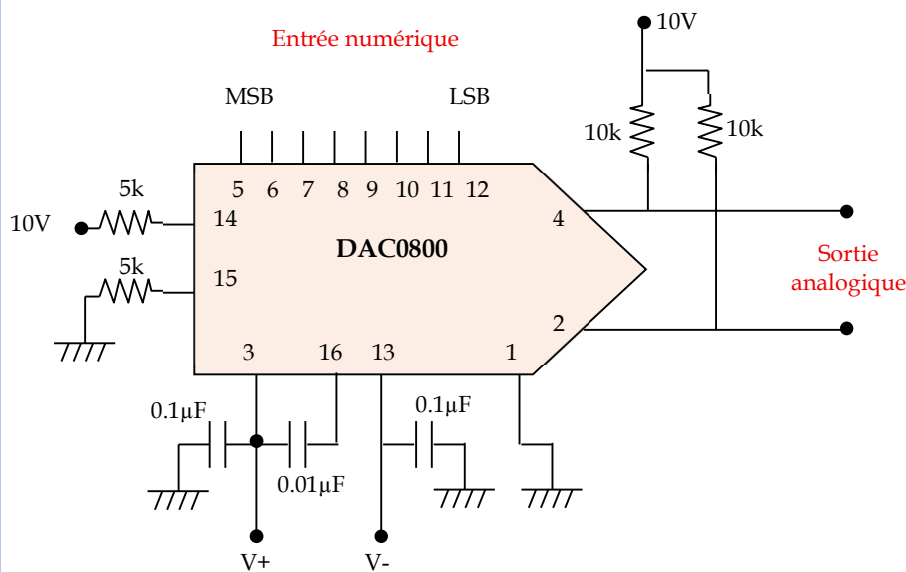
Résultat de la conversion :



Conversion analogique ↔ numérique Réalisation à l'aide de circuits intégrés

1. Le convertisseur-numérique analogique DAC0800 de Motorola est un convertisseur 8 bits rapide. La tension de sortie peut atteindre 20 V.

Symbole et câblage minimal du DAC0800



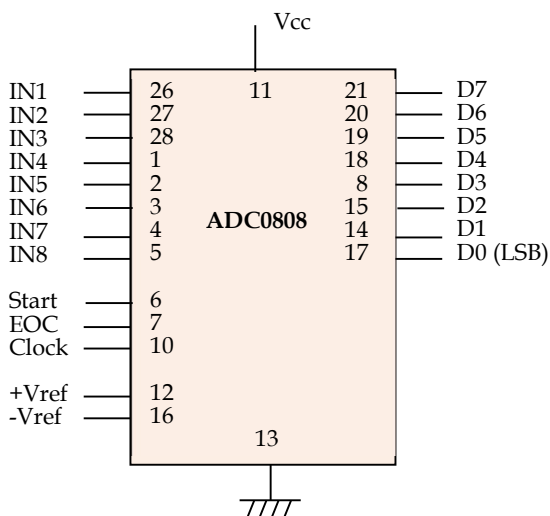
MSB : bit de poids fort
LSB : bit de poids faible

Caractéristiques

Temps de conversion : 100 ns
Tension de sortie jusqu'à 20 V
Alimentation de ± 4.5 V à ± 18 V
Consommation : 33 mW à ± 5 V

2. Le convertisseur analogique-numérique ADC0808 est un convertisseur à approximations successives 8 bits muni d'un multiplexeur 8 voies. Le CNA interne est à base du réseau R/2R.

Principales broches du ADC0808



IN1 ... IN8 : entrées analogiques multiplexées

D0...D7 : sortie numérique

Start et EOC : signaux de début et fin de conversion

+Vref et -Vref : tensions de référence qui permettent de fixer les valeurs min et max de l'entrée

Caractéristiques

Alimentation : $V_{ccmax} = 5$ V

Faible consommation : 15 mW

Durée d'un cycle de conversion : 100 μ s

Température de fonctionnement : -40 °C à $+85$ °C

Erreur : $\pm \frac{1}{2}$ LSB

Nombre de broches : 28

Exercice

Le microcontrôleur PIC 16F877 est doté d'un CAN qui permet de traiter des informations analogiques. Ce CAN a une résolution numérique de **10 bits** et une tension de référence fixée à **5 V**.

- Calculer le quantum de ce convertisseur.

.....

- Compléter ce tableau de conversion.

ve(V)	N décimal	N binaire									
		512	256	128	64	32	16	8	4	2	1
1											
2											
3											
4											
5											

- Le convertisseur étant à approximations successives, compléter le tableau de conversion correspondant à l'entrée $ve = 3V$.

N											v = q.N
512	256	128	64	32	16	8	4	2	1		
.....											
.....											
.....											
.....											
.....											
.....											
.....											
.....											
.....											
.....											

Résultat de la conversion :

Exercice 1 : examen national 2019, session normale**Tâche 4 : Etude de la fonction FP4**

On utilise un convertisseur analogique numérique (CAN) pour convertir la tension V_4 , image de la force F , en un signal numérique. On donne l'expression du nombre N résultat de la conversion en fonction de V_4 et du quantum q : $N = V_4/q$

Question : 40. Sachant que $N = 200$ pour $V_4 = 1$ V et que $N_{\max} = 1023$, calculer la valeur pleine échelle **PE** définie par $PE = q.(N_{\max} + 1)$; [2 pts]

Question : 41. Calculer la résolution numérique (nombre de bits) n du CAN. [2 pts]

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Exercice 2 : examen national 2021, session de rattrapageNumérisation :

La tension V_2 image du couple T est numérisée par un convertisseur analogique numérique (CAN 8 bits) avant d'être utilisée par l'A.P.I. On donne :

- La valeur numérique N de la conversion correspondante au couple T : $N = \frac{V_2 - V_{REF-}}{V_{REF+} - V_{REF-}} . 255$;
- $V_{REF+} = 10$ V ; $V_{REF-} = 0$ V ;
- Pour les signaux de basse fréquence : $V_2 = 20.10^{-3} . T$ (en Volt).

Q48- Calculer la résolution analogique q (quantum) de ce convertisseur en **mV**. [1 pt]

Q49- Déterminer les valeurs $N1$ et $N2$ du mot N (valeurs en décimal) correspondantes aux couples :

$T_1 = 240$ N.m et $T_2 = 300$ N.m. [2 pts]

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Exercice 3 : examen national 2024, session normale**Tâche 4 : Numérisation du signal U_s**

La tension U_s image de la position α du manche de la manette est numérisée par le convertisseur analogique numérique interne au **PIC 16F876**. On donne :

- La valeur numérique N de la conversion correspondante à α : $N = \frac{U_s}{5} \cdot 511$ (conversion sur **9 bits**) ;
- L'expression de la tension U_s en fonction de α : $U_s = 0,1 \cdot \alpha + 2,5$ (en Volt).

Q.44- Déterminer les valeurs de U_s correspondant aux positions $\alpha_1 = +12^\circ$ et $\alpha_2 = -12^\circ$. **1 pt**

Q.45- En déduire les valeurs $N1$ et $N2$ du mot N (valeurs entières en base décimale) correspondant aux positions : $\alpha_1 = +12^\circ$ (montée du crochet) et $\alpha_2 = -12^\circ$ (descente du crochet). **2 pts**

ÉLABORATION DE LA COMMANDE DU VARIATEUR DE VITESSE DU MOTEUR DE LEVAGE

Le variateur de vitesse du moteur **M1** est commandé par une tension U_C qui varie de **0 à 10 V**, lorsque le manche de la manette est poussé vers l'extrémité (α varie de 0° à $\pm 25^\circ$), par l'intermédiaire d'un convertisseur numérique/analogique (C.N.A à 8 bits) connecté au **PORTB** du microcontrôleur.

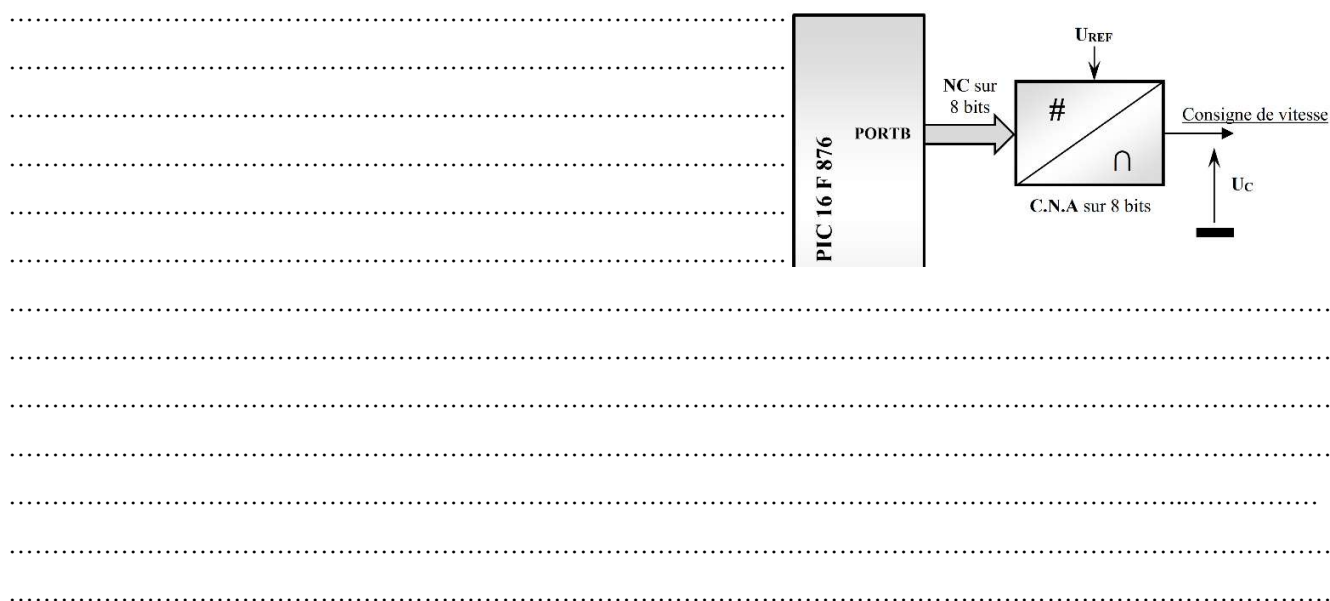
Tâche 5 : Restitution du signal U_C « consigne de vitesse du moteur M1 »

Le nombre N_C (vitesse consigne) est calculé par le microcontrôleur et généré sur le **PORTB**, ce nombre est converti en tension U_C par le C.N.A représenté sur le document **DRES 03**.

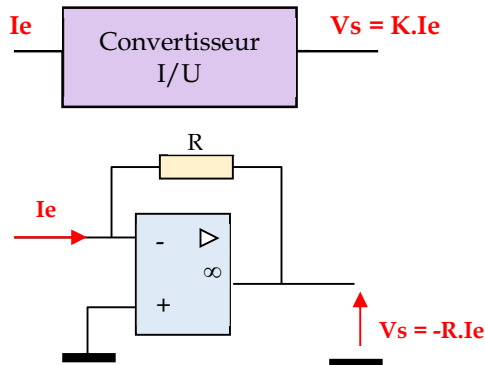
On donne : $U_C = \frac{U_{REF}}{2^8} \cdot N_C$ Avec $N_C = 2^7 \cdot RB_7 + 2^6 \cdot RB_6 + 2^5 \cdot RB_5 + 2^4 \cdot RB_4 + 2^3 \cdot RB_3 + 2^2 \cdot RB_2 + 2^1 \cdot RB_1 + 2^0 \cdot RB_0$

Q.46- Calculer la valeur de la tension U_{REF} du C.N.A pour avoir $U_C = 10 V$ à pleine échelle. **2 pts**

Q.47- On admet que $U_C = 0,04 \cdot N_C$, calculer le nombre N_{Cm} (en décimal) permettant de sélectionner la vitesse minimale de déplacement du crochet correspondant à $U_C = 3 V$. **1 pt**



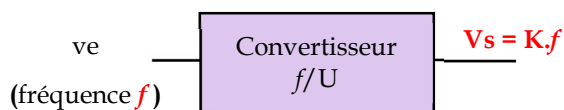
Conversion courant-tension



Ce convertisseur fournit une tension proportionnelle au courant qu'il reçoit.

Il peut être utilisé pour obtenir une sortie tension à partir d'un circuit à sortie courant comme une photodiode, un CNA à sortie courant, etc.

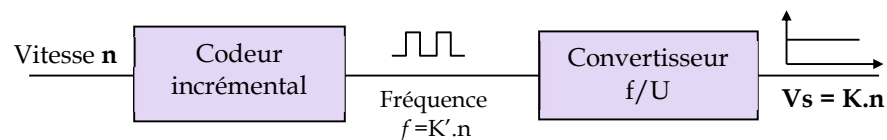
Conversion fréquence-tension



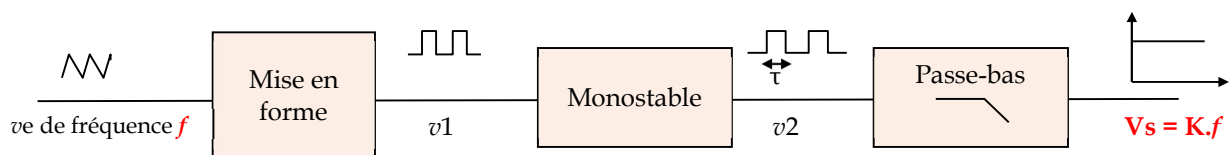
Permet de produire une tension continue proportionnelle à la fréquence du signal d'entrée.

Exemple d'application

Conversion en tension continue du signal en créneaux de sortie d'un codeur incrémental.



Principe

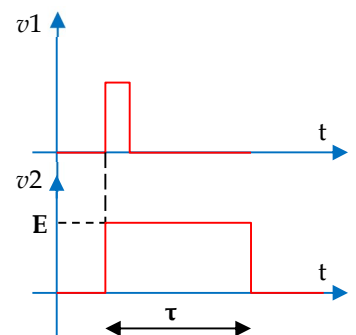


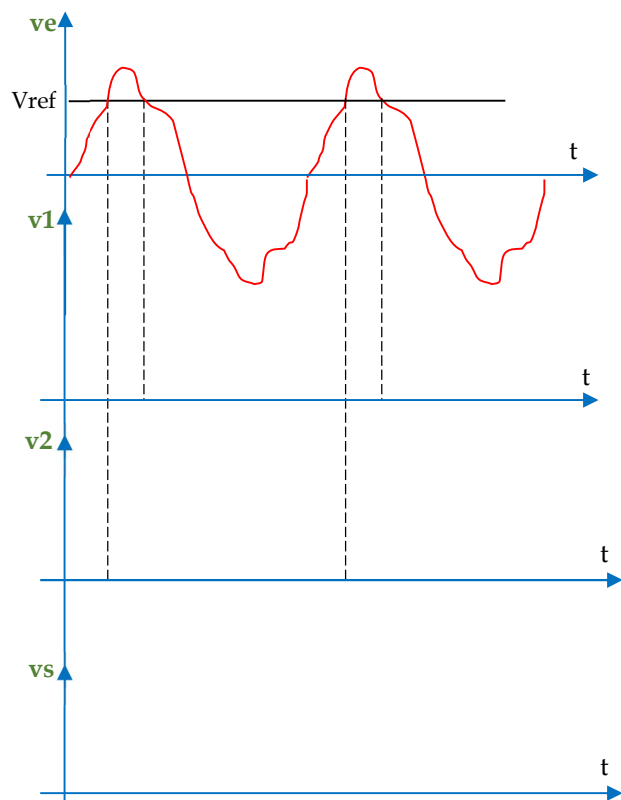
- Le **monostable** génère des impulsions calibrées de durée τ déterminée et d'amplitude E ;
- Le **filtre passe-bas** permet d'extraire la **valeur moyenne** du signal délivré par le monostable.

En effet selon la loi de Fourier, tout signal périodique est décomposable en sa composante continue et une série de composantes sinusoïdales.

$$V(t) = V_{\text{moy}} + V_1 \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t + \varphi_1) + V_2 \cdot \sin(2\pi f_2 \cdot t + \varphi_2) + \dots$$

Un filtre passe-bas de fréquence de coupure inférieure à la fréquence f_1 , laisse passer seule la valeur moyenne V_{moy} (composante continue).





Vérification de la relation $v_s = K.f$

.....

.....

.....

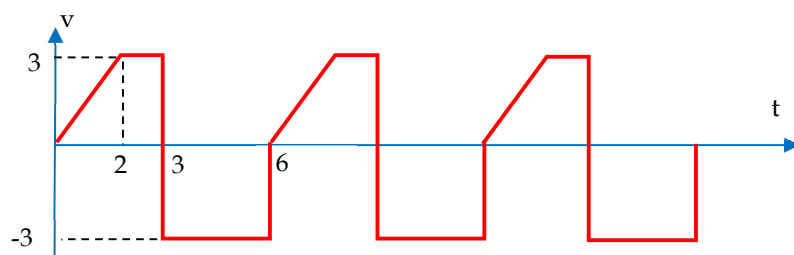
.....

.....

.....

.....

Exemple de calcul de la valeur moyenne d'un signal périodique



.....

.....

.....

.....

.....

.....

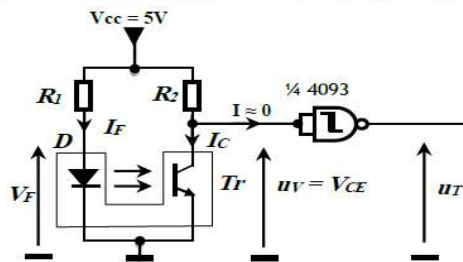
.....

.....

Exercice 1 : examen national 2018, session de rattrapage**Tâche 3 : Mesure de la vitesse**

La vitesse de rotation du moteur est acquise au moyen d'un codeur optique incrémental qui génère un signal carré de fréquence proportionnelle à la vitesse du moteur. Ce codeur est constitué :

- D'un disque comportant 72 trous (figure a) et fixé sur l'arbre de sortie du réducteur ;
- D'un détecteur optoélectronique à fourche lié au bâti et alimenté comme indiqué dans la figure b.

**Figure a****Figure b**

Les éléments du détecteur ont pour caractéristiques principales:

- Intensité du courant dans la diode électroluminescente : $I_F = 20 \text{ mA}$;
- Tension aux bornes de la diode **D** électroluminescente : $V_F = 1,5 \text{ V}$;
- Intensité maximale du courant dans le collecteur du phototransistor **Tr** lorsqu'il est saturé : $I_{CMAX} = 0,5 \text{ mA}$;
- Tension V_{CESAT} entre le collecteur et l'émetteur du phototransistor **Tr** lorsqu'il est saturé : $V_{CESAT} \approx 0 \text{ V}$.

Q31) Calculer les valeurs des résistances R_1 et R_2 .

4 pts

Q32) Suivant l'état du phototransistor (saturé ou bloqué), donner la valeur de la tension u_V en volts.

1 pt

Q33) On admet que la fréquence f du signal u_V est liée à la vitesse N_d du disque du codeur par la relation :

$$f = R \cdot N_d \quad \text{où } R = 72 \text{ (résolution du codeur) et } N_d \text{ étant en tr/s.}$$

Montrer que la fréquence f du signal u_V est liée à la vitesse du moteur $N_{mot} \text{ (tr/min)}$ par : $f = \frac{N_{mot}}{60} \cdot K \cdot R$

où $K = 1/25$ est le rapport de réduction.

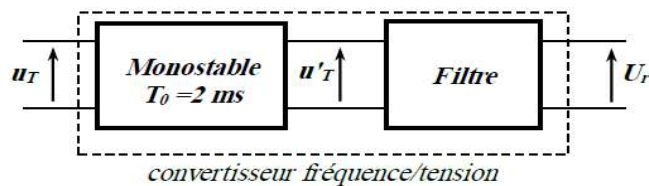
2 pts

Q34) Sachant que la vitesse du moteur N_{mot} varie entre 200 et 4000 tr/min, calculer alors les fréquences f_{min} et

f_{max} correspondantes.

2 pts

Après la mise en forme du signal u_V , le signal u_T est appliqué à l'entrée d'un convertisseur fréquence/tension constitué d'un monostable suivi d'un filtre comme l'indique la figure suivante :



Le monostable génère une impulsion de 2 ms à chaque front montant de u_T .

Les chronogrammes des signaux u_T et u'_T sont représentés sur le document DRES 04.

On admet pour la suite que la fréquence f du signal u_T varie entre $f_{min} = 10 \text{ Hz}$ et $f_{max} = 200 \text{ Hz}$.

Q35) Exprimer U'_{Tmoy} (valeur moyenne de u'_T) en fonction de f .

1 pt

Q36) La tension u'_T peut être considérée comme la somme d'une composante continue U'_{Tmoy} (de fréquence nulle) et de plusieurs tensions sinusoïdales dont les fréquences sont supérieures ou égales à la fréquence f .

Quel est le type de filtre (passe-bas, passe-haut ou passe-bande) qui convient pour avoir une tension continue $U_f = U'_{Tmoy}$?

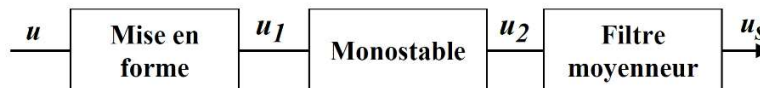
1 pt

Exercice 2 : examen national 2022, session de rattrapage

⇒ Conditionnement

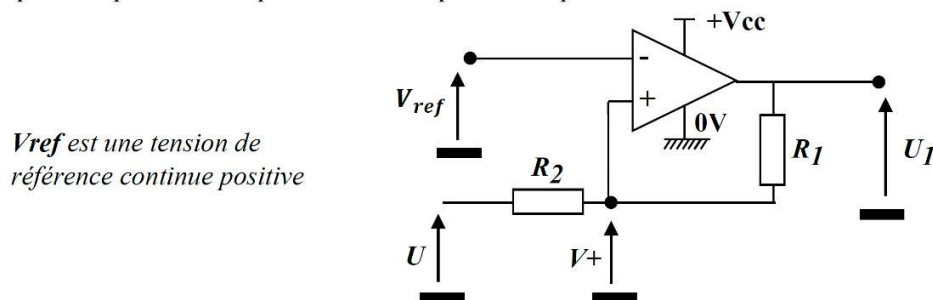
Le circuit de conditionnement du signal du capteur est conçu à base d'un convertisseur **fréquence-tension** et délivre une tension continue u_s proportionnelle à la vitesse de rotation n du moteur.

Voici, ci-dessous, une présentation synoptique du principe de la conversion fréquence-tension :

Mise en forme

Le circuit de mise en forme est un comparateur à deux seuils (trigger non inverseur) à base d'amplificateur opérationnel.

On admet que l'amplificateur opérationnel est parfait et que ses tensions de saturation sont $+V_{cc}$ et 0 V .



Q.36) Donner l'expression de V^+ en fonction de U , U_1 , R_1 et R_2 ;

1 pt

Q.37) En déduire que, au moment du basculement, $U = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} \cdot V_{ref} - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_1$;

1 pt

Q.38) En déduire les expressions des seuils de basculement V_B (seuil bas) et V_H (seuil haut) ;

1 pt

Q.39) Compléter le tracé de la caractéristique de transfert $u_1 = f(u)$ en indiquant les sens d'évolution ;

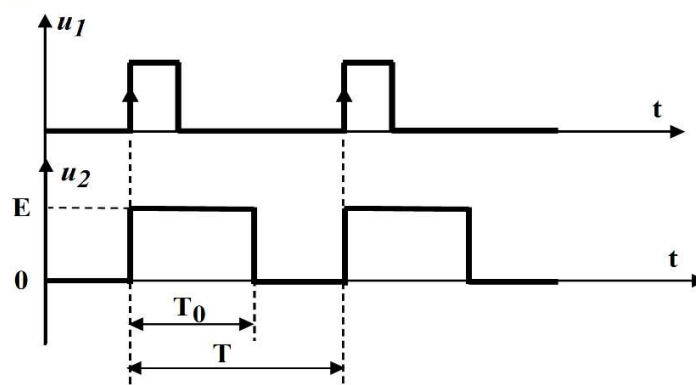
1,5 pt

Q.40) Tracer la courbe $u_1(t)$ en concordance de temps avec le signal $u(t)$ fourni.

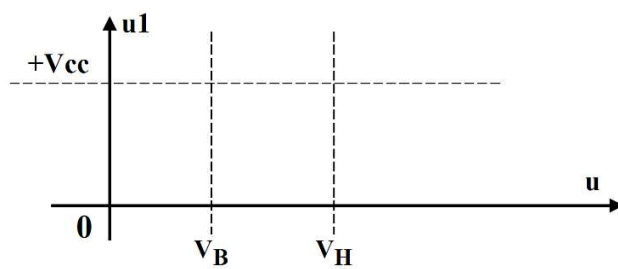
2 pts

Monostable

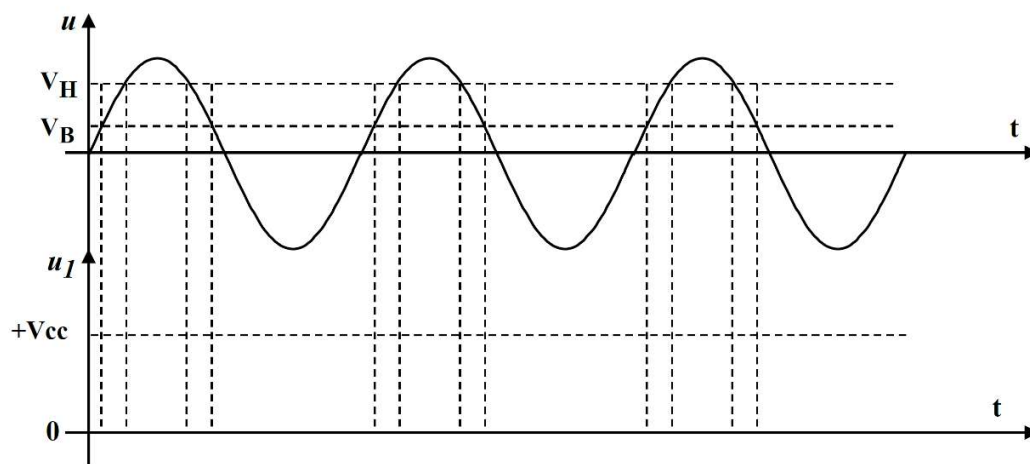
Le circuit monostable génère à sa sortie une impulsion de durée calibrée T_0 et d'amplitude E à chaque fois qu'il reçoit un front sur son entrée. Les chronogrammes suivants illustrent la réponse u_2 d'un monostable actif sur le front montant :



Q.39)



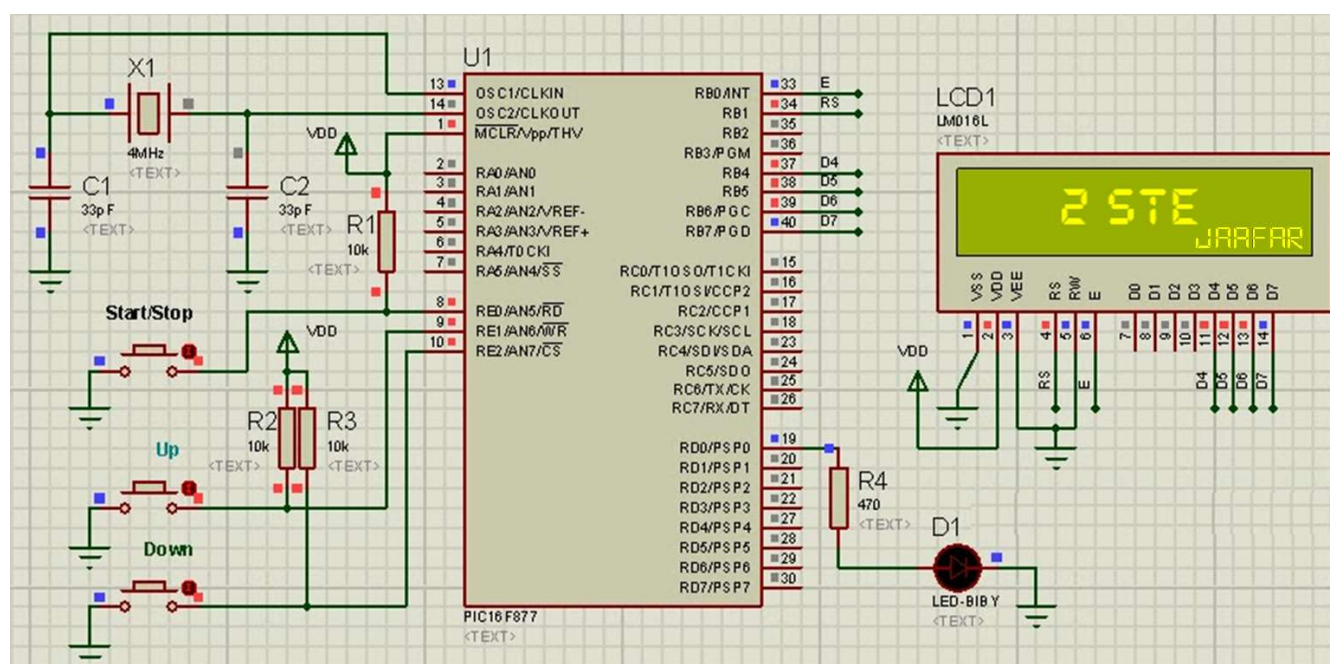
Q.40)

[illegible]

PARTIE

2

Fonction TRAITER



5

CIRCUITS LOGIQUES PROGRAMMABLES

Un circuit logique programmable **PLD (Programmable Logic Device)** est un composant logique dont on peut programmer le schéma selon la fonction souhaitée, combinatoire et/ou séquentielle.

Il apporte un gain dans la mesure où :

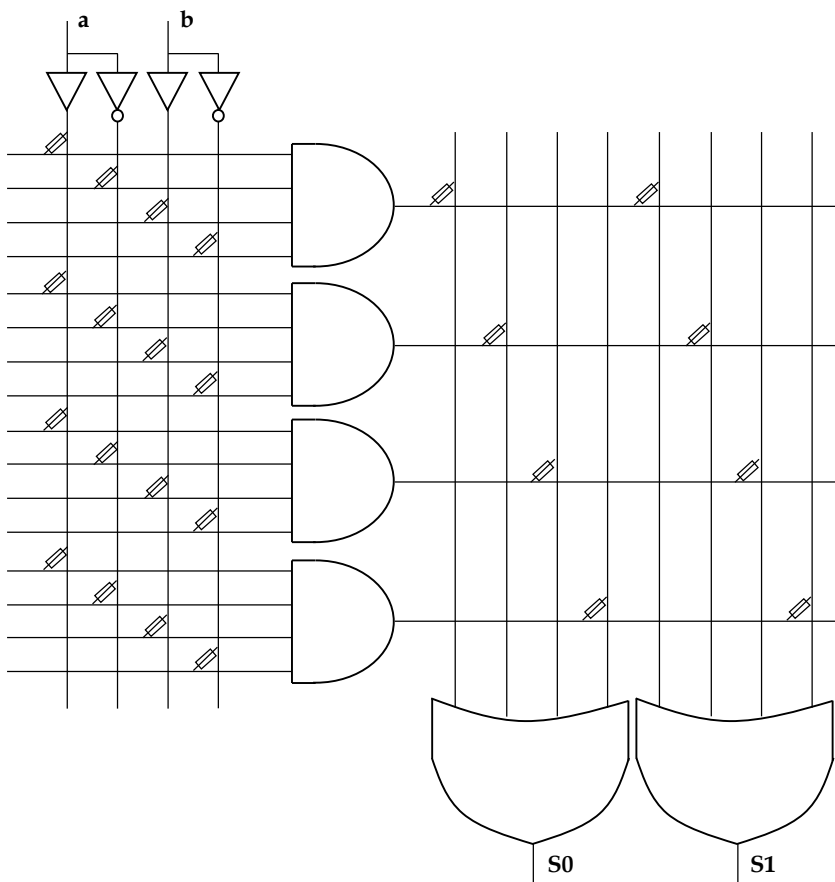
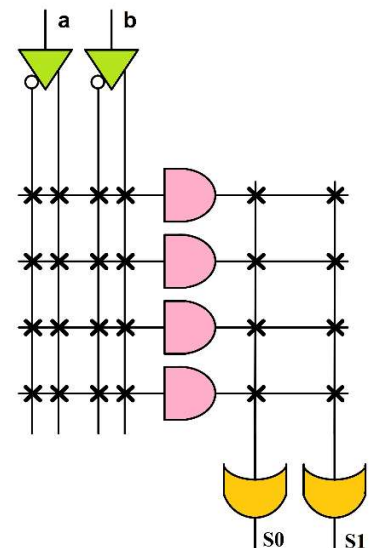
- Un seul circuit peut remplacer plusieurs ;
- La taille et le coût de la fonction implantée sont moindres.

Architecture d'un PLD

Toute fonction logique peut être réalisée par seules les portes logiques fondamentales ET, OU et NON.
Un PLD est bâti autour de ce concept.

La plupart des PLD adoptent l'architecture suivante :

- Une matrice d'opérateurs ET sur lesquels viennent se connecter les variables d'entrée ;
- Une matrice d'opérateurs OU sur lesquels les sorties des opérateurs ET sont connectées ;
- Une éventuelle structure de sortie (Portes inverseuses, bascules...).

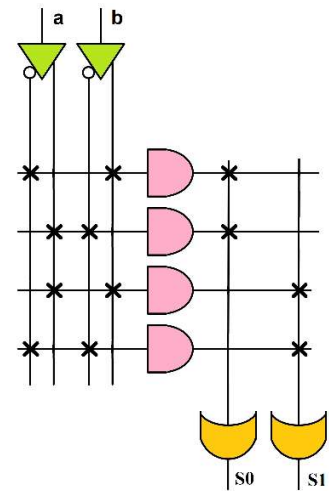
Structure de base d'un PLDReprésentation simplifiée

⇒ Après programmation

Les fonctions programmées ci-contre sont :

$$S0 = \bar{a}b + a\bar{b}$$

$$S1 = ab + \bar{a}\bar{b}$$



Exercice : générateur de parité à 3 entrées

$S = 1$ si le nombre de 1 à l'entrée est impair ;
 $S = 0$ sinon.

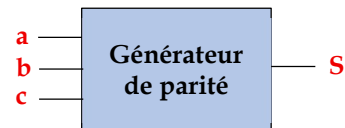


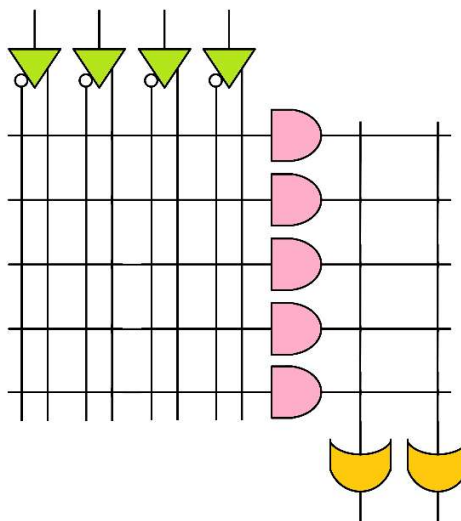
Table de vérité

a	b	c	S
0	0	0	.....
0	0	1	.....
0	1	0	.....
0	1	1	.....
1	0	0	.....
1	0	1	.....
1	1	0	.....
1	1	1	.....

Équation

S =

État du PLD après programmation



⇒ Structure d'un programme ABEL

On y trouve :

- | | |
|------------------------------------|--|
| ▪ La section d'entête | → module, title ; |
| ▪ La section des déclarations | → declarations (device, E/S, bus...) ; |
| ▪ La section de description | → equations, truth_table, state_diagram ; |
| ▪ La déclaration de fin du fichier | → end. |

⇒ Déclarations

- **Pin** : permet d'affecter une broche d'E/S à une variable.

Exemples

e1, e2, A1 pin 2, 3, 4;	: entrées affectées aux broches 2, 3 et 4
d4 pin ;	: entrée sans désignation de numéro de broche
s1 pin 12 istype 'com';	: sortie combinatoire associée à la broche 12
S0..S6 pin istype 'com';	: sorties combinatoires
S1 pin istype 'reg';	: sortie séquentielle

- On peut déclarer un bus ; il s'agit d'un ensemble de variables.

Exemples **A = [b7..b0] ; N = [D2, D1, D0] ;**

L'affectation N = 5 entraîne D2 = 1, D1 = 0 et D0 = 1.

⇒ Opérateurs

<u>Opérateurs logiques</u>	<u>Opérateurs relationnels</u>	<u>Opérateurs arithmétiques</u>
! NON	== Egal	- négation ou soustraction
& ET	!= Différent	+ Addition
# OU	< Inférieur	* Multiplication
\$ OU exclusif	<= Inférieur ou égal	/ Division
	> Supérieur	% Reste de la division
	>= Supérieur ou égal	

⇒ Instructions d'affectation

S = a & !b # !a & b;	affectation pour une sortie combinatoire (symbole =)
A0 := !D1 & A0 & !D7;	affectation pour une sortie séquentielle (symbole :=)
X = a < b	X reçoit 1 si a < b et X reçoit 0 sinon

⇒ Instruction de test

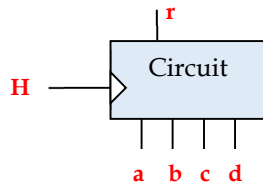
Structure conditionnelle : **WHEN (condition) THEN équation1 ; ELSE équation2 ;**
 Exemple : when (E1 == 0) then S = a # b ; else S = a \$ b ;

⇒ Extensions

Les pins peuvent être suivis d'une extension leur associant une fonction particulière.

.CLK : Entrée horloge	.D : Entrée D d'une bascule D
.AR : Reset asynchrone	.J : Entrée J d'une bascule JK
.OE : Output Enable	.K : Entrée K d'une bascule JK

Exemple :



Dans cet exemple, on déclare que :

- **H** : entrée d'horloge des bascules de sortie ;
- **r** : entrée de remise à 0 asynchrone des sorties.

```

..
Declarations
  H, r  pin ;
  a, b, c, d  pin istype 'reg';
  S = [a, b, c, d];
Equations
  S.CLK = H ;
  S.AR = r ;
..

```

Exercices

Exercice : additionneur 2 bits



a	b	S	R
0	0	.....	.....
0	1	.....	.....
1	0	.....	.....
1	1	.....	.....

S =

R =

Description par la table de vérité

```

MODULE additionneur
DECLARATIONS
  additionneur DEVICE 'P22V10' ;
  a, b PIN ;
  S, R PIN ISTYPE 'COM' ;
TRUTH_TABLE ( [ ..... ] ->[.....] )
  .....
  .....
  .....
  .....
END additionneur

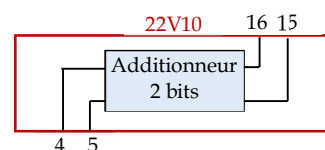
```

Description par les équations logiques

```

MODULE additionneur
DECLARATIONS
  additionneur DEVICE 'P22V10' ;
  a, b PIN 4, 5 ;
  S, R PIN 15, 16 ISTYPE 'COM' ;
EQUATIONS
  S = .....
  R = .....
END additionneur

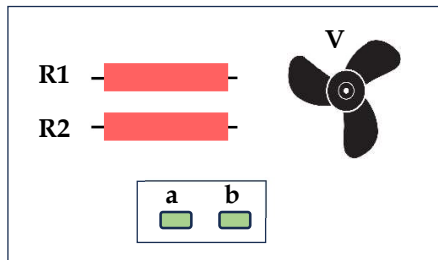
```



Exercice : radiateur de chauffage électrique

Le système de chauffage est équipé d'un radiateur électrique à deux allures de chauffe, comportant deux résistances **R1** et **R2** et un ventilateur **V**. Il est commandé par deux interrupteurs **a** et **b**.

- Par action sur **a** seul, la résistance **R1** seule est mise sous-tension ;
- Par action sur **b** seul ou sur **a** et **b** à la fois, les **deux résistances** et le **ventilateur** sont mis sous-tension.



module

Declarations

.....

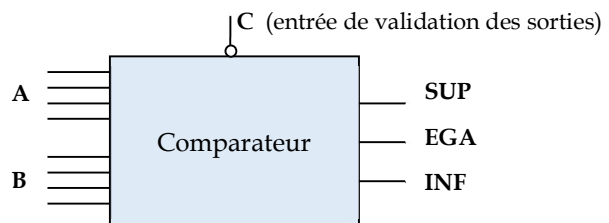
Truth_Table (.....)

.....

End

Exercice : comparateur 4 bits

$SUP = 1 \text{ si } A > B$
 $EGA = 1 \text{ si } A = B$
 $INF = 1 \text{ si } A < B$



module comparateur

Declarations

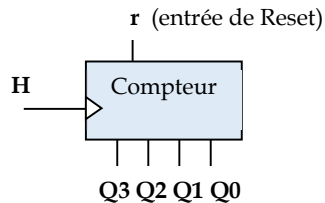
.....

Equations

.....

End

Exercice : compteur 4 bits avec mise à 0 asynchrone



module

Declarations

.....

equations

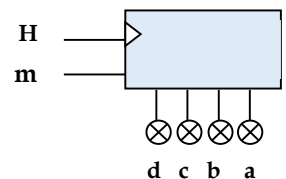
.....

End

Exercice : chenillard à 4 LED

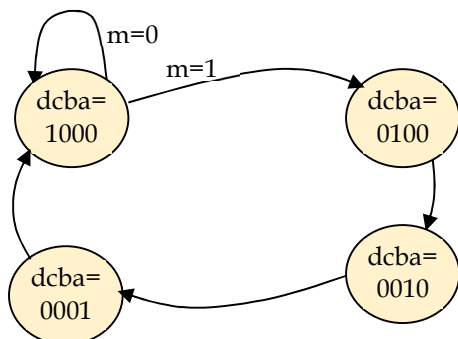
Au départ la Led **d** est allumée.

L'appui sur le bouton **m** lance une séquence de défilements vers la droite.



Le diagramme d'état est une représentation symbolique de l'enchaînement séquentiel des états de sortie d'un système.

Le diagramme d'état suivant illustre le cycle d'allumage désiré :



Module chenillard

DECLARATIONS

chenillard device 'P22V10' ;

.....

EQUATIONS

.....

STATE_DIAGRAM

State [1,0,0,0] : IF (m==1) THEN goto [0,1,0,0] ; else goto [1,0,0,0] ;

.....

END chenillard

6

GRAFCET**Rappel**

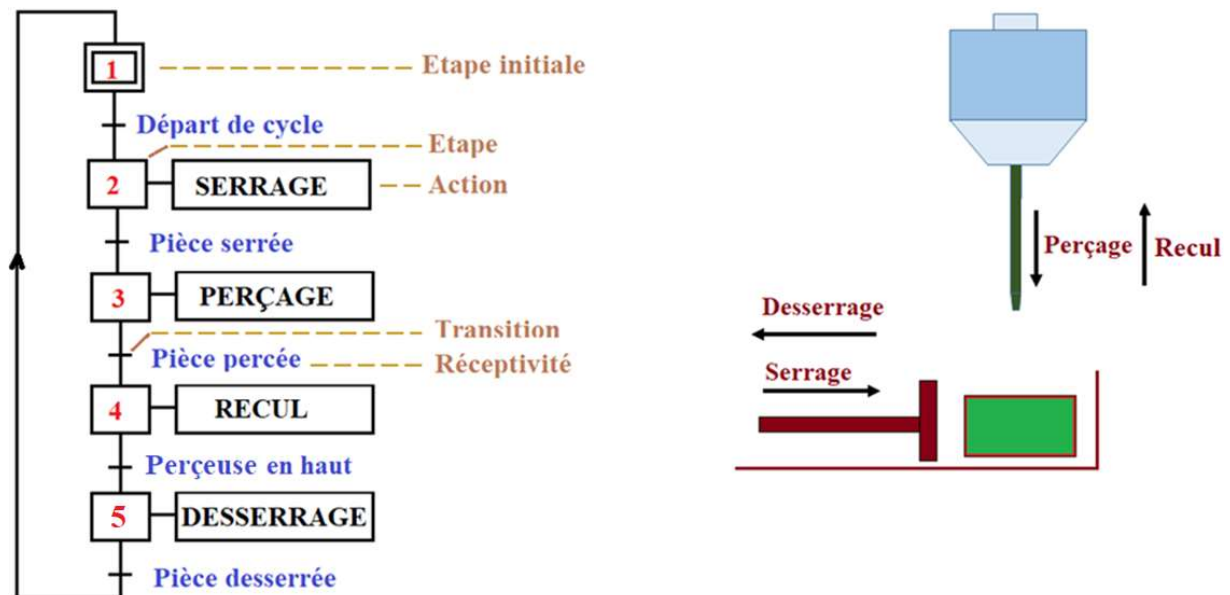
Le **GRAFCET** (Graphe Fonctionnel de Commande Étapes-Transitions) ou diagramme fonctionnel :

- ⇒ Est un outil de représentation du fonctionnement des systèmes automatisés séquentiels ;
- ⇒ Est un langage de programmation des automates programmables (API).

1. Concepts

Le GRAFCET décrit les cycles de fonctionnement par une succession d'étapes, de transitions et de liaisons orientées. Aux étapes, sont associées des actions et aux transitions, des réceptivités.

Exemple :

**Évolution du grafcet**

- L'étape 1 est initialement active ;
- Lorsque la réceptivité "départ de cycle" est vraie, la transition correspondante "1-2" est franchie ce qui provoque l'activation de l'étape 2 qui alors provoque la désactivation de l'étape 1 ;
- Pendant que l'étape 2 est active, se déroule l'action correspondante "SERRAGE " et si la réceptivité "pièce serrée" devient vraie, l'étape 3 s'active et l'étape 2 se désactive et ainsi de suite.

2. Structures du GRAFCET

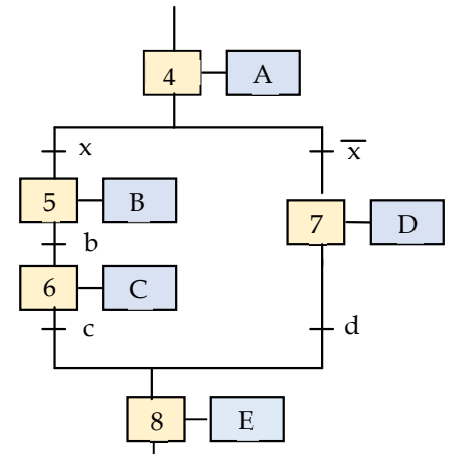
On distingue :

- GRAFCET à séquence unique (linéaire) ;
- GRAFCET à séquences multiples :
 - GRAFCET à sélection de séquences : séquences exclusives, saut d'étapes, reprise d'étapes ;
 - GRAFCET à séquences simultanées.

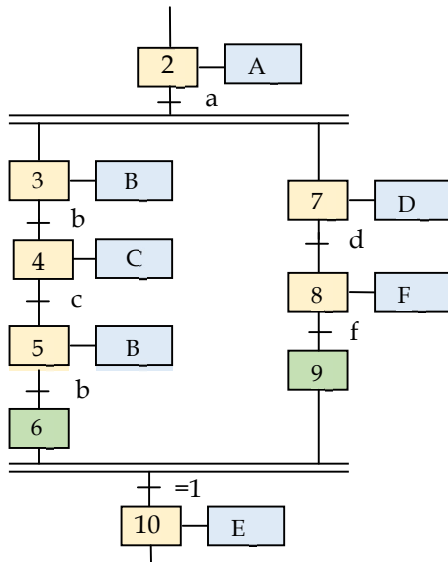
Séquences exclusives (aiguillage en OU)

Permet d'effectuer un choix unique d'évolution entre plusieurs séquences d'étapes.

Ici, il y a sélection entre la séquence 4-5-6-8 et la séquence 4-7-8 selon l'état de la réceptivité x .



Séquences simultanées (aiguillage en ET)



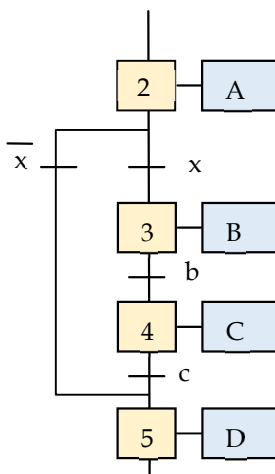
Le franchissement d'une transition conduit à activer simultanément plusieurs séquences d'étapes qui s'exécuteront parallèlement mais indépendamment.

Ici, le franchissement de la transition "a" conduit à l'exécution simultanée des séquences 3-4-5-6 et 7-8-9.

Les séquences 3-4-5-6 et 7-8-9 évoluent indépendamment : par exemple, il n'est pas nécessaire que les étapes 4 et 8 s'activent en même temps.

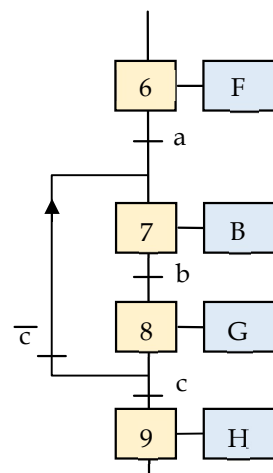
Les étapes 6 et 9 sont des **étapes d'attente**. Une fois toutes les deux actives, l'étape 10 s'active immédiatement.

Saut d'étapes



Le saut d'étapes est un saut conditionnel d'une séquence d'étapes. Ici, il y a saut de la séquence 3-4 si $x = 0$.

Reprise d'étapes



La reprise d'étapes permet de reprendre une ou plusieurs fois la même séquence. Ici, la séquence 7-8 est répétée tant que $c = 0$.

3. Points de vue du GRAFCET

Point de vue système : décrit le fonctionnement global du système, sans faire intervenir les actionneurs et les capteurs.

Point de vue partie opérative (PO) : met en évidence les actionneurs et les capteurs.

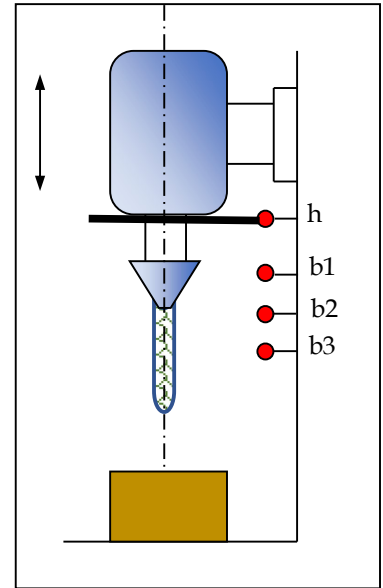
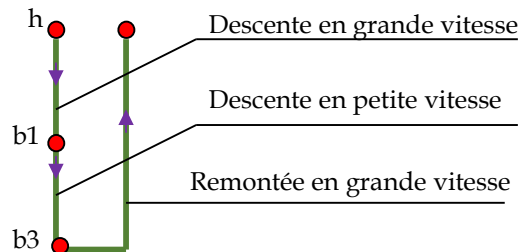
Point de vue partie commande (PC) : décrit la logique de commande et les préactionneurs qui pilotent la partie opérative.

Exercice : perceuse automatique

Suivant la nature des pièces, l'opérateur de la perceuse peut choisir entre deux modes : le perçage avec déburrage ou sans déburrage.

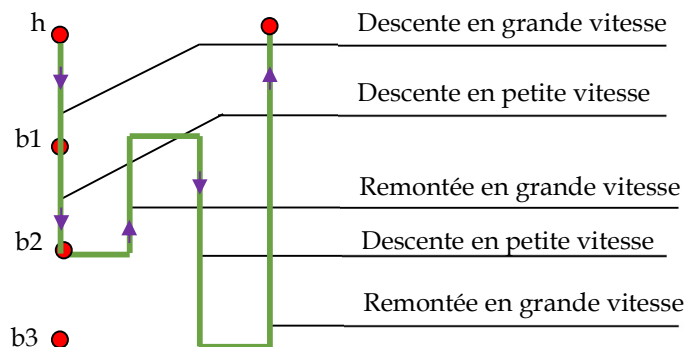
Établir le GRAFCET du point de vue partie commande.
(La commande de la rotation de la broche n'est pas prise en compte)

Cycle sans déburrage



Cycle avec déburrage

Pendant le déroulement du cycle, la broche effectue une remontée à une position intermédiaire (détectée par b2) afin de dégager le foret avant de terminer le perçage.

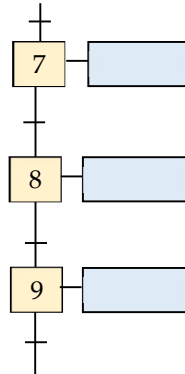
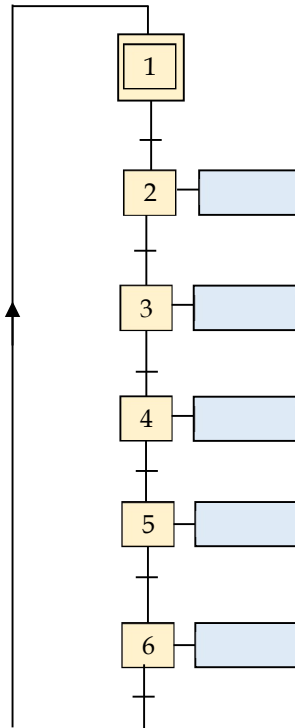
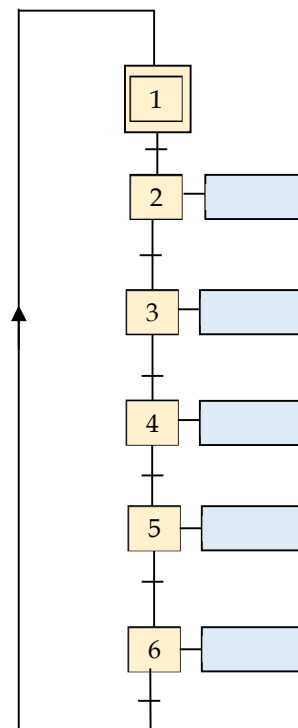


Actions

- KM1** : contacteur descente en grande vitesse
- KM2** : contacteur descente en petite vitesse
- KM3** : contacteur montée en grande vitesse

Capteurs et éléments du pupitre

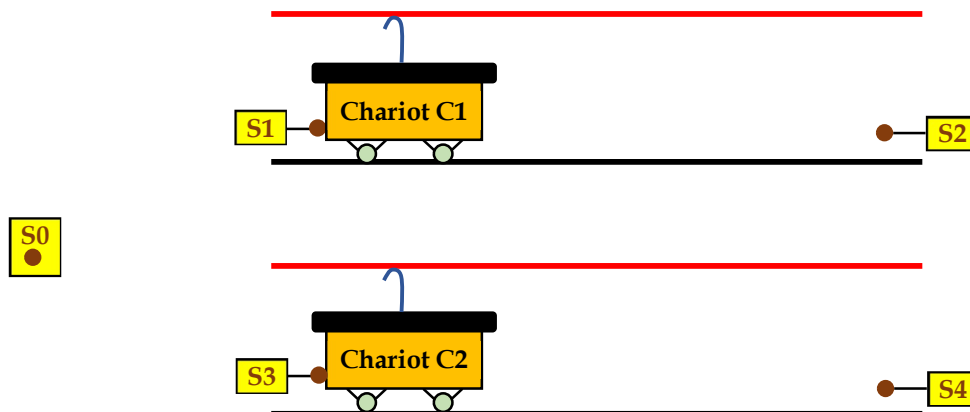
- h** : position haute
- b1** : position d'approche
- b2** : position intermédiaire de déburrage
- b3** : perçage terminé
- br** : broche en rotation
- dbr/dbr** : commutateur "avec déburrage/sans déburrage"
- dcy** : Bp départ de cycle

SolutionVariante

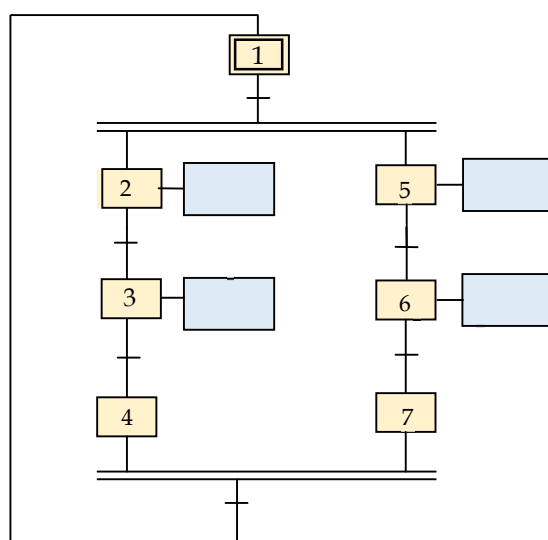
Exercice : Aller et retour de deux chariots

Suite à l'action sur le bouton **S0**, les deux chariots se déplacent pour effectuer chacun un aller et retour. Le cycle se termine lorsque les deux chariots se retrouvent à leurs positions initiales.

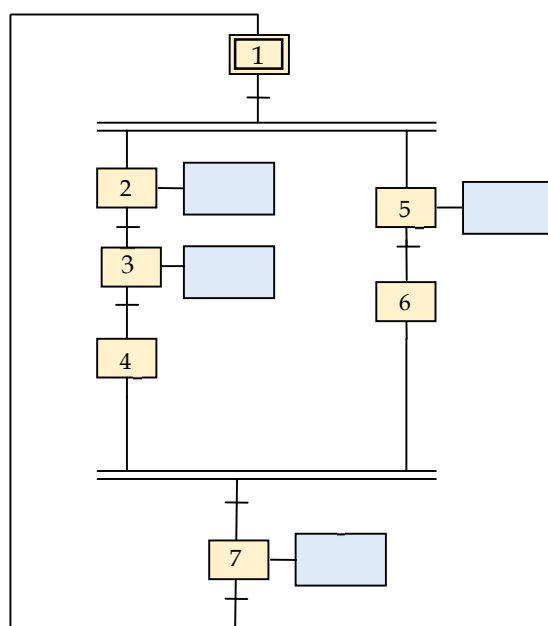
- Fournir le Grafcet de point de vue partie commande.



Mouvement	Actionneur	Préactionneur	Capteur
Déplacement avant de C1	M1	KM1	S2 : fin de déplacement avant
Déplacement arrière de C1		KM2	S1 : fin de déplacement arrière
Déplacement avant de C2	M2	KM3	S4 : fin de déplacement avant
Déplacement arrière de C2		KM4	S3 : fin de déplacement arrière



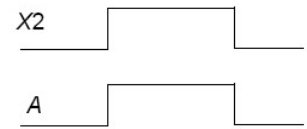
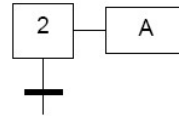
- Modifier le Grafcet si, maintenant, le retour du chariot C2 ne peut se faire qu'après le retour du chariot C1 à sa position initiale.



Actions associées aux étapes

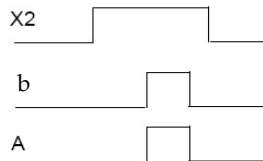
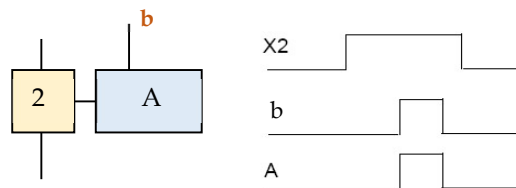
⇒ Action continue

L'action se poursuit tant que l'étape à laquelle elle est associée est active.



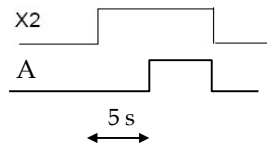
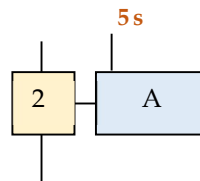
⇒ Action conditionnelle

Une action conditionnelle n'est exécutée que si l'étape est active et si la condition associée à cette étape est vraie.



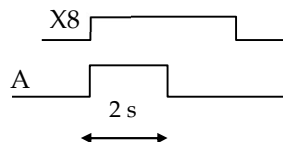
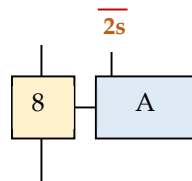
⇒ Action retardée

L'action est retardée par rapport à l'instant de l'activation de l'étape.



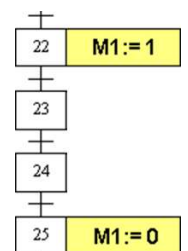
⇒ Action limitée

L'action limitée fonctionne pendant une durée depuis l'activation de l'étape.



⇒ Action mémorisée

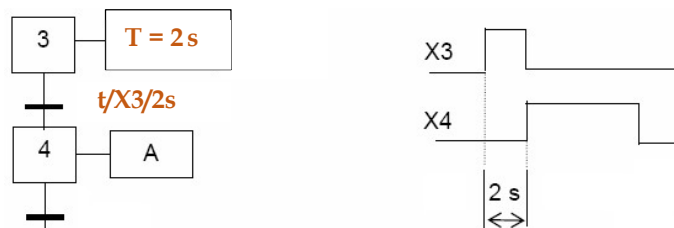
L'action se déroule sur plusieurs étapes. Il suffit d'indiquer les étapes de début et de fin de l'action. L'action M1 est active aux étapes 22, 23 et 24.



Réceptivités particulières

⇒ Réceptivité fonction du temps

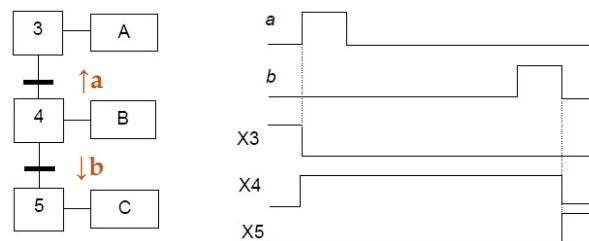
La réceptivité dépend d'une durée écoulée depuis l'activation d'une étape.



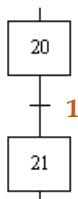
⇒ Réceptivité front

Il est fréquent que l'on ait à détecter dans un système le changement d'état d'une variable.

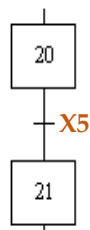
On représente ce changement d'état par : $\uparrow a$, pour le front montant de a et $\downarrow a$ pour le front descendant de a.



⇒ Réceptivité toujours vraie

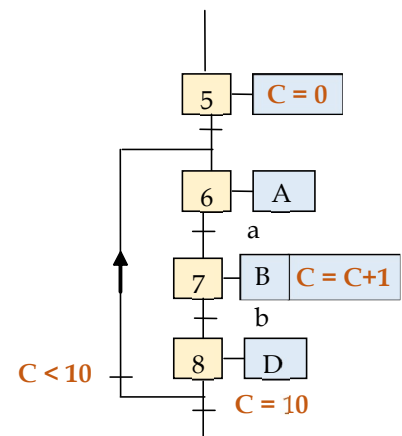


⇒ Variable associée à une étape



La variable X5, associée à l'étape 5, prend 1 si l'étape 5 est active et 0 dans le cas inverse.

⇒ Comptage



Ici, la séquence 6-7-8 est répétée 10 fois.

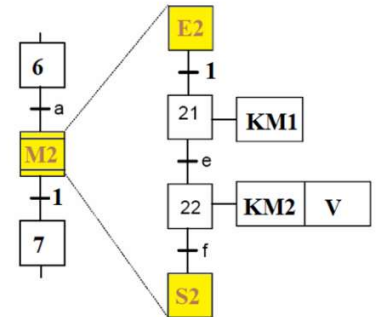
Structuration du GRAFCET

⇒ Macro étape

Une macro-étape est la représentation unique d'une portion du GRAFCET appelée **expansion**. Elle se substitue à une étape du GRAFCET.

L'expansion de macro-étape comporte une étape d'entrée notée E et une étape de sortie notée S.

L'utilisation des macro-étapes permet de simplifier l'écriture du GRAFCET.

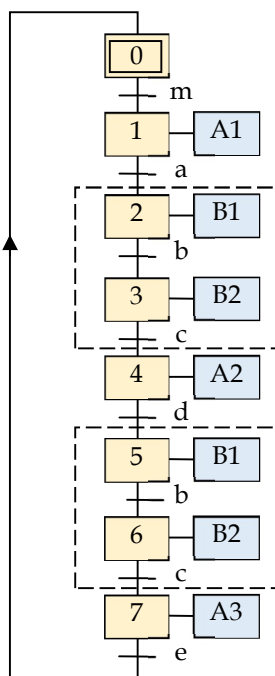


⇒ Synchronisation par tâche

Dans le but de simplifier l'écriture de certains GRAFCET ou lorsqu'une suite de séquences apparaît plusieurs fois dans un GRAFCET, on est amené à définir des **tâches** que l'on peut appeler à partir d'un GRAFCET dit **GRAFCET de coordination** des tâches ou **Grafcet principal**.

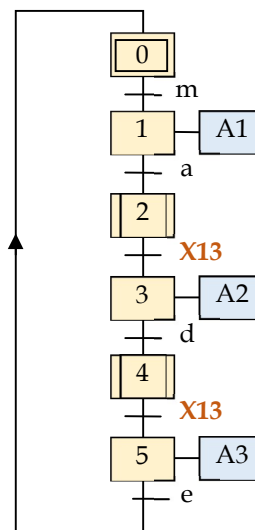
Dans l'exemple suivant, on va déléguer les séquences 2-3 et 5-6 à une tâche évitant ainsi la répétition.

GRAFCET initial

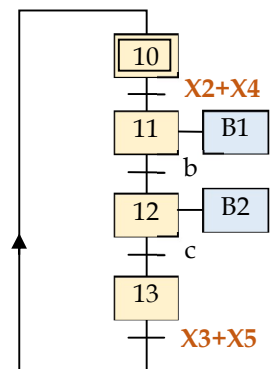


Transformation

GRAFCET de coordination



GRAFCET de tâche



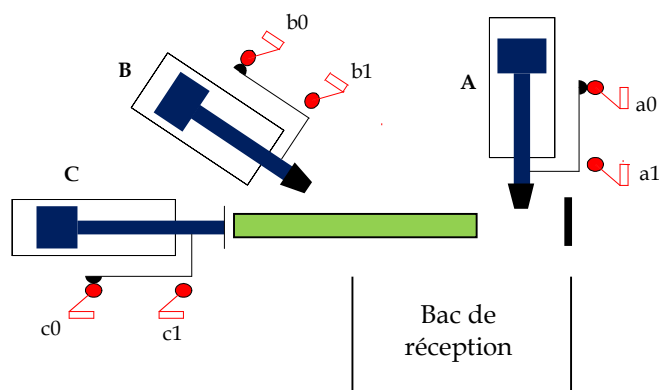
X2+X4 : information de début de la tâche

X13 : information de fin de la tâche

X3+X5 : information de réinitialisation de la tâche

Exercice : cintreuse de tubes

Le système permet le cintrage de tubes d'aluminium. Ces tubes sont ensuite intégrés à un système d'arrosage rotatif de jardin. C'est grâce au cintrage de ces tubes que la rotation de l'arroseur est effectuée.



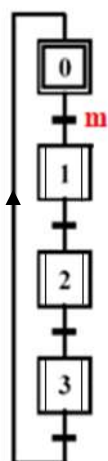
Dès l'appui sur un bouton poussoir **m**, le vérin **C** amène le tube en position de cintrage. Le vérin **A** descend alors pour effectuer l'opération de cintrage. Le tube est, ensuite, évacué dans le bac de réception grâce au vérin **B**.

L'objectif est d'établir un Grafcet décomposé en 3 tâches :

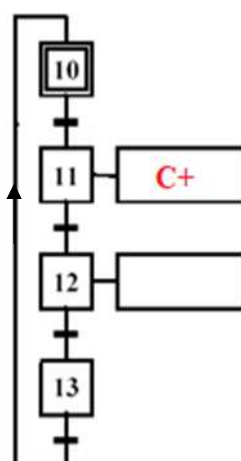
- Positionner le tube en butée ;
- Cintrer le tube ;
- Évacuer le tube dans le bac de réception.

Compléter cette solution.

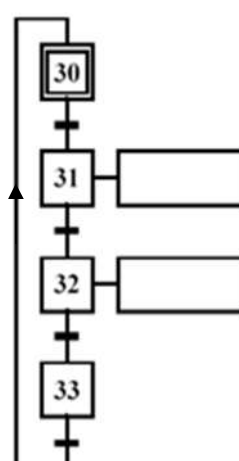
GRAFCET de coordination des tâches



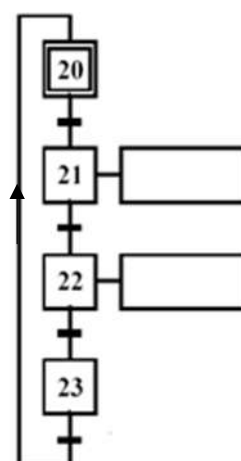
Tâche POSITIONNER



Tâche EVACUER



Tâche CINTRER



Implantation du GRAFCET dans un automate

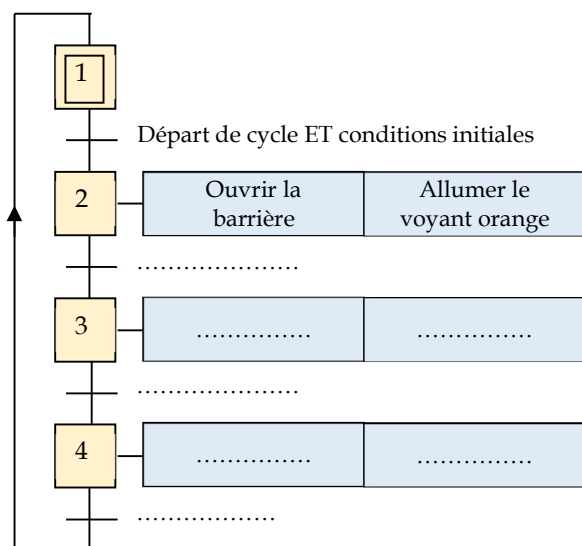
On considère le support technique "barrière automatique" qu'on désire commander selon les séquences suivantes :

- Le système étant au repos, si on appuie sur la télécommande **U2**, la barrière s'ouvre (**KA4**) en même temps que le voyant orange **H4** s'allume ;
- Une fois la barrière ouverte (**S1**), le voyant vert **H1** s'allume ;
- Après 8 s, la barrière se referme (**KA5**) et le voyant orange **H4** s'allume ;
- Lorsque la barrière est fermée (**S2**), le cycle se termine.

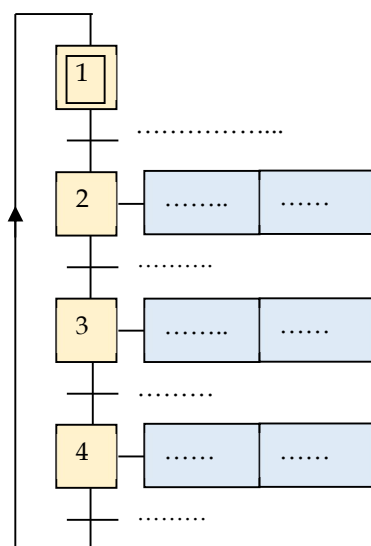
⇒ Étude du GRAFCET

- Compléter le GRAFCET d'un point de vue système et celui d'un point de vue partie commande.

GRAFCET de point de vue système



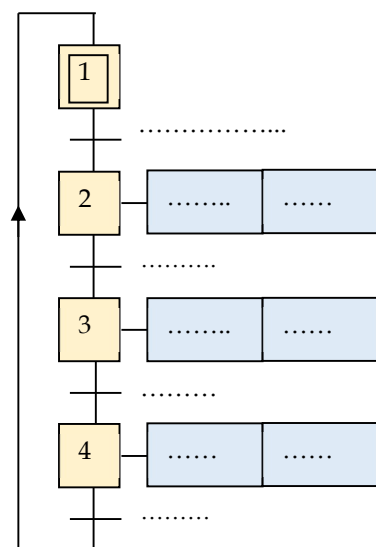
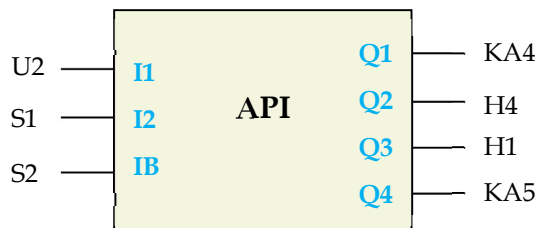
GRAFCET de point de vue partie commande



⇒ GRAFCET de point de vue automate

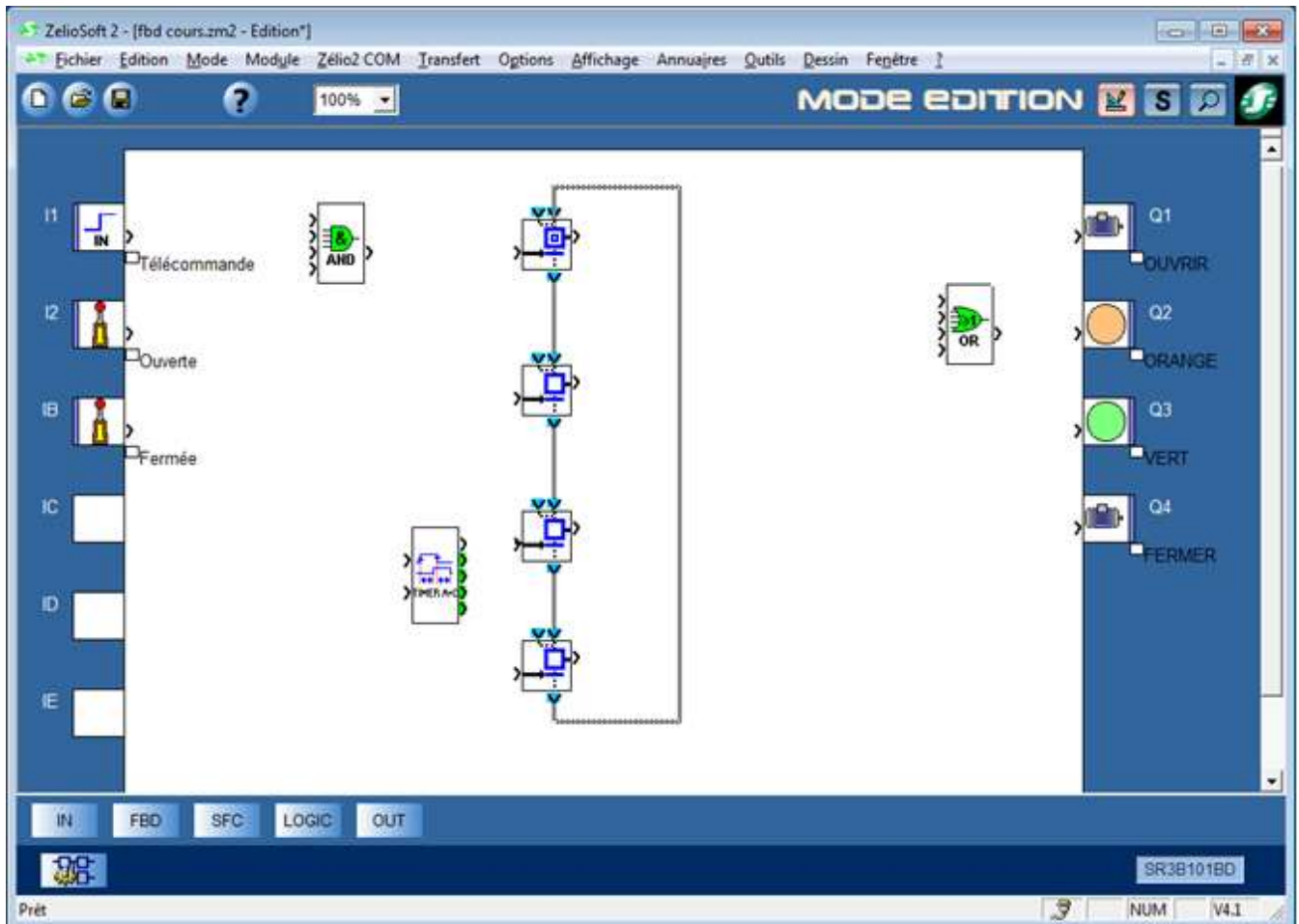
L'API équipant la barrière automatique est le module SR3B101BD doté de 6 entrées (I1, I2, IB, IC, ID, IE) et de 4 sorties (Q1, Q2, Q3, Q4).

- Le schéma bloc suivant, propose une affectation des entrées / sorties à l'automate, compléter le GRAFCET du point de vue API.



⇒ Programmation de l'API par le langage FBD

- Ci-après le schéma FBD à implanter dans l'automate via le logiciel ZelioSoft ; compléter-le.



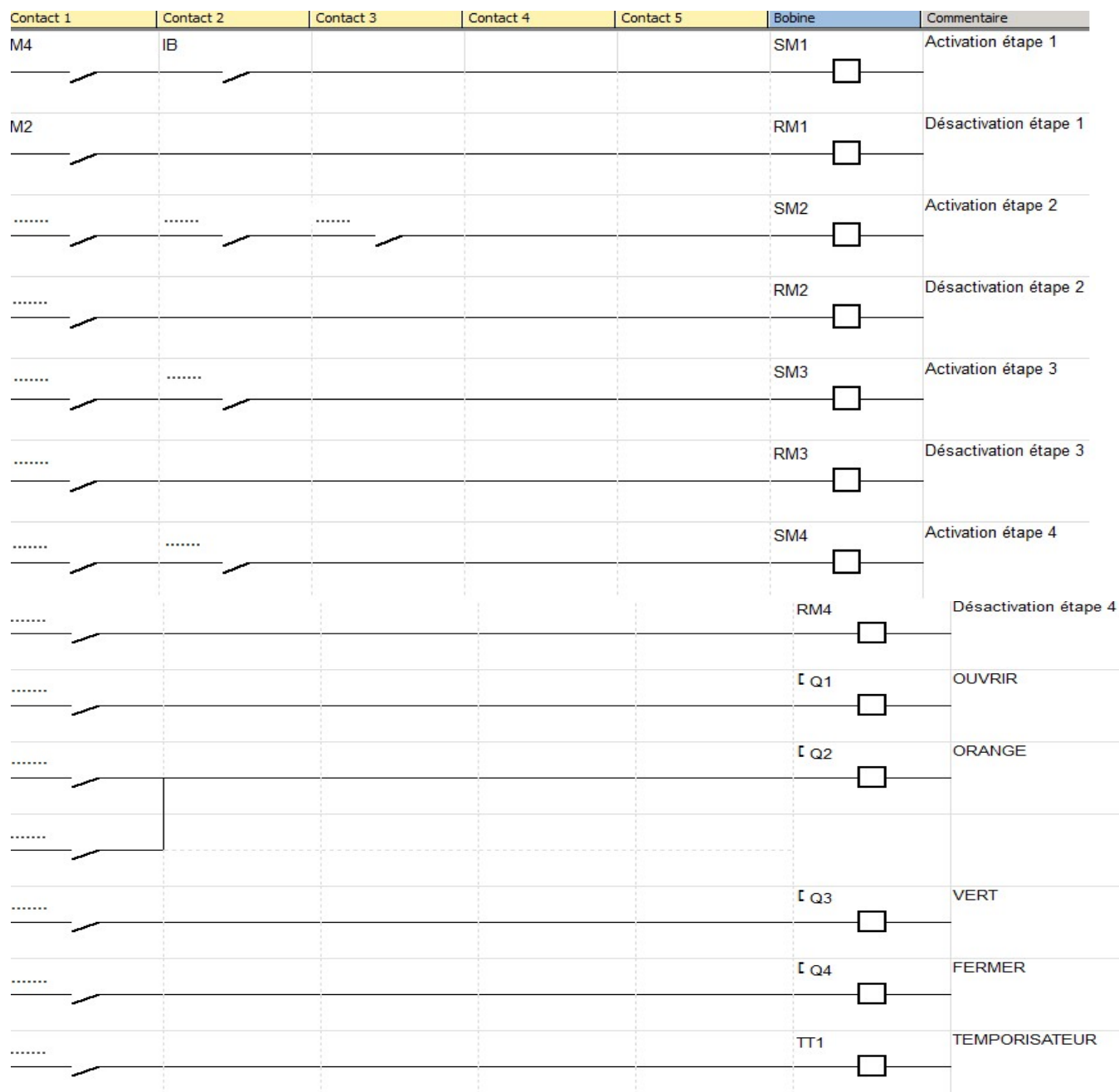
⇒ Programmation de l'API par le langage LADDER

- Effectuer la mise en équations du GRAFCET.

Etape	Activation	Désactivation
1	SM1 =	RM1 =
2	SM2 =	RM2 =
3	SM3 =	RM3 =
4	SM4 =	RM4 =

Action
Q1 =
Q2 =
Q3 =
Q4 =
T1 =

- Compléter le programme LADDER.



Exercice 1 : examen national 2020, session normale**Tâche 2 : GRAFCET et programme LADDER**

En se référant aux documents ressources **DRES 03** et **DRES 04** ; compléter :

Q47- Le GRAFCET du point de vue **API**.

4,5 pts

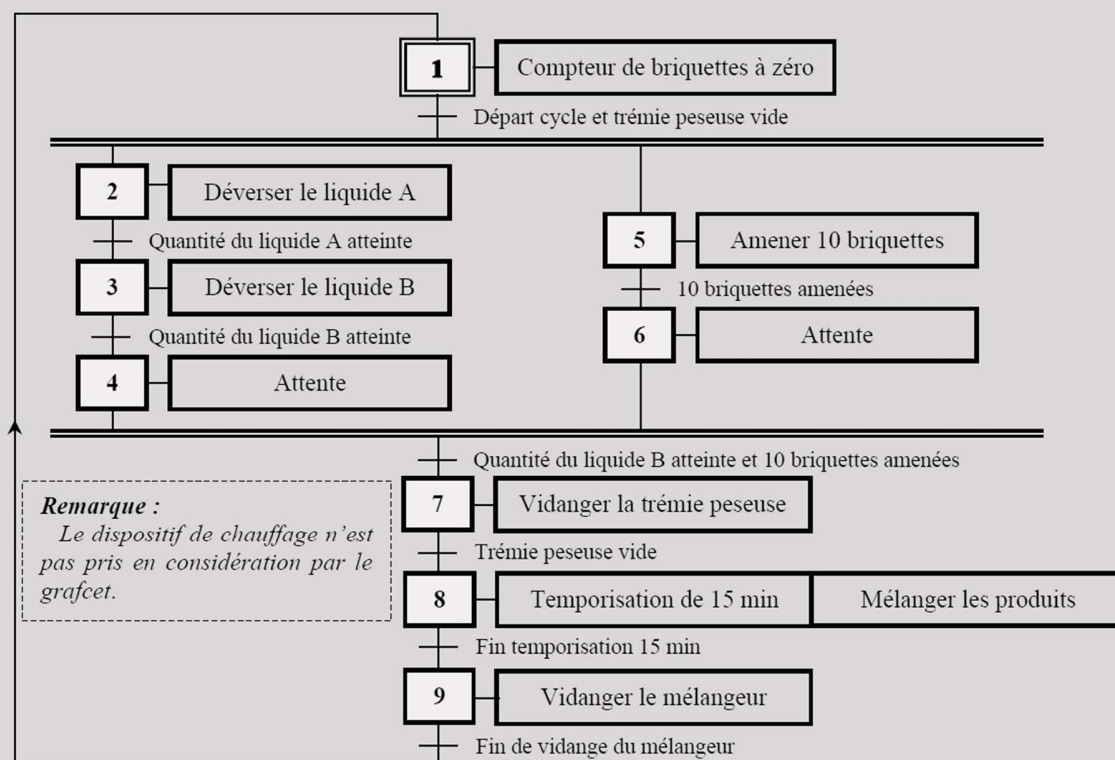
Q48- Le programme Ladder correspondant :

5,5 pts

- aux étapes **1, 2 , 5 et 7**.
- aux actions **CC1, Q5 et Q6**.

GRAFCET fonctionnel du système**DRES 03**

Selon le cahier des charges les différentes fonctionnalités séquentielles du système sont décrites par le GRAFCET du point de vue système suivant :

**Configuration matérielle de l'A.P.I**Identification et affectation des sorties

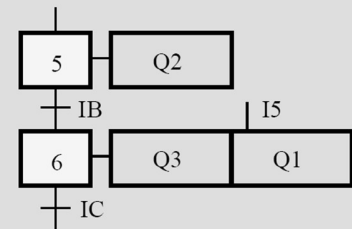
Actions	Actionneurs	Préactionneurs	Sorties API
Déverser le liquide A	Électrovanne V_A	Contacteur KVA	Q1
Déverser le liquide B	Électrovanne V_B	Contacteur KVB	Q2
Vidanger la trémie peseuse	Électrovanne V_C	Contacteur KVC	Q3
Amener une brique	Moteur MR2	Contacteur KM1	Q4
Mélanger les produits	Moteur MR1	Contacteur KM2	Q5
Vidanger le mélangeur	Électrovanne V_D	Contacteur KVD	Q6
Compter le nombre de briquettes	Compteur interne n°1 de l'API		CC1
Remettre à zéro le compteur			RC1
Définir le temps de malaxage (15 min)			TT1

Identification et affectation des entrées

Consignes/Comptes rendus	Boutons/Capteurs	Entrées API
Initialisation	Bouton poussoir Init	I1
Départ cycle	Bouton poussoir Dcy	I2
Fin de vidange du mélangeur	Bouton poussoir Fv	I3
Quantité du liquide A atteinte	Capteur de force + Conditionneur	P_A I4
Quantité du liquide B atteinte		P_B I5
Trémie peseuse vide		P₀ I6
Briquelette amenée	Détecteur optique Pi	I7
Nombre de briquettes dans le mélangeur = 10	Contact interne C1 du compteur	
Fin de la temporisation de 15 min	Contact interne T1 du temporisateur	

Langage LADDER**DRES 04**Action conditionnelle :

- L'action **Q1** est conditionnelle ;
- L'action **Q1** est effective lorsque l'étape **6** est active et la condition **I5** est vraie ;
- L'équation de Q1 est : **Q1 = M6.I5**

Bloc compteur :

L'A.P.I possède plusieurs blocs compteurs de C1 ... Cn.

Le bloc fonction compteur permet de compter ou décompter des impulsions jusqu'à une valeur de présélection.

À chaque compteur sont associées 3 bobines (**RCx**, **CCx** et **DTx**) et un contact **Cx** :

- Bobine **CCx** : entrée de comptage ou de décomptage de numéro x (x=1,2 ou 3...);
- Bobine **DCx** : entrée du sens de comptage (le bloc décompte si cette entrée est activée) ;
- Bobine **RCx** : entrée de remise à zéro du compteur ;
- Contact **Cx** : sortie de fin de comptage.

Le compteur **1** est paramétré à **10** donc le contact associé **C1** se ferme lorsque le compteur atteint la valeur de présélection **10**.

Bloc temporisateur :

L'A.P.I possède plusieurs blocs temporisateurs de T1 ... Tm.

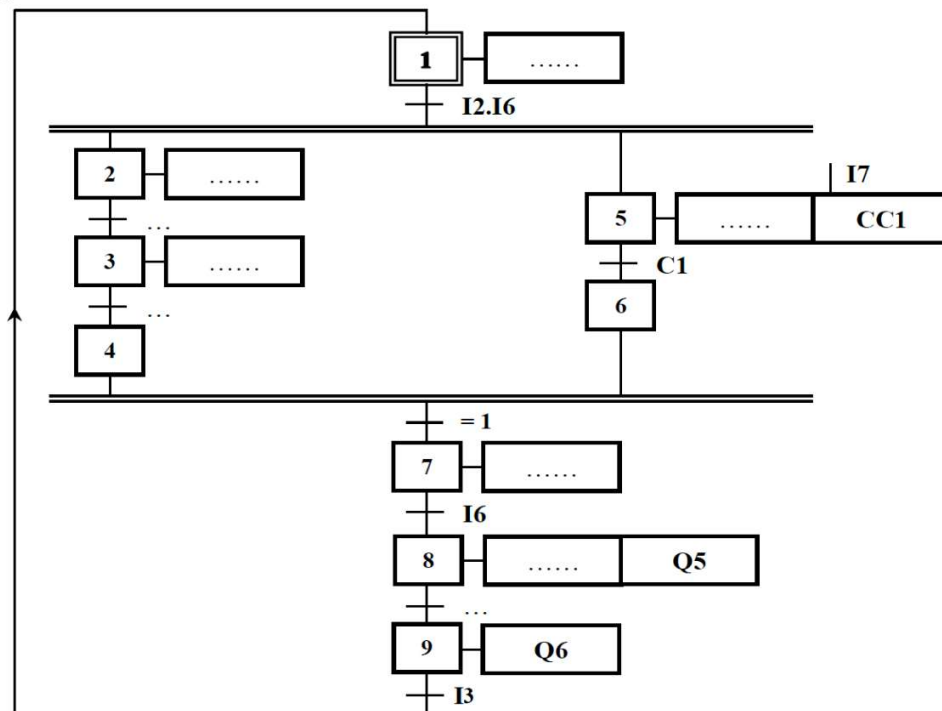
Le bloc fonction temporisateur permet de temporiser des actions.

À chaque temporisateur sont associées 2 bobines (**TTx** et **RTx**) et un contact **Tx** :

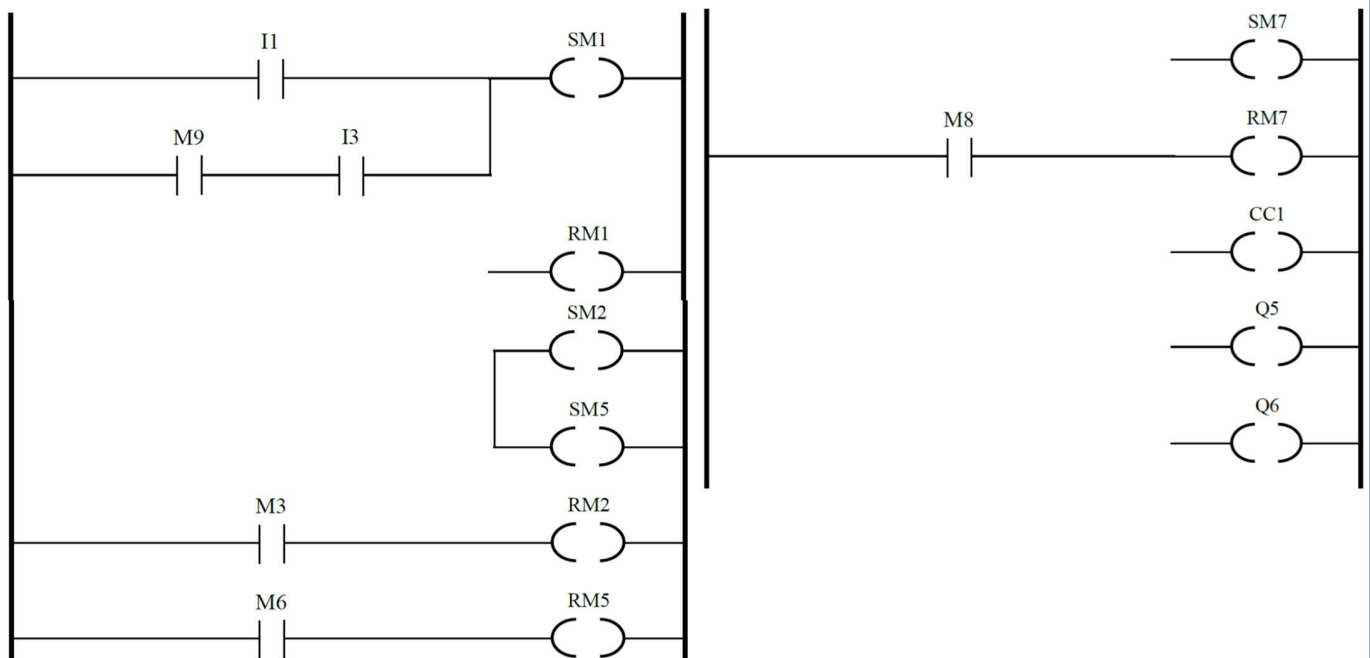
- Bobine **TTx** : entrée de lancement de la temporisation de numéro x (x=1,2 ou 3...);
- Bobine **RTx** : entrée de remise à zéro ;
- Contact **Tx** : sortie de fin de temporisation.

Le temporisateur **1** est paramétré à **15 min** donc le contact associé **T1** se ferme **15 min** après le déclenchement de la temporisation.

Q47- [4,5 pts]



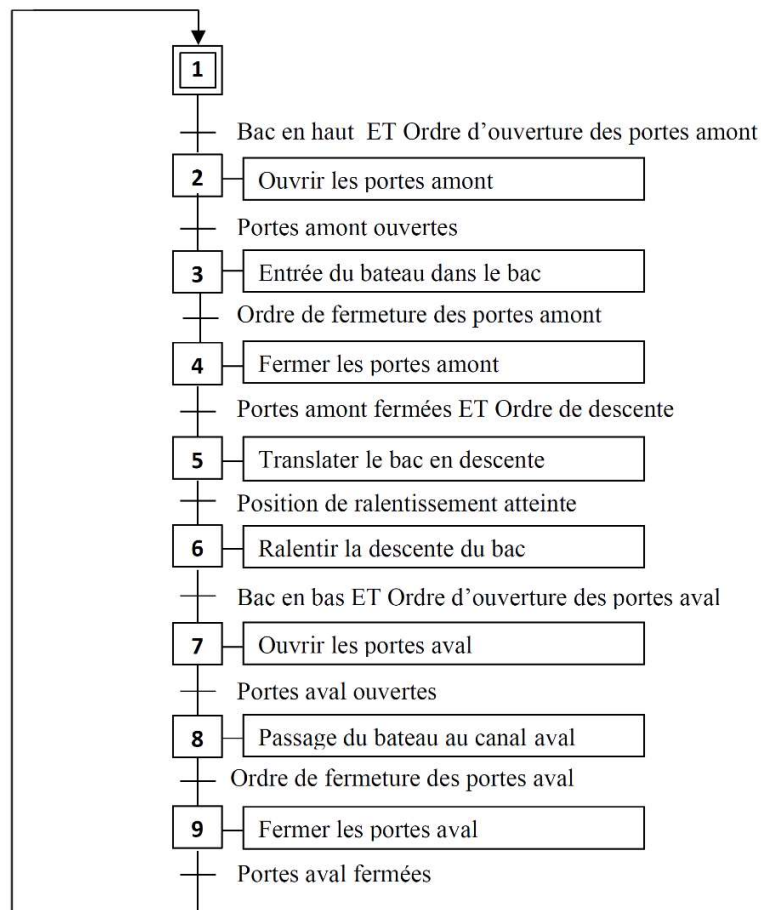
Q48- [5,5 pts]



Exercice 2 : examen national 2022, session de rattrapage**Tâche 2 : Cycle de manœuvre de l'ascenseur**

Un opérateur, depuis son poste de commande et via un pupitre, contrôle le cycle de manœuvre, descente ou montée, du bac

Le Grafcet suivant décrit uniquement le cycle de la descente du bac :



Q.47) En se référant au Grafcet ci-dessus et au **DRES 04**, compléter le Grafcet de point de vue A.P.I. **3 pts**

Dans ce qui suit, on va déléguer la séquence d'étapes "4-5-6-7" à une tâche qu'on va appeler "Translation descendante".

Q.48) En partant du Grafcet de point de vue API (**Question 47**), compléter le Grafcet de la tâche "Translation descendante" ;

3 pts

Q.49) À partir du Grafcet modifié (**Question 48**), compléter le programme Ladder.

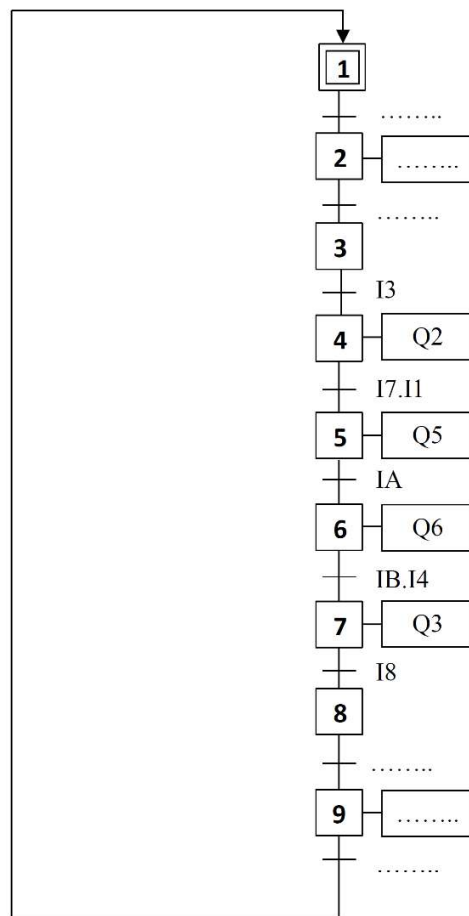
3 pts

Tableaux d'affectation des entrées/sorties de l'automate

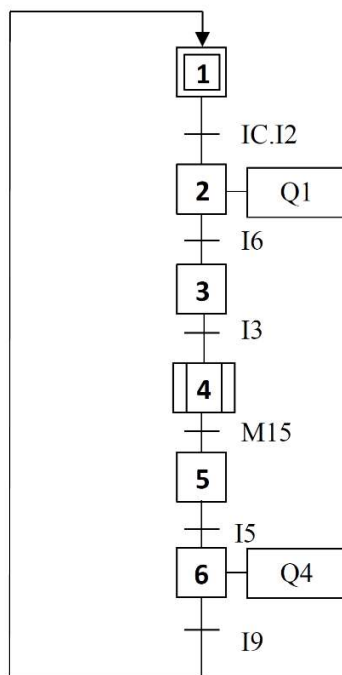
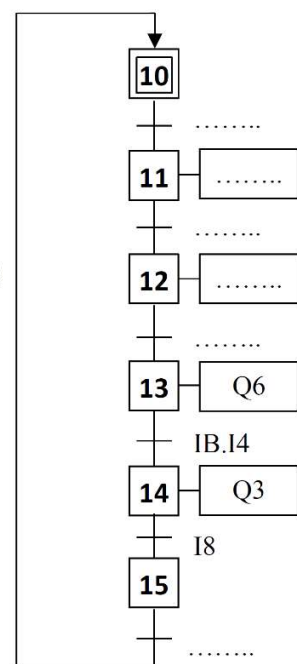
Entrées		
Information	Éléments de consigne et capteurs	Entrée automate
Ordre de descente	S1	I1
Ordre d'ouverture des portes amont	S2	I2
Ordre de fermeture des portes amont	S3	I3
Ordre d'ouverture des portes aval	S4	I4
Ordre de fermeture des portes aval	S5	I5
Portes amont ouvertes	pmo	I6
Portes amont fermées	pmf	I7
Portes aval ouvertes	pvo	I8
Portes aval fermées	pvf	I9
Position de ralentissement atteinte	b	IA
Bac en bas	a	IB
Bac en haut	d	IC
Bouton d'initialisation	S6	ID

Sorties		
Action	Pré-actionneurs	Sortie automate
Ouvrir les portes amont	OPM	Q1
Fermer les portes amont	FPM	Q2
Ouvrir les portes aval	OPV	Q3
Fermer les portes aval	FPV	Q4
Translater le bac en descente	DGV	Q5
Ralentir la descente du bac	DPV	Q6

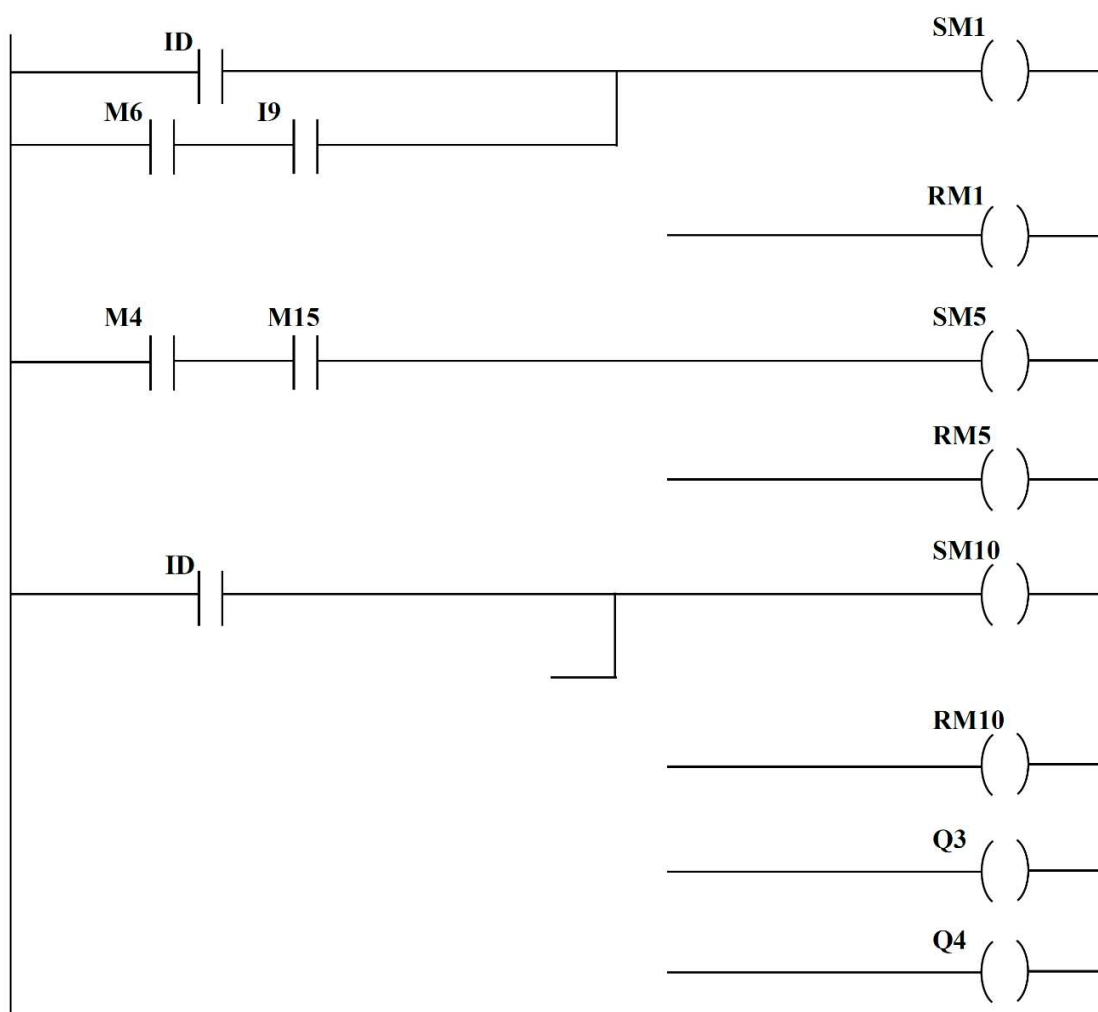
Q.47)



Q.48)

Grafcet principalTâche "Translation descendante"

Q.49)



Exercice 3 : examen national 2024, session normale

Le déplacement vertical de la charge (levage) est géré par un automate programmable industriel (**A.P.I.**).

Les tableaux donnés en **DRES 03** précisent les affectations des entrées et des sorties de l'**A.P.I.**

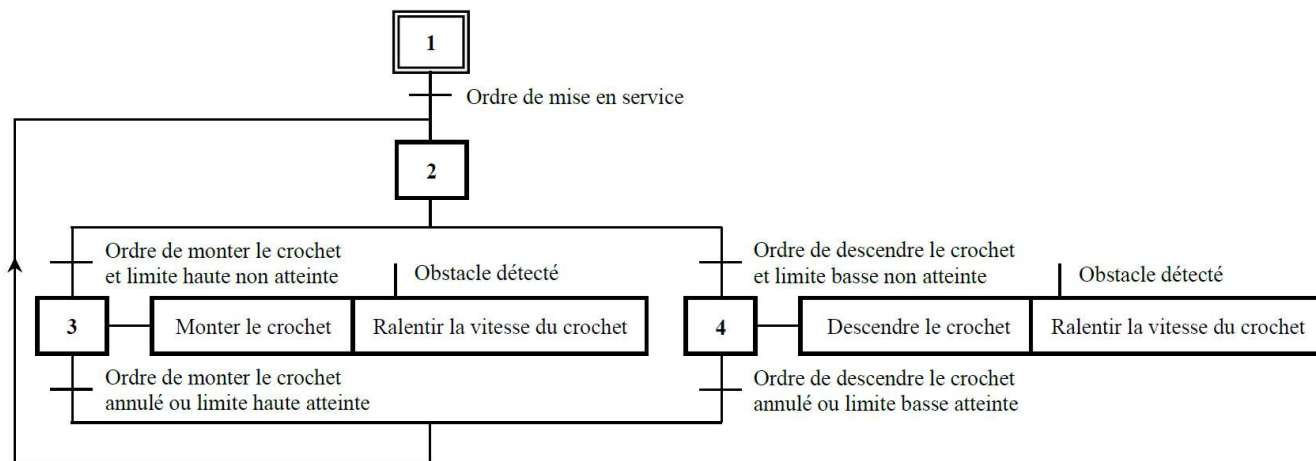
Le schéma synoptique de commande de déplacement vertical du crochet est donné en **DRES 03**.

On note que le moteur **M1** ralentit à la vitesse **V_R** lorsque le capteur **P** détecte, à une distance **d** prédéfinie, la présence d'un obstacle.

Tâche 1 : Étude du GRAFCET de déplacement vertical du crochet (levage)

On se propose d'établir le programme ladder permettant la commande de déplacement vertical de la charge.

Le cycle de déplacement vertical de la charge suivant l'axe **Z** est décrit par le GRAFCET fonctionnel suivant :



En se référant aux tableaux d'affectations des entrées et des sorties de l'**A.P.I.** du document **DRES 03**, compléter :

Q.38-Le GRAFCET du point de vue **A.P.I.**

4 pts

Q.39-Le programme Ladder correspondant aux étapes 2, 3 et 5 et à l'action **Q3**.

4 pts

Tableaux d'affectations des entrées et des sorties de l'API

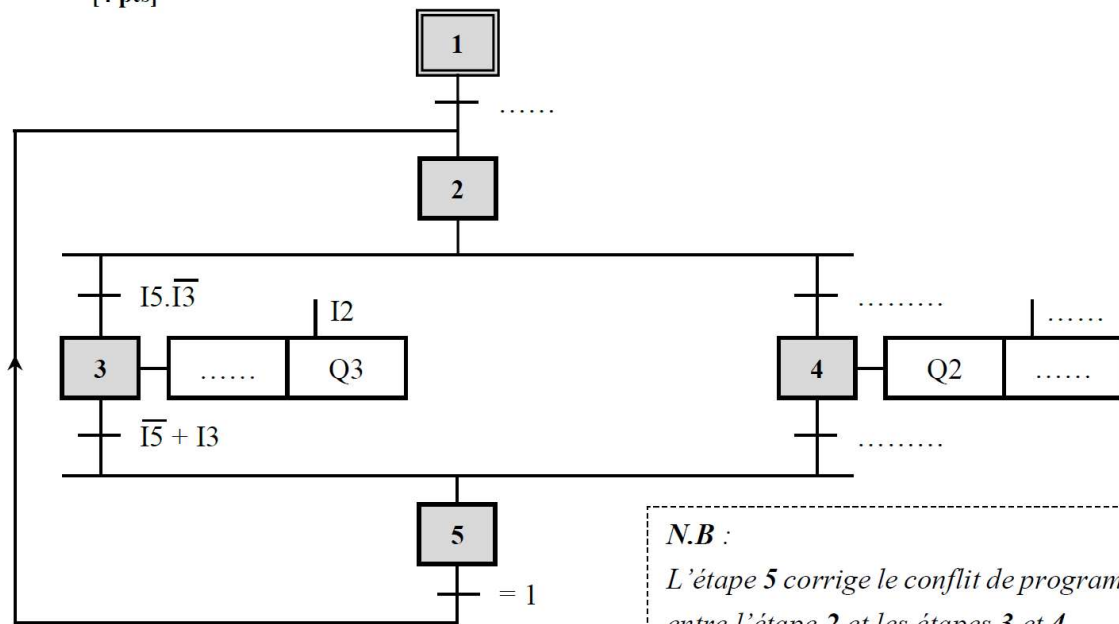
DRES 03

Consigne ou compte rendu			Entrée API
Bouton	S1	Mise en service du système	I1
Détecteur d'obstacle	P	Obstacle détecté	I2
Fin de course	F_H	Limite haute du crochet	I3
	F_B	Limite basse du crochet	I4
Joystick J1 à un axe	Ordre de monter le crochet		I5
	Ordre de descendre le crochet		I6

Ordre		Sortie API
Monter le crochet	KA1	Q1
Descendre le crochet	KA2	Q2
Ralentir la vitesse du crochet	KA3	Q3

Q.38-

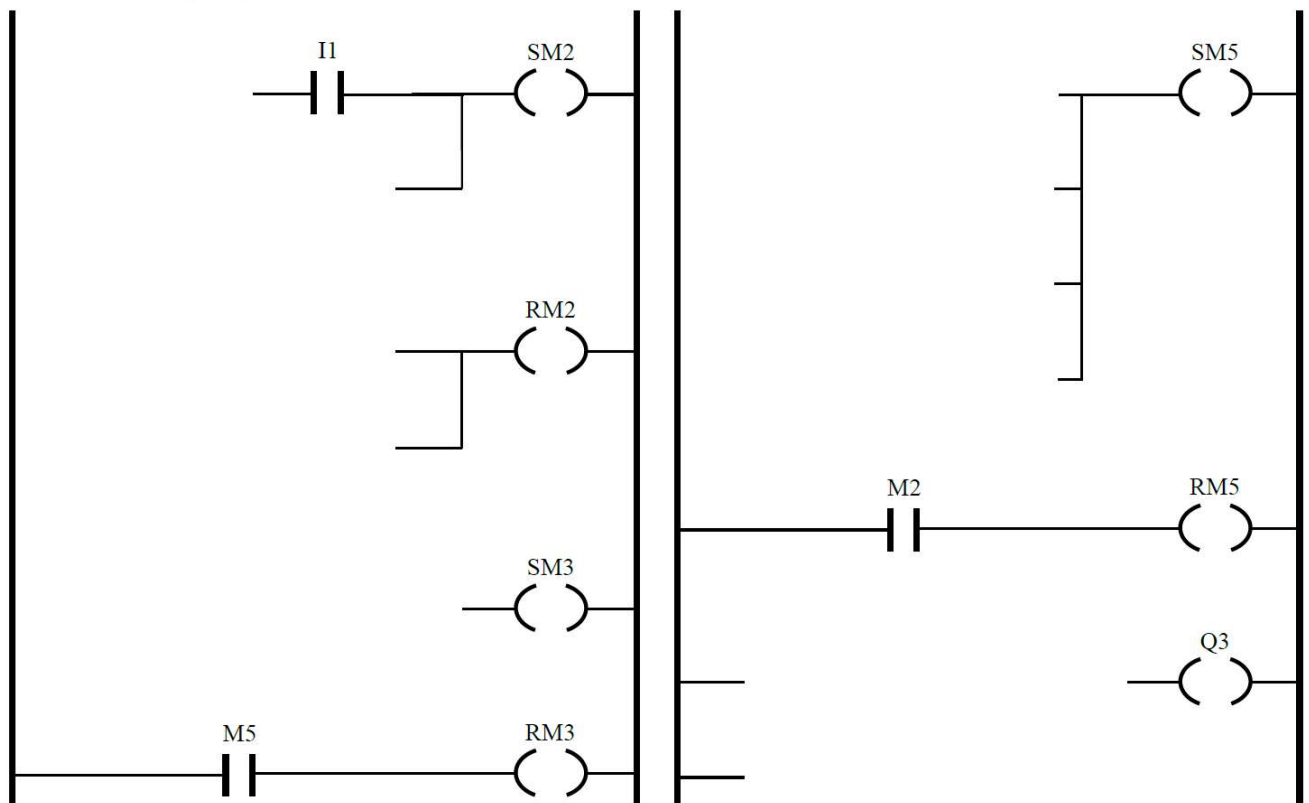
[4 pts]

**N.B :**

L'étape 5 corrige le conflit de programmation entre l'étape 2 et les étapes 3 et 4.

Q.39-

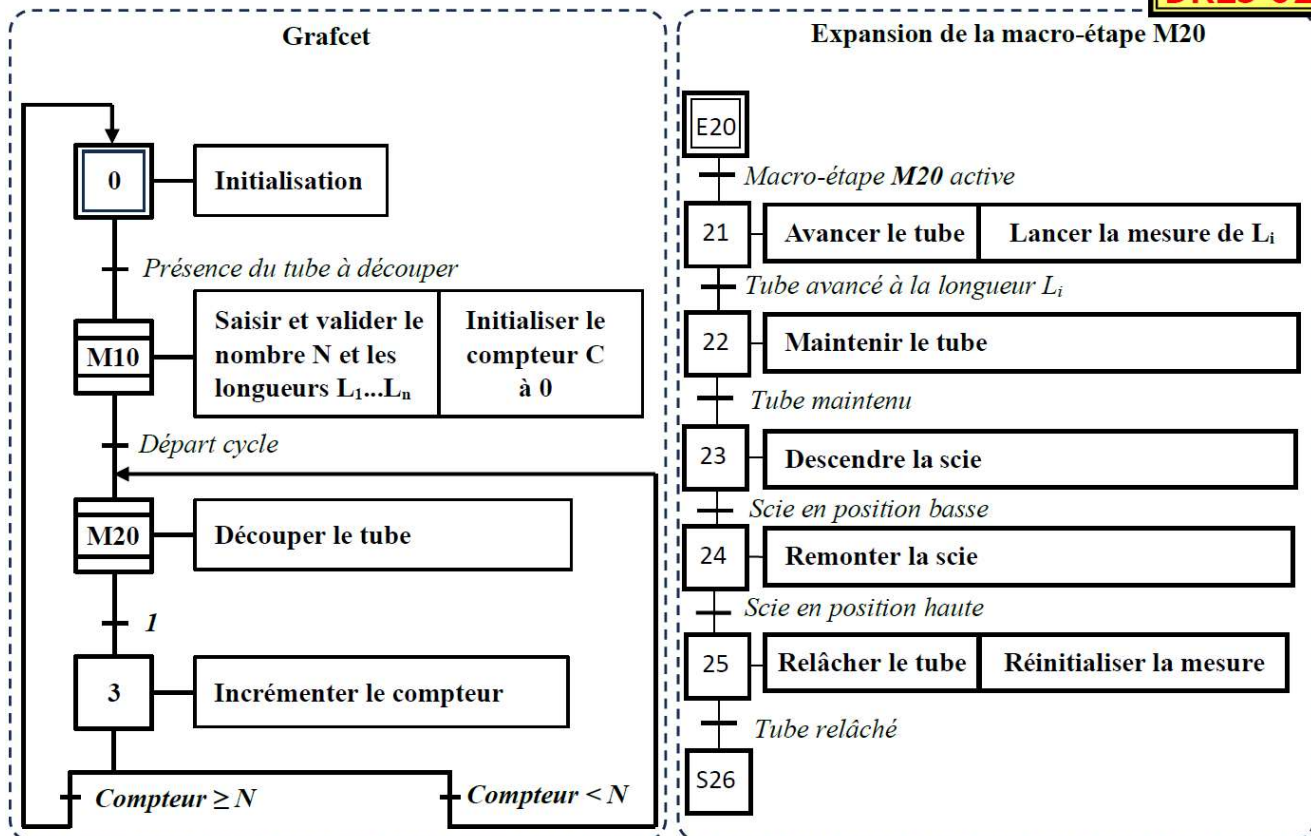
[4 pts]



Exercice 4 : examen national 2024, session de rattrapage**Tâche 4 : Étude du grafcet point de vue commande**

À partir du Grafcet (**DRES 02**) et des données des tableaux du **DRES 03** :

Q46. Compléter, de point de vue commande, l'expansion de la macro-étape **M20**.

2 pts**Grafcet de point de vue système****DRES 02****Tableau d'affectation des entrées****DRES 03**

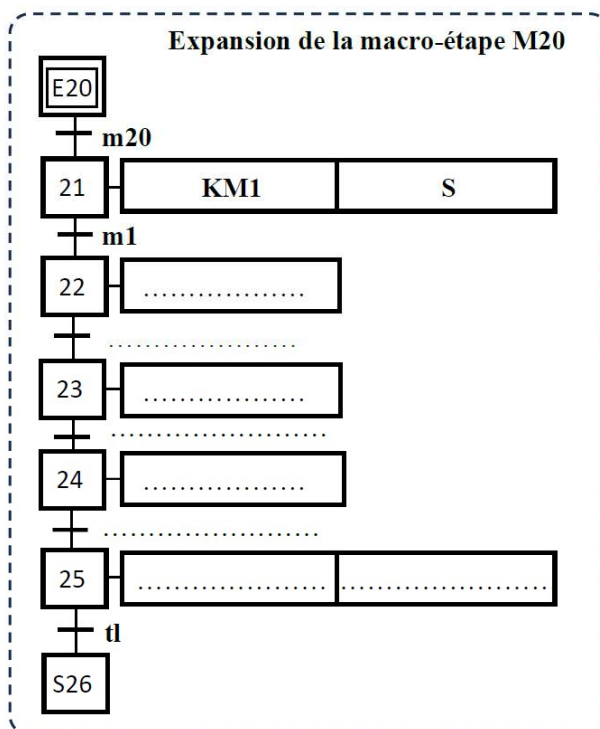
Fonction de l'entrée	Capteur/Interface d'entrée
Départ cycle	Dcy
Présence tube	cp
Longueur L_n prédéfinie atteinte	m1 (Bit 0 de la case mémoire interne CMI)
Macro-étape M20 active	m20 (Bit 1 de la case mémoire interne CMI)
Tube maintenu	tm
Tube relâché	tl
Scie en position basse	sb
Scie en position haute	sh

Tableau d'affectation des sorties

Action	Actionneur	Pré actionneur
Avancer le tube	Moteur électrique <i>M1</i>	KM1
Maintenir le tube	Vérin double effet <i>V2</i>	V2+
Relâcher le tube		V2-
Remonter la scie	Vérin double effet <i>V1</i>	V1-
Descendre la scie		V1+

Commande du capteur de distance

Fonction	Contact de commande
Lancer la mesure	S (Set)
Réinitialiser la mesure	R (Reset)

Q46. Grafcet point de vue commande

Exercice 5 : examen national 2025, session normale**A- FONCTIONNEMENT DU BROYEUR**

Les matières premières, utilisées dans la fabrication des carreaux, sont mélangées et stockées dans une trémie de stockage qui alimente le broyeur de fabrication de la barbotine.

Le broyeur est géré par un automate programmable industriel (**A.P.I.**).

Le document ressources **DRES 03** donne :

- Le Grafcet fonctionnel du broyeur, constitué de **2** Grafcet partiels connexes :
 - ✓ Le Grafcet de production normale (**GPN**) ;
 - ✓ Le Grafcet de sécurité (**GS**) qui arrête le broyeur en cas d'éventuel défaut ou après un arrêt d'urgence ;
- Les tableaux d'affectation des entrées et des sorties de l'**A.P.I.** ;
- Un rappel du fonctionnement du temporisateur de l'automate.

L'étape **12** du Grafcet de **sécurité** est active en cas de défaut ou après un arrêt d'urgence. Celle-ci active l'étape **1** et désactive les **étapes 2, 3 et 4** du Grafcet de **production normale**.

Tâche 1 : Étude de la commande du broyeur

On se propose d'établir le programme **LADDER** permettant la commande du broyeur.

En se référant aux données du document ressources **DRES 03** :

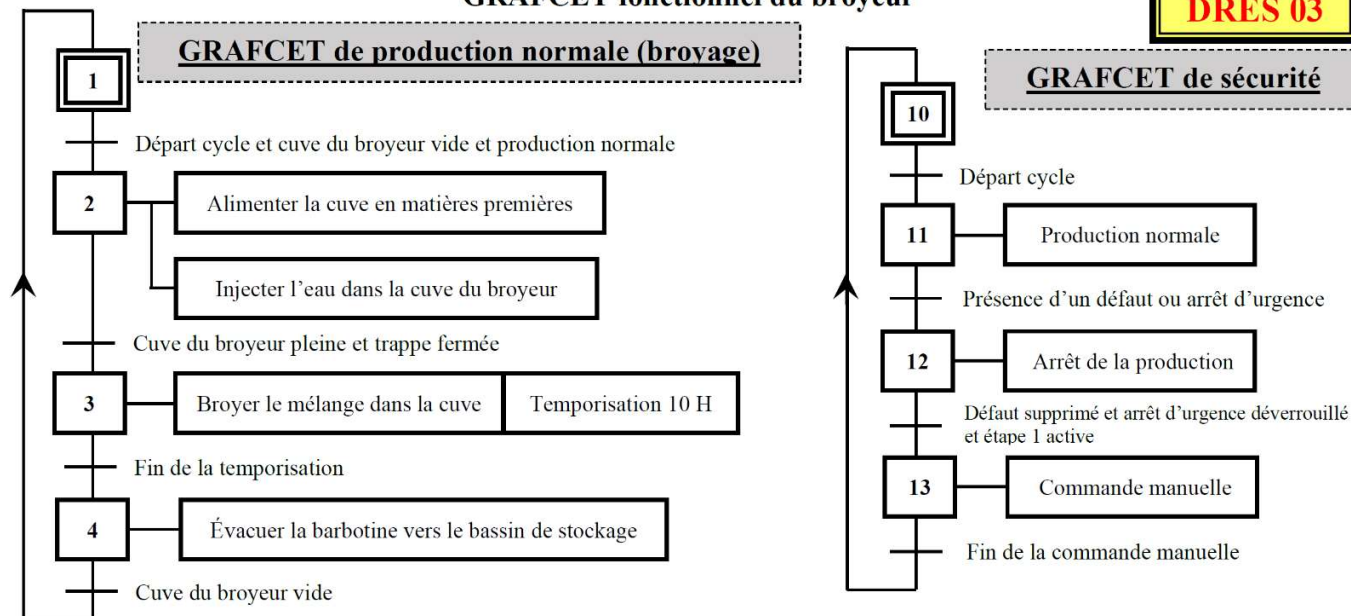
Q.33- Compléter les Grafcet **GPN** et **GS** de point de vue **A.P.I.**

2,5 pts

Q.34- Compléter le programme **LADDER**, partiel, correspondant aux étapes **1, 2, 3 et 4**.

3,5 pts

GRAFCET fonctionnel du broyeur

DRES 03

Tableaux d'affectation des entrées et des sorties de l'A.P.I.

Tableaux d'affectation des sorties

Messages	Voyants	Sorties API
Signaler 'Production normale'	Voyant vert	H1
Signaler 'Arrêt de la production'	Voyant rouge	H2

Actions	Actionneurs	Sorties API
Broyer le mélange dans la cuve	Moteur M1	Q3
Alimenter la cuve en matières premières	Motopompe MP2	Q4
Injecter l'eau dans la cuve du broyeur	Motopompe MP3	Q5
Évacuer la barbotine vers bassin de stockage	Motopompe MP4	Q6

Tableau d'affectation des entrées

Consignes/Comptes rendus	Boutons/Capteurs	Entrées API
Départ cycle	Bouton poussoir	I1
Arrêt d'urgence	Bouton poussoir	I2
Présence d'un défaut	Capteurs (couple, courant...)	Signal TOR
Cuve du broyeur vide	Capteur de niveau + Conditionneur	Signal TOR
Cuve du broyeur pleine		Signal TOR
Trappe fermée	Détecteur à action mécanique	I6

Rappel du fonctionnement du temporisateur de l'automate

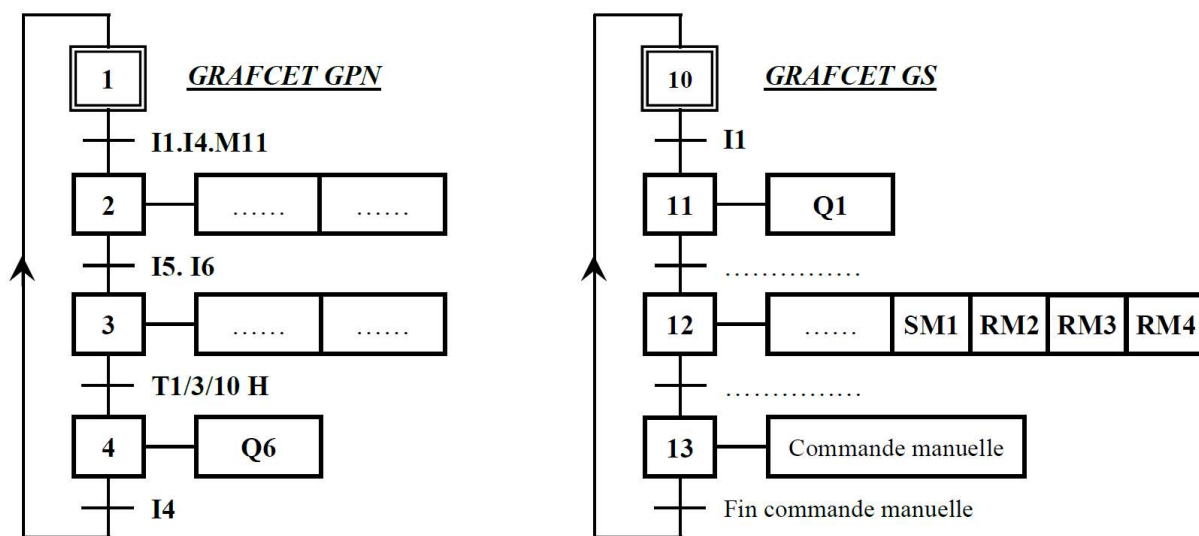
À chaque temporisateur sont associées 2 bobines **TTx** et **RTx** et un contact **Tx** :

- Bobine **TTx** : entrée de déclenchement de la temporisation numéro x (x=1,2 ou 3...);
- Bobine **RTx** : entrée de remise à zéro de la temporisation ;
- Contact **Tx** : sortie active en fin de temporisation.

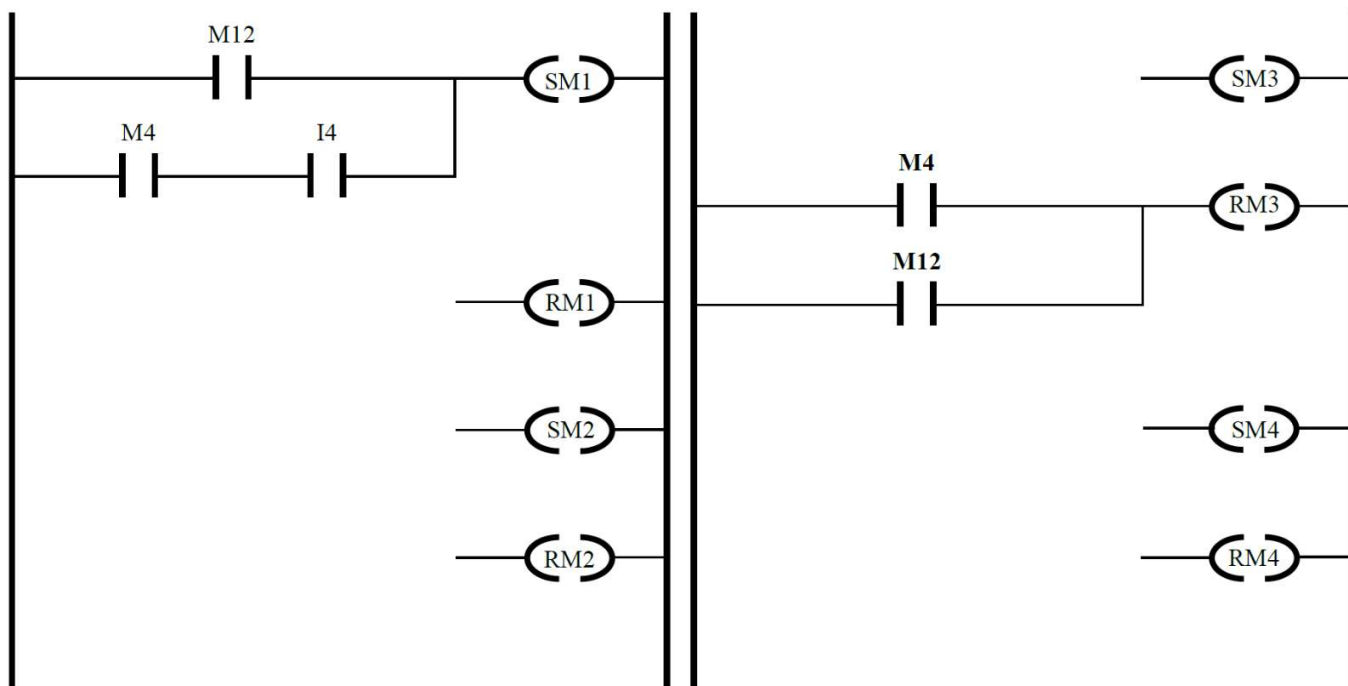
Le temporisateur **1** est paramétré à **10 heures** donc le contact associé **T1** change d'état 10 heures après le déclenchement de la temporisation.

Temporisateur interne n°1 de l'API	Lancer temporisation 10 H	Bobine TT1
	Fin de temporisation 10 H	Contact interne T1

Q.33-



Q.34-



Exercice 6 : examen national 2026, session normale**A. DEPLACEMENTS VERTICAL ET HORIZONTAL DE LA POCHE**

Le déplacement **vertical** (montée ou descente) et le déplacement **horizontal** (à gauche ou à droite) de la poche sont gérés par un automate programmable industriel (**A.P.I.**) et commandés par l'opérateur grâce à la manette industrielle à deux axes **J1**.

Les tableaux donnés en document ressources **DRES 03** précisent les affectations des E/S de l'**A.P.I.**

Le cycle de déplacement de la poche est décrit par le GRAFCET donné en document ressources **DRES 03**.

Tâche 1 : Étude du GRAFCET de déplacement de la poche

On se propose d'établir le programme ladder permettant la commande de déplacement de la poche.

En se référant au document ressources **DRES 03** :

Q33) Compléter Le GRAFCET du point de vue **A.P.I.**

4 pts

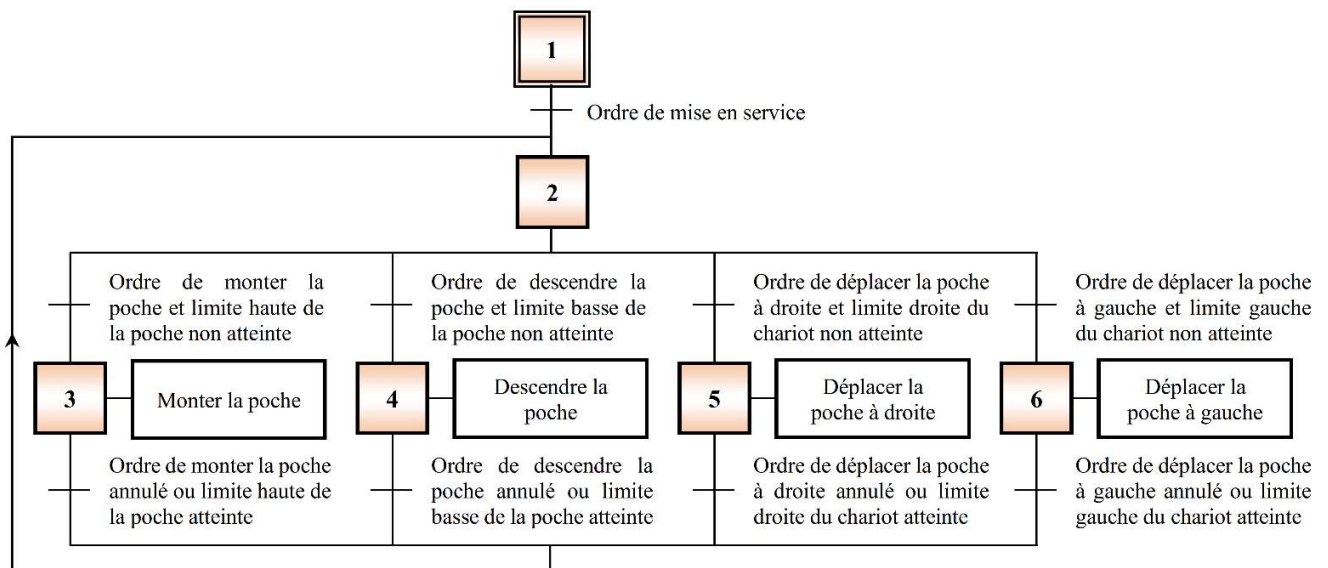
Q34) Compléter le programme Ladder correspondant aux étapes 2, 3, 4 et 7 et à l'action **Q1**.

4 pts**Tableaux d'affectations des entrées et des sorties de l'API****DRES 03**

Consigne ou compte rendu	Appareillages/capteurs/boutons			Entrées API
Ordre de mise en service du système	Bouton poussoir	m		I1
Limite haute de la poche atteinte	Capteur fin de course	FH		I2
Limite basse de la poche atteinte	Capteur fin de course	FB		I3
Limite droite du chariot atteinte	Capteur fin de course	FD		I4
Limite gauche du chariot atteinte	Capteur fin de course	FG		I5
Ordre de monter la poche	Joystick J1 à deux axes + Conditionneur	Signal TOR	S1	I6
Ordre de descendre la poche		Signal TOR	S2	I7
Ordre de déplacer la poche à droite		Signal TOR	S3	I8
Ordre de déplacer la poche à gauche		Signal TOR	S4	I9

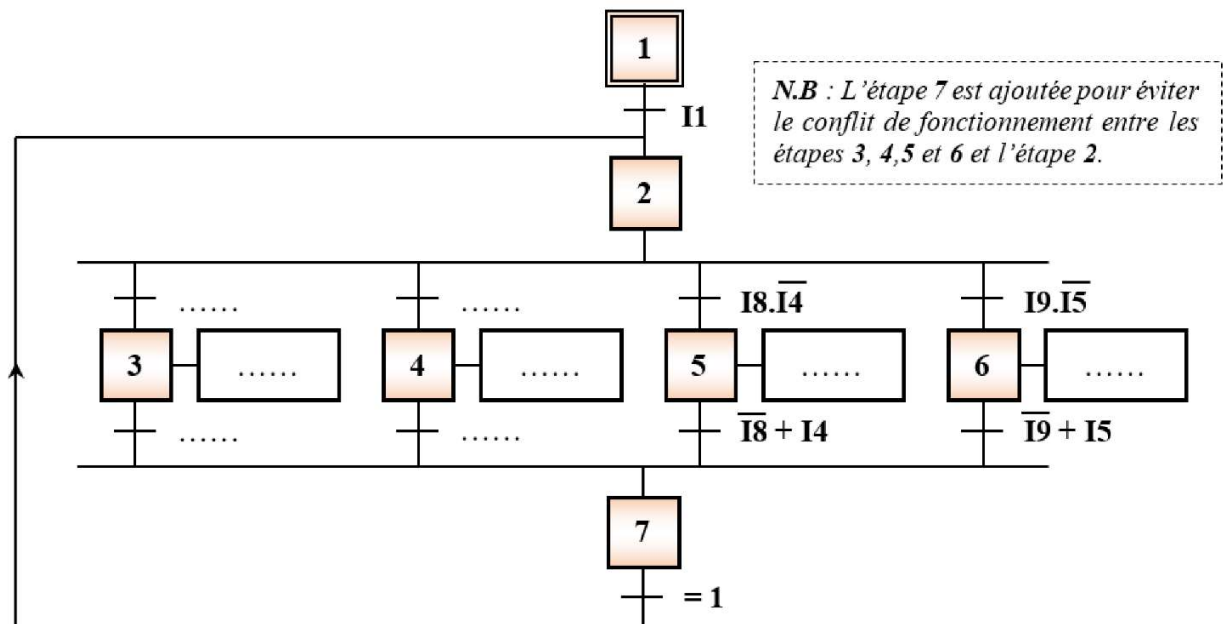
Mouvements	Actionneurs	Preactionneurs		Sorties API
Monter la poche	Vérin hydraulique V	Distributeur hydraulique Y	Y+	Q1
Descendre la poche			Y-	Q2
Déplacer la poche à droite	Moteurs M1 et M2	Deux contacteurs	KM1	Q3
Déplacer la poche à gauche			KM2	Q4

Cycle de déplacement de la poche

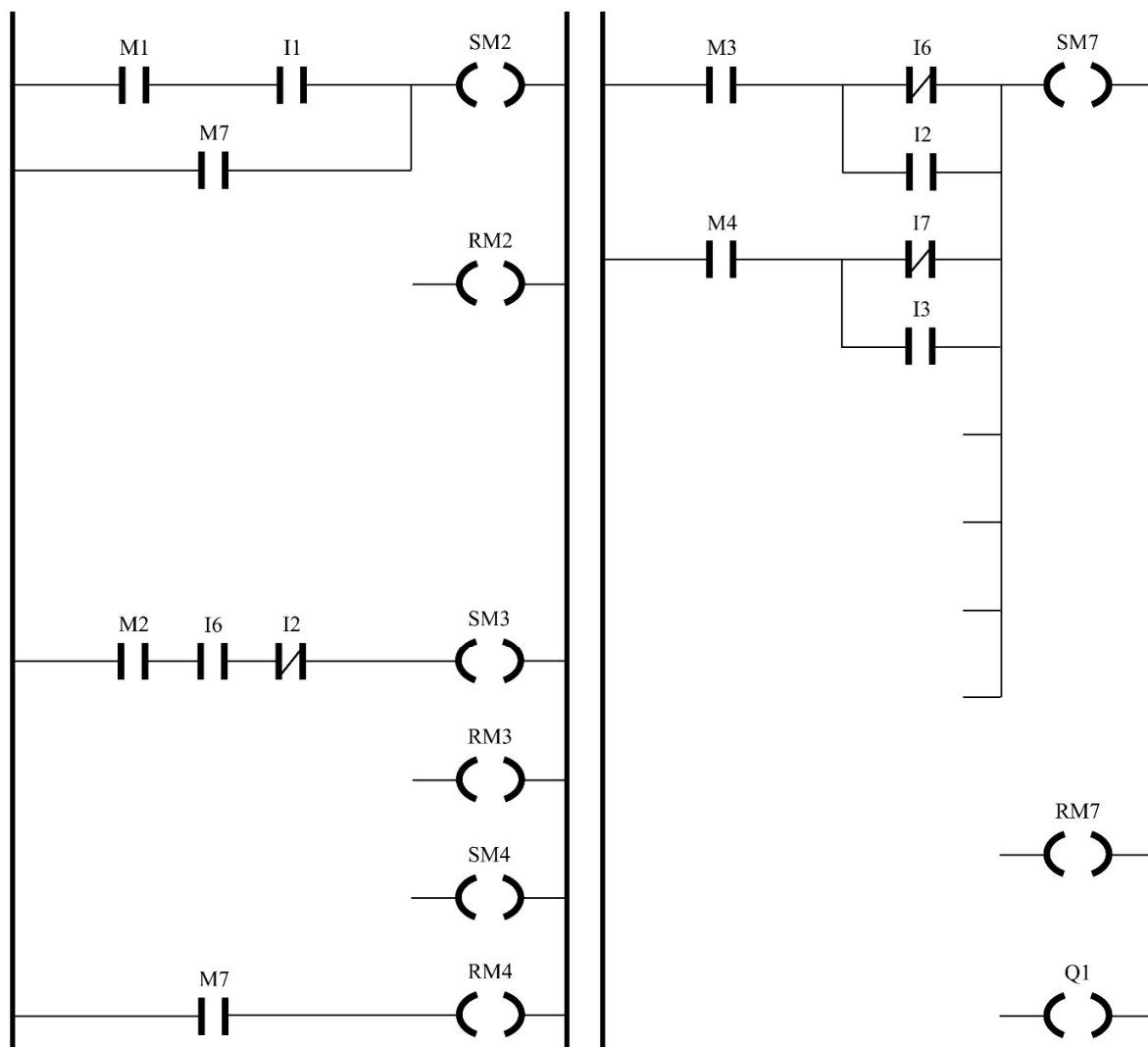


4 pts

Q33) GRAFCET du point de vue A.P.I.



4 pts

Q34) Programme *Ladder* :

Exercice 7 : examen national 2026, session de rattrapage
Tâche 4 : Étude du GRAFCET du système

En se référant au GRAFCET de point de vue fonctionnel de **Document page 3/14** et de la configuration matérielle de l'**A.P.I** du **Document ressources N°5**.

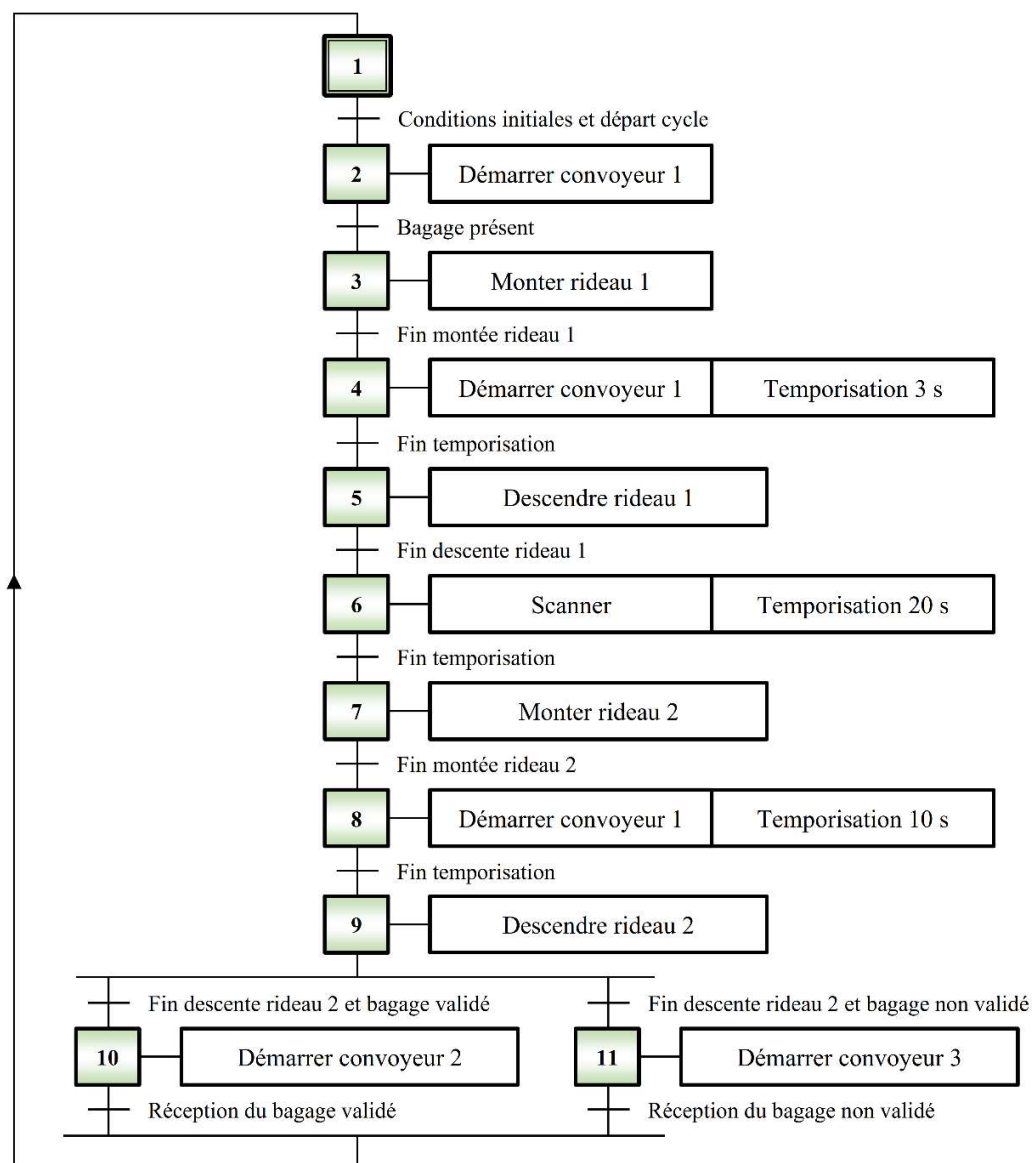
Q42) Compléter Le GRAFCET de point de vue **A.P.I**.

3 pts

Q43) Compléter le programme Ladder correspondant aux étapes **2, 9 et 11** et aux actions **Q1** et **TT2**.

4 pts

Le fonctionnement du système est décrit par le GRAFCET fonctionnel ci-dessous à partir des conditions initiales suivantes : **Rideau 1** et **Rideau 2** sont en position basse.



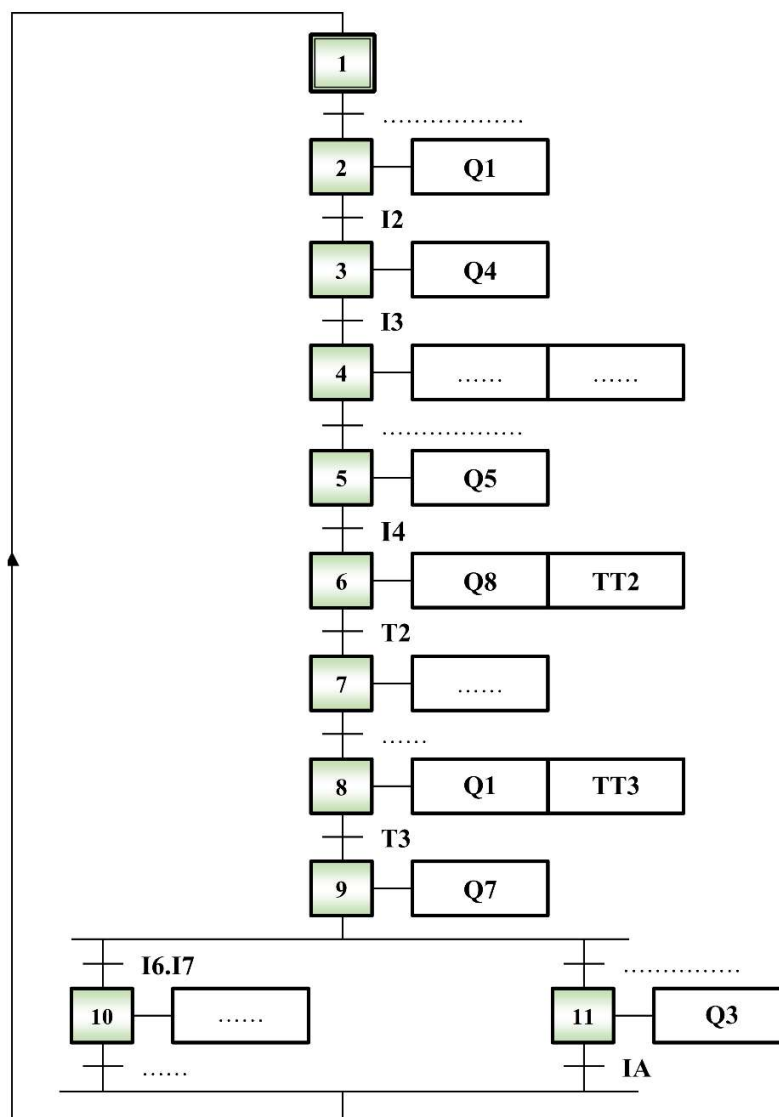
Identification et affectation des sorties (Zelio SR2B201FU)

Action/Temporisation	Actionneur	Préactionneur	Sortie API
Démarrer convoyeur 1	Moteur M1	Contacteur KM1	Q1
Démarrer convoyeur 2	Moteur M2	Contacteur KM2	Q2
Démarrer convoyeur 3	Moteur M3	Contacteur KM3	Q3
Monter rideau 1	Moteur M4	Contacteur KMm1	Q4
Descendre rideau 1		Contacteur KMd1	Q5
Monter rideau 2	Moteur M5	Contacteur KMm2	Q6
Descendre rideau 2		Contacteur KMd2	Q7
Scanner	Lampes à rayons X (RAY - X)		Q8
Temporisation 3s	Temporisateur interne n°1 de l'API		TT1
Temporisation 20s	Temporisateur interne n°2 de l'API		TT2
Temporisation 10s	Temporisateur interne n°3 de l'API		TT3

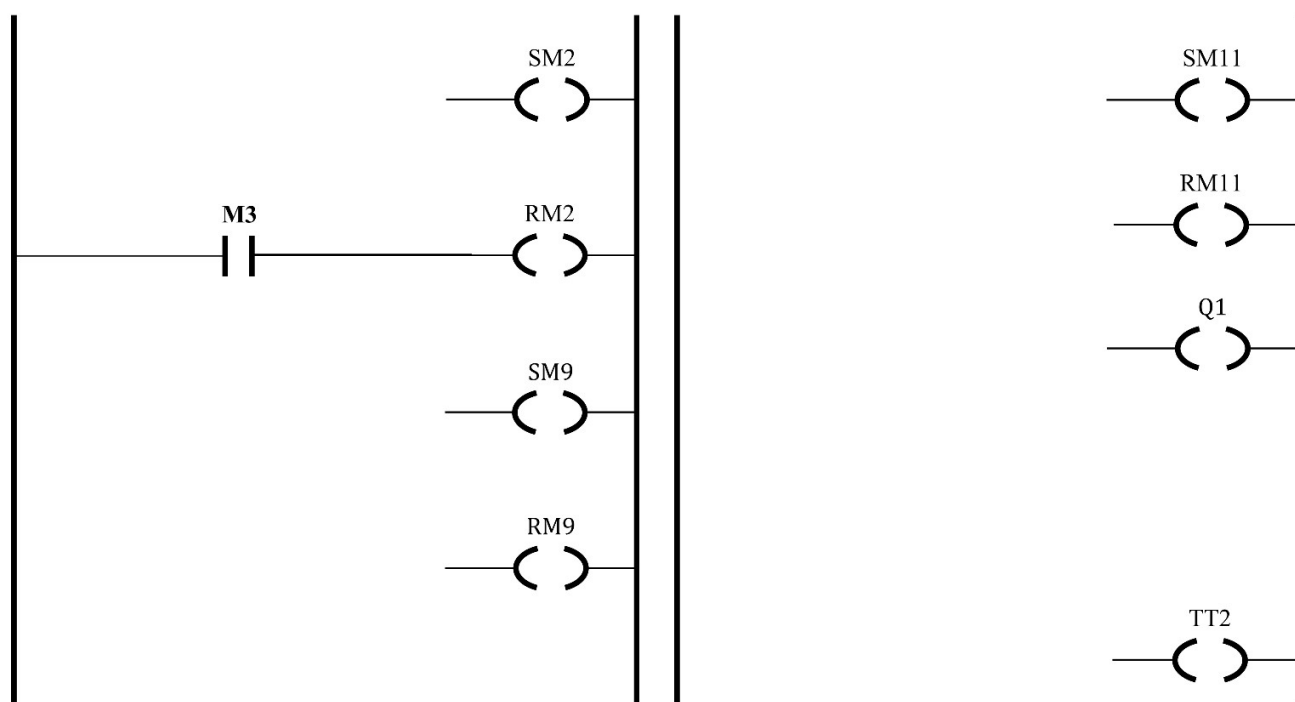
Identification et affectation des entrées (Zelio SR2B201FU)

Consigne/Compte-rendu	Bouton/Capteur	Entrée API
Départ cycle	Bouton poussoir Dcy	I1
Bagage présent	Capteur présence bagage CPB	I2
Fin montée rideau 1 (Position haute)	Capteur rideau 1 haut CR1h	I3
Fin descente rideau 1 (Position basse)	Capteur rideau 1 bas CR1b	I4
Fin montée rideau 2 (Position haute)	Capteur rideau 2 haut CR2h	I5
Fin descente rideau 2 (Position basse)	Capteur rideau 2 bas CR2b	I6
Bagage validé	Bouton poussoir BV	I7
Bagage non validé	Bouton poussoir BNV	I8
Réception du bagage validé	Capteur de réception bagage validé CBV	I9
Réception du bagage non validé	Capteur de réception bagage non validé CBNV	IA
Fin de la temporisation de 3s	Contact interne T1 du temporisateur n°1	T1
Fin de la temporisation de 20s	Contact interne T2 du temporisateur n°2	T2
Fin de la temporisation de 10s	Contact interne T3 du temporisateur n°3	T3

3 pts

Q42) GRAFCET de point de vue **A.P.I.**

4 pts

Q43) Programme Ladder.

7

MICROCONTROLEURS**Environnement microinformatique minimal**

Le contrôle d'un processus technique fait souvent appel à un dispositif de traitement programmable composé de deux éléments complémentaires indissociables :

- **Logiciel** : programme qui décrit la gestion du processus technique ;
- **Matériel** : dispositif électronique, à base de μP , qui héberge le programme et lui donne vie.

Ci-contre, la structure d'un système programmable minimal :

1. Microprocesseur

(ou CPU pour Central Processing Unit)

Le μP exécute le programme situé dans la mémoire de programme. Toute l'activité du μP est cadencée par une horloge.

2. Mémoires

Ce sont des composants chargés de conserver des contenus. En fonction des propriétés des mémoires, on distingue :

	Lecture	Écriture	Volatile
RAM	Oui	Oui	Oui
ROM	Oui	Non (programmée une seule fois au moment de la fabrication)	Non
PROM	Oui	Programmable une seule fois par l'utilisateur	Non
EEPROM	Oui	Effaçable électriquement à l'aide d'une broche spécifique et reprogrammable	Non

- Une mémoire volatile perd son contenu à la coupure de l'alimentation ;
- En principe, la RAM sert de mémoire de données tandis que la ROM sert de mémoire de programme ;
- Une variante de l'EEPROM est la mémoire FLASH qui est rapide et accepte d'être reprogrammée un grand nombre de fois.

3. Ports d'entrée/sortie

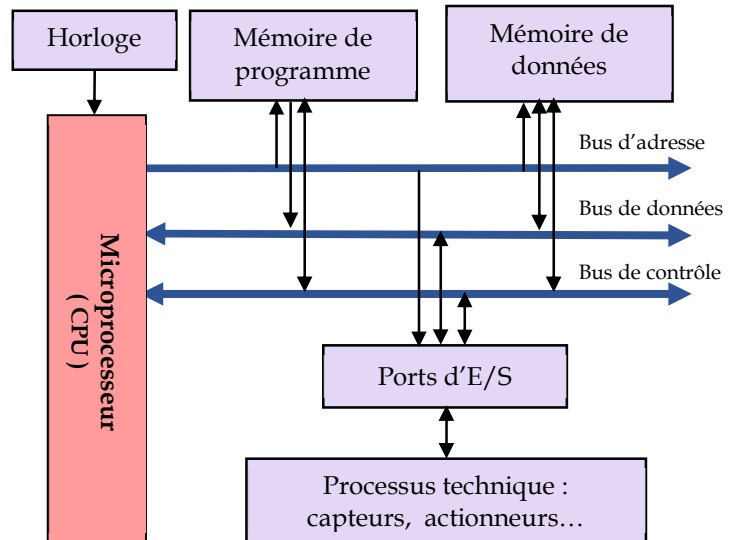
Ils ont pour rôle d'interfacer les périphériques afin de dialoguer avec le processus à gérer.

- ⇒ **Port parallèle** : les données sont transmises par paquets de 8, 16 ...bits.
- ⇒ **Port série** : les données sont transmises bit par bit sur un fil unique (exemples : USB, RS232, RS485).

4. Bus

Un bus est ensemble de fils destiné à véhiculer les données entre les différents composants du système. On distingue :

- **Bus de données** : à travers lequel transitent les données ;
- **Bus d'adresse** : à travers lequel le μP applique l'adresse de la donnée à lire ou à écrire ;
- **Bus de contrôle** : à travers lequel le μP dialogue avec le composant adressé.

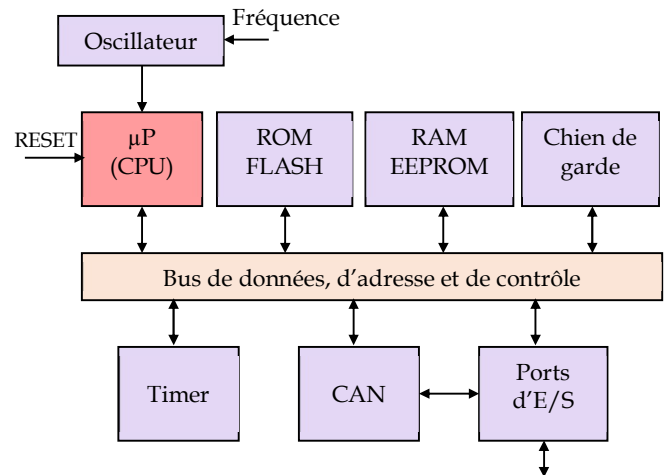


Microcontrôleur PIC 16F877

Généralités

Le μC se présente sous la forme d'un circuit intégré réunissant tous les éléments d'une structure à base de μP ainsi que certains modules auxiliaires :

- Un μP ;
- De la mémoire de données (RAM, EEPROM) ;
- De la mémoire de programme (FLASH, EEPROM) ;
- Des ports pour la connexion des entrées/sorties ;
- Des timers pour générer des impulsions, compter des événements, mesurer des fréquences, etc ;
- Des CAN pour traiter des signaux analogiques ;
- Un chien de garde : qui détecte s'il y a un problème logiciel et provoque un RESET ;

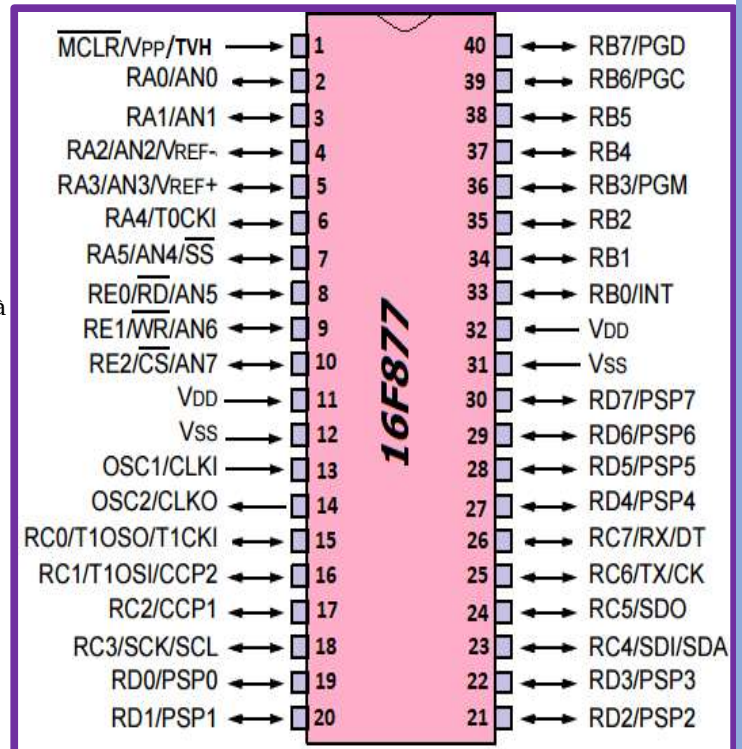


Aujourd'hui on trouve les μC presque partout : cafetière, réfrigérateur, four à micro-ondes, téléviseur, téléphone portable, imprimante, scanner, voiture (airbags, climatisation, alarme, etc), etc.

Architecture externe (brochage) du PIC 16F877 de Microchip

La popularité du 16F877 vient de sa facilité de mise en œuvre et la disposition d'un environnement de développement complet totalement gratuit : MPLAB.

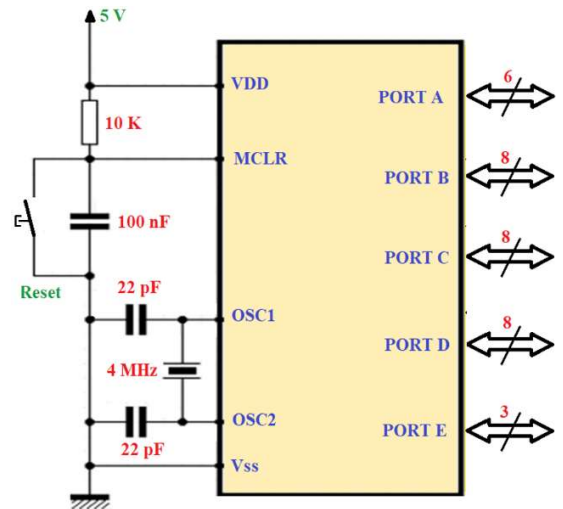
- L'alimentation du circuit est assurée par les pins $VDD = +5V$ et $VSS = 0V$;
- **OSC1** et **OSC2** : broches qui reçoivent un quartz ou un circuit RC pour l'horloge interne ;
- **MCLR** (Master Clear Reset) : broche de remise à zéro, active au niveau bas (0V) ;
- **RA0 à RA5** : 6 broches E/S du **PORT A** ;
RB0 à RB7 : 8 broches E/S du **PORT B** ;
RC0 à RC7 : 8 broches E/S du **PORT C** ;
RD0 à RD7 : 8 broches E/S du **PORT D** ;
RE0 à RE2 : 3 broches E/S du **PORT E**.



Mise en œuvre

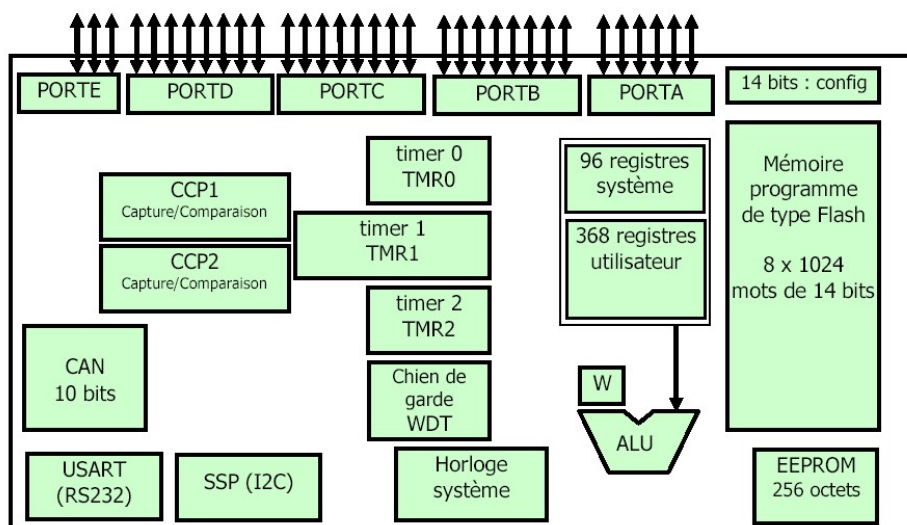
Ci-contre, un montage minimal avec :

- Alimentation du composant (VDD = +5V et VSS = 0V) ;
- Pilotage par quartz, ici de 4 MHz (OSC1 et OSC2) ;
- RESET manuel par un bouton poussoir ;
- RESET automatique à chaque mise sous tension.
En effet, le condensateur est initialement déchargé (MCLR = 0), puis se charge jusqu'à VDD (MCLR = 1).

Architecture interne

Les caractéristiques principales du 16F877 sont :

- Une **mémoire programme** de type flash de **8K mots de 14 bits** de h'0000' à h'1FFF' ($1K = 2^{10} = 1024$) ;
- Une **mémoire RAM** constituée de **4 banques** (bank) :
 - 96 registres SFR** (Special Function Register) : sont les registres de fonctionnement du PIC et ayant des fonctions spéciales ;
 - 368 registres GPR** (General Propose Register) : sont des positions mémoire que l'utilisateur peut utiliser pour stocker ses variables.
- Une **mémoire EEPROM** Data de données de **256 octets** ;
- 3 Timers** avec prédiviseur programmable : 2 timers 8 bits **TMR0**, **TMR2** et un autre 16 bits **TMR1** ;
- Un chien de garde **WDT** ;
- CAN 10 bits** à approximations successives à 8 entrées multiplexées ;
- 33 E/S bidirectionnelles réparties sur **5 ports** : **PORTA** à 6 bits, **PORTB**, **PORTC**, **PORTD** à 8 bits et **PORTE** à 3 bits ;
- 1 registre de travail (accumulateur) **W** à 8 bits ;
- Bus DATA sur 8 bits ;
- Jeu de **35 instructions** de durée 1 ou 2 cycles ;
- Plusieurs **sources d'interruption** ;
- Autres modules : **USART** pour transmission série, interface **I2C**, 2 modules pour **PWM**, etc.



Programmation du PIC 16F877 en langage assembleur

Jeu d'instructions du 16F877

<i>INSTRUCTIONS OPERANT SUR UN REGISTRE</i>			Indicateurs	Cycles
ADDWF	F, d	W+F → {W, F ? d}	C, DC, Z	1
ANDWF	F, d	W AND F → {W, F ? d}	Z	1
CLRF	F	0 → F	Z	1
CLRW		0 → W	Z	1
CLRWDT		0 → WDT	TO', PD'	1
COMF	F, d	Complément F → {W, F ? d}	Z	1
DECF	F, d	Décrémente F → {W, F ? d}	Z	1
DECFSZ	F, d	Décrémente F → {W, F ? d} et saute une ligne si F=0		1(2)
INCF	F, d	Incrémente F → {W, F ? d}	Z	1
INCFSZ	F, d	Incrémente F → {W, F ? d} et saute une ligne si F=0		1(2)
IORWF	F, d	W OR F → {W, F ? d}	Z	1
MOVF	F, d	F → {W, F ? d}	Z	1
MOVWF	F	W → F		1
RLF	F, d	Rotation à gauche de F à travers C → {W, F ? d}	C	1
RRF	F, d	Rotation à droite de F à travers C → {W, F ? d}		1
SUBWF	F, d	F – W → {W, F ? d}	C, DC, Z	1
SWAPF	F, d	Permute les 2 quartets de F → {W, F ? d}		1
XORWF	F, d	W XOR F → {W, F ? d}	Z	1
<i>INSTRUCTIONS OPERANT SUR UN BIT</i>				
BCF	F, b	0 → bit b du registre F		1
BSF	F, b	1 → bit b du registre F		1
BTFSC	F, b	Teste le bit b de F et saute une ligne si b=0		1(2)
BTFSS	F, b	Teste le bit b de F et saute une ligne si b=1		1(2)
<i>INSTRUCTIONS OPERANT SUR UNE VALEUR</i>				
ADDLW	K	W + K → W	C, DC, Z	1
ANDLW	K	W AND K → W	Z	1
IORLW	K	W OR K → W	Z	1
MOVLW	K	K → W		1
SUBLW	K	K – W → W	C, DC, Z	1
XORLW	K	W XOR K → W	Z	1
<i>INSTRUCTIONS GENERALES</i>				
CALL	L	Branchement à un sous-programme de label L		2
GOTO	L	Branchement à la ligne de label L		2
NOP		Pas d'opération		1
RETURN		Retour d'un sous-programme		2
RETFIE		Retour d'interruption		2
RETLW	K	Retour d'un sous-programme avec K dans W		2
SLEEP		Mode standby	TO', PD'	1

La notation {W, F ? d} signifie que le résultat va soit dans W si d=0 ou w, soit dans F si d= 1 ou f.

⇒ Accès à la RAMRegistre STATUS

IRP	RP1	RP0	T0	PD	Z	DC	C
-----	-----	-----	----	----	---	----	---

Les bits **RP1** et **RP0** du registre **STATUS** permettent la sélection des banques de la RAM selon ce tableau :

RP1	RP0	Banque sélectionnée
0	0	Bank 0
0	1	Bank 1
1	0	Bank 2
1	1	Bank 3

⇒ Expression des nombres

L'assembleur considère les nombres dans la base indiquée par la spécification adjointe :

Base	Indicateur	Exemple
Décimal	D	D'27'
Hexadécimal	H 0x h	H'1B' ou 0x1B ou 1Bh
Binaire	B	B'00011011'

Exercice

En utilisant le plan d'organisation de la RAM, trouver la banque concernée.

Registre	Bank
PORTA	
TRISA	
TMR0	
ADCON1	

Exercice

Action	Code assembleur
Sélectionner la banque 0	BCF 0x03, 6 ou mieux BCF STATUS, RP1
Sélectionner la banque 2	..... .....
Mettre à 0 le registre W	 ; par l'instruction CLRW autrement ; par AND ou encore ; charger la valeur 0 dans W

Incrémenter le registre GPR d'adresse 0x20	.....	; copier le registre 0x20 dans W
	.....	; Incrémenter le registre W
	.....	; copier W dans 0x20
	ou mieux	
	.....	; incrémenter le registre 0x20 par l'instruction INCF
Charger le registre PORTB par le mot 10000001	.....	; Reset du registre PORTB
	.....	; forcer le bit b ₀ à 1
	.....	; forcer le bit b ₇ à 1
	autrement	
	.....	; charger l'octet '10000001' dans W
	.....	; copier W dans PORTB
Copier le contenu de PORTA dans PORTB	.....	; copier le contenu de PORTA dans W
	.....	; copier W dans PORTB

⇒ Ports d'entrées/sortie

PORTA : pins RA0 à RA5
PORTB : pins RB0 à RB7
PORTC : pins RC0 à RC7
PORTD : pins RD0 à RD7
PORTE : pins RE0 à RE2

- La direction des données sur les ports est programmée à travers les registres **TRISA**, **TRISB**, **TRISC**, **TRISD** et **TRISE** de la façon suivante :
 - 0** → configure la broche correspondante en **sortie** ;
 - 1** → configure la broche correspondante en **entrée**.

Exemples : la valeur '00000011' dans TRISB configure les broches RB0 et RB1 en entrée et les autres en sortie.

- La manipulation des données (lecture/écriture) sur les ports est programmée à travers les registres PORTA, PORTB, PORTC, PORTD et PORTE.

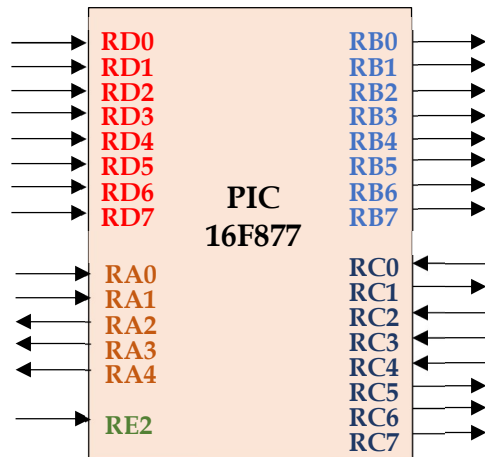
Exemple :

```

bsf PORTC, 7    → positionne la broche RC7 à 1 (écriture).
movwf PORTC    → permet de mettre le contenu de W sur PORTC (écriture).
movf PORTC, w   → récupère l'état de PORTC dans W (lecture).
  
```

Exercice

Ecrire le programme assembleur permettant la configuration suivante :

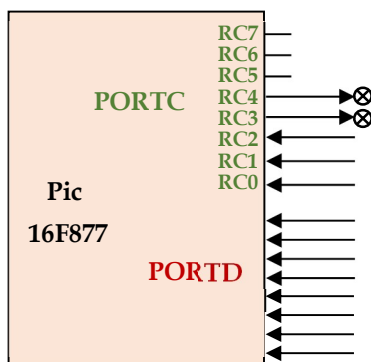


TRISA =
 TRISB =
 TRISC =
 TRISD =
 TRISE =

.....	; activer la banque 1
.....	
.....	; configurer port A
.....	
.....	; configurer port B
.....	
.....	; configurer port C
.....	
.....	; configurer port D
.....	
.....	; configurer port E
.....	
.....	; activer la banque 0
.....	

Exercice

- Configurer les ports conformément à la figure
- Allumer les 2 LED du PORTC
 Lire le contenu de PORTD pour le stocker dans le registre d'adresse 7F



TRISC	.....
TRISD	.....

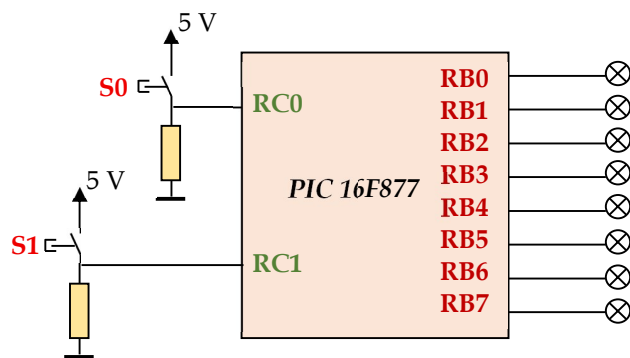
.....	; activer la banque 1
.....	
.....	; configurer le port C
.....	
.....	; configurer le port D
.....	
.....	; activer la banque 0
.....	
.....	; allumer les 2 Led du portC
.....	
.....	; lire et ranger la valeur du port D
.....	; dans le registre 7F

Exercice

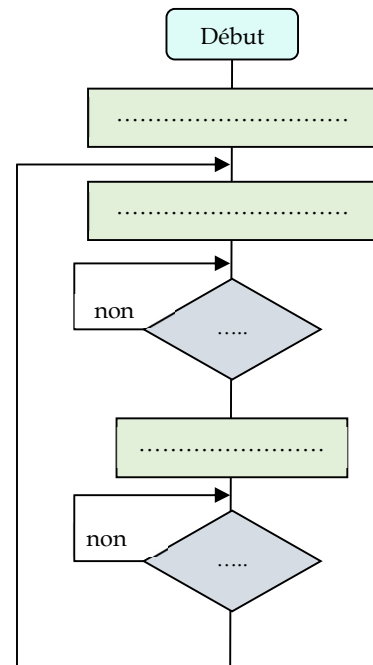
Au repos les LED sont éteintes.

- Une action sur le bouton-poussoir **S1** allume toutes les LED.
- Une action sur le bouton-poussoir **S0** éteint toutes les LED.

Fournir l'organigramme et le programme



TRISB	.....
TRISC	.....



.....	; banque 1
.....	
.....	; configurer PORTB en sortie
.....	; configurer PORTC
.....	
.....	; banque 0
.....	
boucle1	; éteindre les LED
boucle2	; Si RC1 = 1 (signifiant si S1 appuyé)
.....	; sinon se brancher à "boucle2"
.....	; si oui allumer les LED
.....	
boucle3	; Si RC0 = 1
.....	; sinon se brancher à "boucle3"
.....	; Se brancher à "boucle1" pour éteindre de nouveau

⇒ Techniques de comparaison des registres

Bits indicateurs d'état Z et C du registre STATUS

Le bit **Z** est l'indicateur de **Zéro** : **Z = 1** si le résultat d'une opération arithmétique ou logique est **zéro** ;
Z = 0 si le résultat est **différent de zéro**.

Le bit **C** est l'indicateur de **signe** : **C = 1** si le résultat d'une soustraction est **positif** ;
C = 0 si le résultat est **négatif**.

F1 et F2 étant deux registres, compléter ce tableau :

Action	Code assembleur
Si F1 = 0	 ; copier F1 dans W puis contrôler le bit Z
Si F1 = F2	 ; effectuer la soustraction entre F1 et F2 puis contrôler le bit Z
Si F1 < F2	 ; effectuer la soustraction entre F1 et F2 puis contrôler le bit C

⇒ Temporisation et sous-programme

Un sous-programme est une séquence d'instructions chargée d'effectuer un traitement particulier.
 Les sous-programmes permettent ainsi de décomposer un programme en plusieurs sous-parties.

Programme principal

```

.....
.....
CALL X
.....
CALL X
.....

```

Sous-programme

```

X .....
.....
.....
RETURN

```

CALL : instruction d'appel du sous-programme.

RETURN : instruction de retour au programme appelant.

Exercice

Faire clignoter à la fois et à 1 Hz, les 8 LED supposées montées sur PORTB.
On suppose déclaré un sous-programme "tempo" qui réalise une temporisation de 0,5 s.

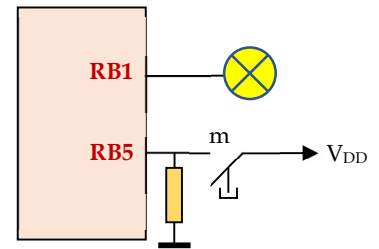
loop	.....	; Éteindre les LED
	.....	; Temporiser 0,5 s
	.....	; Allumer les LED
		
	.....	; Temporiser 0,5 s
	.....	; répéter

Variante utilisant l'instruction **comf F, d**

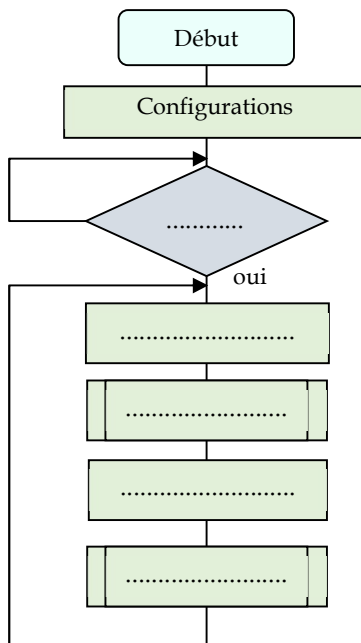
	.....	; Éteindre les LED
loop	.....	; Temporiser 0,5 s
	.....	; complémenter PORTB
	.....	; répéter

Exercice

Faire clignoter la **LED** du montage ; **m** est le bouton marche.
Réaliser la temporisation par une boucle de retard (temporisation logicielle) et la confier à un sous-programme.



Programme principal

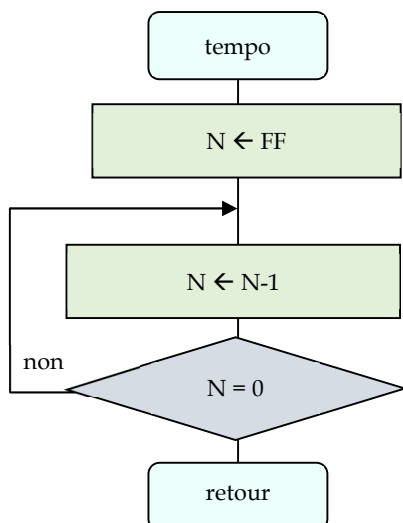


```

N equ 0x20          ; Initialisation des variables
.....             ; banque 1
.....             ;
.....             ; configurer port B
.....             ;
.....             ; banque 0
.....             ;
test .....          ; tester si RB5 = 1 et saut si vrai
.....             ; revenir à 'test'
lab .....           ; allumer
.....             ; appel du sous-programme 'tempo'
.....             ; éteindre
.....             ; temporisation
.....             ; revenir à 'lab'

tempo Movlw 0xFF      ; sous prog. de temporisation
      movwf N
boucle Decfsz N,f
      Goto boucle
      Return
  
```

Sous-programme de temporisation



```

tempo .....         ; N <- FF
.....             ;
loop .....           ; décrémenter N et tester si N = 0
.....             ; sinon retour à l'étiquette 'loop'
return .....         ; retour au programme principal
  
```

Durée de temporisation du sous-programme

La fréquence f de fonctionnement interne du PIC est le quart de celle du quartz ; soit $f = F_{osc}/4$.

- Pour un quartz de $F_{osc} = 20 \text{ MHz} \Rightarrow f = 5 \text{ MHz} \Rightarrow 1 \text{ cycle} = 1/f = 0,2 \mu\text{s}$;
- Pour un quartz de $F_{osc} = 4 \text{ MHz} \Rightarrow f = 1 \text{ MHz} \Rightarrow 1 \text{ cycle} = 1 \mu\text{s}$.

- Pour un quartz de **4MHz**, 1 cycle instruction = **1 μ s** ;
- Toutes les instructions du sous prog. prennent 1 cycle sauf goto et return qui en prennent 2.

Calcul de la durée la temporisation :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Multiplés durées de temporisation

Augmenter la durée de temporisation peut être obtenu par imbrication des boucles de retard.

```

tempo .....
          .....
loop     .....
          .....
          return
  
```

Durée T = avec un quartz de

```

tempo1 .....
          .....
loop1     .....
          .....
          .....
          return
  
```

Durée T1 =

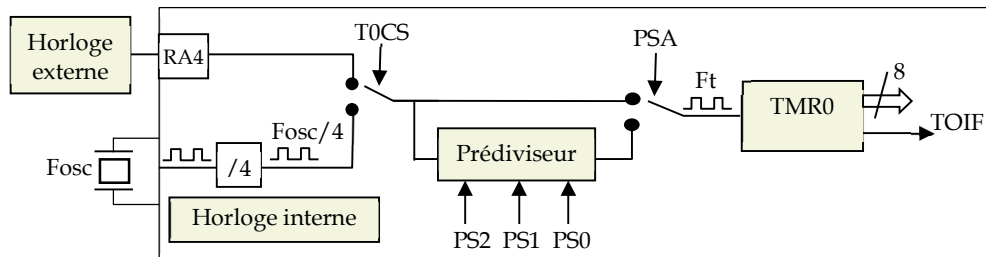
```

tempo2 .....
          .....
loop2     .....
          .....
          .....
          return
  
```

Durée T2 =

⇒ Module Timer 0

- Le Timer 0 est un compteur 8 bits qui peut servir de temporisateur (timer) ou de compteur d'évènements ;
- TMR0 est un registre associé au Timer 0.



Configuration

Timer 0 est configuré par le registre OPTION

Registre **OPTION**
(banques 1 et 3)

RBP	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0
-----	--------	-------------	------	------------	------------	------------	------------

- L'horloge peut être interne ou externe :
 - T0CS = 0** → horloge interne (de fréquence Fosc/4) ;
 - T0CS = 1** → horloge externe appliquée à la broche RA4.
- On peut ou non utiliser le prédiviseur :
 - PSA = 0** → le prédiviseur est affecté au timer TMR0 ;
 - PSA = 1** → le prédiviseur est affecté au Watchdog WDT.

Le facteur de division de la fréquence est fixé par les bits PS2, PS1 et PS0

PS2 PS1 PS0	000	001	010	011	100	101	110	111
Division de fréquence de TMR0 par	2	4	8	16	32	64	128	256

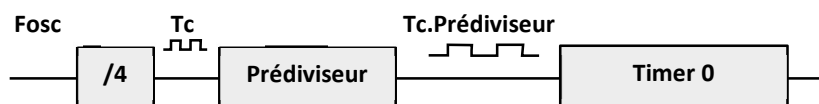
Timer 0 en mode timer

Dans ce mode, Timer 0 est piloté par l'horloge interne du microcontrôleur et sert de temporisateur. La durée de temporisation est **$T = T_c \cdot \text{Prédiviseur} \cdot (256 - \text{TMR0})$**

T_c : durée d'un cycle horloge.

Prédiviseur : valeur de prédivision.

TMR0 : valeur de départ du registre TMR0.



Temporisation par scrutation du débordement du Timer 0

Au débordement du timer (passage de FF à 00), le bit **TOIF** du registre **INTCON** passe à 1.

Registre **INTCON**
(banques 0, 1, 2 et 3)

GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF
-----	------	------	------	------	-------------	------	------

Exercice

On désire obtenir une temporisation de **10 ms**, trouver le mot de configuration (OPTION) et la valeur initiale de TMR0. On donne **Fosc = 4 MHz**.

Écrire, ensuite, un sous-programme qui met en œuvre cette temporisation en scrutant le bit TOIF.

En mode timer, on utilise l'horloge interne : T0CS =

Et si on choisit une prédivison =, le mot de configuration sera :

OPTION	RBPU	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0
								

Avec un quartz de Fosc = 4MHz, la durée d'un cycle horloge est

.....

.....

.....

Sous-programme de temporisation de 10 ms par scrutation du bit TOIF

...		
.....		; configurer Timer 0 via OPTION
.....		
...		
tempo10ms	.....	; valeur de départ du registre TMR0
.....		
.....		; baisser le drapeau càd mettre TOIF = 0
attente	.....	; tester si TOIF = 1
.....		; sinon revenir à 'attente'
.....		; retour au programme principal

Exercice

Donner la valeur initiale de TMR0 et trouver le mot de configuration (OPTION) pour obtenir la temporisation maximale possible. On donne **Fosc = 4 MHz**.

Écrire, ensuite, un sous-programme qui met en œuvre cette temporisation.

.....

.....

OPTION	RBPU	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0
								

Sous-programme de temporisation maximale

...		
.....		; configurer Timer 0 via OPTION
.....		
...		
tempomax	.....	; valeur de départ du registre TMR0
.....		; baisser le drapeau càd mettre TOIF = 0
attente	.....	; tester si TOIF = 1
.....		; sinon revenir à 'attente'
.....		; retour au programme principal

⇒ Le module WDT Watchdog Timer ou chien de garde

C'est un compteur 8 bits incrémenté par une horloge indépendante de l'horloge système (même si le μ C est en mode sleep). Lorsqu'il déborde (après **18 ms**), deux situations sont possibles :

- Si le μ C est en fonctionnement normal, cela provoque un RESET ;
- Si le μ C est en mode SLEEP, cela provoque un WAKE-UP (l'exécution du programme reprend).

Configuration

Registre **OPTION**
(banques 1 et 3)

RBPU	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0
------	--------	------	------	------------	------------	------------	------------

Il est possible d'augmenter la durée par utilisation du prédiviseur (celui partagé avec le timer 0). Le coefficient de prédivision est fixé par les bits PS0, PS1 et PS2 :

- **PSA = 0** → le prédiviseur est affecté au timer TMR0 ;
- **PSA = 1** → le prédiviseur est affecté au Watchdog WDT.

Le coefficient de prédivision de la fréquence est fixé par les bits PS2, PS1 et PS0 :

PS2 PS1 PS0	000	001	010	011	100	101	110	111
Division de fréquence par	1	2	4	8	16	32	64	128

Le WDT est activé par la directive `__CONFIG _WDT_ON`.

Mode SLEEP

Dans ce mode, l'horloge système est arrêtée ce qui suspend l'exécution du programme.

Pour sortir du mode SLEEP et donc continuer l'exécution, il faut provoquer un WAKE-UP par :

- Un RESET externe dû à l'initialisation du PIC ; dans ce cas, l'exécution recommence ;
- Ou par un débordement du chien de garde WDT s'il est activé ; dans ce cas, l'exécution continue.

Temporisation par le mode Sleep combiné au WDT

On met le μ C dans le mode Sleep ; le programme est alors suspendu et reprendra après débordement du WDT.

Exercice

Faire clignoter une LED montée sur la ligne RC0. Réaliser la temporisation par le mode Sleep combiné au WDT.

On optera pour une prédivison par donc PSA = et PS2 PS1 PS0 =

OPTION	RBPU	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0
								

La durée du WDT étant de
Avec le prédiviseur elle devient

.....	; activer WDT
...	
.....	; configurer WDT via OPTION
.....	
...	
loop	 ; allumer la LED
.....	; passer en mode sleep, réveil après débordement de WDT
.....	; éteindre la LED
.....	; passer en mode sleep, réveil après débordement de WDT
goto loop	

Durées possibles du WDT

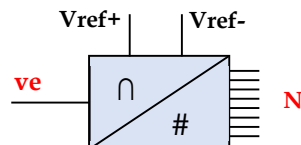
PSA	PS2, PS1, PS0	Taux de prédivison du WDT	Mot de configuration (OPTION)	Durée indicative
1	000	.....	.....	.....
1	001	.....	.....	.....
1	010	.....	.....	.....
1	011	.....	.....	.....
1	100	.....	.....	.....
1	101	.....	.....	.....
1	110	.....	.....	.....
1	111	.....	.....	.....

⇒ Le module ADC (Analog to Digital Converter)

Conversion

Le PIC16F877 est équipé d'un module de conversion analogique-numérique CAN **10 bits** à approximations successives. Ce module permet de convertir une tension analogique (**entre 0 et 5 V**) en une valeur numérique codée sur 10 bits, soit une plage de valeurs de **0 à 1023**.

Ce convertisseur est très utile pour interfacer des composants analogiques comme les potentiomètres, les sondes de température, capteurs de luminosité, etc.



La valeur **N** résultante de la conversion a pour expression :

$$N = \frac{ve - V_{ref}^-}{V_{ref}^+ - V_{ref}^-} \cdot 1023$$

et si $V_{ref}^+ = V_{DD} = 5V$ et $V_{ref}^- = V_{SS} = 0V$,

$$N = \frac{ve}{5} \cdot 1023$$

Entrées analogiques

Il y a 8 canaux d'entrée analogiques : AN0 à AN7.

Registres associés

ADCON0 et **ADCON1** : registres de contrôle du CAN.

ADRESH et **ADRESL** : registres qui contiennent le résultat de la conversion.

⇒ Registre ADCON0

Registre **ADCON0**
(banque 0)

ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	-	ADON
-------	-------	------	------	------	---------	---	------

- Bits **ADCS1** et **ADCS0** → choix de la fréquence de fonctionnement du CAN.

ADCS1 ADCS0	00	01	10	11
Fréquence	Fosc/2	Fosc/8	Fosc/32	Fréquence de l'oscillateur RC interne

- Bits **CHS2**, **CHS1** et **CHS0** → choix l'entrée analogique à convertir (canal).

CHS2 CHS1 CHS0	000	001	010	011	100	101	110	111
Canal	AN0/RA0	AN1/RA1	AN2/RA2	AN3/RA3	AN4/RA5	AN5/RE0	AN6/RE1	AN7/RE2

- Bit **GO/DONE** → état de la conversion.

1 → lance la conversion ;
0 → signale la fin de conversion.

- Bit **ADON** → état du convertisseur.

1 → le module convertisseur est activé ;
0 → le module convertisseur est désactivé.

⇒ Registre ADCON1

Registre **ADCON1**
(banque 1)

ADFM	-	-	-	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
------	---	---	---	-------	-------	-------	-------

- Bit **ADFM** → format du résultat : justification à droite ou à gauche des 10 bits du résultat dans les 16 bits de **ADRESH** et **ADRESL**.

	ADRESH	ADRESL
ADFM = 1 → résultat justifié à droite	0 0 0 0 0 0 XX	XXXXXXXXXX
ADFM = 0 → résultat justifié à gauche	XXXXXXXXXX	XX 0 0 0 0 0 0

- Bits **PCFG3** à **PCFG 0** → configuration des ports du CAN.

PCFG3 à PCFG0	RE2	RE1	RE0	RA5	RA3	RA2	RA1	RA0	VREF+	VREF-
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	RA3	VSS
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	VDD	VSS
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	RA3	RA2

Mise en œuvre

- Définir les entrées analogique/numérique/référence → bits **PCFG3** à **PCFG0** → **ADCON1**
- Choisir la justification du résultat → bit **ADFM** → **ADCON1**
- Choisir le canal d'entrée → bits **CHS2** à **CHS0** → **ADCON0**
- Définir la fréquence de conversion → bits **ADCS1** et **ADCS0** → **ADCON0**
- Activer le module CAN → bit **ADON** → **ADCON0**
- Démarrer la conversion → bit **GO/DONE** → **ADCON0**
- Attendre la fin de conversion → bit **GO/DONE** → **ADCON0**
- Lire le résultat disponible dans les registres de résultat → **ADRESH** et **ADRESL**

Exercice

Un capteur de température analogique, type LM35, est connecté à la broche **RA0** du microcontrôleur **PIC16F877**. Ce capteur fournit une tension v de **10 mV** par **degré Celsius** (sensibilité).

Le CAN du microcontrôleur est configuré comme suit :

- $V_{ref+} = VDD$ (5 V) ; $V_{ref-} = VSS$ (0 V) ;
- Justification à droite du résultat ;
- Fréquence du CAN = $F_{osc}/32$.

1. Donner l'expression de la sortie N en fonction de v ;
2. Calculer le **quantum** q (résolution numérique) du CAN ;
3. Quelle est la valeur numérique N (en décimal) fournie par le CAN lorsque la température est de **25°C** ?
4. On souhaite acquérir un échantillon de température et ranger le résultat numérique dans les registres **20_H** et **21_H**. Compléter le **programme**.

.....

.....

.....

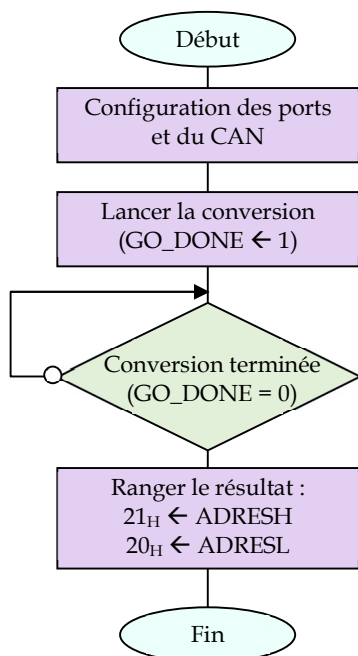
.....

.....

.....

.....

Organigramme

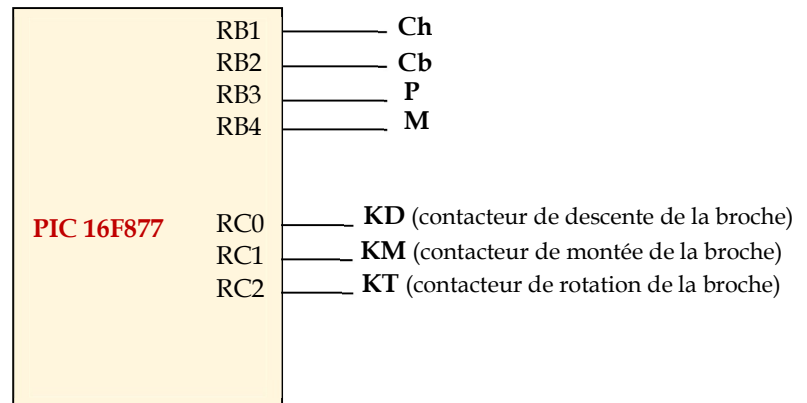
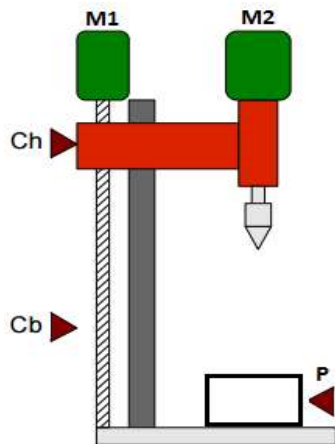


Programme

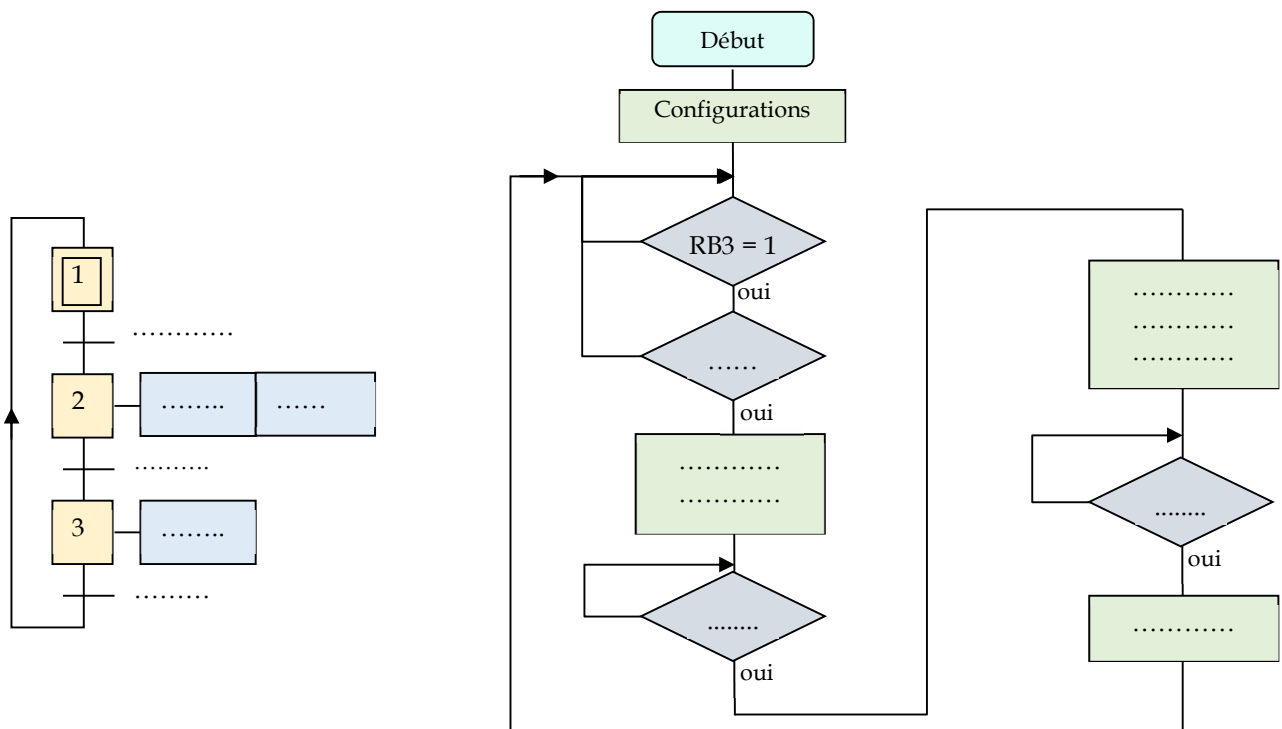
.....	; bank 1
.....	
.....	; configurer PORTA
.....	
.....	; configurer le ADC (Vrefs, RA0 analogique, justification à droite)
.....	
.....	; bank 0
.....	
.....	; configurer le ADC (canal RA0, fréquence, activation du ADC)
.....	
.....	; démarrer la conversion
att	.....
.....	; attendre la fin de conversion
.....	
.....	; 21 _H ← ADRESH
.....	
.....	; bank 1
.....	; W ← ADRESL
.....	
.....	; bank 0
.....	; 20 _H ← W

Implantation du GRAFCET dans un microcontrôleur

Le système est une perceuse automatique simple. Lorsque la pièce à usiner est en place (**P**), un appui sur le bouton **M** lance le cycle : la machine descend jusqu'à **Cb** puis remonte pour s'arrêter en **Ch**.



Fournir le GRAFCET, le traduire en organigramme puis en un programme assembleur pour le microcontrôleur PIC16F877.



```
    bcf STATUS, RP1                ; banque 1
    bsf STATUS, RP0
    .....                          ; configurer le port B
    .....
    .....                          ; configurer le port C
    bcf STATUS, RP0                ; banque 0
    bcf STATUS, RP1

test1 .....                        ; si RB3 = 1
    .....
    .....                        ; si RB4 = 1
    .....
    .....                        ; RC0 ← 1
    .....                        ; RC2 ← 1
test2 .....                        ; si RB2 = 1
    .....
    .....                        ; RC0 ← 0
    .....                        ; RC2 ← 0
    .....                        ; RC1 ← 1
test3 .....                        ; si RB1 = 1
    .....
    .....                        ; RC1 ← 0
    .....                        ; recommencer
```

⇒ Interruptions

Une interruption provoque l'arrêt du programme principal pour aller exécuter un sous-programme, dit d'interruption, qui se trouve à l'adresse **0004**.

À la fin de cette procédure, le microcontrôleur reprend le programme principal à l'endroit où il l'a laissé.

Sources d'interruption

Interruption	Source d'interruption	Bit de validation	Flag	Interruption périphérique
TOI	Débordement de Timer0	TOIE	TOIF	Non
INT	Front sur la broche RB0/INT (le front de déclenchement est configuré par le bit INTEDG)	INTE	INTF	Non
RBI	Front sur une broche RB4-RB7	RBIE	RBIF	Non
ADI	Fin de conversion A/N	ADIE	ADIF	Oui
TMR1I	Débordement de Timer1	TMR1E	TMR1F	Oui
TMR2I	Timer2 a atteint la valeur maxi	TMR2E	TMR2F	Oui
EEI	Fin d'écriture en EEPROM	EEIE	EEIF	Oui

- ☞ Toutes les interruptions peuvent être validées/interdites à la fois par le bit GIE ;
- ☞ Chaque interruption peut être validée/interdite par son bit de validation individuel ;
- ☞ Un bit drapeau (flag) permet de savoir si l'évènement déclenchant l'interruption arrive.

L'interruption INT

Cette interruption externe arrive via la broche RB0/INT, sa mise en œuvre nécessite de :

- Mettre à 1 le bit **GIE** pour l'autorisation globale de toutes les interruptions ;
- Mettre à 1 le bit **INTE** afin d'autoriser l'interruption sur RB0/INT ;
- Choisir le front (montant ou descendant) qui déclenche l'interruption par le bit **INTEDG** du registre OPTION.

Le bit **INTF** (flag) est un indicateur, il est mis à 1 si une interruption arrive sur RB0/INT. Il doit être remis à 0 dans le programme de traitement de l'interruption.

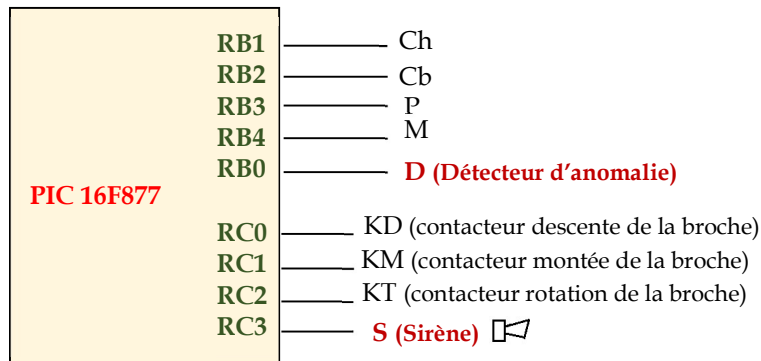
Registre **INTCON**

GIE	EEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF
-----	------	------	------	------	------	------	------

Exercice : mise en œuvre de l'interruption INT

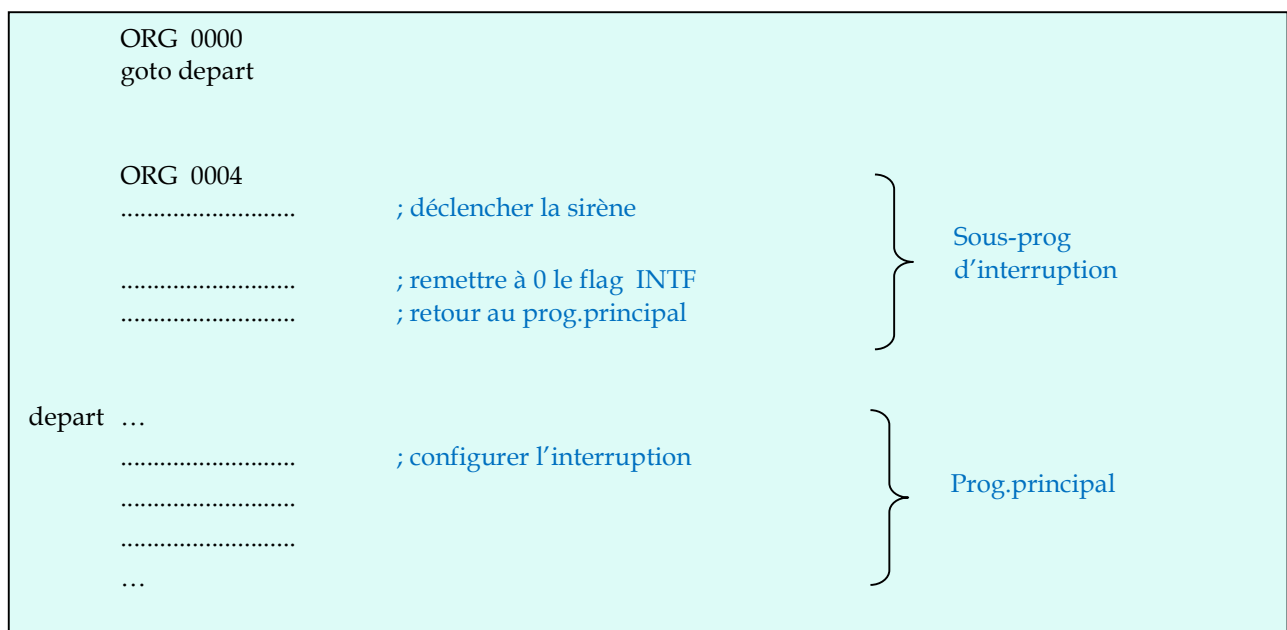
Il s'agit d'alerter les responsables en cas de danger autour de la perceuse de l'exercice traité plus haut : en cas d'anomalie signalée par le détecteur D sur la broche **RB0**, la sirène S montée sur **RC3** entre en action.

On va charger le programme principal de l'opération de perçage et la routine d'interruption du traitement de l'anomalie.



Configuration de l'interruption INT (sur RB0)

Registre	bit	Action
INTCON	GIE = 1	Autorisation générale de toutes les interruptions
INTCON	INTE = 1	Autorisation de l'interruption INT (sur RB0)
OPTION	INTEDG = 1	Choix du front montant sur RB0



Exercice 1 : examen national 2018, session de rattrapage

Tâche 4 : Test du niveau de la charge de la batterie (voir document DRES 04)

A chaque mise sous tension du chariot, l'utilisateur est informé du niveau de la charge de la batterie par une signalisation sonore. Pour cela, un sous-programme « Test » permet de tester la tension de la batterie E_{Bat} et d'émettre des bips sonores :

- $E_{Bat} \geq 12 V$ → charge convenable : 1 bip ;
- $11 V \leq E_{Bat} < 12 V$ → charge moyenne : 2 bips ;
- $E_{Bat} < 11 V$ → charge insuffisante (batterie déchargée) : 3 bips.

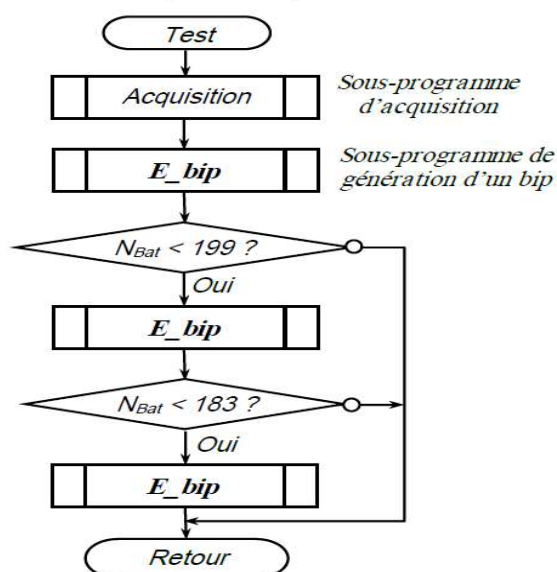
Le principe de ce test consiste à acquérir la tension U_{Bat} (image de la tension de la batterie E_{Bat}) et à la convertir en une valeur numérique N_{Bat} ; ensuite, on compare cette valeur aux seuils correspondants définis dans le tableau suivant :

	$E_{Bat} = 11 V$	$E_{Bat} = 12 V$
$U_{Bat} (V)$	3,59	3,92
N_{Bat} en décimal	183	199

L'organigramme du sous-programme « Test » est représenté ci-contre :

On note **adr_Nbat** l'adresse de la case mémoire contenant la valeur numérique N_{Bat} .

Q39) En utilisant le jeu d'instructions du microcontrôleur donné sur le document DRES 05, compléter le programme Assembleur correspondant à cet organigramme. 6 pts



Q39) Programme assembleur :

Label	Mnémonique	Opérande	Commentaire
Test	.....	.....	; Appel au sous-programme Acquisition
	CALL	E_bip	; Appel au sous-programme E_bip
	.....	.....	; Charger W par la valeur 199
	SUBWF	Adr_NBat,W	; Comparer (adr_NBat) à W
	.....	.....	; Sauter si N_Bat < 199
	GOTO	Fin	; Aller à la fin
	CALL	E_bip	; Appel au sous-programme E_bip
	.....	.....	; Charger W par la valeur 183
	.....	.....	; Comparer (adr_NBat) à W
	BTFSC	STATUS,C	; Sauter si N_Bat < W
	.....	.....	; Aller à la fin
	CALL	E_bip	; Appel au sous-programme E_bip
Fin	RETURN		

Exercice 2 : examen national 2021, session normale

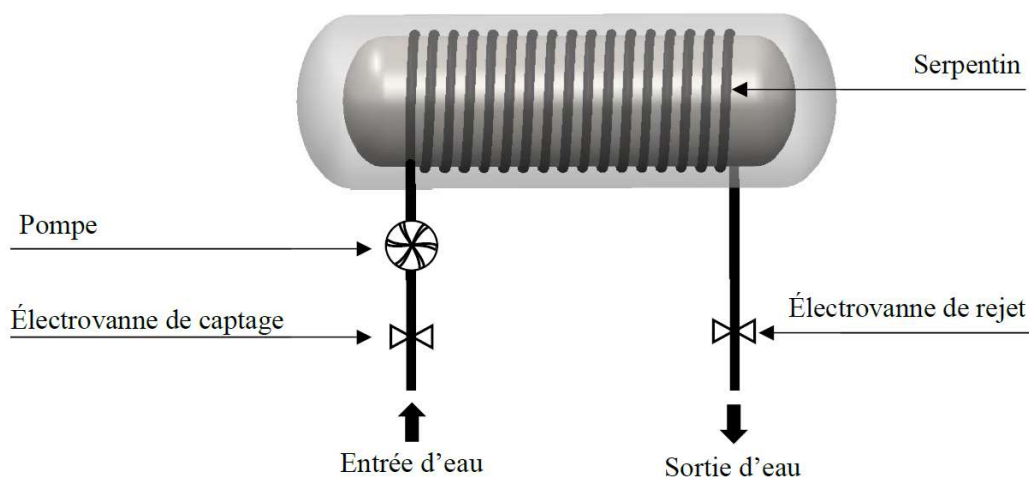
Tâche 2 : Commande du système de refroidissement à l'eau de mer

Les constituants électriques de l'hydrolienne, en particulier les convertisseurs électroniques de puissance, sont confinés à l'intérieur du convertisseur **AC/AC** (l'enceinte posée au fond marin et abritant l'ensemble du matériel électrique de l'hydrolienne).

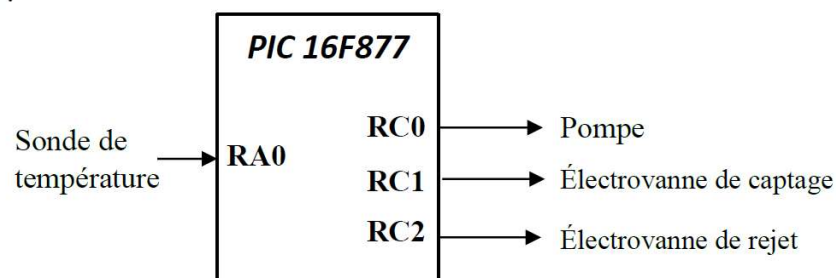
De ce fait, les composants électroniques peuvent être portés à des températures excessives. Cela nécessite de prévoir un moyen de refroidissement afin de protéger l'électronique embarquée.

On envisage de maintenir la température à l'intérieur du convertisseur **AC/AC** entre **20 °C** et **30 °C** par un système de refroidissement à l'eau de mer.

Moyennant deux électrovannes et une pompe à eau de mer, le système fait circuler l'eau dans un serpentin (tube métallique enroulé en spirale) inséré dans la double coque du convertisseur **AC/AC**. C'est un refroidissement en circuit ouvert ; en effet, après circulation dans le serpentin, l'eau est rejetée dans la mer. Une sonde mesure la température à l'intérieur du convertisseur **AC/AC**.



La commande de ce système de refroidissement est réalisée par un microcontrôleur **PIC 16F877** selon l'architecture suivante :



Programme de commande de ce système de refroidissement

Éléments du programme

- **Lecture_T** : sous-programme chargé de lire, sur la ligne **RA0**, l'information issue de la sonde de température et de ranger le code numérique correspondant dans le registre **NT**.
- **NT** : registre qui contient le code numérique de la température mesurée par la sonde.
- **NT_{min}** et **NT_{max}** : sont les codes numériques qui correspondent respectivement à **20 °C** et **30 °C**.

Séquences du programme

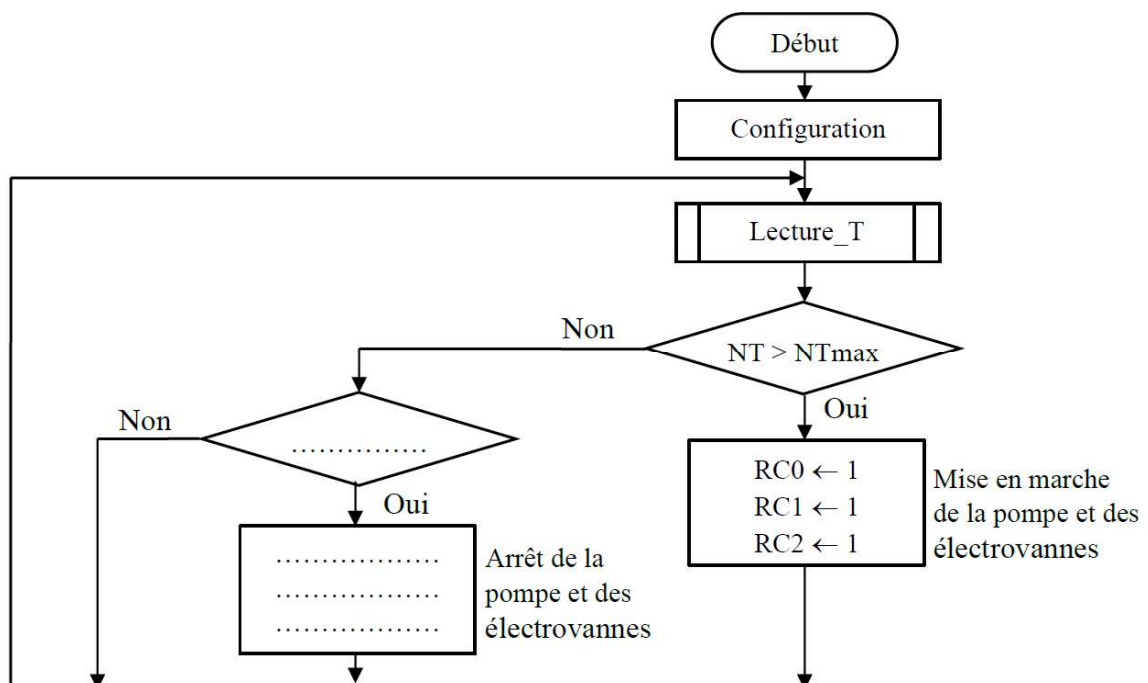
- Appel du sous-programme **Lecture_T** ;
- Evaluation de la température lue :
 - Si **NT > NT_{max}**, on met en marche la pompe et les deux électrovannes ;
 - Si **NT < NT_{min}**, on arrête la pompe et les deux électrovannes ;
- Reprendre une nouvelle lecture de la température.

Question : 43. Compléter l'organigramme traduisant les séquences ci-dessus.

2 pts

Question : 44. En vous aidant du jeu d'instructions du **DRES 04**, compléter le programme assembleur correspondant.

6 pts



Instruction		Commentaire	
BCF STATUS, RP1		; Activer la page 1	
.....		; Configurer PORTC en sortie	
BSF TRISA, 0		; Configurer la ligne RA0 en entrée	
BCF STATUS, RP1 BCF STATUS, RP0		; Activer la page 0	
repeter		; appel du sous-programme "Lecture_T"	
MOVLW NTmax SUBWF NT, w		; $W \leftarrow NTmax$; $W \leftarrow NT - NTmax$; tester si le bit C = 1	tester si NT > NTmax
GOTO saut		; si non, se brancher à l'étiquette "saut"	
BSF PORTC, 0 BSF PORTC, 1 BSF PORTC, 2		; si oui, mettre en marche la pompe et les deux électrovannes	
GOTO repeter		; reprendre	
saut		; $W \leftarrow NTmin$; $W \leftarrow NT - NTmin$; tester si le bit C = 0	tester si NT < NTmin
GOTO repeter		; si non, reprendre	
BCF PORTC, 0 BCF PORTC, 1		; si oui, arrêter la pompe et les deux électrovannes	
GOTO repeter		; reprendre	

Exercice 3 : examen national 2023, session de rattrapage**Tâche 2 : programmation du cycle de nettoyage des diffuseurs fines bulles**

Le colmatage (bouchage des orifices des membranes des diffuseurs causé par les dépôts) est le problème majeur observé dans le système d'insufflation par diffuseurs fines bulles.

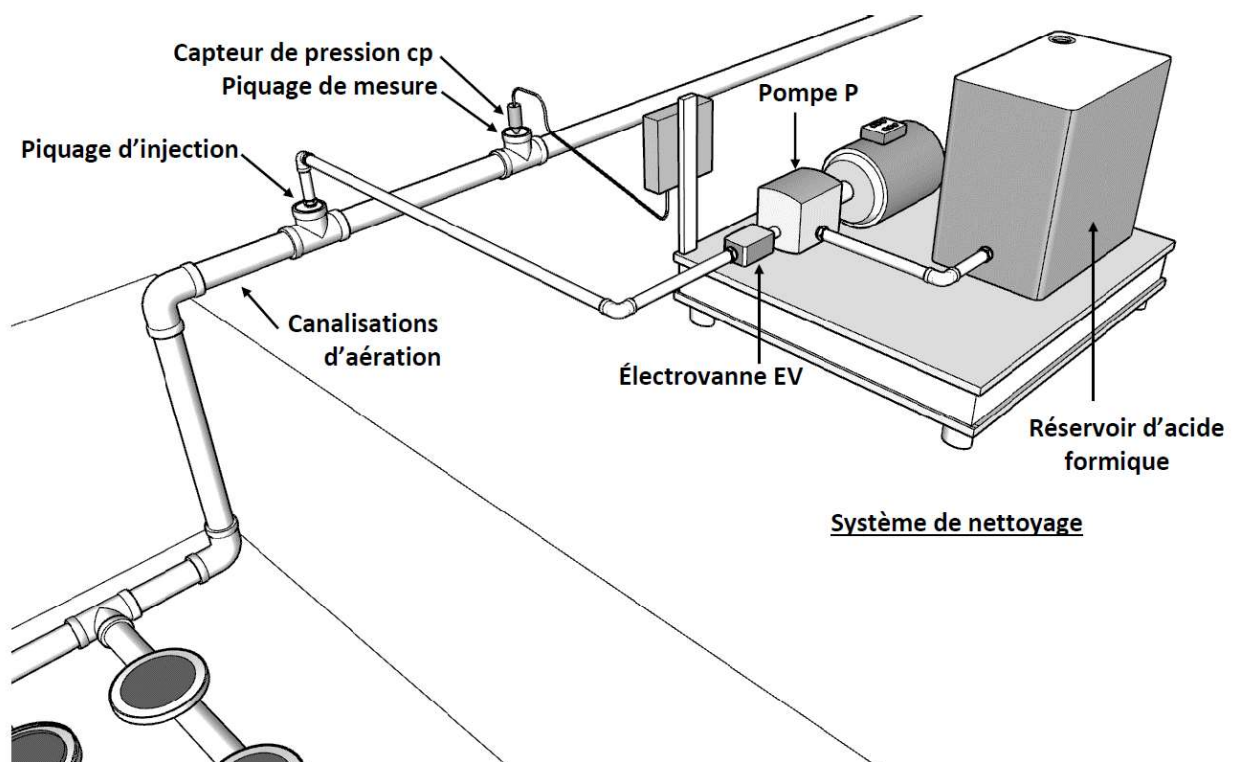
Il est donc fortement recommandé de procéder de façon régulière à un nettoyage préventif des canalisations d'aération

Le nettoyage par injection de l'acide formique est le remède le plus couramment utilisé.

Système de nettoyage

Le système de nettoyage (figure ci-dessous) est équipé d'une pompe **P** et d'une électrovanne d'isolement **EV** ; la pompe puise l'acide formique dans un réservoir. Le produit est pulvérisé et injecté dans les canalisations d'aérations par le biais d'un piquage.

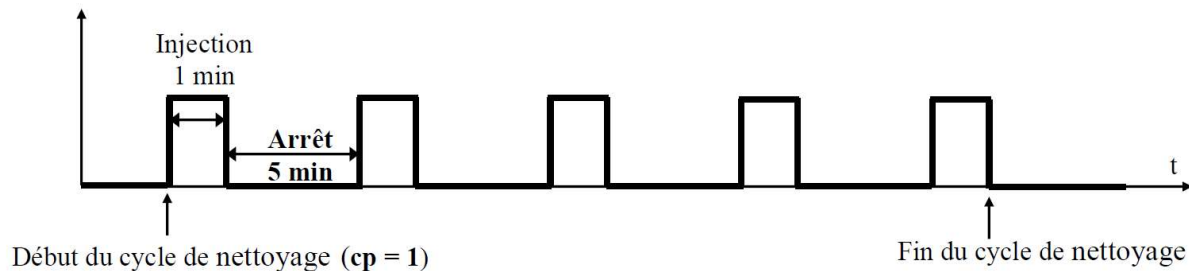
Le cycle de nettoyage se déclenche lorsque la perte de charge (chute de pression), détectée par un capteur de pression **cp**, dépasse un certain seuil



Le dispositif de nettoyage est géré par microcontrôleur (PIC 16F877). Le cycle de fonctionnement de ce dispositif est réalisé de la manière suivante :

Dès que le capteur « **cp** » détecte une perte de charge de **30 mbar** (**cp = 1**), on réalise **5** injections d'acide formique d'une minute chacune (**1 min**), avec un arrêt de **5** minutes entre deux injections successives.

Le chronogramme suivant illustre les étapes du cycle de nettoyage :



L'équipement électrique du nettoyeur est connecté au microcontrôleur comme suit :

Capteur de pression cp	→ RC1
Pompe P	→ RC2
Électrovanne EV	→ RC3

Q.40) Quelle est la durée totale T_n d'un cycle de nettoyage (en **min**) ?

1 pt

Q.41) Compléter l'organigramme de ce cycle (sont déclarés : une variable **N** de comptage ainsi que deux sous-programmes **T_1min** et **T_5min** qui réalisent respectivement des temporisations de **1 min** et de **5 min**) ;

2 pts

Q.42) Compléter le programme assembleur correspondant (le jeu d'instructions du microcontrôleur est fourni en **DRES 02**).

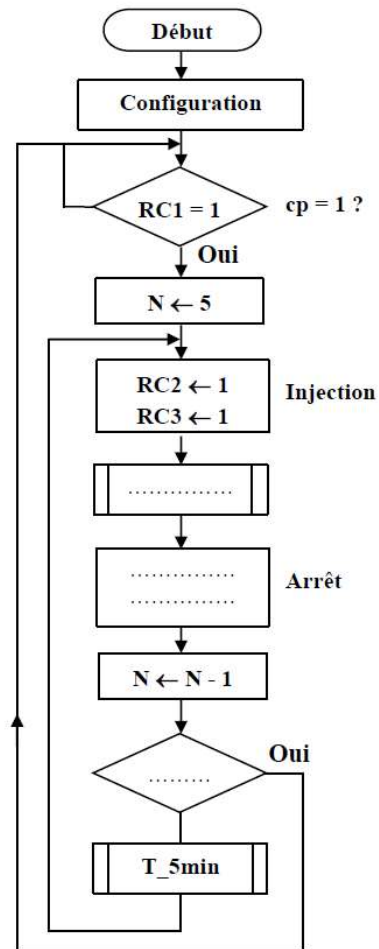
3 pts

Les deux sous-programmes de **T_1min** et **T_5min** font appel à une routine qui se répète plusieurs fois pour réaliser la temporisation désirée. Le code assembleur de la routine est le suivant :

<u>Routine de temporisation</u>		
	MOVLW	d'233'
	MOVWF	N1
b4	DECFSZ	N1, f
	GOTO	b4

N1 est une variable de comptage

Q.41)



Q.42)

b1	.....		
	GOTO	b1	Tester si RC1 = 1
	.....		N ← 5
			
b2	BSF	PORTC, 2	
	BSF	PORTC, 3	Injection
	CALL	T_1min	Temporisation de 1 min
	BCF	PORTC, 2	
	BCF	PORTC, 3	Arrêt de l'injection
	DECFSZ	N, f	Décrémenter N et tester si N = 0
	GOTO	b3	Si non, se brancher à "b3"
	.....		Si oui, fin de cycle
b3	.....		
			

Exercice 4 : examen national 2024, session normale**Tâche 6 : Calcul de la vitesse de consigne et détermination du sens de déplacement**

Pour calculer la vitesse de consigne et déterminer le sens de déplacement du crochet (montée ou descente), le PIC agit selon l'algorithme suivant :

- Acquérir la position α du manche de la manette de commande par un sous-programme appelé 'Acquisition' qui convertit le signal U_s image de α en un nombre N sur 9 bits, stocké dans les cases mémoires appelées N_H (N_H0 bit de poids fort de N) et N_L (8 bits de poids faible de N) ;
- Déterminer à partir de N_H0 (bit 0 de N_H) et de N_L :
 - Le code de la vitesse consigne N_C (sur 8 bits) : $N_C = N_L$ si $\alpha > 0$ et $N_C = \bar{N}_L$ si $\alpha < 0$;
 - Le sens de déplacement du crochet (montée ou descente) en positionnant les bits RA1 et RA2.
- Mettre N_C à 0 si $N_C < N_{Cm}$ (N_{Cm} : code de la vitesse de déplacement minimal du crochet) ;
- Transférer le code N_C au convertisseur numérique analogique via le **PORTB**, pour restituer le signal U_c de commande du variateur de vitesse du moteur **M1**.

Exemple :

	N_H	N_L	
$\alpha_{\max} = +25^\circ$ ($\alpha > 0$)	0000 0001	1111 1111	Vitesse maximale de montée : $N_C = N_L = 255$ Bit 0 de $N_H = 1$: ordre de monter le crochet.
$\alpha_{\min} = -25^\circ$ ($\alpha < 0$)	0000 0000	0000 0000	Vitesse maximale de descente : $N_C = \bar{N}_L = 255$ Bit 0 de $N_H = 0$: ordre de descendre le crochet.

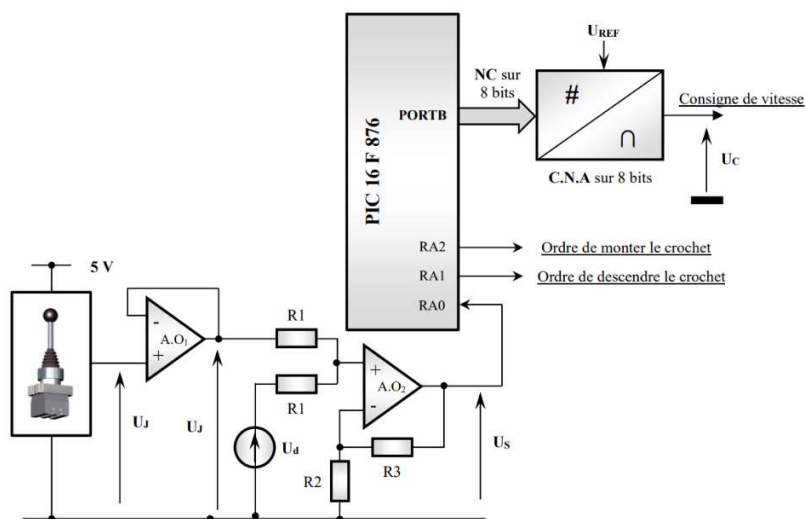
En vous aidant de l'algorithme ci-dessus et du jeu d'instructions fourni en **DRES 04**, compléter :

Q.48- L'organigramme correspondant.

3 pts

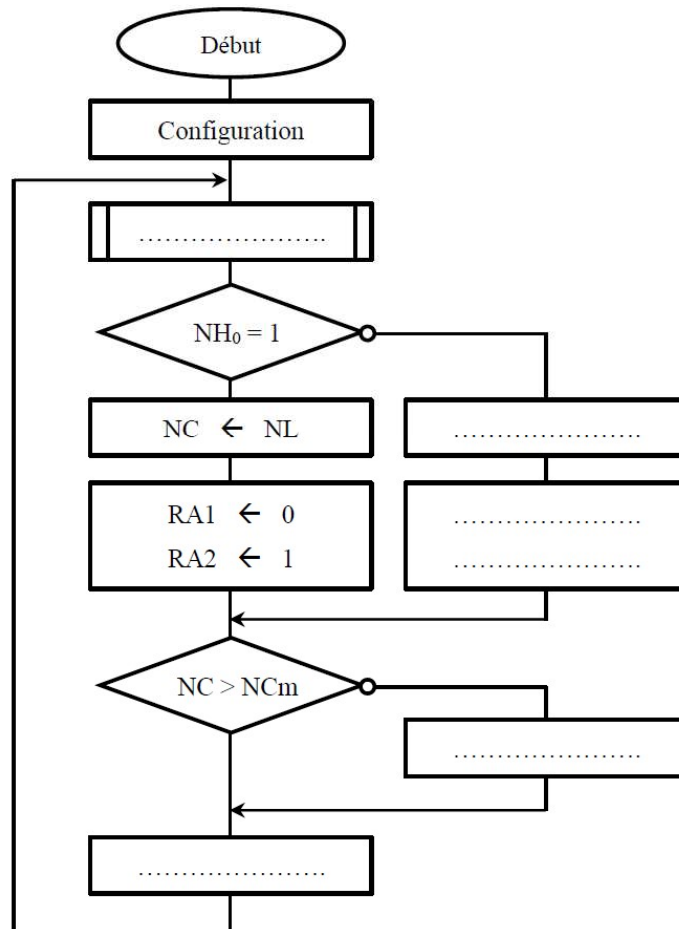
Q.49- Le programme de configuration du microcontrôleur **PIC 16F876**. (Mettre les bits non utilisés du registre **TRISA** à 0).

3 pts



Q.48-

[3 pts]



Q.49-

[3 pts]

```

..... ;
..... ; Accès à la BANK 1
..... ;
..... ; RA0 entrée, RA1 et RA2 des sorties
..... ; PORTB en sortie
MOVLW    0x8E ;
MOVWF    ADCON1 ; Configuration du CAN interne
BCF      STATUS, 6 ;
..... ; Accès à la BANK 0
MOVLW    0x81 ;
MOVWF    ADCON0 ; Configuration du CAN interne
  
```


Exercice 5 : examen national 2024, session de rattrapage

Tâche 5 : Programme assembleur

À partir :

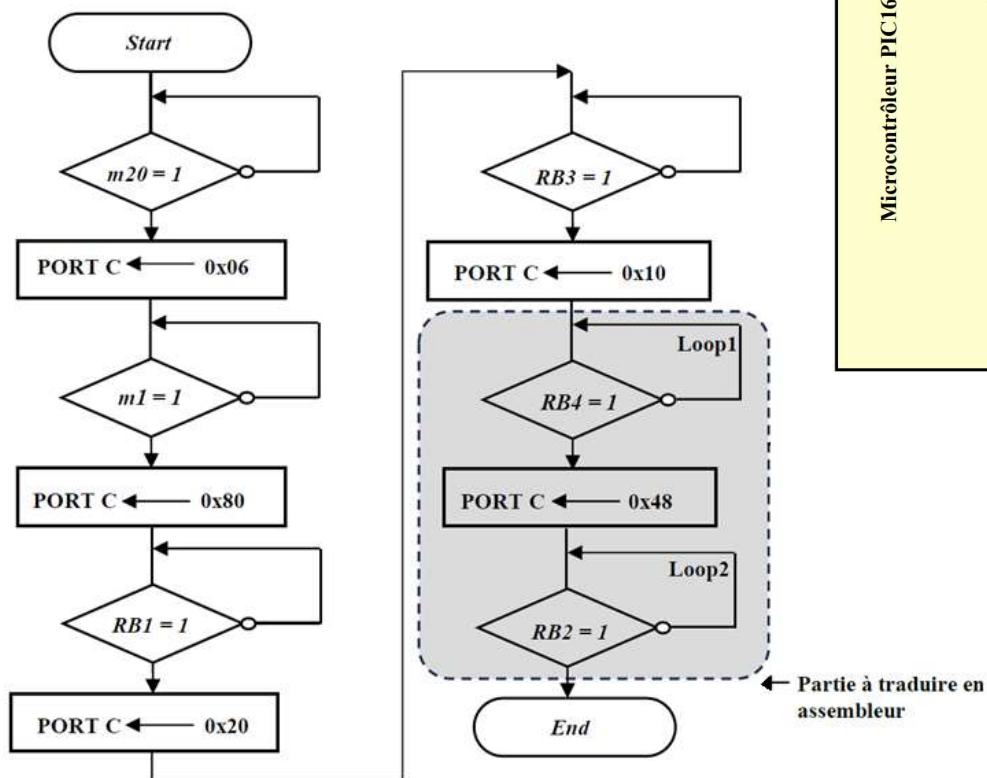
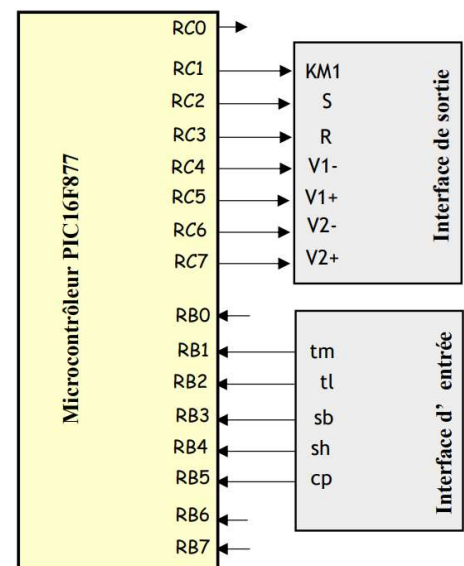
- Du schéma de câblage des entrées-sorties du **DRES 03** ;
- De l'extrait de la documentation technique du microcontrôleur donné en **DRES 04**,

Q47. Compléter les parties du programme assembleur permettant de :

6,5 pts

1. Configurer les ports **B** et **C** du microcontrôleur ;
2. Réaliser la partie encadrée de l'organigramme de l'expansion de la macro-étape **M20** donné ci-dessous.

Schéma de câblage des entrées-sorties



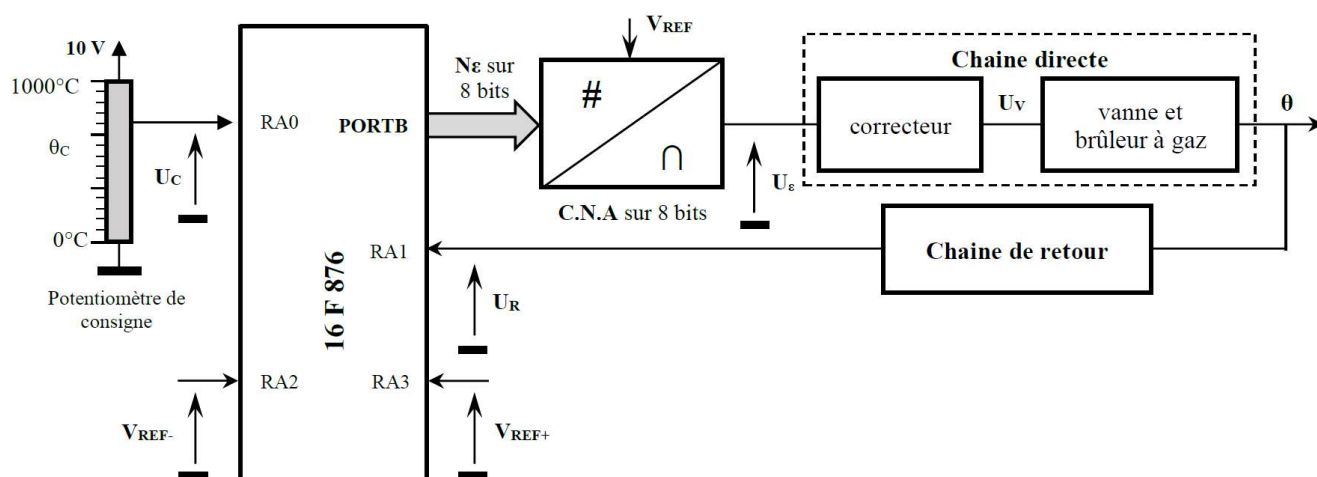
Q47. Programme Assembleur

Ligne	Label	Mnémonique	Opérande
Configuration des ports B et C			
1		BSF	STATUS, RP0
2		.....	.....
3		.....	.....
4		.....	.....
5		.....	.....
6		BCF	STATUS, RP0
Programme de la partie encadrée de l'organigramme			
7	Loop1	BTFSS	PORTB, RB4
8		.....	.....
9		.....	.....
10		.....	.....
11	Loop2	.....	.....
12		.....	.....

Exercice 6 : examen national 2025, session normale
Étude du comparateur

La comparaison entre la tension de consigne U_C et la tension de retour U_R est réalisée numériquement par le microcontrôleur **PIC 16F 876**.

Le microcontrôleur convertit les tensions analogiques U_C et U_R en valeurs numériques N_C et N_R grâce à son **C.A.N** interne et calcule leur différence N_ε puis l'envoie au port **B**, le **C.N.A** restitue alors le signal d'erreur U_ε .



Pour calculer l'écart, le PIC agit selon l'algorithme suivant :

- Acquérir la valeur de la température consigne θ_c par un sous-programme appelé '**Acquisition_consigne**' qui convertit le signal U_C image de θ_c en un nombre N_C sur 8 bits, stocké dans la case mémoire appelée **Val_NC** ;
- Acquérir la valeur de la température de l'atomiseur θ par un sous-programme appelé '**Acquisition_retour**' qui convertit le signal U_R image de θ en un nombre N_R sur 8 bits, stocké dans la case mémoire appelée **Val_NR** ;
- Déterminer la valeur de l'erreur N_ε à partir de l'écart entre N_C et N_R ;
- Transférer le code N_ε au convertisseur numérique analogique via le **PORTB**, qui restitue le signal d'erreur U_ε à fin d'élaborer la commande de la vanne.

Q.40- En vous aidant du jeu d'instructions fourni en **DRES 04**, compléter le programme correspondant à l'algorithme ci-dessus. (Mettre les **bits** non utilisés du registre **TRISA** à 0).

4,5 pts

Q.40-

```

..... ;
..... ; Accès à la BANK 1
..... ;
..... ; RA0, RA1, RA2 et RA3 des entrées
..... ; PORTB en sortie
MOVLW    0x0D      ;
MOVWF     ADCON1    ; Configuration du CAN interne
BCF       STATUS, 5 ; Accès à la BANK 0
MOVLW    0x81      ;
MOVWF     ADCON0    ; Configuration du CAN interne
LAB ..... ; Appel du sous-programme d'acquisition de  $\theta_C$ 
..... ; Appel du sous-programme d'acquisition de  $\theta$ 
..... ;  $W \leftarrow \theta$ 
SUBWF     Val_NC, W ;  $W \leftarrow \theta_C - \theta$ 
..... ;  $PORTB \leftarrow \theta_C - \theta$ 
GOTO      LAB      ;

```

Exercice 7 : examen national 2026, session normale

DÉTERMINATION DE LA POSITION DE LA POCHE

La position de la poche est calculée par le μC . Le signal **EncA** est utilisé pour déclencher une interruption à chaque front descendant sur **RB0/INT**. La routine d'interruption consiste alors, à incrémenter ou à décrémenter le contenu de la case mémoire représentant la position, suivant l'état de la ligne **EncB (RB1)**.

En tenant compte des considérations suivantes :

- On appelle **Pos_poche** case mémoire sur 8 bits contenant la position actuelle de la poche ;
- L'incrémentaion aura lieu si **EncB (RB1)** est au niveau **haut**.

Q44) Compléter le *sous-programme d'interruption*.

2 pts

Tâche 4 : Programme de commande du basculement de la poche

On dispose des sous programmes suivants :

- **Acquisition_J2** : Sous-programme qui convertit le signal U_c image la position α du manche de la manette en un nombre N sur **10 bits**, stocké dans les registres internes (**ADRESH : ADRESL**) du module C.A.N (Convertisseur Analogique Numérique) intégré au **PIC16F876**.

- **Calcul_Npas** : Sous-programme qui convertit la valeur numérique N résultat du convertisseur CAN en un nombre N' image de la consigne position β_c . Ce nombre est stocké dans la case mémoire appelée **Pos_consigne**.

Le programme de commande de la coulée agit selon l'**algorithme** suivant :

- Acquisition de la position α du manche de la manette par le sous-programme **Acquisition_J2** ;
- Calcul du nombre de pas pour atteindre la consigne position β_c de la poche par le sous-programme **Calcul_Npas** ;
- Si la position de la poche (**Pos_poche**) est égale au nombre de pas calculé (**Pos_consigne**) alors arrêt de la poche.
- Si la position de la poche (**Pos_poche**) est inférieure au nombre de pas calculé (**Pos_consigne**) alors basculer la poche en avant.
- Si la position de la poche (**Pos_poche**) est supérieure au nombre de pas calculé (**Pos_consigne**) alors basculer la poche en arrière ;

Q45) En vous aidant de l'**algorithme** du programme de commande du basculement de la poche, compléter l'organigramme correspondant (voir document ressources **DRES 04**).

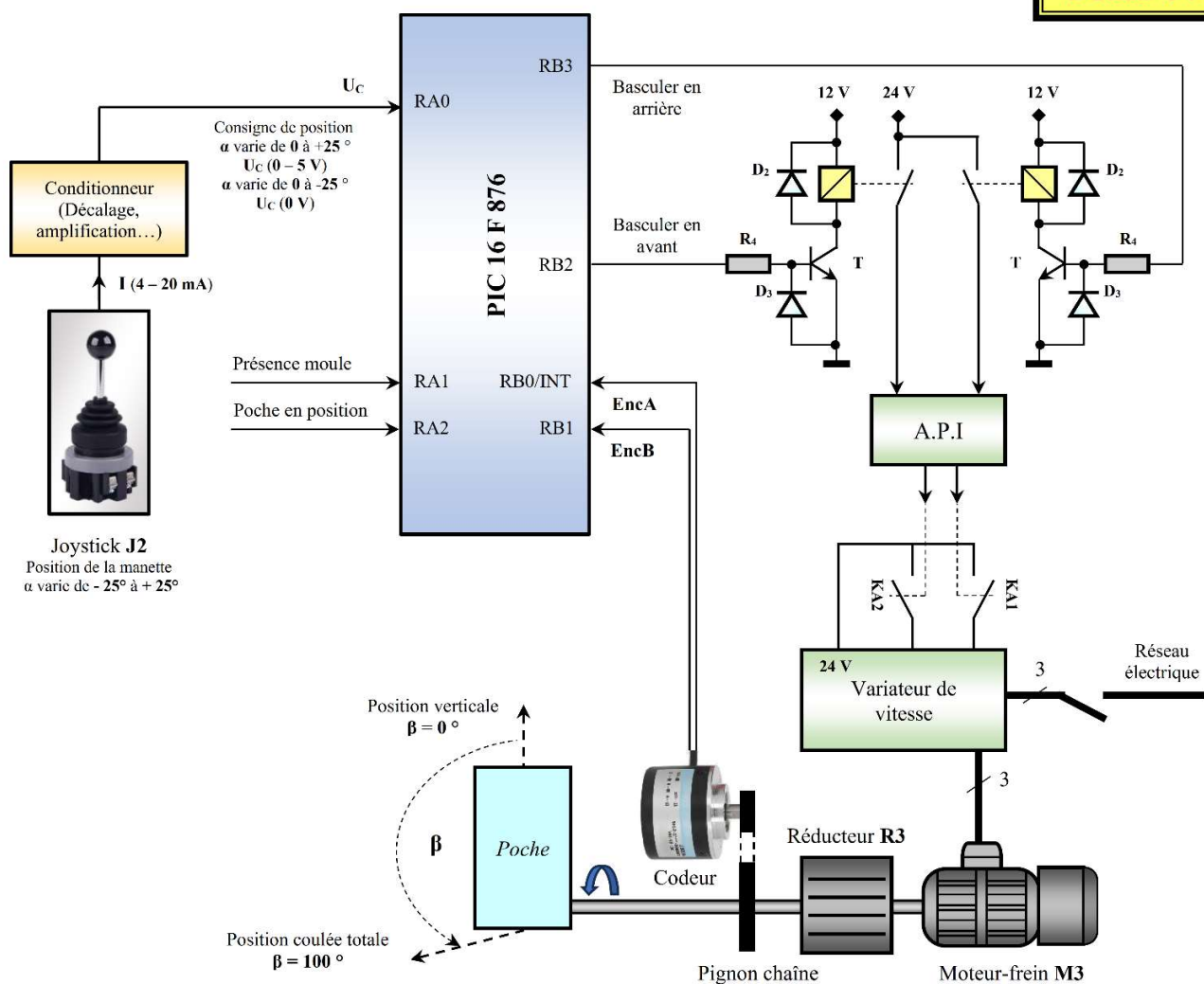
2,5 pts

Q46) En vous aidant du jeu d'instructions fourni en document ressources **DRES 05**, compléter le programme de configuration du microcontrôleur correspondant au circuit de commande du basculement de la poche (voir document ressources **DRES 04**).

3 pts

N.B : Les bits non utilisés des registres **TRISA** et **TRISB** doivent être mis à 0.

Circuit de commande du basculement de la poche de coulée

DRES 04

2 pts

Q44) Sous-programme d'interruption :

Interruption

BTFSS

PORTB, 1

; RB1 = 1 ?

.....

; Décrémenter position

.....

; RB₁ = 0 ?

.....

; Incrémenter position

BCF

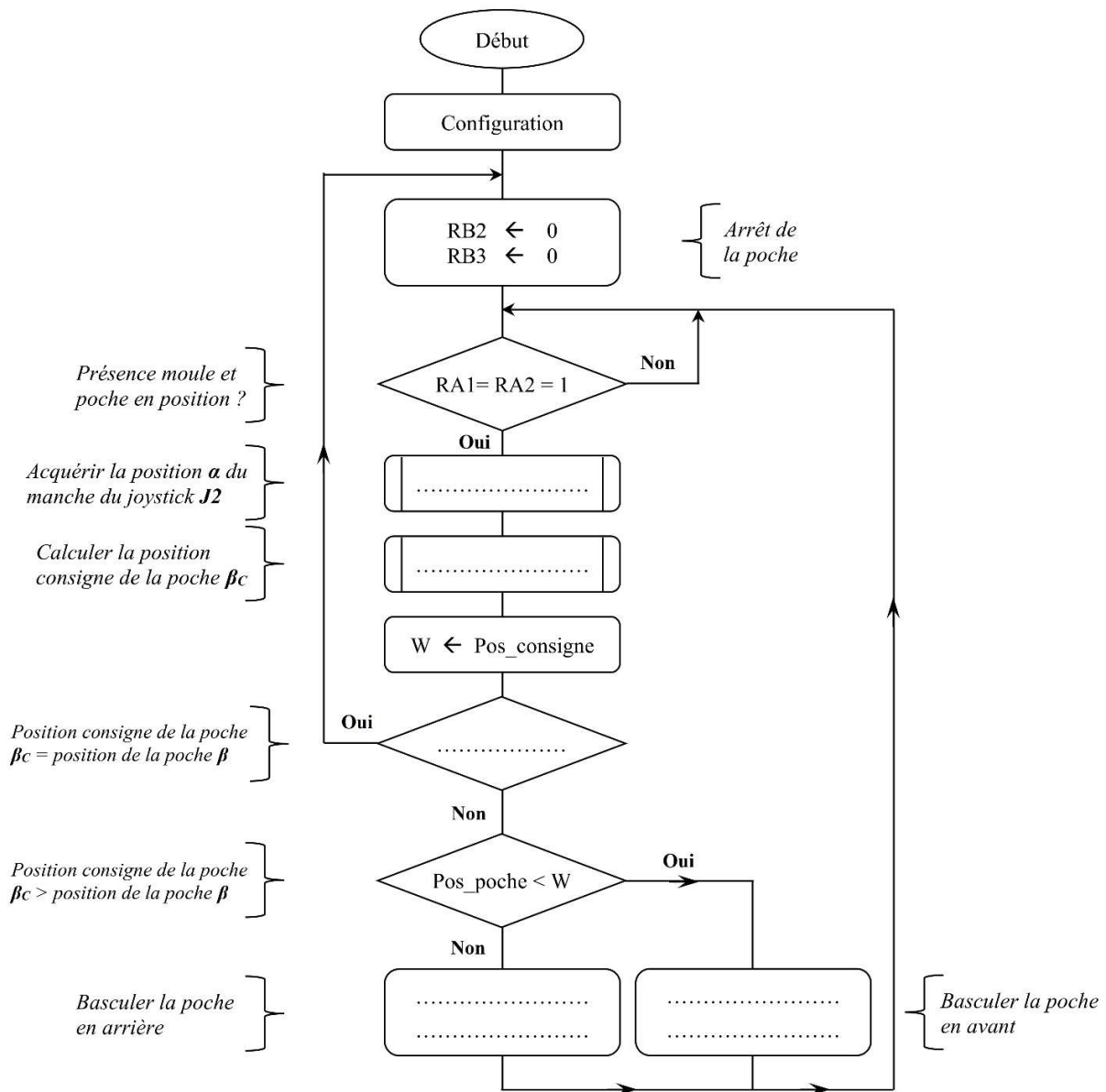
INTCON, 1

; Drapeau d'interruption INTF à 0

.....

; Retour d'interruption

2.5 pts

Q45) Organigramme :

3 pts

Q46) Programme de *configuration* .

```

..... ;
..... ; Accès à la BANK 1
..... ;
..... ; RA0, RA1 et RA2 des entrées
..... ;
..... ; RB0, RB1 entrées-RB2, RB3 sorties

MOVLW    0x90      ;
MOVWF    INTCON    ; Validation de l'interruption INT
CLRF     OPTION    ; INT reconnaît un front descendant
MOVLW    0x0E      ;
MOVWF    ADCON1    ; Configuration du CAN interne
BCF      STATUS, 5 ; Accès à la BANK 0
MOVLW    0x81      ;
MOVWF    ADCON0    ; Configuration du CAN interne

```

N.B : Les bits non utilisés des registres **TRISA** et **TRISB** doivent être mis à **0**.

Exercice 8 : examen national 2026, session de rattrapage

Tâche 3 : Étude du convertisseur analogique-numérique interne au microcontrôleur

Pour traiter numériquement le signal issu du détecteur de bagage converti et filtré, on utilise le convertisseur analogique-numérique (**CAN de 10 bits**) intégré au microcontrôleur.

On rappelle que :

- Le pas de quantification (quantum) est : $Q = \frac{V_{REF+} - V_{REF-}}{1023}$;
- La tension analogique à convertir est : V_a , appliquée à l'entrée **RA0** ;
- La valeur numérique obtenue est : $N = \text{partie entière de } \left(\frac{V_a - V_{REF-}}{Q} \right)$;
- Les tensions de référence internes sont : $V_{REF+} = 5 \text{ V}$ et $V_{REF-} = 0 \text{ V}$.

Q39) Déterminer la résolution analogique Q du CAN en mV.

1 pt

En se référant au **Document ressources N°4**, et sachant qu'on opte la configuration suivante pour le CAN :

Entrées analogiques	Résultat	Vitesse de conversion	CAN activé
Canal 0 à canal 7	Justification à droite	Fosc/32	OUI

N.B : Les bits non utilisés des registres **ADCON0** et **ADCON1** doivent être mis à zéro.

Q40) Compléter les **valeurs binaires et hexadécimales** des deux registres **ADCON0** et **ADCON1**. **2 pts**

Q41) Compléter le tableau par les valeurs **N** en décimal correspondant aux tensions **V_a** d'entrée, sachant que

V_{amax} est la tension maximale (pleine échelle) qu'on peut convertir par ce **C.A.N** (Prendre $Q = \frac{5}{1023}$). **2,5 pts**

Document ressources N° 4

Module CAN intégré au PIC 16F877

Le contrôle du module CAN du **PIC 16F877**, se fait par les deux registres **ADCON0** et **ADCON1**.

Configuration du registre **ADCON0**

ADCON0

ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	-	ADON
-------	-------	------	------	------	---------	---	------

ADCS1 - ADCS0 : choix de l'horloge de conversion donc du temps de conversion :

00 : Fosc/2
01 : Fosc/8
10 : Fosc/32
11 : Oscillateur RC dédié au CAN (fonctionne seulement pour FOSC < 1MHz)

CHS2 - CHS1 - CHS0 : choix de l'entrée analogique

000 : canal 0 (**RA0**)
001 : canal 1 (**RA1**)
010 : canal 2 (**RA2**)
011 : canal 3 (**RA3**)
100 : canal 4 (**RA5**)
101 : canal 5 (**RE0**)
110 : canal 6 (**RE1**)
111 : canal 7 (**RE2**)

GO/DONE : Une conversion démarre quand on place ce bit à 1. A la fin de la conversion, il est remis automatiquement à zéro. Ce bit peut aussi être positionné automatiquement par le module CCP2.

ADON : Ce bit permet de mettre le module CAN en service

Configuration du registre **ADCON1**

ADCON1

ADFM	-	-	-	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
------	---	---	---	-------	-------	-------	-------

ADFM : justification à droite ou à gauche du résultat dans les registres **ADRESH** et **ADRESL**.

	ADRESH	ADRESL
ADFM = 1 → résultat justifié à droite	0 0 0 0 0 0 XX	XXXXXXXX
ADFM = 0 → résultat justifié à gauche	XXXXXXXX	XX 0 0 0 0 0 0

PCFG3 à **PCFG0** : les 5 broches du PORT A et les 3 broches du PORT E peuvent être configurées soit en E/S digitales, soit en entrées analogiques. **RA2** et **RA3** peuvent aussi être configurées en entrée de référence.

PCFG3 à PCFG0	RE2	RE1	RE0	RA5	RA3	RA2	RA1	RA0	VREF+	VREF-
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	RA3	VSS
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	VDD	VSS
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	RA3	RA2

1 pt

Q39) Résolution analogique Q du **CAN** en **mV**.

2 pts

Q40) Valeurs binaires des deux registres **ADCON0** et **ADCON1**.

ADCON0	ADCS10	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON
								
ADCON0 (en Hexadécimal) =								

ADCON1	ADFM	—	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
								
ADCON1 (en Hexadécimal) =								

2.5 pt

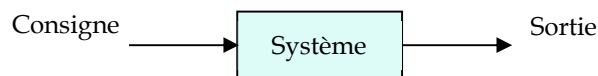
Q41) Tableau des valeurs N en décimal correspondant aux tensions V_a d'entrée et tension V_{max} .

V_a (en V)	1,25	2,5	3	V_{max} =
N (en décimal)	.....	.....	.....	.....

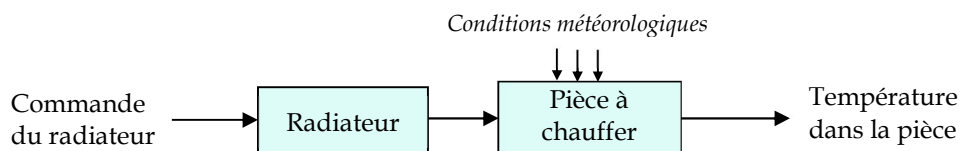
8

SYSTEMES ASSERVIS**Généralités****1. Commande en boucle ouverte**

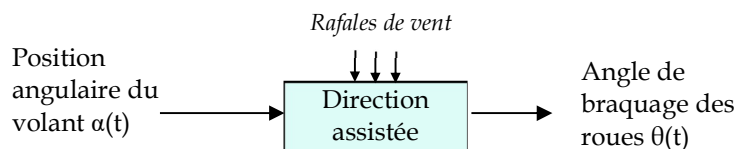
Un système est en boucle ouverte lorsque la commande est élaborée indépendamment de la sortie. Lorsqu'une perturbation intervient sur le système, la sortie s'écarte de la consigne (sortie souhaitée) : la précision de ce système est faible et il est moins fiable.

**Exemple 1 : commande de la température d'une salle**

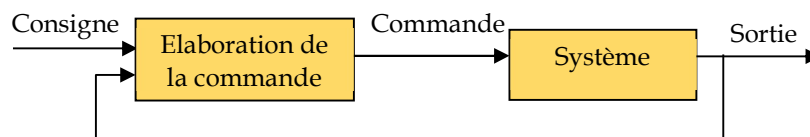
Suite à un changement de la température ambiante, la température atteinte dans la salle sera différente de la consigne.

**Exemple 2 : direction assistée d'un véhicule automobile**

Lors de rafales de vent, l'angle de braquage souhaité ne sera pas obtenu.

**2. Commande en boucle fermée**

En boucle fermée, la sortie est comparée en permanence à la consigne puis corrigée.



3. Système bouclé

Un système bouclé a donc un dispositif de retour permettant de compenser le manque de fidélité d'un système physique. Un système bouclé peut fonctionner en régulation ou en asservissement :

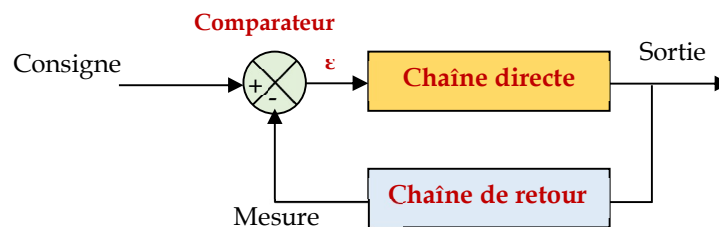
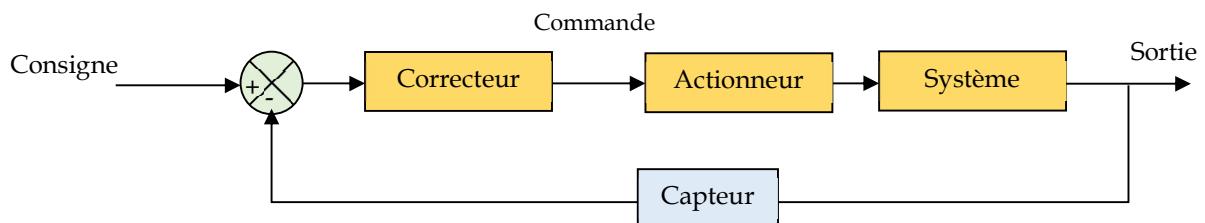
- On parle de régulation lorsque la **consigne est constante** et que le système doit maintenir une sortie constante, quelles que soient les perturbations.

Exemples : régulation de vitesse d'un véhicule, de température d'un local.

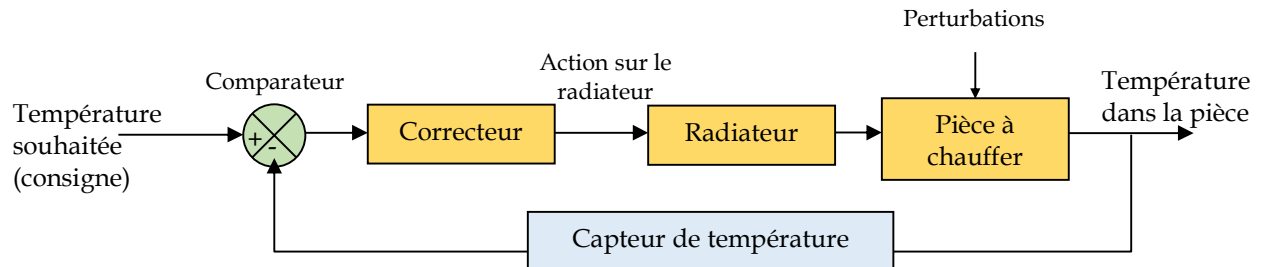
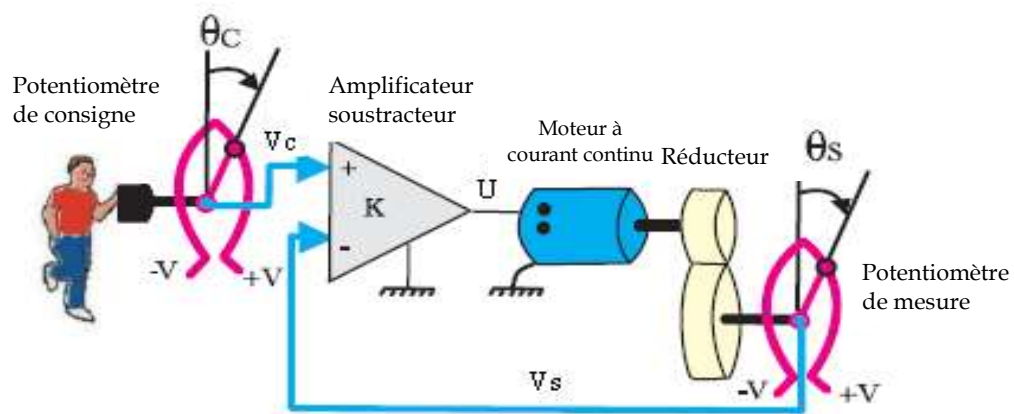
- On parle d'asservissement lorsque la **consigne varie** avec le temps. Le système doit ajuster en permanence la sortie au signal d'entrée.

Exemples : asservissement de position d'un radar de poursuite, suivi de trajectoire d'un missile.

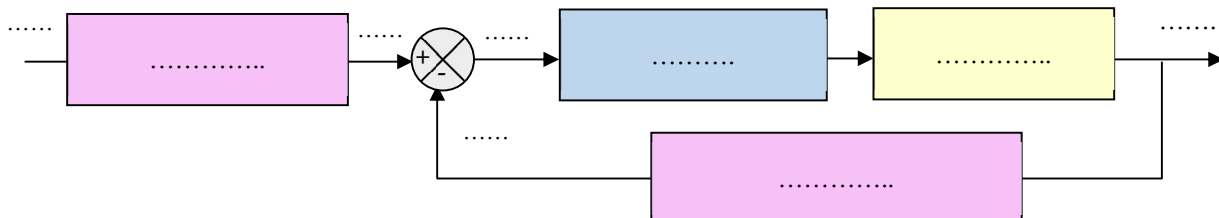
Le schéma bloc d'un système asservi est le suivant :



- Le **comparateur** calcule l'écart entre la consigne et la sortie ;
- À partir de l'écart ϵ constaté, le **correcteur** élabore un signal de commande ;
- L'**écart ϵ** (ou erreur) caractérise la qualité de l'asservissement. Le but de l'asservissement est d'annuler en permanence cet écart, de manière à ce que la sortie suive l'entrée.

Exemple : régulation de température d'une pièce**Exercice : représentation d'une régulation de position par un schéma bloc**

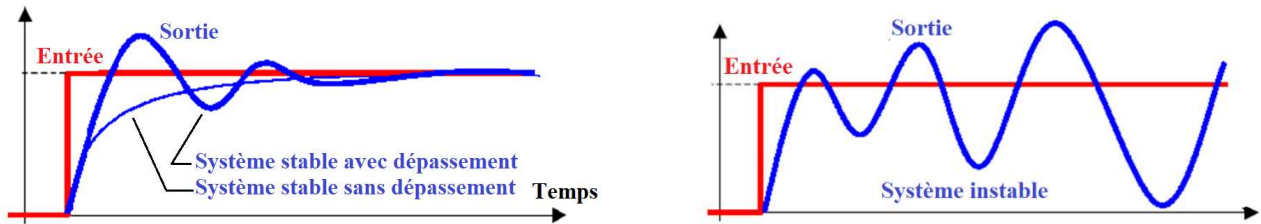
Compléter la représentation en blocs de cette régulation.



4. Performances d'un système asservi

Le cahier des charges d'un système asservi impose généralement un certain nombre de contraintes sur le comportement du système (pour le passage d'une position à une autre sur un radar par exemple). Ces contraintes portent sur : la *stabilité*, la *précision* et la *rapidité*.

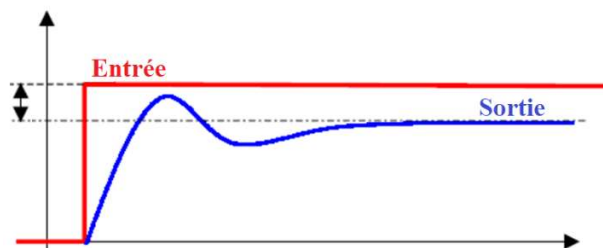
⇒ Stabilité



Un système est stable si pour une entrée constante $e(t)$, la sortie du système $s(t)$ tend vers une constante. Un système asservi instable se traduit par des variations importantes de la sortie qui peuvent causer la dégradation.

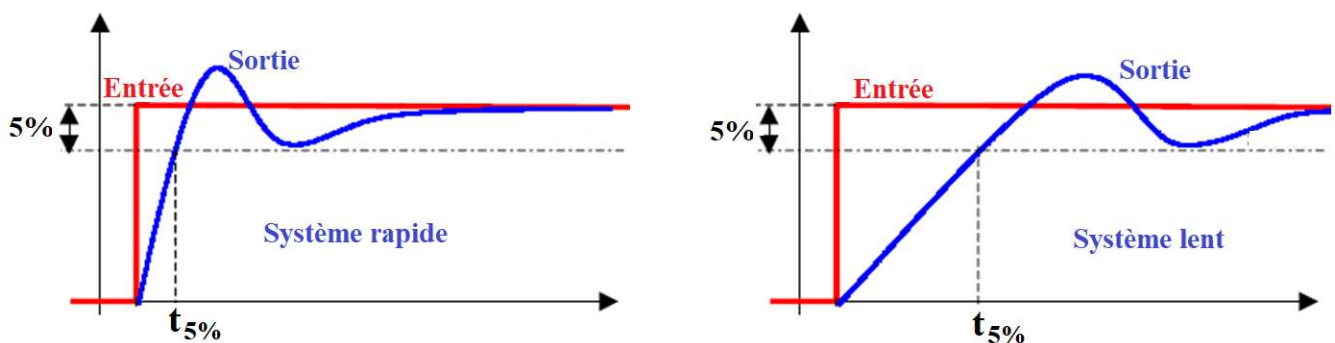
⇒ Précision

C'est la différence entre la sortie et l'entrée en régime permanent.



⇒ Rapidité

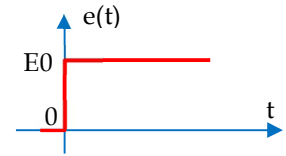
La rapidité se traduit par le temps mis par le système pour que la sortie atteigne la valeur finale. On définit, pour caractériser la rapidité, le temps de réponse à 5%.



Systèmes linéaires

- La mise en équations d'un système $s(t) = f(e)$ aboutit souvent à une équation différentielle du premier ordre ou du deuxième ordre ;
- Analyser les performances d'un système c'est étudier son comportement vis-à-vis des signaux d'entrée particuliers. Une entrée typique est l'échelon, la réponse de $s(t)$ à un échelon s'appelle une réponse indicielle.

Entrée échelon



1. Système du premier ordre

Un système physique d'entrée $e(t)$ et de sortie $s(t)$ est du premier ordre s'il est régi par une équation différentielle du premier ordre du type :

$$\tau \cdot \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = K \cdot e(t)$$

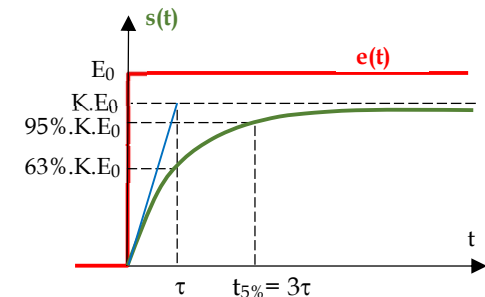
k : gain statique du système

τ : constante de temps.

Réponse indicielle : l'entrée est un échelon d'amplitude E_0 pour $t > 0$

L'équation devient : $\tau \cdot \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = K \cdot E_0$

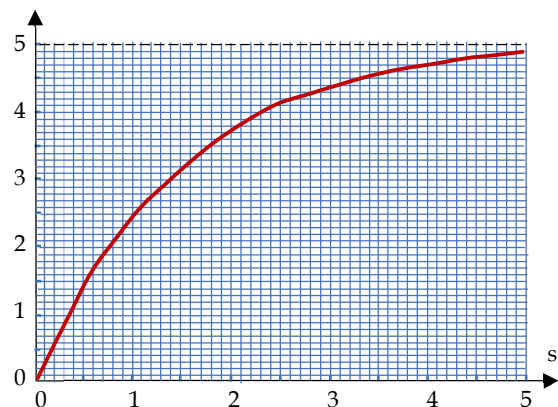
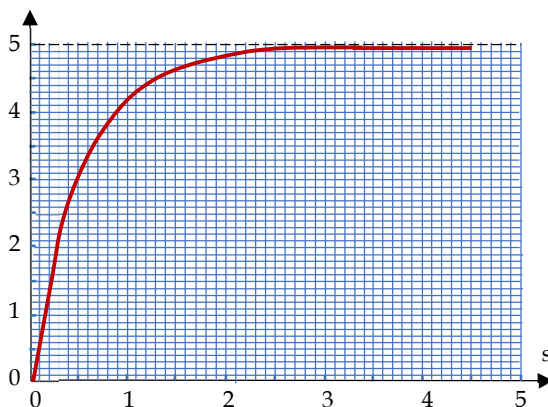
Ce qui donne : $s(t) = K \cdot E_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$



- Le comportement du système est non oscillant (stable), il tend vers la valeur $K \cdot E_0$ sans jamais la dépasser. La propriété de non dépassement est très recherchée dans certains asservissements où le dépassement est interdit ;
- Le temps de réponse à 5% est tel que $s(t) = 0,95 \cdot K \cdot E_0 \Rightarrow s(t) = K \cdot E_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 0,95 \cdot K \cdot E_0 \Rightarrow t(5\%) = 3\tau$;
- L'erreur statique est $\varepsilon = 1 - k$;
En effet, $\varepsilon = (e(t) - s(t))/e(t)$ en régime statique ; soit $\varepsilon = (E_0 - kE_0)/E_0 = 1 - k$ en % ;
- La tangente à l'origine coupe l'asymptote horizontale $y = K \cdot E_0$ à $t = \tau$. À $t = \tau$, $s(t) = 0,63 \cdot K \cdot E_0$.

Exercice

Déterminer le temps de réponse à 5% et la constante de temps de ces systèmes du premier ordre.



2. Système du deuxième ordre

Un système physique d'entrée $e(t)$ et de sortie $s(t)$ est du deuxième ordre s'il est régi par une équation différentielle du deuxième ordre du type :

$$\frac{1}{\omega_n^2} \cdot \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + \frac{2z}{\omega_n} \cdot \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = K \cdot e(t)$$

K : gain statique

ω_n : pulsation propre

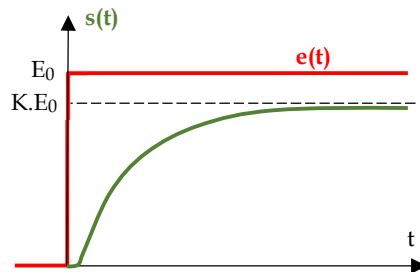
z : facteur d'amortissement

Réponse indicielle : l'entrée est un échelon d'amplitude E pour $t > 0$

Il existe 3 cas selon le facteur d'amortissement :

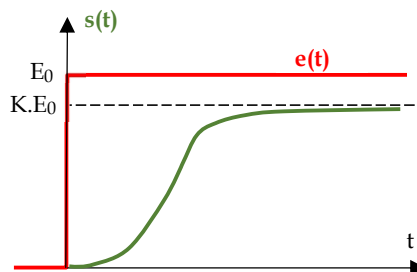
1^{er} cas : $z > 1$, régime apériodique amorti

Le comportement du système est non oscillant, il tend vers la valeur $K.E_0$ sans jamais la dépasser.



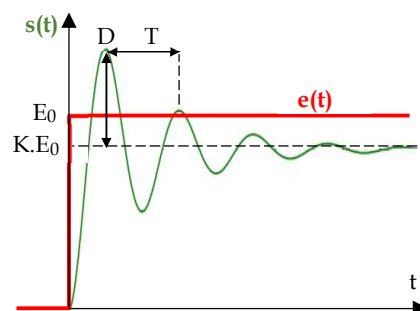
2^e cas : $z = 1$, régime apériodique critique

La réponse est non oscillante, c'est le régime apériodique le plus rapide.



3^e cas : $z < 1$, régime oscillatoire

La réponse présente la forme d'une sinusoïde amortie.



D : dépassement

T : pseudo-période

Asservissement en vitesse d'un moteur à CC

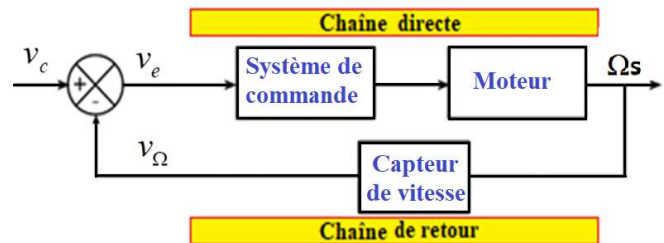
Le système est décrit par le schéma bloc ci-contre :

Supposons qu'une perturbation provoque une diminution de la vitesse de sortie Ω_s (la consigne v_c étant constante).

La chaîne de retour fait alors apparaître une diminution de la grandeur de retour v_Ω .

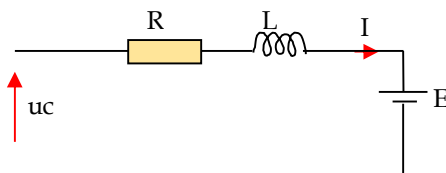
La grandeur d'entrée v_e va donc augmenter et la vitesse Ω_s également. Elle va augmenter jusqu'à ce que la tension $\varepsilon = v_e = v_c - v_\Omega$ s'annule.

Remarquons que ce résultat est obtenu sans qu'il soit nécessaire de connaître l'origine de la perturbation.



⇒ Mise en équation du moteur et sa charge

La mise en équation du système "moteur+charge" est réalisable à partir du modèle électrique de la machine à courant continu et de la relation fondamentale de la dynamique.



R, L : résistance et inductance de l'induit
 E : force contre électromotrice

On a $U_c = E + RI + L \frac{dI}{dt}$ avec $E = k' \Phi \Omega = k \Omega$ (à flux constant) $\Rightarrow U_c = RI + L \frac{dI}{dt} + k \Omega$ (1)

Le principe fondamental de la dynamique s'écrit : $J \Omega' = C_u - C_r = C_{em} - C_f - C_r = C_{em} - C_r$ (si on néglige C_f , le couple des frottements secs)

Avec J : moment d'inertie des masses en mouvement

C_{em}, C_u et C_r : respectivement couple électromagnétique, couple utile et couple résistant

On aussi $C_{em} = kI$ et on suppose $C_r = f \Omega$ où f est le coefficient de frottement visqueux

Ce qui donne $J \Omega' = kI - f \Omega \Rightarrow I = \frac{J}{k} \cdot \Omega' + \frac{f}{k} \cdot \Omega$ (2)

⇒ Analyse temporelle

On néglige l'inductance L de l'induit

L'équation (1) devient $U_c = RI + k \Omega$ or (2) $I = \frac{J}{k} \cdot \Omega' + \frac{f}{k} \cdot \Omega \Rightarrow U_c = \frac{RJ}{k} \cdot \Omega' + \frac{Rf + k^2}{k} \cdot \Omega$

$$\Rightarrow \frac{RJ}{Rf + k^2} \cdot \Omega' + \Omega = \frac{k}{Rf + k^2} \cdot U_c$$

C'est une équation du 1^{er} ordre avec la constante de temps $\tau = \frac{RJ}{Rf + k^2}$ et le gain statique $K = \frac{k}{Rf + k^2}$.

La réponse indicielle (à un échelon) $U_c = E_0$ pour $t > 0$ est $\Omega(t) = K \cdot E_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ (voir plus haut).

Le système est stable et ne risque aucun dépassement. Le temps de réponse à 5% est 3τ .

On tient compte de l'inductance L de l'induit

En tenant compte des équations (1) et (2), il vient $U_c = R \left(\frac{1}{k} \cdot \Omega' + \frac{f}{k} \cdot \Omega \right) + L \left(\frac{1}{k} \cdot \Omega'' + \frac{f}{k} \cdot \Omega' \right) + k\Omega$

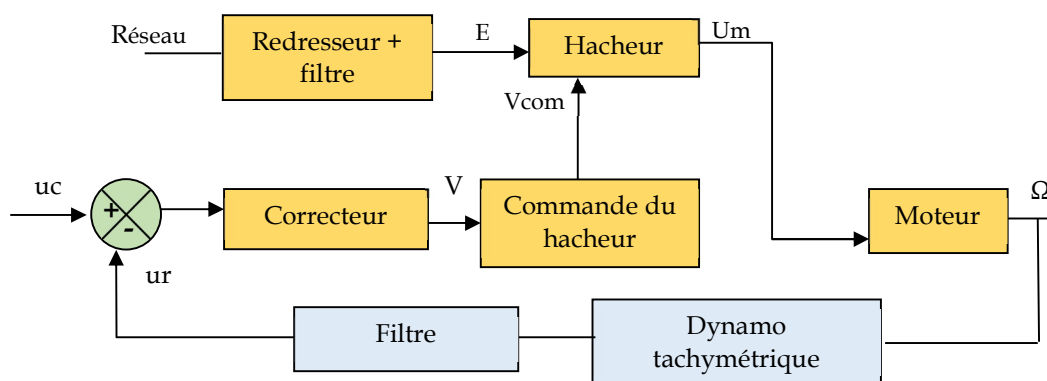
Ce qui donne $\frac{LJ}{Rf + k^2} \cdot \Omega'' + \frac{RJ + Lf}{Rf + k^2} \cdot \Omega' + \Omega = \frac{k}{Rf + k^2} \cdot U_c$

C'est une équation du 2^{ème} ordre.

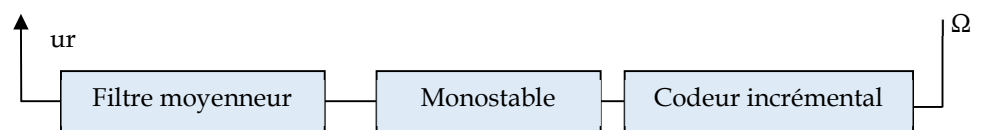
La pulsation propre, le facteur d'amortissement et le gain statique sont tels que (voir plus haut) :

$$\frac{1}{\omega_n^2} = \frac{LJ}{Rf + k^2} \quad , \quad \frac{2z}{\omega_n} = \frac{RJ + Lf}{Rf + k^2} \quad \text{et} \quad K = \frac{k}{Rf + k^2}$$

⇒ Montage d'asservissement

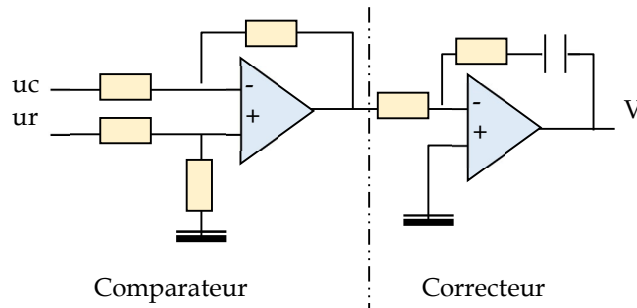


Autre structure de la chaîne de retour



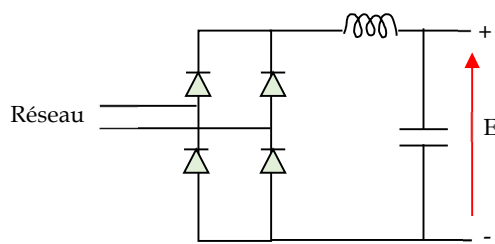
- La dynamo tachymétrique, capteur de vitesse, est en général très bruitée ; il va falloir filtrer sa sortie avec un passe-bas qui élimine une partie suffisante du bruit ;
- Pour qu'un asservissement soit correct, il faut d'abord qu'il assure la **stabilité** du système. Ceci étant, on recherche souvent à ce qu'en régime permanent, la sortie tende vers la consigne (**précision**). On peut aussi s'imposer un temps de réponse court (**rapidité**). Pour atteindre ces objectifs, on introduit un **correcteur** dans la chaîne directe.

L'ensemble "comparateur (soustracteur) + correcteur" peut avoir la structure suivante :

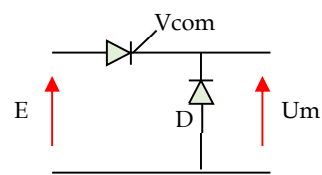


Alimentation du hacheur

Cette alimentation est réalisée au moyen d'un pont redresseur et d'un filtre :



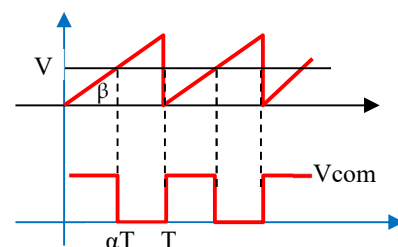
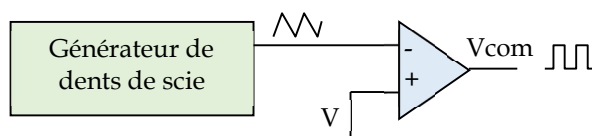
Hacheur



Le hacheur débite au moteur une tension $U_m = \alpha \cdot E$ où α est le rapport cyclique proportionnel à la tension de commande V .

D est une diode de roue libre.

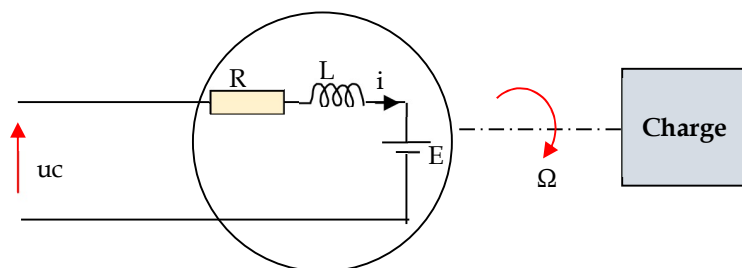
Pour obtenir un rapport cyclique α proportionnel à la tension V , on compare celle-ci à un signal en dents de scie. La sortie du comparateur est le signal V_{com} envoyée au thyristor.



On a $\text{tg} \beta = V / (\alpha \cdot T) \Rightarrow \alpha = V / (\text{tg} \beta \cdot T) = K \cdot V$
 (β et T étant des caractéristiques du générateur de dents de scie)

Exercice : Modélisation du moteur à CC par un schéma bloc

L'objectif est de représenter l'ensemble "moteur à courant continu + charge" par un schéma bloc en vue d'en étudier l'asservissement en vitesse. On négligera l'inductance L du bobinage de l'induit.



Relation	Schéma fonctionnel
<u>i en fonction de u_c et E</u>	
<u>E en fonction de Ω</u>	
<u>Ω en fonction de C_{em} et de C_r</u>	
<u>C_r en fonction de Ω</u> On admet que le couple résistant C_r est proportionnel à Ω . Soit, $C_r = f \cdot \Omega$ où f est le coefficient de frottement visqueux	
<u>C_{em} en fonction de i</u>	
<u>Schéma bloc</u>	

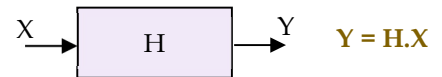
Schéma bloc (ou diagramme fonctionnel)

Un schéma fonctionnel est une représentation simplifiée d'un processus mettant en évidence les différentes fonctions mises en œuvre.

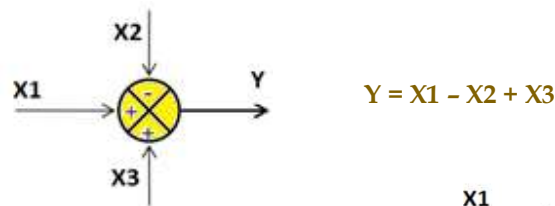
1. Formalisme

⇒ Bloc

Un bloc est caractérisé par sa fonction de transfert ou transmittance H



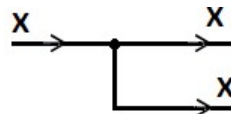
⇒ Sommateur



⇒ Comparateur



⇒ Point de prélèvement



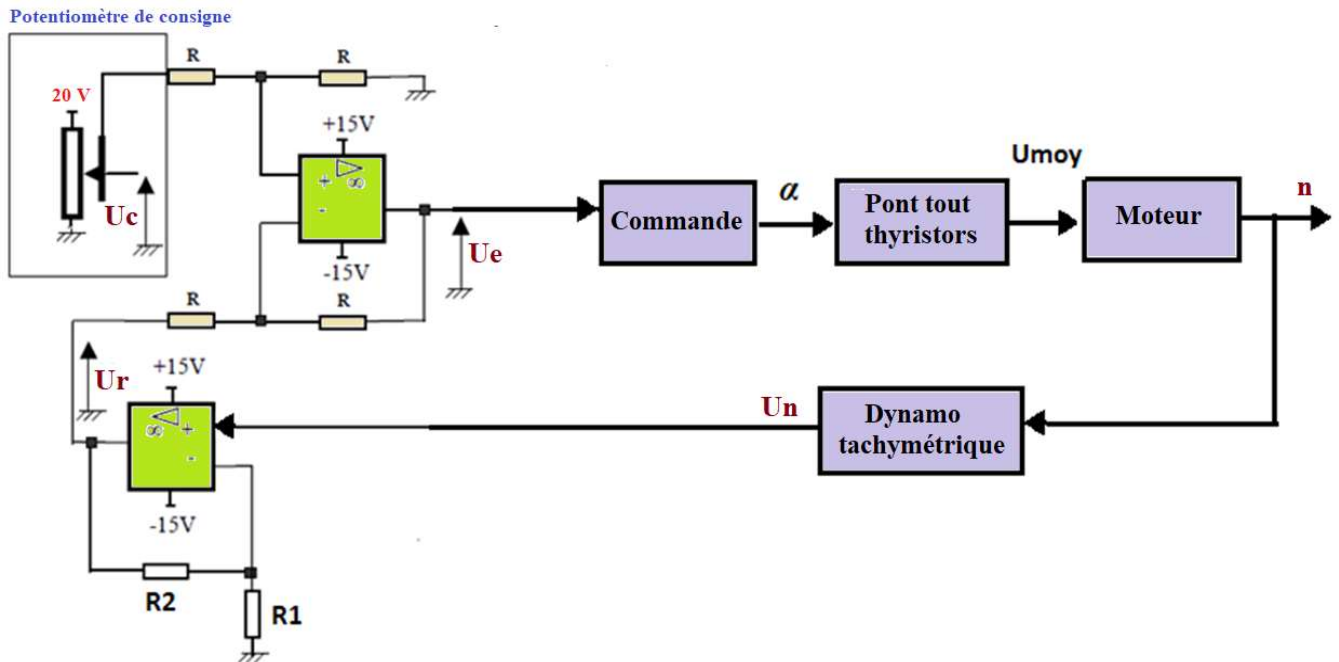
2. Simplification des schémas blocs

Blocs en cascade (en série)		
Blocs en parallèle		
Structure en boucle fermée		
Cas du retour unitaire		

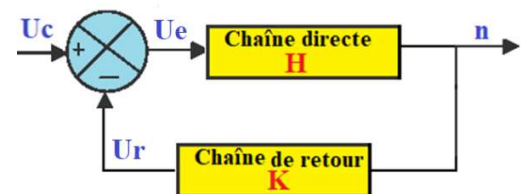
[illegible]

Exercice 2 : régulation de vitesse de rotation d'un moteur à CC

L'exercice propose d'étudier la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu, afin d'éviter des variations importantes de vitesse lors d'une perturbation. Le descriptif du système de régulation est le suivant :



La régulation par le système bouclé peut être schématisée comme suit :



La chaîne de retour est constituée par l'ensemble "dynamo tachymétrique-amplificateur"

La dynamo tachymétrique délivre une tension U_n proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur : $U_n = 5 \cdot 10^{-3} \cdot n$ (n en tr/min et U_n en V).

Comparateur

Les amplificateurs opérationnels sont supposés parfaits et fonctionnent en régime linéaire, montrer que $U_e = U_c - U_r$.

Chaîne de retour

- Montrer que $U_r = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_n$
- On donne $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, calculer R_2 pour que la transmittance de la chaîne de retour soit $K = 0,01 \text{ V/(tr/min)}$.

Régulation de vitesse

U_e est une tension de commande qui sert à régler l'angle de retard à l'amorçage des thyristors et donc à régler la tension moyenne U_{moy} à la sortie du pont. La relation liant la tension U_e à la tension moyenne est $U_{moy} = 100 \cdot U_e$.

On négligera la chute de tension dans l'induit du moteur ; la vitesse de rotation est alors pratiquement proportionnelle à U_{moy} ; soit $n = 50 \cdot U_{moy}$ (U_{moy} en V et n en tr/min).

- Calculer la transmittance H de la chaîne directe.
- La tension de consigne U_c étant maintenue constante, calculer U_e et U_r pour une vitesse de $n = 1\,000 \text{ tr/min}$. En déduire la tension de consigne U_c permettant le réglage de cette vitesse.
- Une perturbation tend à diminuer la vitesse du moteur. Donner le sens de variation des grandeurs U_r , U_e et n puis conclure sur l'intérêt du bouclage réalisé.

[illegible]

Exercice 3 : examen national 2018, session de rattrapage

SEV 3 : Asservissement de vitesse et traitement de l'information

Le réglage de la vitesse du moteur se fait en agissant sur le rapport cyclique de la tension du moteur $u_m(t)$.

En plus, la vitesse dépend de plusieurs paramètres tels que :

- ✓ La charge du chariot ;
- ✓ La pente et l'état du terrain.

On se propose d'asservir la vitesse du chariot à la vitesse choisie par l'utilisateur (consigne).

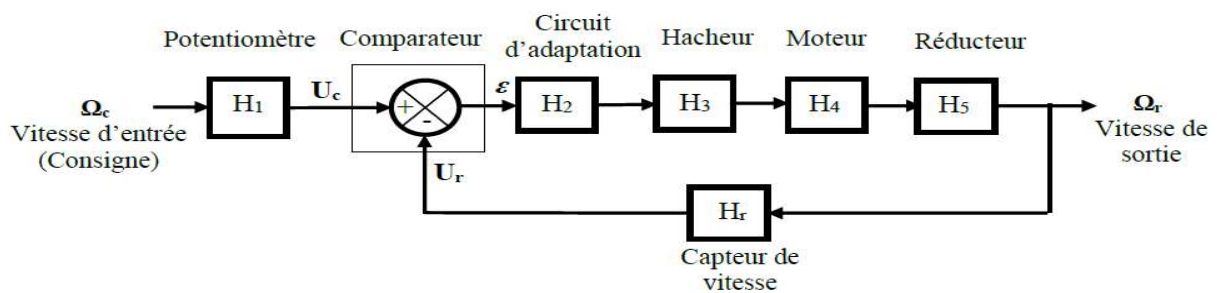
Le principe de cet asservissement consiste donc à :

- Mesurer la vitesse du chariot et délivrer une tension U_r image de la vitesse ;
- Comparer cette tension à la tension U_c image de la vitesse désirée ;
- Agir sur le moteur en fonction de l'écart entre U_c et U_r .

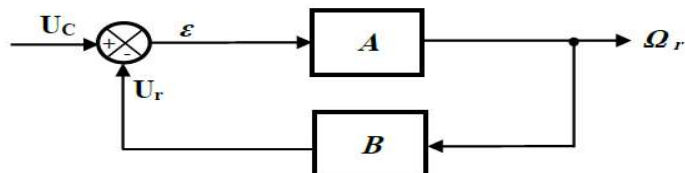
La comparaison des tensions et la commande du hacheur s'effectuent par le microcontrôleur.

Tâche 1 : Modélisation du système

Le modèle équivalent est représenté par le schéma bloc suivant :



Ce schéma-bloc peut être simplifié et remplacé par le schéma équivalent suivant :



Avec : $U_c = H_1 \cdot \Omega_c$

On note :

- A : la fonction de transfert de la chaîne directe ;
- B : la fonction de transfert de la chaîne de retour.

Q26) Exprimer A et B en fonction de H_2, H_3, H_4, H_5 et H_r .

1,5 pt

Q27) Donner en fonction de A et de B :

Q27-1) La fonction de transfert en boucle ouverte FTBO : $T_{BO} = U_r / \varepsilon$.

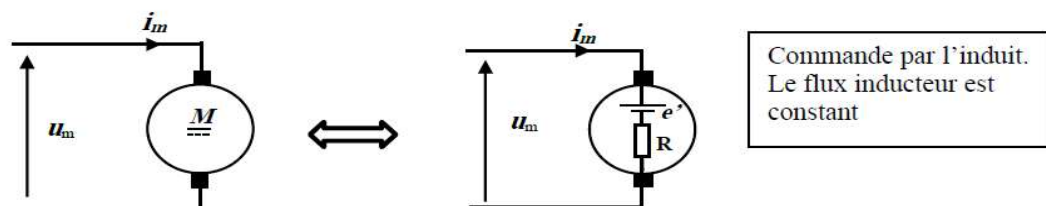
1,5 pt

Q27-2) Donner la fonction de transfert en boucle fermée FTBF : $T_{BF} = \Omega_r / U_c$.

2 pts

Tâche 2 : Modélisation du moteur

Le schéma équivalent du moteur à courant continu est le suivant :



Commande par l'induit.
Le flux inducteur est constant

$$\begin{aligned} \bullet \quad u_m &= R i_m + e' \\ \bullet \quad e' &= a \cdot \Omega_m \\ \bullet \quad C_m &= a \cdot i_m \end{aligned}$$

avec :

- u_m : tension aux bornes de l'induit du moteur (V).
- R : résistance de l'induit du moteur (Ω).
- e' : f.c.é.m du moteur (V).
- a : constante de la f.c.é.m (V.s/rad) ou constante de couple (N.m/A).
- Ω_m : vitesse angulaire du moteur (rad/s).
- C_m : couple moteur (N.m).

En appliquant la loi fondamentale de la dynamique au moteur, on obtient : $C_m - C_r - C_f = J \frac{d\Omega_m}{dt}$

avec J : le moment d'inertie de l'ensemble mobile en rotation.

On suppose que :

- ✓ Le moteur est à vide : couple résistant $C_r = 0$;
- ✓ Les frottements mécaniques C_f sont négligeables.

Q28) Montrer que la vitesse du moteur Ω_m est liée à la tension u_m par l'équation différentielle suivante :

$$\left(\frac{RJ}{a^2}\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + \Omega_m = \frac{u_m}{a}$$

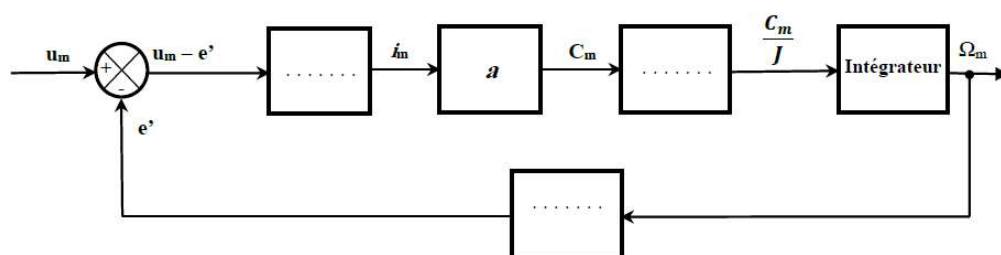
2 pts

Q29) S'agit-il d'un système de premier ou de deuxième ordre ?

0,5 pt

Q30) Sur le document **DREP 06**, compléter alors le schéma-bloc du moteur.

1,5 pt



Exercice 4 : examen national 2023, session de rattrapage

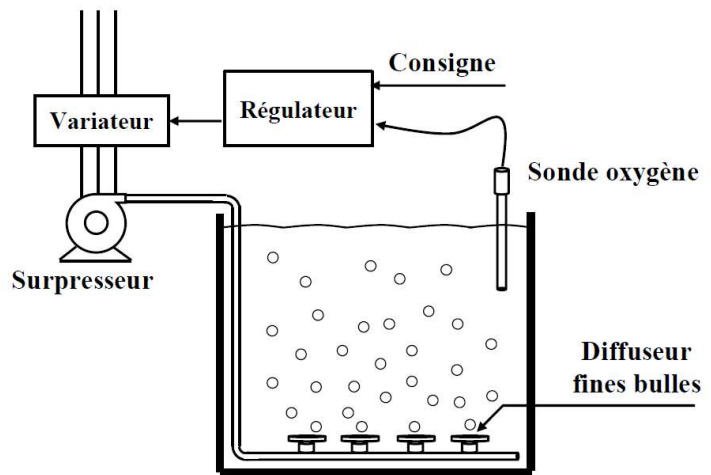
Pour réaliser un traitement biologique efficace, il est nécessaire de réguler le taux d'oxygène dissous dans le bassin d'aération et donc de contrôler la vitesse du surpresseur selon le besoin en oxygène.

Tâche 1 : régulation du taux d'oxygène dissous (OD) dans le bassin d'aération

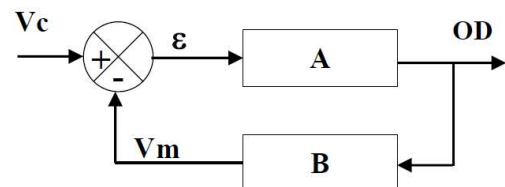
La figure ci-contre fournit le schéma de la boucle de régulation du taux d'oxygène dissous (OD).

⇒ Boucle de régulation

Le régulateur compare la valeur mesurée par la sonde oxygène à la consigne et élabore le signal de commande envoyé au variateur de vitesse. La modification de vitesse du surpresseur se traduit par celle du débit d'air soufflé dans le bassin et donc du taux d'oxygène OD

**Boucle de régulation de l'oxygène dissous**

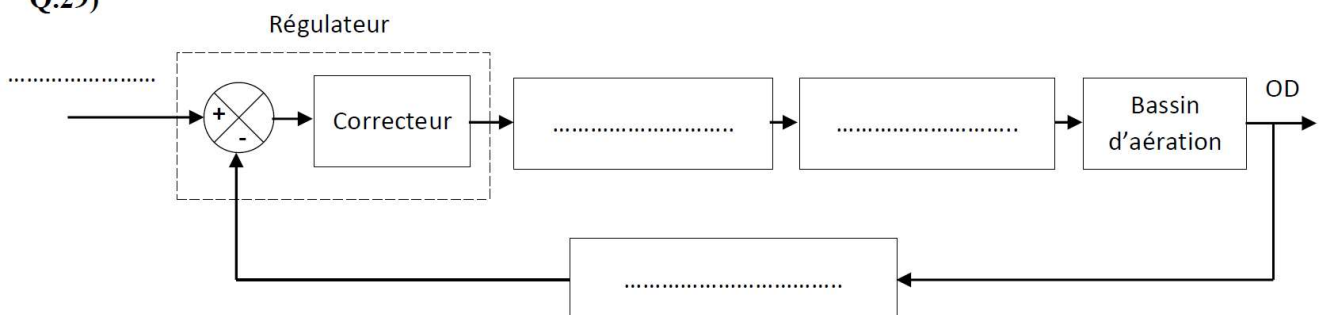
Le schéma fonctionnel de cette boucle de régulation peut être modélisé comme le montre la figure ci-contre.



Q.29) À partir du schéma de la boucle de régulation ci-dessus, compléter le schéma-bloc fonctionnel de cette régulation (utiliser les propositions : surpresseur, sonde oxygène, variateur, consigne) **2 pts**

Q.30) Parmi les propositions données, lesquelles sont correctes ? **1,5 pt**

Q.29)



Q.30) Cocher les cases appropriées

Proposition	Vrai	Faux
Un système régulé est un système bouclé pour lequel la sortie poursuit une consigne variable.	☐	☐
Un système régulé est un système bouclé qui maintient la sortie conforme à une consigne fixe.	☐	☐
Le bloc A correspond à la chaîne directe du système bouclé.	☐	☐
Le bloc B correspond à la chaîne de retour du système bouclé.	☐	☐
La fonction de transfert en boucle fermée est : $\frac{A}{1+AB}$	☐	☐
La fonction de transfert en boucle ouverte est : $A + B$	☐	☐

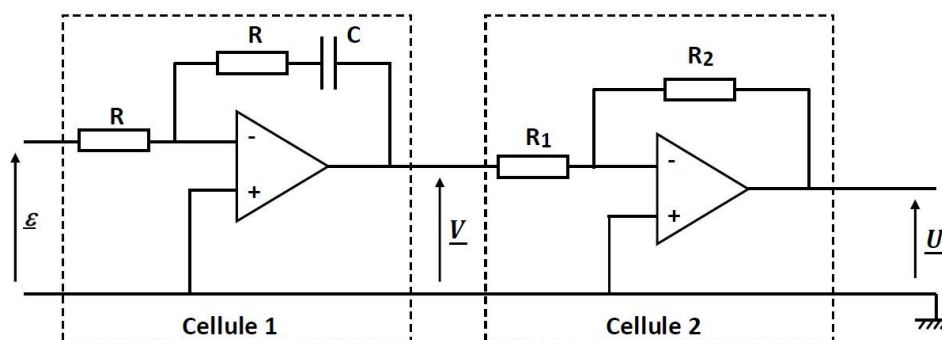
⇒ Synthèse d'un correcteur PI

Dans une boucle de régulation, le correcteur élabore le signal de commande à partir du signal d'erreur. Son but est d'améliorer les performances de la régulation.

Q.34) Quelles sont ces performances visées par le correcteur (cocher les bonnes réponses)

1,5 pt

Le montage suivant représente un correcteur **PI** dit à architecture mixte :



Q.35) Montrer que la fonction de transfert complexe de la cellule 1 est $\frac{V}{\varepsilon} = -(1 + \frac{1}{jRC\omega})$;

2 pts

Q.36) Donner, en fonction de R_1 et R_2 , la fonction de transfert complexe $\frac{U}{V}$ de la cellule 2 ;

2 pts

Q.37) En déduire que la fonction de transfert complexe $\underline{H} = \frac{U}{\varepsilon}$ du correcteur s'écrit $\underline{H} = \frac{R_2}{R_1} (1 + \frac{1}{jRC\omega})$;

2 pts

La forme canonique de la fonction de transfert de ce correcteur est : $\underline{H} = K_p (1 + \frac{1}{T_i j\omega})$.

K_p et T_i s'appellent respectivement gain proportionnel et constante de temps d'action intégrale.

On se propose de déterminer ces deux paramètres par une méthode expérimentale.

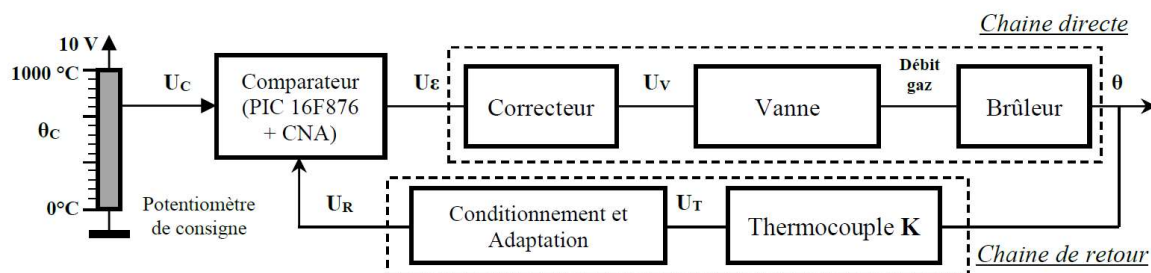
Cette méthode de réglage des correcteurs repose sur le principe de la recherche des oscillations en faisant varier le gain proportionnel. On note, au point d'oscillations, le gain K_{osc} et la période des oscillations T_{osc}

Exercice 5 : examen national 2025, session normale**B- RÉGULATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'ATOMISEUR**

L'atomiseur est équipé d'un brûleur à gaz qui lance l'air chaud.

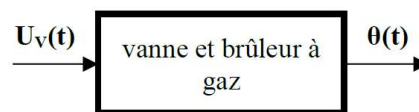
L'objectif de la régulation est de maintenir la température de l'air dans l'atomiseur à une valeur constante $\theta = 530\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour assurer une atomisation optimale de la barbotine.

Le circuit de régulation de la température est représenté par le schéma ci-dessous :

**Tâche 3 : Étude de la chaîne directe**Modélisation du système (vanne et brûleur)

On admet que l'ensemble des dispositifs vanne et brûleur, peut être modélisé par l'équation différentielle suivante : $\tau \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = K_0 \cdot U_V(t)$, avec :

- $\tau = 10\text{ s}$: constante de temps du système ;
- $K_0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C/V}$ gain statique du système (gain en régime permanent).



Q.38- Quel est l'ordre du système ainsi modélisé ? Justifier, puis calculer le temps de réponse du système τ_r à 5%. **1,5 pt**

Q.39- Calculer la température θ_P en régime permanent pour un échelon de tension U_V d'amplitude 10 V. **1 pt**

Tâche 4 : Étude de la régulation

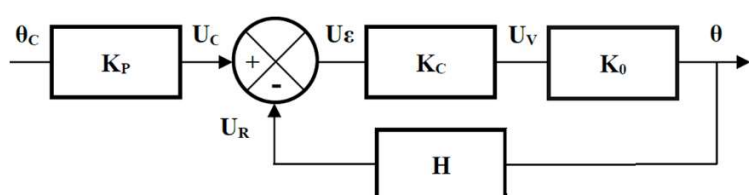
Le potentiomètre de consigne convertit la position du curseur θ_C allant de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ en une tension continue U_C allant de 0 V à 10 V .

La tension U_C est liée à la température de consigne θ_C par la relation $U_C = K_P \cdot \theta_C$.

Le correcteur permet d'adapter le signal d'erreur U_ϵ (écart) à la loi de commande de la vanne.

La tension U_V est liée au signal d'erreur U_ϵ par la relation $U_V = K_C \cdot U_\epsilon$.

On donne ci-dessous le **schéma fonctionnel** de la régulation de la température de l'atomiseur en régime permanent.



- $K_0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C/V}$: Gain du système commandé ;
- $K_C = 30$: Gain du correcteur ;
- $K_P = 0,01\text{ V/}^{\circ}\text{C}$: Transmittance du potentiomètre de consigne
- $H = 0,01\text{ V/}^{\circ}\text{C}$: Transmittance de la chaîne de retour.

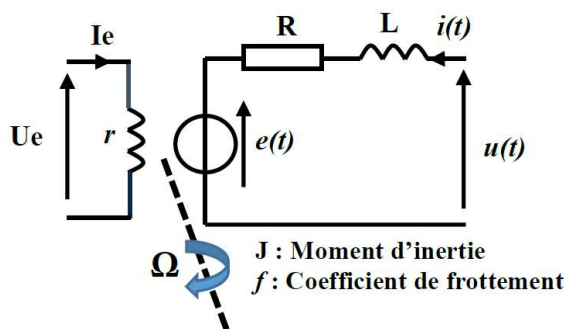
Exercice 6 : examen national 2025, session de rattrapage**C- Asservissement de vitesse du moteur à courant continu**

Pour que les deux glissières (donc les scies) descendent à vitesses égales et constantes, on est amené à asservir les vitesses des deux moteurs à courant continu **M1** et **M2** qui sont identiques.

L'étude de l'asservissement de vitesse se limitera au moteur **M1**.

Tâche 4 : Modélisation du moteur M1 à excitation indépendante (commande par l'induit)

Le schéma équivalent du moteur à courant continu **M1**, à excitation indépendante, est donné ci-dessous.

**Principales caractéristiques du moteur M1 :**

<i>Caractéristiques du moteur M1 en charge</i>	
Tension d'alimentation	$u(t)$
Courant dans l'induit	$i(t)$
Résistance de l'induit (rotor)	$R = 0,1 \, \Omega$
Inductance de l'induit (rotor)	$L = 5 \, mH$
Force électromotrice proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor	$e(t) = k_v \cdot \Omega(t)$
Moment d'inertie	J
Coefficient de frottement	f
Couple moteur proportionnel au courant dans l'induit	$C_m = k_c \cdot i(t)$
Couple résistant (charge et perturbations)	C_r

Q41) Exprimer l'équation différentielle électrique de l'induit (modèle électrique), liant la tension $u(t)$ au courant $i(t)$ et la mettre sous la forme : $\tau \frac{di(t)}{dt} + i(t) = A(u(t) - e(t))$ et préciser les expressions de τ et A en fonction des éléments du schéma puis calculer leurs valeurs. **2 pts**

Le modèle mécanique est régi par les équations ci-dessous tenant compte des couples agissant sur le rotor :

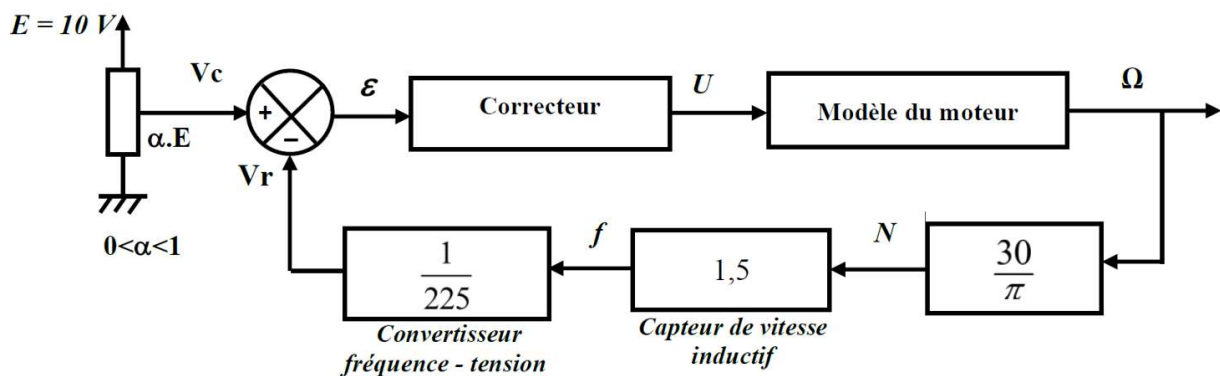
$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f\Omega(t) = C_m - C_r \quad \text{et} \quad C_m(t) = k_c \cdot i(t)$$

Q42) Compléter le schéma bloc fonctionnel du modèle du moteur. **1,5 pt**

Tâche 5 : Étude de la vitesse en boucle fermée

La figure ci-dessous représente le schéma bloc de l'asservissement de la vitesse du moteur **M1**.

Le moteur est représenté par son modèle simplifié de premier ordre. La chaîne de retour est modélisée par les fonctions de transfert du capteur de vitesse inductif et du convertisseur fréquence-tension. La consigne est obtenue par un montage potentiométrique.

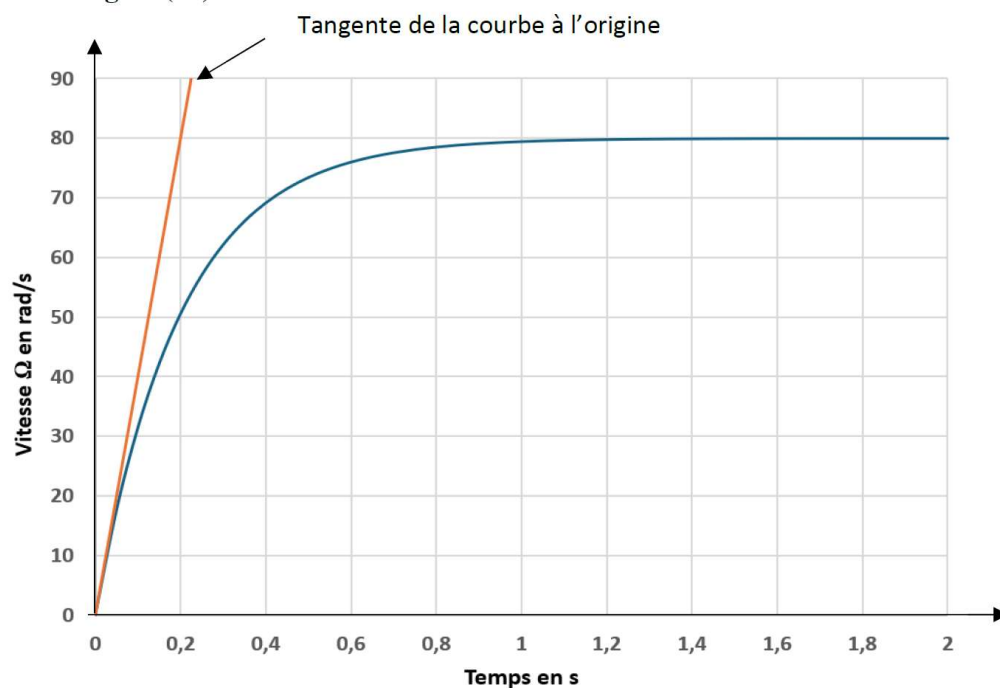


Q43) Montrer que la tension V_r de la chaîne de retour est liée à la vitesse Ω par l'expression :

$$V_r = \frac{1}{5\pi} \cdot \Omega \text{ puis compléter le tableau correspondant (prendre } \pi = 3,14).$$

1,5 pt

Le graphe de la vitesse $\Omega(t)$, donnée ci-dessous, est obtenue pour une consigne de tension $V_c = 5,1 \text{ V}$ avec un correcteur **proportionnel-intégral (PI)**.



Q44) À partir du graphe $\Omega(t)$, compléter le tableau par la valeur de la vitesse en régime permanent Ω_∞ , la constante du temps du système τ_F et le temps de réponse tr à 5% correspondant en boucle fermée. Calculer l'erreur statique ε du système et conclure sur le rôle du correcteur (PI). **1,5 pt**

.....

.....

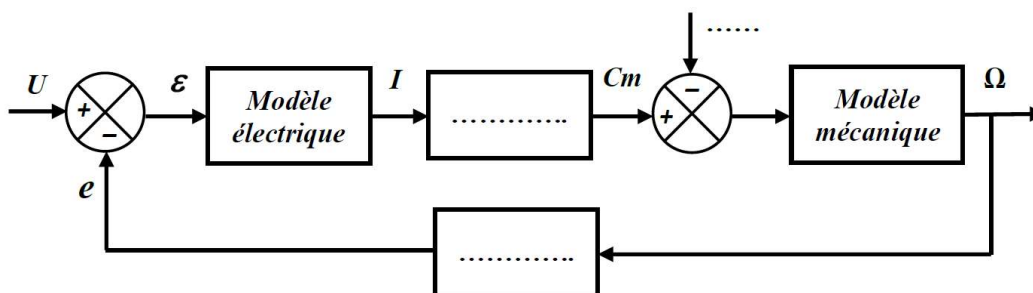
.....

.....

.....

.....

Q42)



Q43)

.....

.....

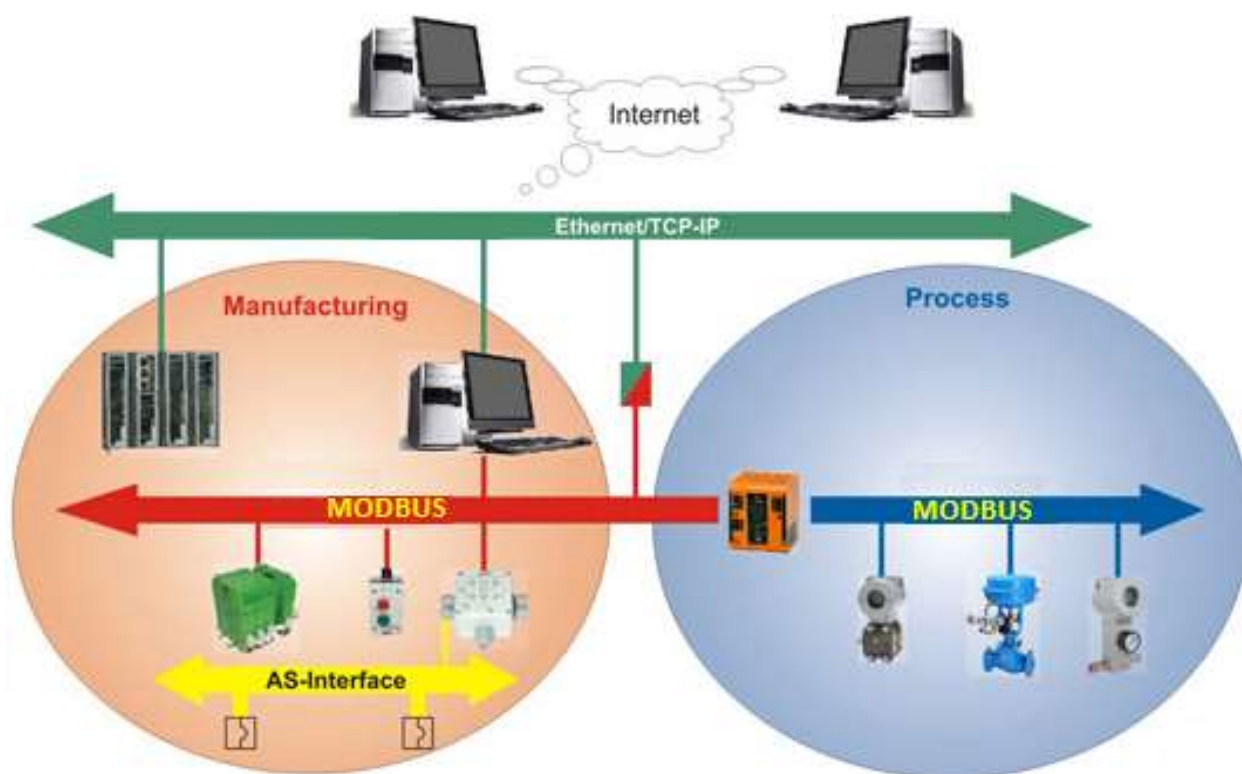
Vitesse Ω en rad/s	Vitesse N en tr/min	Fréquence en Hz	Tension Vr en V
157	.....	2250	10
80	764	.....	5,1

Q44)

Vitesse en régime permanent Ω_∞	Constante du temps du système τ_F	Temps de réponse tr à 5%	Erreur du système $\varepsilon = V_c - V_r$	Conclusion sur le rôle du correcteur PI
.....				
.....				

PARTIE**3**

Fonction COMMUNIQUER



9

COMMUNICATION DE L'INFORMATION - RESEAUX INDUSTRIELS -

Généralités sur les réseaux informatiques

Un réseau est un ensemble de machines interconnectées dans le but d'échanger des informations et de partager des ressources (fichiers, imprimante...).

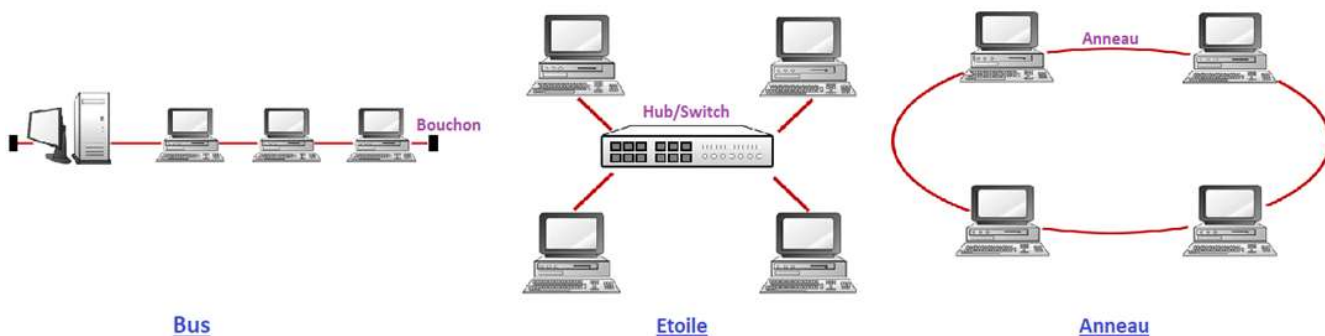
En fonction de la localisation, la distance et le débit, les réseaux sont classés en trois types :

- **LAN** (Local Area Network) : réseau local, intra entreprise permettant l'échange de données et le partage de ressources (ex : Ethernet) ;
- **MAN** (Metropolitan Area Network) : réseau métropolitain qui permet la connexion de plusieurs sites à l'échelle d'une ville ;
- **WAN** (Wide Area Network) : réseau à l'échelle d'un pays ou d'un continent, généralement celui des opérateurs. Le plus connu des WAN est Internet.

⇒ Topologie

Par topologie, nous entendons la façon dont on connecte les machines au serveur. Il y en a trois principales :

- **Topologie en bus** : tous les ordinateurs sont reliés à une même ligne par le biais d'un câble ;
- **Topologie en étoiles** : la communication entre deux ordinateurs passe par le matériel central (routeur, commutateur, concentrateur, ...) ;
- **Topologie en anneau (ring)** : les équipements sont reliés entre eux en formant une boucle.



⇒ Méthodes d'accès

Une méthode d'accès est un ensemble de règles définissant la façon dont un ordinateur accède au support tout en évitant les collisions.

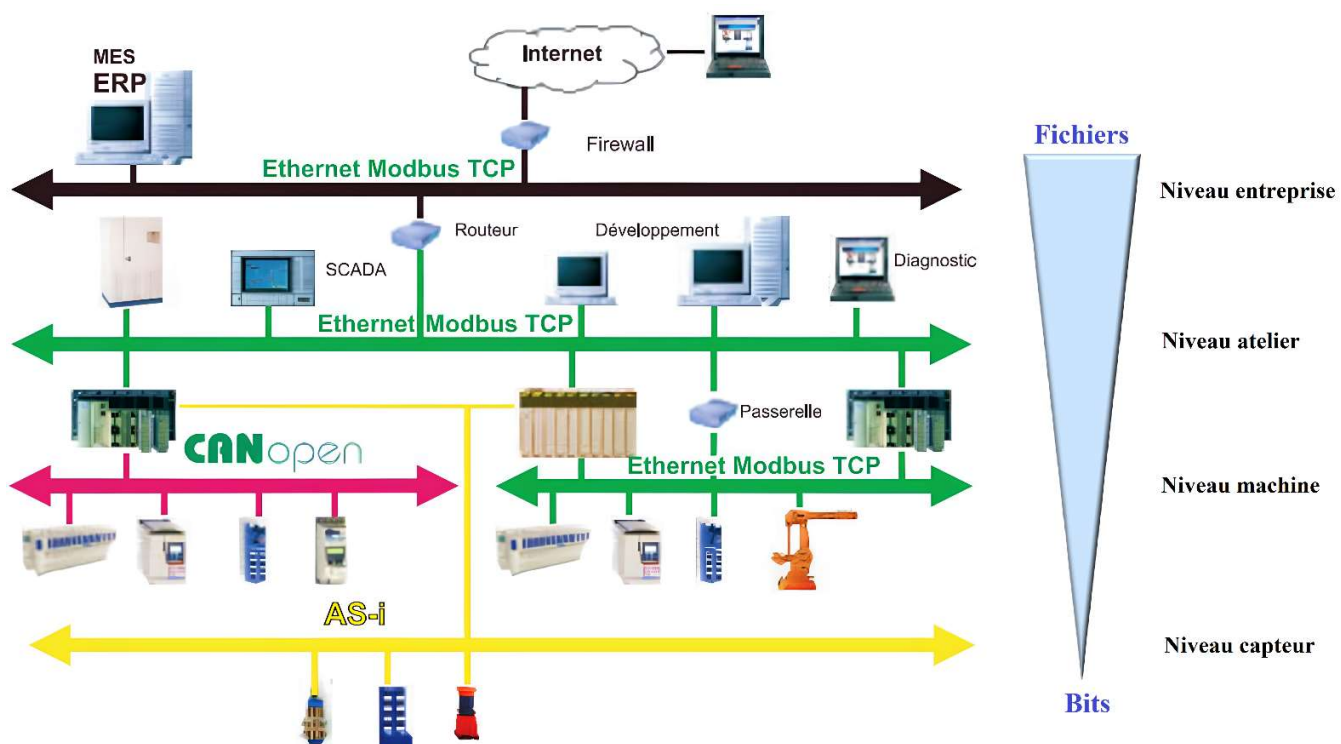
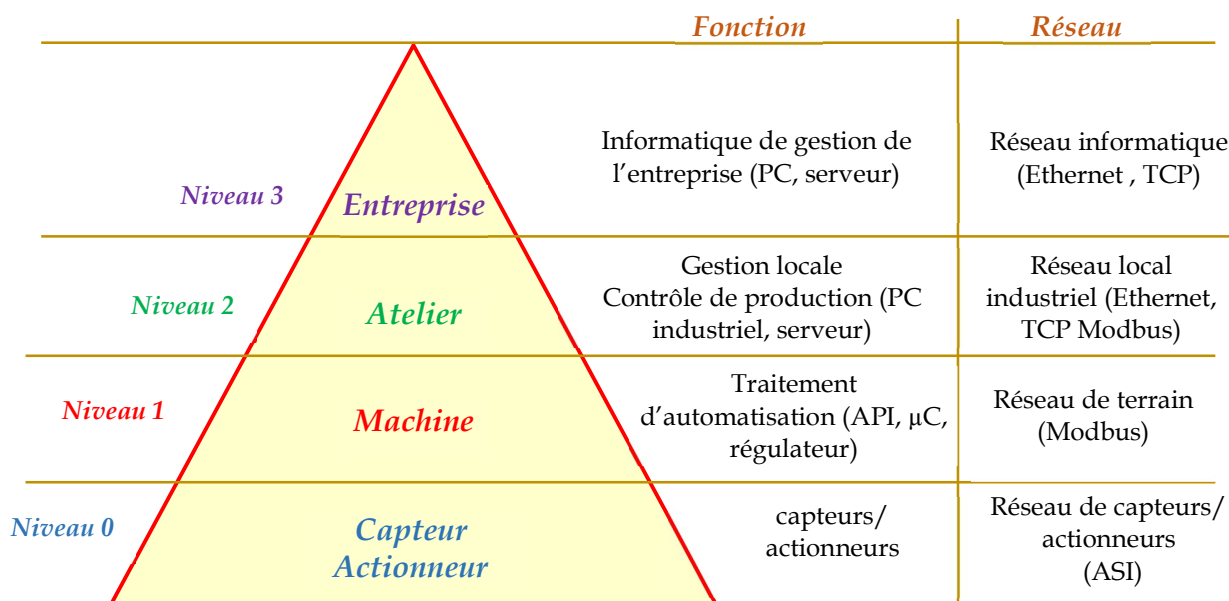
On distingue les méthodes :

- **CSMA/CD** (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect) pour les réseaux en bus et en étoile. Méthode utilisée par Ethernet ;
- **Token Ring** (anneau à jeton) pour les réseaux en anneau.

⇒ Pyramide CIM (Computer Integrated Manufacturing)

La technologie CIM définit le modèle d'usine industrielle au sens de l'automatisation et de la communication, c'est-à-dire que tous les équipements de l'usine fonctionnent sous le contrôle permanent des ordinateurs, API et autres dispositifs numériques.

La CIM propose quatre niveaux. Plus on s'élève dans la pyramide, plus le niveau de décision est important. Un niveau supérieur décide ce qu'un niveau inférieur exécute.



Réseau Ethernet

La technologie Ethernet permet de connecter les différents équipements entre eux dans un LAN (Local Area Network). Plusieurs réseaux peuvent communiquer entre eux par des routeurs pour former un WAN (Wide Area Network). La topologie la plus courante pour un réseau local est une topologie en étoile. Ethernet utilise le mécanisme CSMA/CD.

⇒ Équipements

- Carte réseau dans le PC ;
- Prises murales de type RJ45 ;
- Câble en cuivre à paires torsadées ou en fibres optiques ;
- Concentrateurs (hub), commutateurs (switchs), routeurs ;

Selon l'importance et le type de réseau, on utilise le plus souvent un des trois concentrateurs les plus généraux : les Hubs, Switchs et Routeurs.

Hub (concentrateur) : utilisé pour un réseau local avec un nombre très limité de machines. Il n'est ni plus ni moins qu'une multiprise RJ45 qui amplifie le signal réseau.

Switch (ou commutateur) : distribue les données à chaque machine destinataire, alors que le hub envoie les données à toutes machines qui répondent. Il élimine les collisions de paquets éventuelles.

Routeur : autorise l'utilisation de plusieurs classes d'adresses IP au sein d'un même réseau. Il permet ainsi la création de sous-réseaux.

⇒ Protocoles de communication

Un protocole est un ensemble de règles et de procédures à respecter pour émettre et recevoir des données sur un réseau. Le plus souvent, c'est la suite de protocoles **TCP/IP** qui est utilisée.

Voici quelques exemples de protocoles utilisant TCP/IP :

- **HTTP** (HyperText Transfer Protocol) : protocole de navigation sur le web ;
- **FTP** (File Transfer Protocol) : protocole pour le transfert de fichiers.

TCP/IP (Transmission Control Protocole / Internet Protocole) :

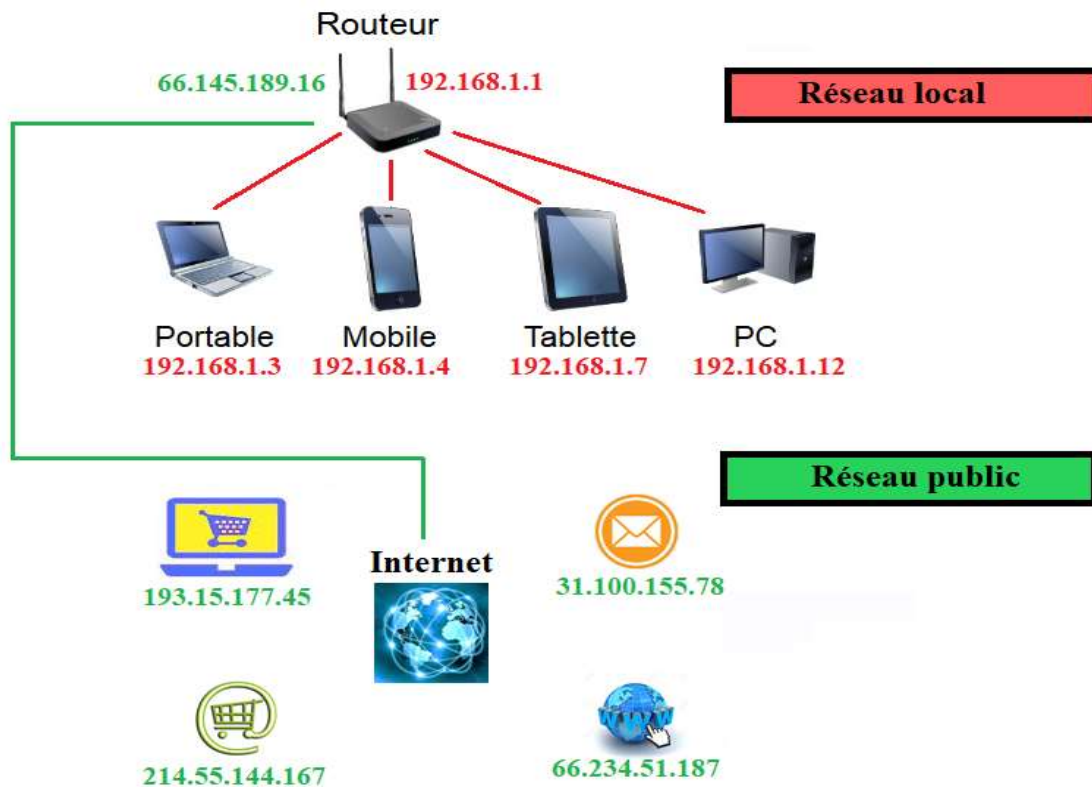
- Le protocole **IP** se base sur l'adressage IP, c'est-à-dire le fait de fournir une adresse IP à chaque machine du réseau afin de pouvoir acheminer des paquets de données ;
- Le protocole **TCP** assure le contrôle de la transmission des données.

⇒ Adressage IP

Une adresse IP est le numéro qui identifie chaque ordinateur connecté à Internet, ou plus généralement, l'interface avec le réseau de tout matériel informatique (PC, routeur, imprimante) connecté à un réseau informatique utilisant l'Internet Protocol.

En attendant la généralisation de la nouvelle version d'IPv6 avec un adressage sur 128 bits, IPv4 utilise 32 bits représentés par 4 valeurs décimales chacune allant de 0 à 255.

L'adresse est constituée de deux parties : un identificateur de réseau (netId) et un identificateur de la machine (hostId) pour ce réseau.



Il existe trois classes d'adresses, chacune permettant de coder un nombre différent de réseaux et de machines :

- **Classe A** : 1 octet identificateur du réseau, 3 octets d'hôtes.
1^{er} Octet compris entre 1 et 127.
- **Classe B** : 2 octets réseau, 2 octets d'hôtes.
1^{er} Octet compris entre 128 et 191.
- **Classe C** : 3 octets réseau, 1 octet d'hôtes.
1^{er} Octet compris entre 192 et 223.

Classe A : De 0.0.0.0 à 127.255.255.255

0XXX XXXX	XXXX XXXX	XXXX XXXX	XXXX XXXX
octet 1	octet 2	octet 3	octet 4
partie réseau	partie hôte		

Classe B : De 128.0.0.0 à 191.255.255.255

10XX XXXX	XXXX XXXX	XXXX XXXX	XXXX XXXX
octet 1	octet 2	octet 3	octet 4
partie réseau	partie hôte		

Classe C : De 192.0.0.0 à 223.255.255.255

110X XXXX	XXXX XXXX	XXXX XXXX	XXXX XXXX
octet 1	octet 2	octet 3	octet 4
partie réseau	partie hôte		

Masque de sous-réseau

Il permet d'identifier le réseau associé à une adresse IP.

Pour connaître, par exemple, l'adresse du réseau associé à l'adresse IP **34.208.123.12** (classe A), le masque est **11111111.00000000.00000000.00000000** ; soit **255.0.0.0** (/8)

Remarque : si on ajoute le nombre entre parenthèses, c'est pour indiquer la taille de l'adresse réseau.

La valeur binaire de 34.208.123.12 est 00100010.11010000.01111011.00001100 .

Un ET logique entre l'adresse IP et le masque donne ainsi le résultat suivant :

```

      00100010.11010000.01111011.00001100
ET    11111111.00000000.00000000.00000000
=     00100010.00000000.00000000.00000000
soit  34.0.0.0.
```

Il s'agit bien du réseau associé à l'adresse 34.208.123.12

En généralisant, il est possible d'obtenir les masques par défaut correspondant à chaque classe d'adresse :

- Pour une adresse de **Classe A**, le masque est **255.0.0.0**
- Pour une adresse de **Classe B**, le masque est **255.255.0.0**
- Pour une adresse de **Classe C**, le masque est **255.255.255.0**

Exercice

- Quelle est la classe d'adresse de la machine dont l'adresse IP est 144.19.74.201 ?
- Quelle est l'adresse du réseau ?
- Quel est l'identificateur de la machine dans le réseau ?
- Quel est le masque réseau ?

Exercice

Compléter le tableau.

Note : on enlève toujours deux adresses :

- L'adresse du réseau : la partie hôte contient uniquement des 0 ;
- L'adresse de diffusion (broadcast) : la partie hôte contient uniquement des 1.

Classe	Adresse mini	Adresse maxi	Masque par défaut	Nombre de réseaux	Nombres de machines par réseau
A					
B					
C					

Création de sous-réseaux

Soit l'adresse **34.208.123.12** et supposons que l'on désire que les deux premiers bits du deuxième octet permettent de désigner le sous-réseau. Le masque à appliquer sera alors : **11111111.11000000.00000000.00000000** c'est-à-dire **255.192.0.0** .

Ce masquage divise donc un réseau de classe A en 4 sous-réseaux ; d'où le nom de *masque de sous-réseau*.

Si on note N le nombre de bits attribués en plus au réseau, le **nombre de sous-réseaux** sera **2^N**

Exercice

☞ Pour l'adresse **145.245.45.225**, donner

- a) La classe d'adresse ;
- b) Le masque de sous-réseau et l'adresse du réseau ;
- c) Le nombre de machines possibles sur ce réseau ;

☞ Pour une subdivision de ce réseau en 64 sous-réseaux, donner :

- d) Le masque modifié ;
- e) L'adresse du sous-réseau auquel appartient la machine **145.245.45.225**.
- f) Le nombre de machines possibles par sous-réseau.
- g) Parmi ces adresses IP, lesquelles appartiennent au même sous-réseau que la machine **145.245.45.225** :
145.245.46.18 ; 145.245.129.201 ; 145.245.47.126 ; 145.245.66.32

a) Il s'agit d'une classe

b) Le masque de sous-réseau est (/.....). Nous aurons en binaire
11111111.11111111.00000000.00000000.

L'adresse réseau est

c) Le nombre de machines possibles sur ce réseau est

d) Pour obtenir 64 subdivisions du réseau, on emprunte bits de la partie hôte.
Le masque de sous-réseau devient donc en binaire **11111111.11111111.11111100.00000000** soit
..... (/.....).

e) Pour trouver l'adresse de sous-réseau qui contient la machine 145.245.45.225, nous allons appliquer le masque de sous-réseau à l'adresse IP au travers d'une fonction "ET". Nous aurons :

	.....	IP machine
ET	.....	Masque
=	.....	IP sous-réseau
soit, en décimal	.....	IP sous-réseau

f) Le nombre de machines possibles par sous-réseau est

g) **145.245.46.18**
145.245.129.201
145.245.47.126
145.245.66.32

Réseau de terrain

Un bus de terrain est une ligne numérique, reliant différents types d'équipements d'automatisme au sein d'une zone géographique délimitée (usine, voiture, photocopieur ...). Les équipements de sécurité (frein ABS, capteur de vitesse, airbag...) d'une voiture moderne, communiquent à l'aide d'un bus de terrain.

Parmi les avantages des bus de terrain, on peut citer :

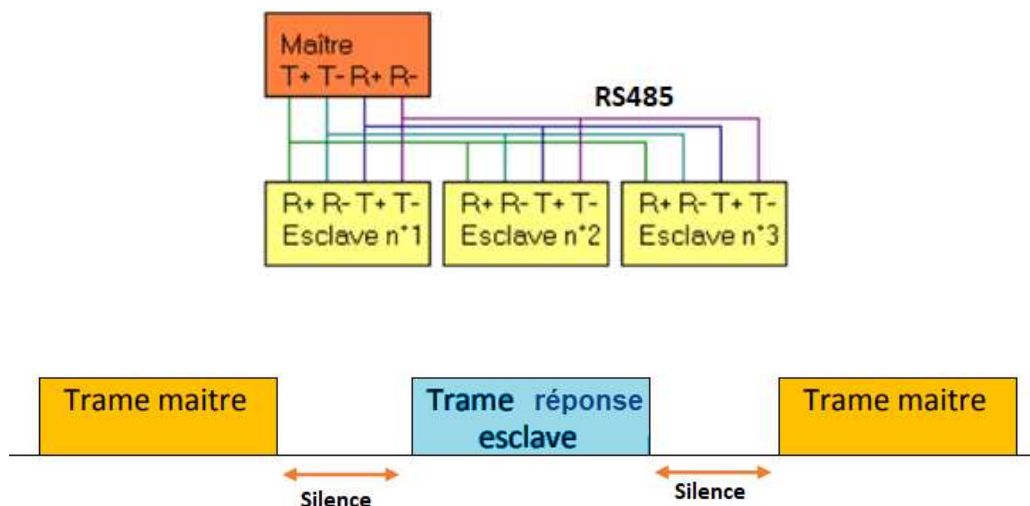
- Réduction massive du câblage, du temps d'installation, du matériel requis et des coûts de maintenance ;
- Plus de précision grâce à la numérisation.

⇒ Réseau Modbus

Modbus (marque déposée par Modicon) est un protocole de communication utilisé pour des réseaux d'automates programmables. Il fonctionne selon une structure hiérarchisée entre un maître et plusieurs esclaves.

- Le maître envoie une demande et attend une réponse ;
- Deux esclaves ne peuvent dialoguer ensemble.

Le protocole MODBUS utilise généralement la transmission série asynchrone RS232, RS422 ou RS485.

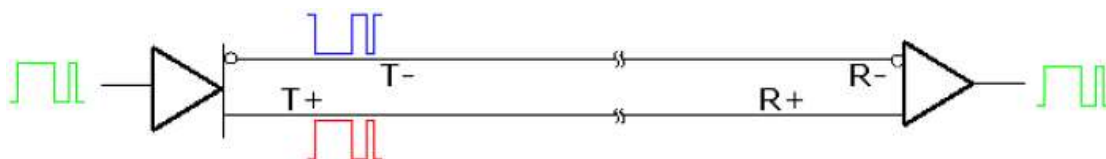


RS-485

C'est une liaison série, de type asynchrone, multipoints et différentielle ; débit élevé (jusqu'à 10 Méga bits/s) sur une distance importante (jusqu'à 1200 m). Elle dispose de 2 bornes d'émission polarisées notées T+, T- et de 2 bornes de réception polarisées notées R+, R-.

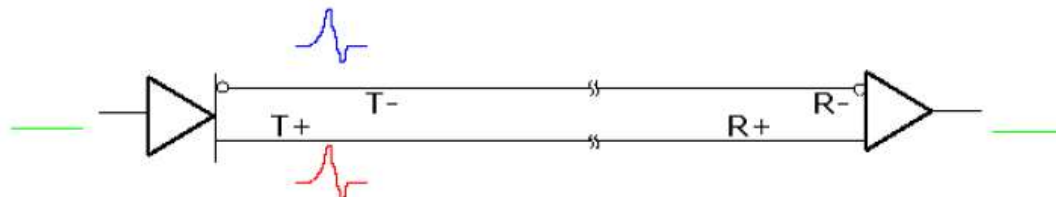
Liaison différentielle

Sur une liaison différentielle (ou symétrique) les signaux (T+ et T-) sont transmis en opposition de phase. Le récepteur réalise la différence de ces deux signaux (R+ et R-) pour obtenir le signal utile.



La paire de fils étant dans le même environnement. Donc, Si un parasite se produit, il se présente nécessairement sur les deux fils avec la même polarité.

Le récepteur, réalisant la différence des deux signaux, neutralise le parasite.



Format d'une frame Modbus

Le format de la trame RTU est en général composé de 4 champs :



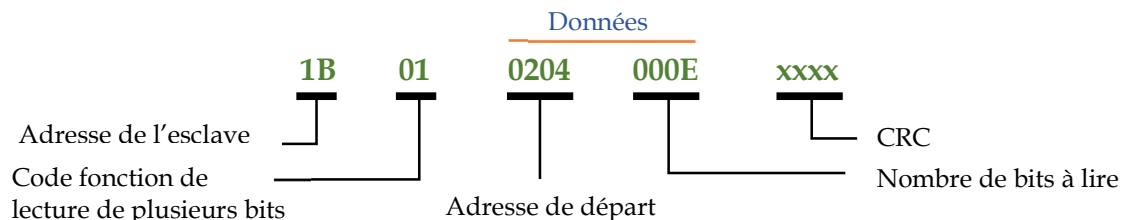
- Adresse : N° de l'esclave concerné par la requête ;
- Fonction : type d'action à réaliser ;
- Données : champ d'informations contenant les paramètres liés à la fonction : adresse mot, valeur de mot, nombre de mots, ...
- CRC (Cyclic Redundancy Check). : mot de contrôle de l'intégrité de la trame :
 - Le maître calcule le CRC codé sur 2 octets ;
 - L'esclave, lorsqu'il reçoit la trame, calcule le CRC et le compare au CRC reçu. En cas d'erreur, l'esclave répond par une trame d'exception.

La liste de quelques fonctions MODBUS est présentée dans le tableau suivant :

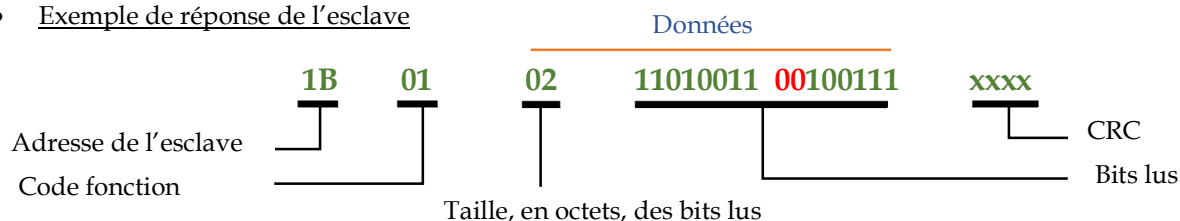
CODE en Hexa	FONCTION
01	Lecture de N bits de sortie
02	Lecture de N bits d'entrée
03	Lecture de N mots de sortie
04	Lecture de N mots d'entrée
05	Ecriture d'un bit de sortie
06	Ecriture d'un mot de sortie
0F	Ecriture de N bits de sortie
10	Ecriture de N mots

Exemple de transaction maitre-esclave Modbus

- Lecture par le maitre des bits 204_h à 211_h (soit 14 bits ou 0E en hexa) sur l'esclave N° 27 (1B en hexa)



- Exemple de réponse de l'esclave

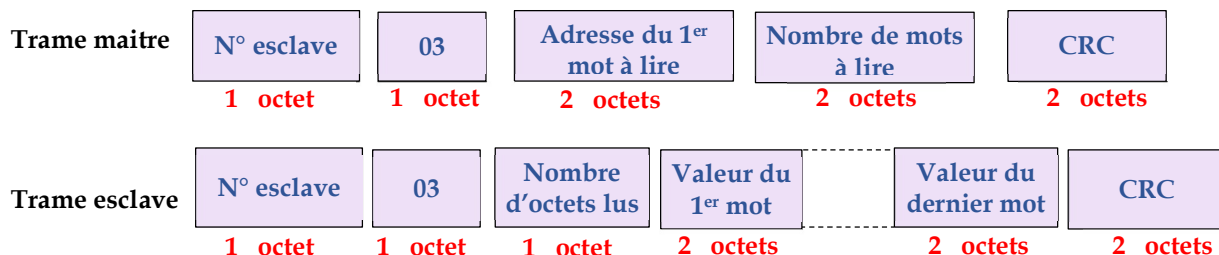


Exercice

On considère les trames Modbus suivantes :

Requête émise par le maitre	04	03	1C	02	00	01	25	9F
Réponse émise par l'esclave	04	03	02	09	D5	74	DE	

Pour la fonction 03 (lecture de plusieurs mots), les trames maitre et esclave sont montées comme suit :



Compléter le décodage de ces messages Modbus.

Trame maitre

- Adresse de l'esclave :
- Code fonction :
- Nombre et adresse des mots à extraire :
- CRC :

Trame réponse esclave

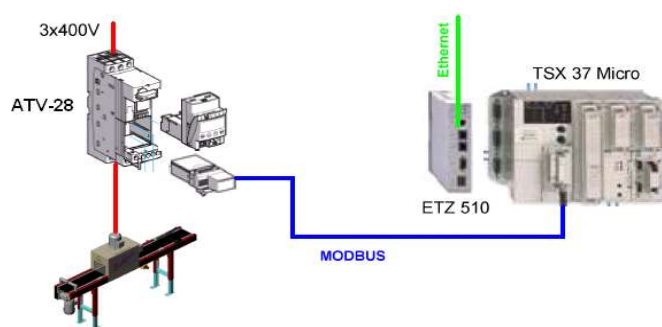
- Adresse de l'esclave :
- Code fonction :
- Valeur du mot envoyé au maitre :
- CRC :

Exercice

Donnez la trame MODBUS de lecture par le maître des mots qui se trouvent sur la plage d'adresse **W450₍₁₀₎** à **W456₍₁₀₎** sur un ATV-28 (ALTIVAR), esclave n°2.
(Le CRC n'est pas demandé)

$$(450)_{10} = (\dots\dots\dots)_{16}$$

Nombre de mots =



.....	.....	.....	.....	XX XX
N° de l'esclave	Instruction de lecture de N mots	Adresse de début	Nombre de mots	Valeur du CRC

Exercice

Donnez la trame MODBUS pour envoyer une question à l'**esclave 4** pour charger la valeur **10₍₁₀₎** dans le registre **W252₍₁₀₎**. La partie "Données", dans le cas de l'écriture de 1 mot, est composée de 4 octets : 2 octets de l'adresse de destination et de 2 autres de la valeur envoyée.

$$(252)_{10} = (\dots\dots\dots)_{16}$$

Valeur envoyée =

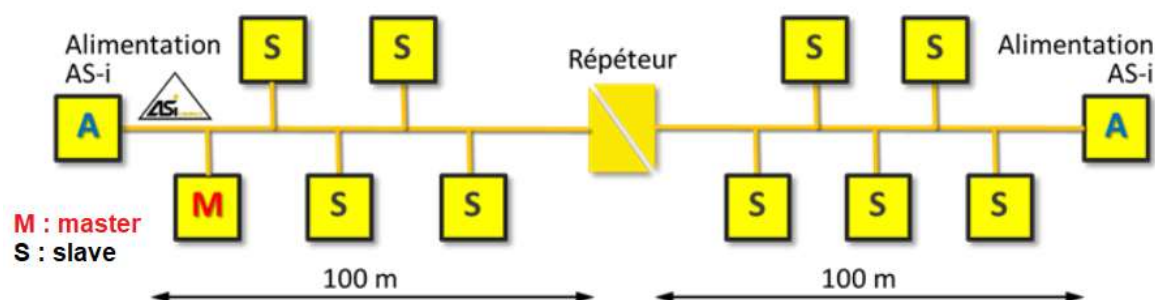
.....	.....	.....	.....	XX XX
N° de l'esclave	Instruction d'écriture d'un mot	Adresse de destination	Valeur envoyée	Valeur du CRC

⇒ **Réseau As-i**

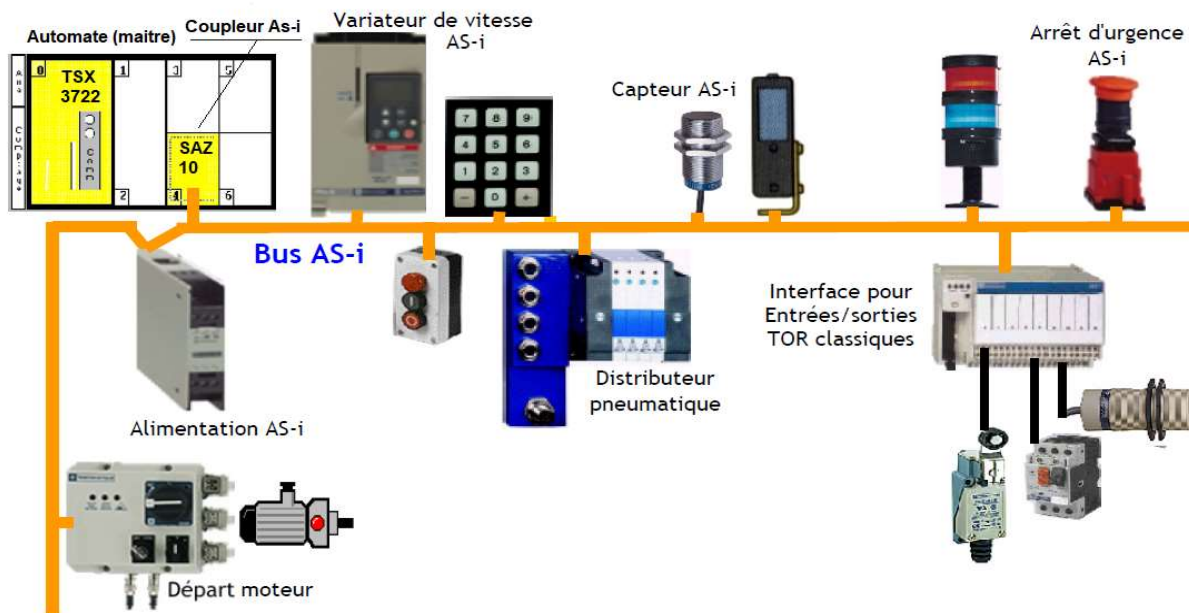
Un bus AS-i (en anglais Actuators Sensors Interface) est un bus de terrain de niveau 0 sur la pyramide CIM.

Le bus AS-i étant un bus série, il permet de diminuer la longueur de câble nécessaire à l'utilisation d'un grand nombre de capteurs ou de pré-actionneurs.

La liaison physique est composée d'une simple paire de fils gainés d'un isolant jaune. Sur ces fils transitent les données ainsi que l'alimentation électrique.

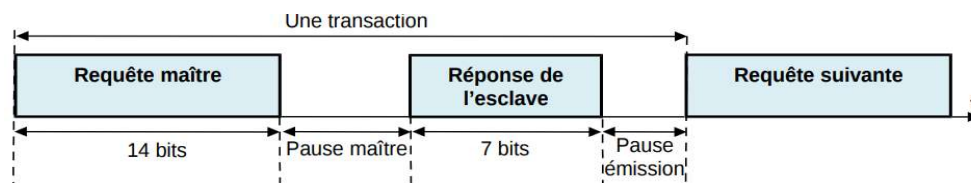
Exemple de topologie

Exemple d'équipements

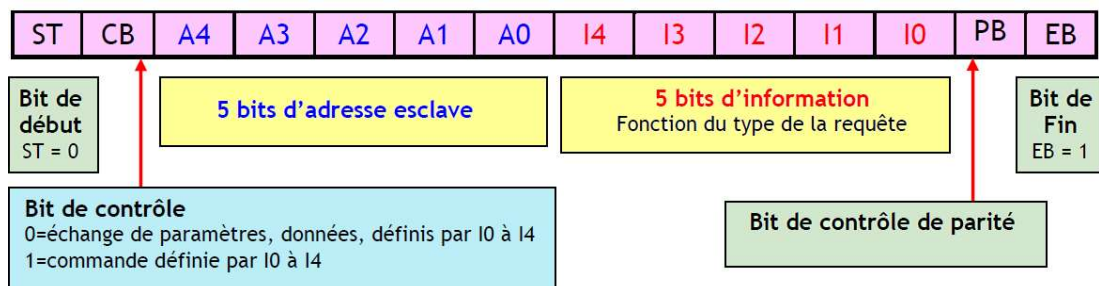


Protocole de communication As-i

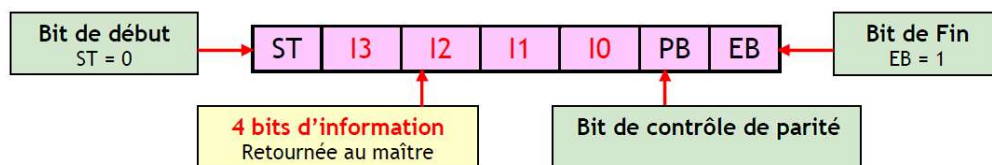
La méthode d'accès du bus AS-i est de type maître-esclave. Le maître interroge chacune des stations esclaves sur le bus, il met à jour les sorties et acquiert l'état des entrées des esclaves.



La trame de requête du **maître** contient toujours **14 bits** organisés de la façon suivante :



La trame de réponse de l'**esclave** contient toujours **7 bits** organisés de la façon suivante :



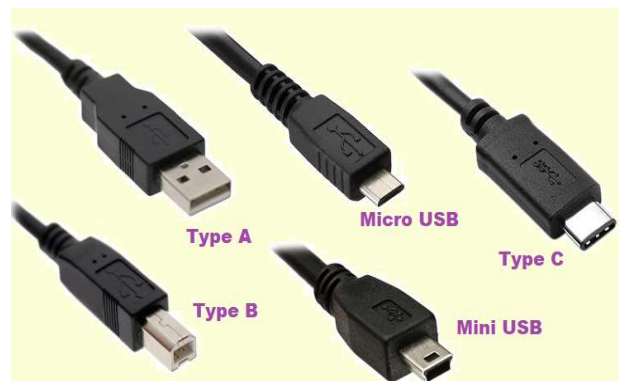
Bus USB

La technologie USB (Universal Serial Bus) est une interface d'entrée-sortie beaucoup plus rapide que les ports série standards. Si l'on veut exploiter plusieurs périphériques, on utilise un hub.

Hub USB



Types de connecteurs USB



Les avantages de L'USB sont nombreux :

- Faible coût ;
- Indépendance vis à vis des machines hôtes ;
- Hot Plug & Play (c'est à dire branchement et débranchement sans avoir besoin d'arrêter le PC) ;
- Jusqu'à 127 périphériques possibles ;
- Fiabilité et sécurité ...

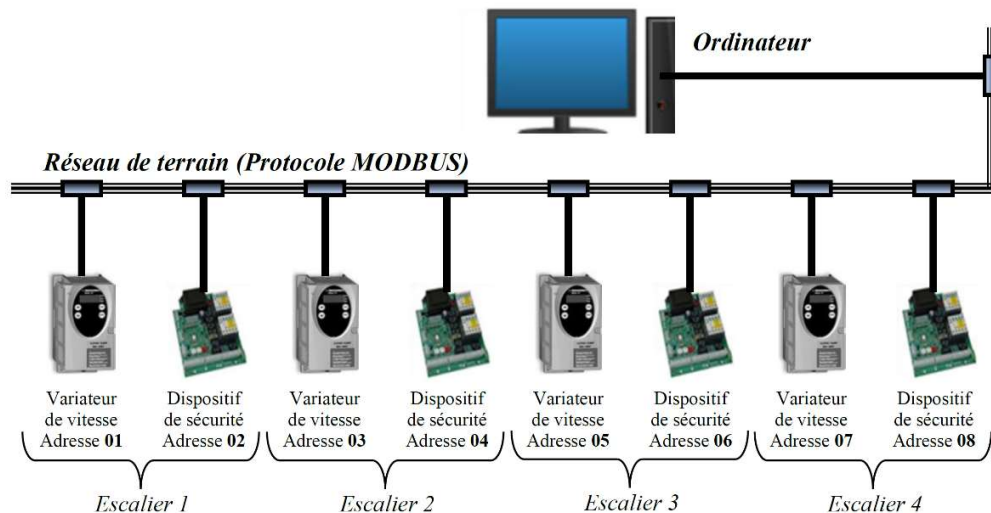
Brochage des connecteurs USB

Broche	Désignation	Couleur du fil
1	Alimentation +5V	Rouge
2	Données (D-)	Blanc
3	Données (D+)	Vert
4	Masse (GND)	Noir



Exercice 2 : examen national 2023, session normale**Tâche 3 : Analyse d'une trame MODBUS**

Un espace commercial utilise quatre escaliers mécaniques supervisés à distance par **ordinateur** et une liaison différentielle de type **RS485**, selon la configuration suivante :



On peut ainsi se renseigner sur l'état général des quatre escaliers, comme on peut les contrôler à distance.

Lire le document ressources **DRES 06** avant de répondre aux questions.

On désire vérifier à l'aide d'un analyseur de trame **MODBUS**, la configuration des variateurs **ALTIVAR** qui pilotent les différents moteurs des 4 escaliers.

Ces variateurs gèrent la vitesse des moteurs (accélération, décélération, grande vitesse, petite vitesse...) d'après les paramètres stockés sous forme de mots (double octet) dans leurs registres de configuration (mémoire interne).

On a relevé sur le bus les trames suivantes codées en **hexadécimal** :

Requête du maître (Ordinateur)

05	03	2C92	0002	CRC
----	----	------	------	-----

Réponse de l'esclave (Variateur)

05	03	04	0064	0096	CRC
----	----	----	------	------	-----

2C92 = **11410** en décimal

0064 = **100** en décimal

0096 = **150** en décimal

Répondre aux questions suivantes en cochant les bonnes réponses.

Q.40- Avec quel esclave le maître entame-t-il un **dialogue** ?

1 pt

Q.41- Quel est le **but** de la requête du maître ?

1 pt

Q.42- Quels sont les **paramètres** lus ou écrits ? donner alors, leurs **valeurs** en Hz ?

2 pts

On souhaite changer le paramètre **SP2** de 100 (10 Hz) à 250 (25 Hz).

Q.43- Elaborer la trame **MODBUS** (requête du maître et réponse de l'esclave) permettant de configurer à partir du maître le paramètre **SP2** (2^{ème} vitesse) à 250 (25 Hz) du variateur de vitesse de l'**escalier 4**.

2 pts

MODBUS

DRES 06

1. Présentation

Le tableau suivant indique quelques fonctions du protocole de communication **MODBUS** entre le maître (Ordinateur) et l'esclave (**Altivar 31**).

Code fonction (décimal)	Nom des fonctions	Valeur maxi de N
3	Lecture de N mots de sortie	29 mots maxi
6	Ecriture d'un mot de sortie	
16	Ecriture de N mots de sortie	27 mots maxi

2. Ecriture d'un mot de sortie : fonction 6 (06_H)

Cette fonction permet d'écrire un mot. Les formats des trames dans ce cas sont identiques.

Requête du maître et réponse de l'esclave

Adresse de l'esclave	N° fonction	Adresse du mot		Valeur du mot		CRC	
		PF	Pf	PF	Pf	PF	Pf
1 octet	1 octet	2 octets		2 octets		2 octets	

N.B:

PF = poids fort

Pf = poids faible

1 mot = 2 octets = 2 x 8 bits = 16 bits

CRC (Cyclic Redundancy Code) : 2 octets de contrôle de l'intégrité de la trame (non exploité dans le sujet).

3. Lecture de N mots de sortie : fonction 3 (03_H)

Cette fonction permet de lire un ou plusieurs mots, la lecture s'effectue à partir de l'adresse du premier mot puis par incrémentation de l'adresse.

Requête du maître

Adresse de l'esclave	N° fonction	Adresse du premier mot		Nombre de mots		CRC	
		PF	Pf	PF	Pf	PF	Pf
1 octet	1 octet	2 octets		2 octets		2 octets	

Réponse de l'esclave

Adresse de l'esclave	N° fonction	Nombre d'octets lus	Valeur premier mot			Valeur dernier mot		CRC	
			PF	Pf		PF	Pf	PF	Pf
1 octet	1 octet	1 octet	2 octets			2 octets		2 octets	

4. Liste de quelques mots configurables de l'ALTIVAR 31 par trame MODBUS

Adresse MODBUS	Code	Nom / Description / Valeurs possibles
11410 ₁₀ = 2C92 _{Hexa}	SP2	2^{ème} vitesse présélectionnée - Unité : 0,1 Hz - Réglage usine 100 : (100 × 0,1 = 10 Hz) - Plage de réglage : 0 à 5000
11411 ₁₀ = 2C93 _{Hexa}	SP3	3^{ème} vitesse présélectionnée - Unité : 0,1 Hz - Réglage usine 150 : (150 × 0,1 = 15 Hz) - Plage de réglage : 0 à 5000
11412 ₁₀ = 2C94 _{Hexa}	SP4	4^{ème} vitesse présélectionnée - Unité : 0,1 Hz - Réglage usine 200 : (200 × 0,1 = 20 Hz) - Plage de réglage : 0 à 5000

Q.40 -

- ☐ Esclave d'adresse 01 : Variateur de vitesse du moteur de l'escalier 1
- ☐ Esclave d'adresse 03 : Variateur de vitesse du moteur de l'escalier 2
- ☐ Esclave d'adresse 05 : Variateur de vitesse du moteur de l'escalier 3
- ☐ Esclave d'adresse 07 : Variateur de vitesse du moteur de l'escalier 4

Q.41 -

- ☐ Lecture de 2 mots de sortie (adresses : 2C92_H et 2C93_H)
- ☐ Ecriture de 2 mots de sortie (adresses : 2C92_H et 2C93_H)
- ☐ Ecriture d'un mot de sortie (adresse : 2C92_H)

Q.42 -

Paramètres lus ou écrits :

- ☐ 1^{ère} vitesse présélectionnée (SP1)
- ☐ 2^{ème} vitesse présélectionnée (SP2)
- ☐ 3^{ème} vitesse présélectionnée (SP3)
- ☐ 4^{ème} vitesse présélectionnée (SP4)

Valeurs des paramètres lus ou écrits en Hz :

- ☐ SP1 = 0 Hz
- ☐ SP2 = 10 Hz
- ☐ SP3 = 15 Hz
- ☐ SP4 = 20 Hz
- ☐ SP1 = 25 Hz
- ☐ SP2 = 100 Hz
- ☐ SP3 = 150 Hz
- ☐ SP4 = 200 Hz

Q.43 -

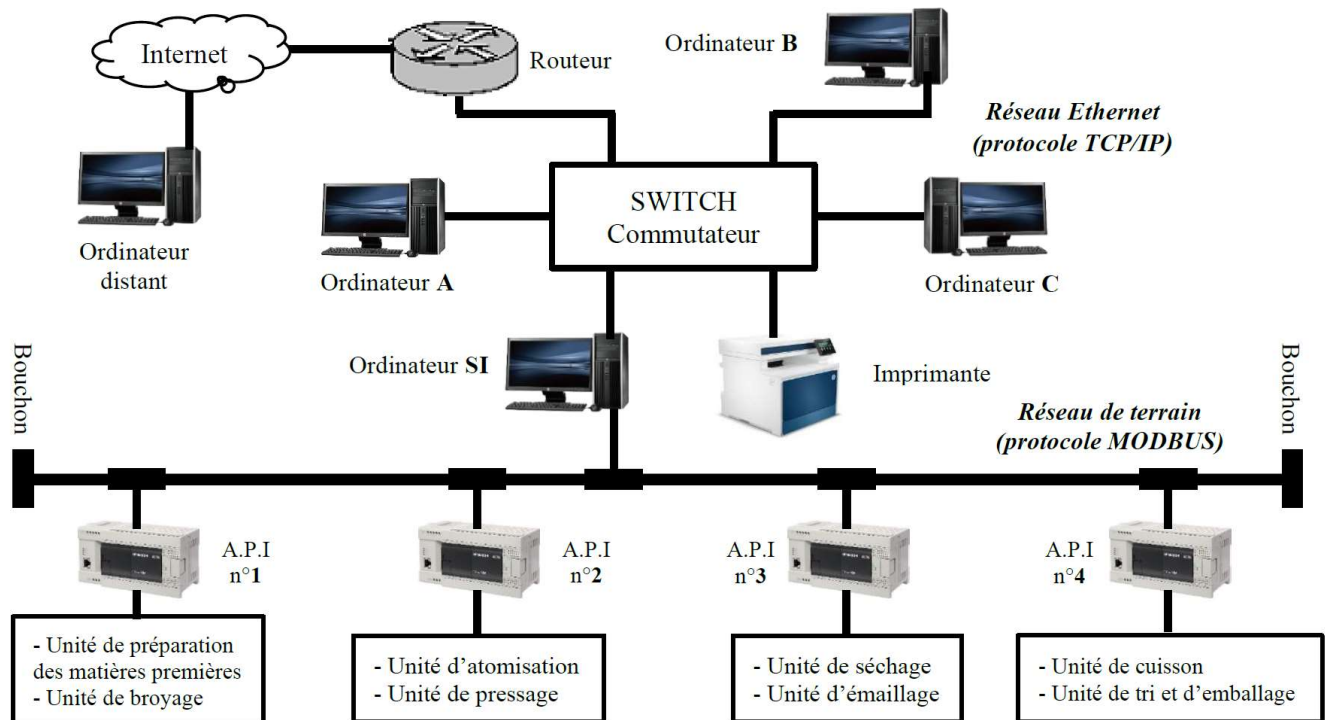
2^{ème} vitesse : 25 Hz $\rightarrow$ SP2 = 25/0,1 $\rightarrow$ SP2 = 250

Requête du maître (Ordinateur) et réponse de l'esclave (Variateur)

				CRC
☐ 01	☐ 03	☐ 2C92	☐ FA00	
☐ 03	☐ 06	☐ 2C93	☐ 0064	
☐ 05	☐ 0A	☐ 2C94	☐ 6400	
☐ 07	☐ 10	☐ 2C95	☐ 00FA	

Exercice 3 : examen national 2025, session normale**C- ORGANISATION DU RÉSEAU LOCAL DE L'USINE DE PRODUCTION DE CARRELAGE**

On donne ci-dessous la structure du réseau de l'usine de production de carreaux céramiques :



La structure générale de la commande de l'usine, se compose de :

- Un **ordinateur SI** (système d'information) assurant la gestion des informations véhiculées sur le réseau de **terrain** entre les différentes unités de production, ces unités sont pilotées par quatre **A.P.I** ;
- **Trois** ordinateurs chargés de la supervision du système en relation avec l'**ordinateur SI** via un réseau **Ethernet**.

Tâche 5 : Configuration du réseau Ethernet

Il est indispensable de réaliser l'adressage **IP** pour permettre à l'**ordinateur SI** de communiquer avec les **ordinateurs** de supervision via le réseau **Ethernet**.

Q.44- D'après l'organisation du réseau adoptée par l'usine, identifier :

2 pts

- Les **éléments** du réseau **MODBUS** (réseau de terrain).
- La **topologie** du réseau de terrain (bus, maille, anneau, étoile ou point à point) et justifier votre réponse.

Q.45- D'après l'organisation du réseau adoptée par l'usine, identifier :

2 pts

- Les **éléments** du réseau **Ethernet** (réseau d'entreprise).
- La **topologie** du réseau **Ethernet** (bus, maille, anneau, étoile ou point à point) et justifier votre réponse.

Sachant que l'adresse **IP** du poste **A** (réseau d'entreprise) est **192.168.140.24** :

Q.46- Quelle **classe d'adressage** (**A**, **B** ou **C**) utilise ce réseau ? Justifier votre réponse, en déduire le **masque de sous réseau**. **1,5 pt**

Q.47- Compléter le tableau par les adresses **IP** convenables à l'aide des propositions ci-dessous : **2 pts**

	Proposition d'adressage IP		
	Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3
Ordinateur B	192.168.140.24	192.168.141.27	192.168.140.26
Ordinateur C	192.168.140.27	192.168.140.26	193.168.140.27
Ordinateur SI	192.168.140.200	192.168.142.28	193.168.140.28
Imprimante réseau	192.168.140.201	192.168.141.201	193.168.140.29

Q.44-

- Cocher les éléments du réseau de terrain :

Ordinateur SI	Ordinateur distant	Ordinateur A	Ordinateur B	Ordinateur C	Imprimante	A.P.I n°1	A.P.I n°2	A.P.I n°3	A.P.I n°4
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐

- La topologie physique du réseau :
- Justification :

Q.45-

- Cocher les éléments du réseau Ethernet :

Ordinateur SI	Ordinateur distant	Ordinateur A	Ordinateur B	Ordinateur C	Imprimante	A.P.I n°1	A.P.I n°2	A.P.I n°3	A.P.I n°4
☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐

- La topologie physique du réseau :
- Justification :

Q.46-

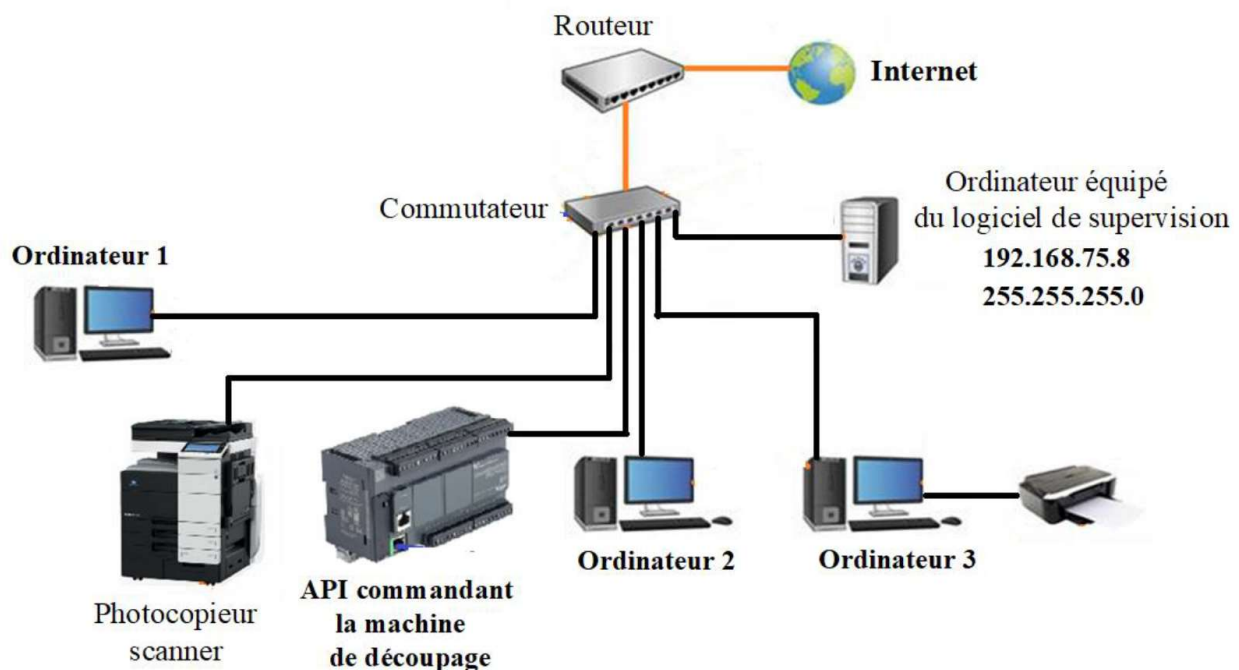
- Classe du réseau Ethernet :
- Justification :
- Masque de sous réseau :

Q.47-

	Ordinateur B	Ordinateur C	Ordinateur SI	Imprimante
Adresse IP				

Exercice 4 : examen national 2025, session de rattrapage
D- Réseau local Ethernet de supervision
Tâche 6 : Étude de l'adressage IP du réseau local

La supervision de la machine de découpage de marbre est effectuée par un logiciel installé sur un poste de travail (ordinateur) relié à un réseau local Ethernet selon la topologie ci-dessous.



Q45) Compléter le tableau par la topologie physique, la classe, le masque de sous réseau, l'adresse du réseau correspondant et le nombre de machines adressables dans ce réseau. **2,5 pts**

On veut diviser ce réseau en **quatre sous réseaux**, pour cela on emprunte les deux premiers bits de poids fort de l'identifiant machine, ainsi l'**identifiant réseau** est sur **26 bits** et l'**identifiant machine** sur **6 bits** comme le montre le tableau ci-dessous.

1 ^{er} Octet	2 ^{ème} Octet	3 ^{ème} Octet	4 ^{ème} Octet	
			2 Bits empruntés	Six bits pour les hôtes
XXXX.XXXX	XXXX.XXXX	XXXX.XXXX	XX	XX.XXXX

Q46) Compléter le tableau en donnant le nouveau masque du sous réseau et cocher les adresses des machines qui appartiennent au sous réseau d'adresse IP : 192.168.75.64. **1,5 pt**

Q45)

Topologie physique	Adresse IP	Classe	Masque du sous-réseau	Adresse du réseau	Nombre de machines
--------------------	------------	--------	-----------------------	-------------------	--------------------

Q45)

Topologie physique du réseau	Adresse IP	Classe	Masque du sous-réseau	Adresse du réseau	Nombre de machines adressables du réseau
.....	192.168.75.8	.....	.....	.....	.....

Q46)

Nouveau masque de sous réseau créé	Adresses IP des machines		Machines qui appartiennent au sous réseau d'adresse IP : 192.168.75.64
.....	Adresse de l'API	192.168.75.88	☐
	Adresse de l'ordinateur 1	192.168.75.125	☐
	Adresse de l'ordinateur 2	192.168.75.129	☐
	Adresse de l'ordinateur 3	192.168.75.194	☐

Exercice 5 : examen national 2026, session de rattrapage

Tâche 5 : Communication entre les équipements

Dans cet aéroport, on dispose de quatre scanners (S1, S2, S3, S4) qui transmettent en temps réel les données des bagages vers un serveur central via un réseau Ethernet dont le schéma est donné dans le **Document ressources N°3**.

Q44) Pour les questions proposées **a**, **b** et **c**, cocher la bonne réponse.

1,5 pt

Sachant que le serveur central possède la configuration **IP** suivante :

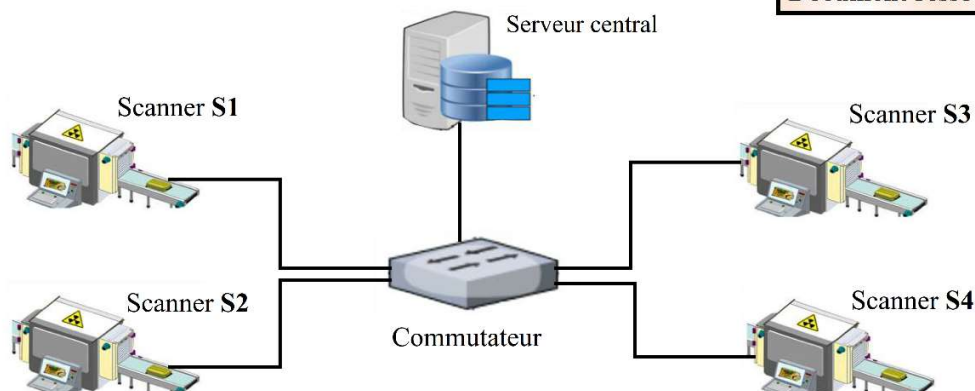
Adresse **IP** : **192.168.40.100** Masque de sous réseau : **255.255.255.0** Passerelle : **192.168.40.1**

Q45) Compléter le tableau par une proposition d'**adresses IP** valides pour assurer la communication entre les équipements.

3 pts

Schéma du réseau Ethernet des équipements

Document ressources N° 3



1.5 pt

Q44) Pour les questions proposées **a, b et c**, cocher la bonne réponse.



- a.** Dans une topologie en étoile, quel est l'élément central qui relie tous les équipements ?
- ☐ Imprimante ☐ Switch ou hub ☐ Serveur ☐ Câble coaxial
- b.** Quel type de câble est le plus utilisé pour les connexions Ethernet modernes ?
- ☐ Câble téléphonique ☐ Câble parallèle LPT ☐ Câble à paires torsadées (UTP)
- ☐ Câble série RS-232
- c.** Dans un réseau Ethernet, quelle est la fonction de l'adresse MAC ?
- ☐ Identifier un utilisateur sur Internet ☐ Identifier de manière unique chaque carte réseau
- ☐ Attribuer une adresse IP dynamique ☐ Chiffrer les données transmises

3 pts

Q45) Tableau d'adressage **IP**.



Equipement	Adresse IP attribuée	Masque de sous réseau	Passerelle
Scanner 1	192.168.40.10	255.255.255.0	192.168.40.1
Scanner 2	.....	.....	
Scanner 3	.....	.....	
Scanner 4	.....	.....	