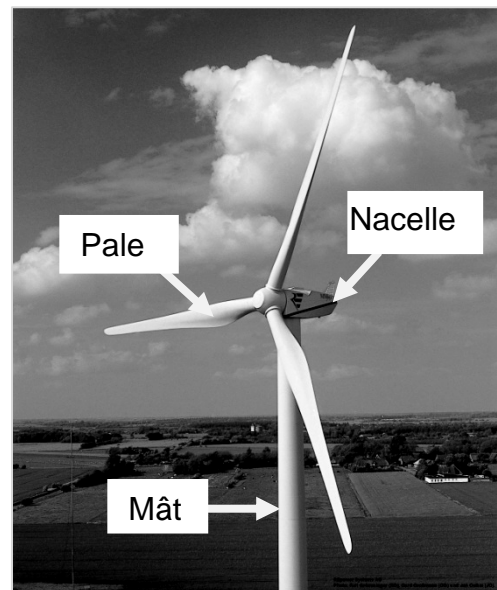


# ORIENTATION DES PALES D'UNE EOLIENNE

Une éolienne est un générateur qui convertit l'énergie du vent en énergie électrique. Elle se compose d'un mât sur lequel est installée une nacelle renfermant la génératrice électrique entraînée par un rotor à 3 pales (voir figure 1 ci-contre).

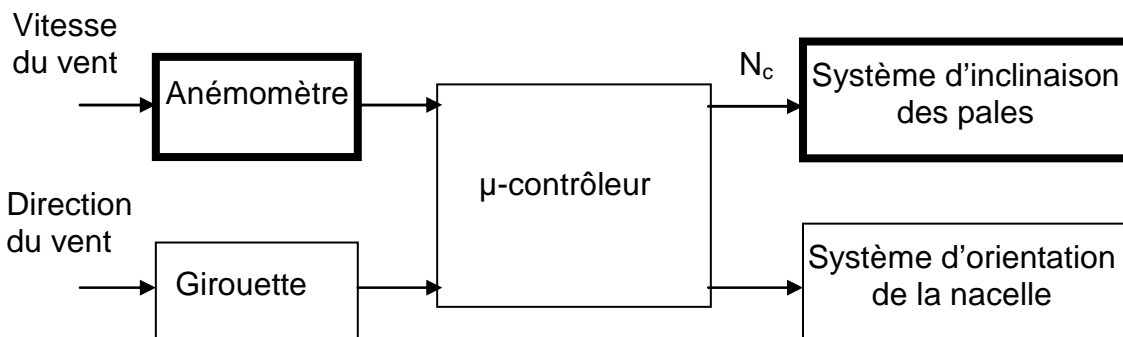
La force exercée par le vent sur les pales n'étant pas constante, ni en direction et ni en intensité, il faut constamment orienter la nacelle face au vent et modifier l'angle d'inclinaison des pales pour adapter la puissance fournie par l'éolienne à la vitesse du vent, ce qui rend nécessaire une mesure de la vitesse du vent.

Elle est effectuée par un anémomètre placé à l'arrière de la nacelle.



**Figure 1**

L'étude porte sur la mesure de la vitesse du vent par un anémomètre et sur le système d'inclinaison des pales, deux fonctions situées en amont et en aval d'un micro-contrôleur, comme indiqué **figure 2**.



**Figure2**

## Informations générales :

Tous les composants sont considérés comme parfaits.

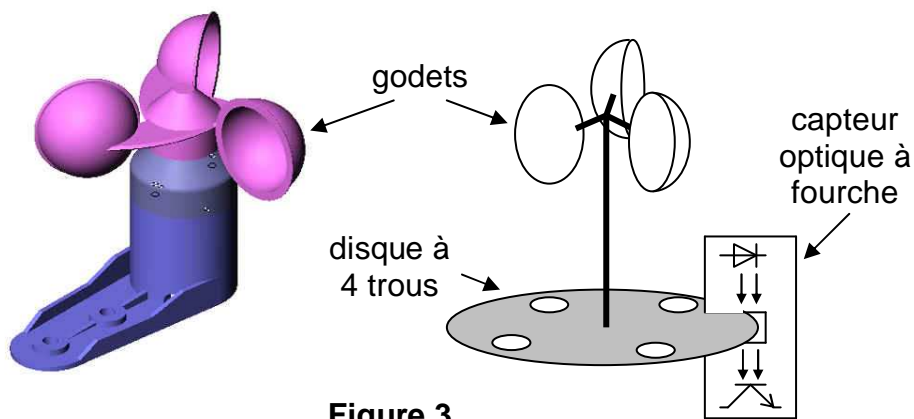
Les amplificateurs opérationnels (ou AO) sont alimentés sous des tensions  $+V_{cc} = +12V$  et  $-V_{cc} = -12V$ . Ils ont une impédance d'entrée infinie et une impédance de sortie nulle. Les tensions de saturation sont égales à  $-12V$  ou à  $+12V$ .

Toutes les parties sont indépendantes sauf certaines questions de la synthèse (partie C).

**Les documents réponses 1 à 4 en fin de sujet sont à rendre avec la copie.**

## **PARTIE A : MESURE DE LA VITESSE DU VENT**

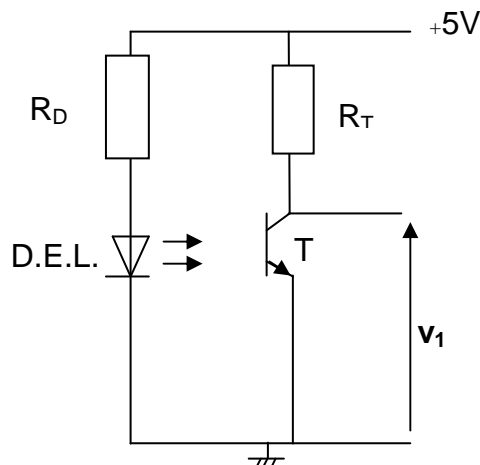
La mesure de la vitesse du vent est réalisée à l'aide d'un anémomètre à godets fixés sur un axe mis en rotation par le souffle du vent. L'anémomètre délivre un signal électrique dont la fréquence dépend de la vitesse du vent. Un disque à trous, solidaire de l'axe supportant les godets, tourne entre les broches d'une fourche optique (diode électroluminescente associée à un phototransistor). Le faisceau lumineux émis par la diode électroluminescente (D.E.L.) est ainsi transmis au phototransistor à chaque fois qu'un trou passe dans la fourche. La fréquence du signal  $v_1$ , représentative de la vitesse du vent, est convertie en tension continue variable puis, après numérisation, traitée par le microcontrôleur.



**Figure 3**

### **A.1. Capteur optique à fourche (figure 4)**

Le phototransistor noté T fonctionne comme un interrupteur idéal (tension de saturation nulle). Il est saturé dès qu'un courant d'intensité égale ou supérieure à 20 mA circule dans la D.E.L. Dans ce cas, la tension aux bornes de la D.E.L. vaut 2 V.



**Figure 4**

**A.1.1** Quelles sont les deux valeurs possibles de la tension  $v_1$  ? Préciser l'état du phototransistor T pour chacune de ces deux valeurs.

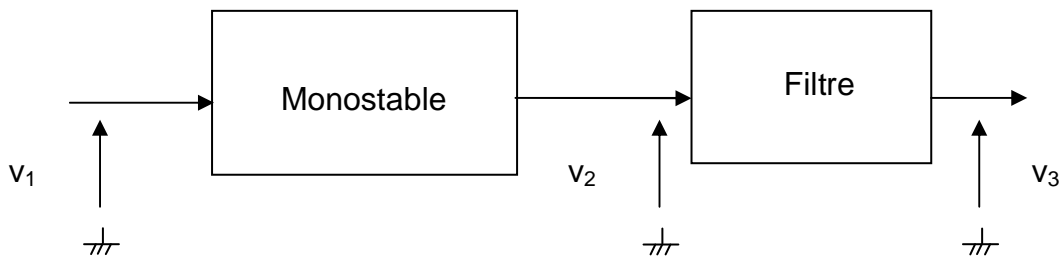
**A.1.2** Un technicien propose pour  $R_D$  une valeur de  $1500 \Omega$ . Ce choix est-il correct ? Justifier la réponse.

**A.1.3** Déterminer la fréquence électrique  $f$  en hertz de la tension  $v_1$  lorsque le disque solidaire de l'axe de rotation de l'anémomètre tourne à une vitesse de rotation de 25 tours par seconde (on rappelle que le disque est percé de 4 trous).

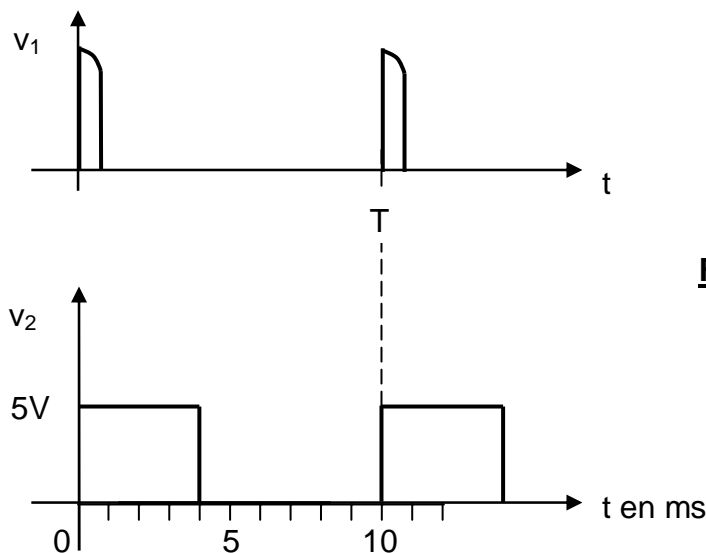
**A.2. Conversion fréquence / tension (figures 5 et 6)**

La tension  $v_1$  est mise en forme par un circuit monostable dont la tension de sortie  $v_2$  est filtrée afin d'obtenir une tension continue  $v_3$  image de la vitesse du vent.

**A.2.1** Mise en forme



**Figure 5**



**Figure 6**

**a)** L'état instable du monostable est-il déclenché par un front montant ou descendant de la tension  $v_1$  ?

- b) Pour une période  $T$  égale à 10 ms de la tension  $v_1$ , quelles sont les durées  $\Delta t_s$  et  $\Delta t_i$  des états stable et instable de la tension de sortie du monostable?
- c) La fréquence de rotation des godets et la période  $T$  de la tension  $v_1$  dépendent de la vitesse du vent. Comment sont modifiées les durées des états stable et instable si la période  $T$  augmente ?

### A.2.2 Filtrage

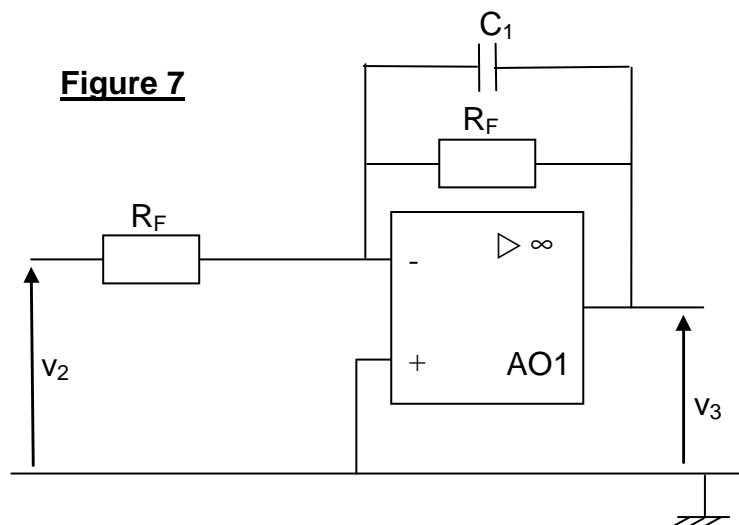
Le filtre est conçu pour extraire la valeur moyenne de la tension  $v_2$ . La période  $T$  de celle-ci peut varier de 7 ms à 20 ms selon la vitesse du vent.

Pour une valeur de  $T$  de 10 ms, la tension d'entrée du filtre est périodique et peut s'écrire :

$$v_2(t) = 2 + 2\sqrt{2} \sin(628t + \varphi_1) + \sqrt{2} \sin(1256t + \varphi_2) + 0,7\sqrt{2} \sin(1884t + \varphi_3)$$

- a) Représenter sur **le document réponse 1** à rendre avec la copie le spectre en valeurs efficaces de la tension  $v_2$ .
- b) Quel type de filtre fournirait une tension de sortie proportionnelle à la valeur moyenne de la tension  $v_2$  ? Justifier la réponse.
- c) Proposer une plage de fréquences de coupure d'un tel filtre pour extraire la valeur moyenne de  $v_2$  compte tenu des valeurs possibles de la période  $T$ .

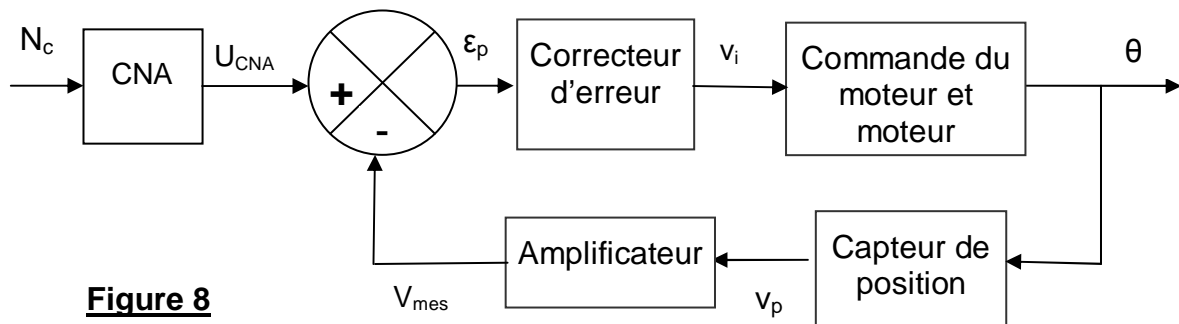
Le filtre utilisé est schématisé ci-dessous (**figure 7**). L'étude est effectuée en régime sinusoïdal : on applique à l'entrée une tension  $v_2$ , sinusoïdale, de pulsation  $\omega$  et on associe aux grandeurs temporelles  $v_2$  et  $v_3$  les grandeurs complexes  $\underline{V}_2$  et  $\underline{V}_3$ .



- d) Vérifier en faisant tendre la fréquence de la tension d'entrée vers 0 puis vers l'infini que le montage proposé peut effectivement remplir la fonction d'extraction de valeur moyenne. **Une réponse complètement rédigée est attendue.**
- e) Les deux courbes données sur le **document réponse 2** à rendre avec la copie représentent la variation du gain en dB en fonction de la fréquence en Hz de deux filtres différents. Quelle est celle représentant la réponse fréquentielle du filtre étudié précédemment ? Justifier la réponse.
- f) Déterminer graphiquement la valeur de la fréquence de coupure à partir du **document réponse 2** à rendre avec la copie.  
**Les tracés graphiques utiles pour la détermination de la fréquence de coupure seront portés sur le document réponse.**

## PARTIE B : INCLINAISON DES PALES

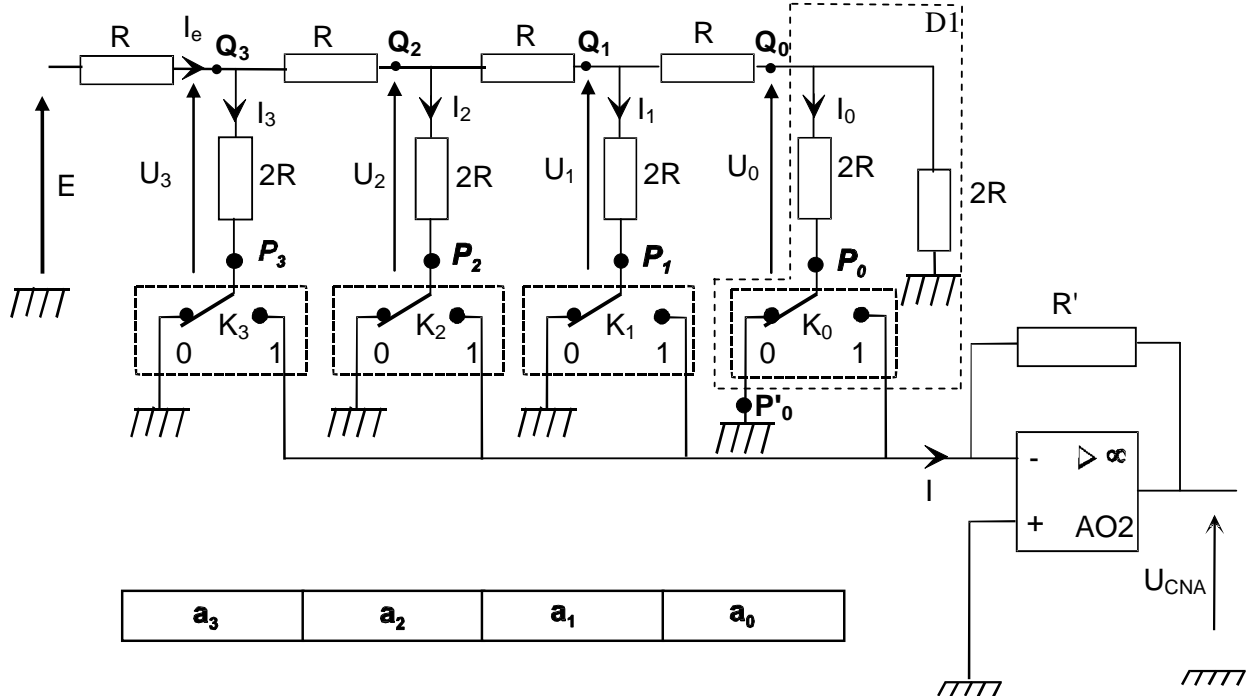
Le dispositif étudié doit asservir la position angulaire des pales à la valeur numérique  $N_c$  délivrée par le micro-contrôleur. En fonction de la vitesse du vent, le dispositif reçoit une consigne angulaire d'inclinaison des pales, sous la forme d'une information numérique  $N_c$ , codée sur 4 bits. Un moteur à courant continu oriente les pales dans la position attendue  $\theta$ . Une vue d'ensemble de l'asservissement est donnée **figure 8**.



**Figure 8**

## B.1. Conversion Numérique-Analogique

Cette fonction est réalisée par le circuit schématisé sur la **figure 9**. La consigne angulaire  $N_c$  codée sur 4 bits ( $a_3, a_2, a_1, a_0$ ) est convertie en une tension analogique  $U_{CNA}$ .



**Figure 9**

Pour  $i = 0, 1, 2$  ou  $3$ , la position de l'interrupteur  $K_i$  dépend de la valeur du bit  $a_i$  :  
Si  $a_i = 0$  alors  $K_i$  est en position 0 et si  $a_i = 1$  alors  $K_i$  est en position 1 (**voir figure 9**).

- B.1.1 Quel est le régime de fonctionnement de l'amplificateur opérationnel AO2 ?
- B.1.2 En déduire que les tensions entre les points  $P_0, P_1, P_2$  ou  $P_3$  et la masse du montage peuvent être considérées comme nulles quelles que soient les positions des interrupteurs  $K_i$ .
- B.1.3 Exprimer la tension  $U_{CNA}$  en fonction de l'intensité  $I$ .
- B.1.4 Justifier que l'intensité  $I$  puisse s'écrire:  $I = a_3 \cdot I_3 + a_2 \cdot I_2 + a_1 \cdot I_1 + a_0 \cdot I_0$ .
- B.1.5 Déterminer la résistance équivalente  $R_e$  au dipôle passif D1 situé à droite des bornes  $Q_0$  et  $P'_0$  et en déduire l'expression de  $U_0$  en fonction de  $U_1$ .
- B.1.6 Appliquer le même raisonnement pour exprimer  $U_1$  en fonction de  $U_2$  puis  $U_2$  en fonction de  $U_3$  et enfin  $U_3$  en fonction de  $E$ .

**B.1.7** Montrer que l'intensité  $I_3$  peut s'écrire :  $I_3 = \frac{E}{4R}$ . En déduire l'expression de  $I_2$ ,  $I_1$  et  $I_0$ .

**B.1.8** En remplaçant les intensités des courants par les expressions déterminées ci-dessus, exprimer  $U_{CNA}$  en fonction de  $E$ ,  $R$ ,  $R'$  et les valeurs des bits  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$ .

**B.1.9** En déduire que l'on peut écrire  $U_{CNA} = q.N_C$ . Préciser l'expression de  $q$ .

**B.1.10** Compléter les 3 cases vides du tableau du **document réponse 3** à rendre avec la copie.

On donne  $E = -10\text{ V}$  et  $R = R' = 27\text{ k}\Omega$ .

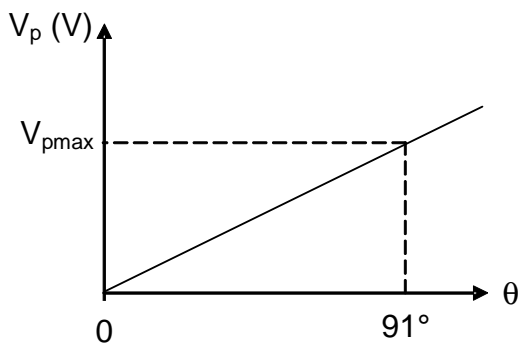
**B.1.11** En déduire la valeur numérique du quantum  $q$ .

**B.1.12** Tracer sur le **document réponse 3** à rendre avec la copie la caractéristique de transfert du CNA.

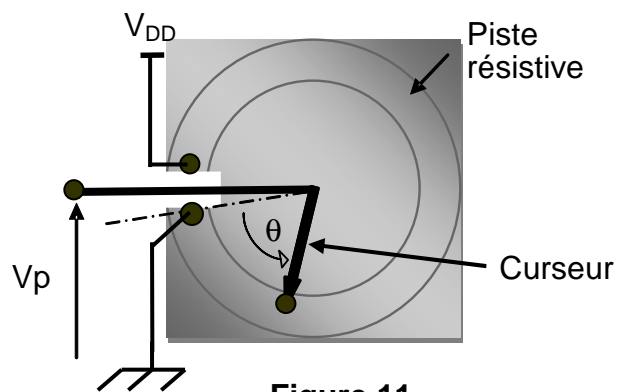
## B.2. Capteur de position

Le capteur de position est un potentiomètre dont le curseur est solidaire de l'axe de rotation de la pale. Il délivre une tension  $V_p$  proportionnelle à la position angulaire  $\theta$  de la pale, avec  $0^\circ < \theta < 340^\circ$  (**figures 10 et 11**). La tension  $V_p$  vaut  $V_{DD}$  lorsque  $\theta = 340^\circ$ .

Le potentiomètre est utilisé seulement dans une plage angulaire comprise entre  $0$  et  $91^\circ$ :  $0^\circ < \theta < 91^\circ$  (**figure 10**).



**Figure 10**

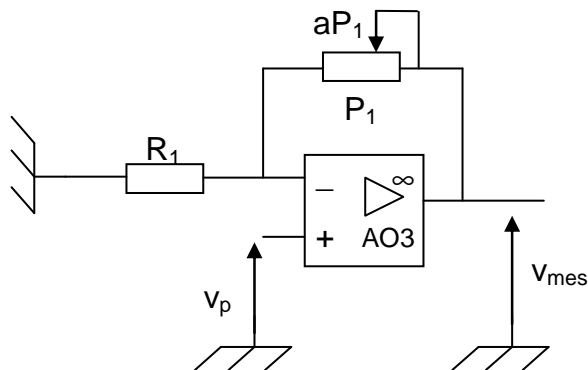


**Figure 11**

**B.2.1** Montrer que  $V_p = \frac{V_{DD}}{340} \times \theta$

**B.2.2** Déterminer la plage de variation de  $V_p$  pour  $V_{DD} = 5\text{V}$ .

**B.3. Etude de l'amplificateur (figure 12)**



**Figure 12**

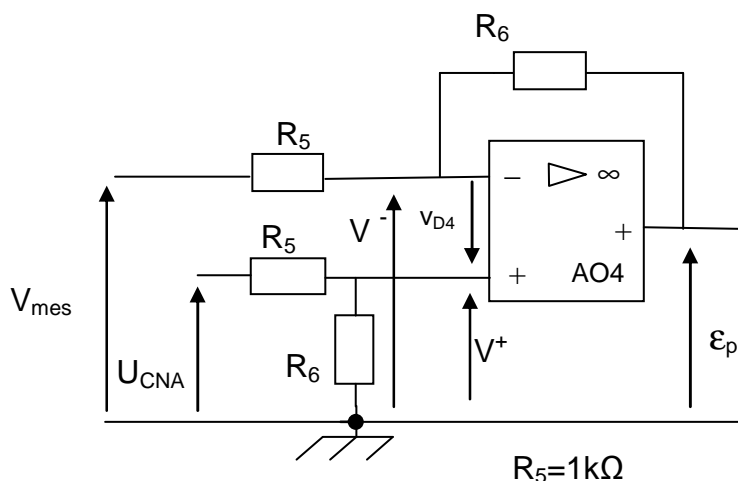
**B.3.1** Quel est le nom du montage réalisé autour de l'amplificateur opérationnel AO3 ?

$aP_1$  représente la valeur de la résistance du potentiomètre  $P_1$  intervenant dans le montage :  $a$  est un coefficient compris entre 0 et 1.

**B.3.2** Exprimer la tension  $V_{mes}$  en fonction de  $\theta$ ,  $a$ ,  $P_1$ ,  $R_1$  et  $V_{DD}$ .

**B.3.3** Calculer la valeur de  $a$  pour obtenir  $V_{mes} = 4,69$  V lorsque  $\theta = 91^\circ$ .  
On donne  $P_1 = 10R_1 = 10$  k $\Omega$ .

**B.4. Amplificateur de différence (figure 13)**



**Figure 13**

**B.4.1** Quel est le mode de fonctionnement l'amplificateur opérationnel AO4 ?

**B.4.2** En déduire la valeur de la tension  $v_{D4}$  et la relation entre les tensions  $V^+$  et  $V^-$ .

- B.4.3** Exprimer la tension  $V^+$  en fonction de la tension  $U_{CNA}$  et des résistances  $R_5$  et  $R_6$ .
- B.4.4** Exprimer la tension  $V^-$  en fonction des tensions  $V_{mes}$  et  $\varepsilon_p$  et des résistances  $R_5$  et  $R_6$ .
- B.4.5** En déduire l'expression de  $\varepsilon_p$  en fonction de  $U_{CNA}$  et  $V_{mes}$  et des résistances  $R_5$  et  $R_6$ .
- B.4.6**  $R_5 = 1 \text{ k}\Omega$ . Calculer la valeur de la résistance  $R_6$  pour obtenir  $\varepsilon_p = (U_{CNA} - V_{mes})$ .
- B.4.7** En déduire la valeur maximale que peut atteindre la tension d'erreur  $\varepsilon_p$ .

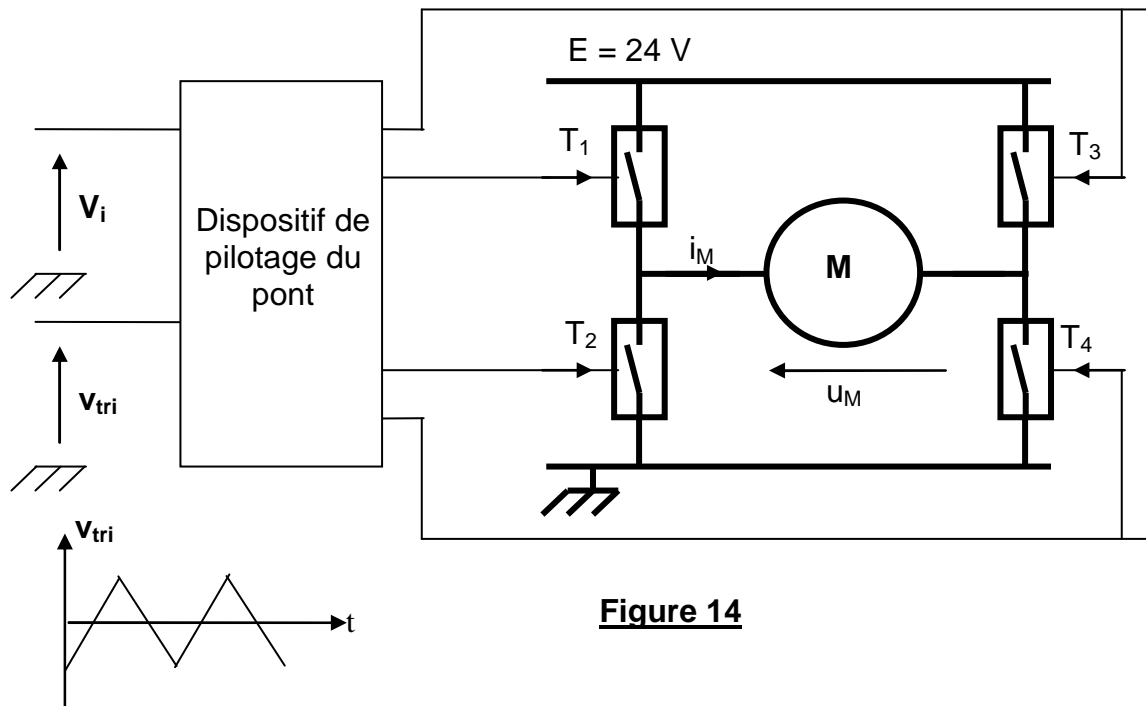
**Le correcteur d'erreur, non étudié, est un amplificateur de tension non inverseur de coefficient d'amplification  $A_V = V_i / \varepsilon_p$ .**

## **B.5. Etude de la commande du moteur à courant continu**

L'alimentation du moteur est assurée par un pont en H, alimenté entre 0 et  $E = 24 \text{ V}$ , dans lequel les transistors  $T_1$  à  $T_4$  se comportent comme des interrupteurs idéaux (voir **figure 14**).

Le dispositif de pilotage du pont compare la tension  $V_i$  continue à une tension triangulaire  $v_{tri}$  variant de  $-4 \text{ V}$  à  $+4 \text{ V}$ , de fréquence  $10 \text{ kHz}$ , et génère la commande des transistors de la façon suivante :

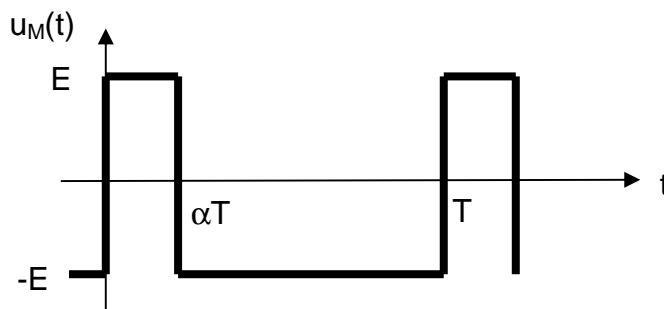
Lorsque  $v_{tri} > v_i$  les transistors  $T_1$  et  $T_4$  conduisent,  $T_2$  et  $T_3$  sont bloqués.  
Lorsque  $v_{tri} < v_i$  les transistors  $T_2$  et  $T_3$  conduisent,  $T_1$  et  $T_4$  sont bloqués.



**Figure 14**

La tension  $v_{tri}$  est représentée sur le **document réponse 4** à rendre avec la copie.

- B.5.1** Représenter sur le **document réponse 4** à rendre avec la copie la tension  $u_M(t)$  aux bornes du moteur pour les trois valeurs de la tension  $V_i$  données dans le **document réponse 4**. Graduer les axes des ordonnées pour trois représentations graphiques.
- B.5.2** Indiquer clairement les intervalles de conduction des interrupteurs dans le cas N°1 ( $V_i = 0$  V).
- B.5.3** Pour le cas N°2 ( $V_i = 3$  V), déterminer la valeur moyenne de  $u_M(t)$ .
- B.5.4** Pour certaines valeurs de  $V_i$  la tension  $u_M(t)$  aux bornes du moteur peut avoir l'allure représentée sur la **figure 15**.



**Figure 15**

- a) Déterminer l'expression littérale de la valeur moyenne de  $u_M(t)$  en fonction de  $E$  et  $\alpha$  (rapport cyclique).
- b) La valeur moyenne de  $u_M(t)$  peut être positive, nulle ou négative selon les différentes valeurs de  $V_i$ . Quelle est la conséquence pour le moteur ?

**B.6. Etude du moteur à courant continu**

On utilise un moteur à courant continu à aimants permanents. On donne :

$R_M = 1 \Omega$ , résistance de l'induit du moteur.

$U_M = 24 \text{ V}$ , tension nominale d'induit.

$I_M = 2 \text{ A}$ , intensité nominale du courant d'induit.

$n = 750 \text{ tr/min}$ , vitesse nominale de rotation du rotor.

$E_M$  : force électromotrice (f.é.m) du moteur.

Pour les questions suivantes, le moteur fonctionne en **régime nominal**.

**B.6.1** Donner le schéma électrique équivalent de l'induit du moteur.

**B.6.2** Calculer la f.é.m  $E_M$ .

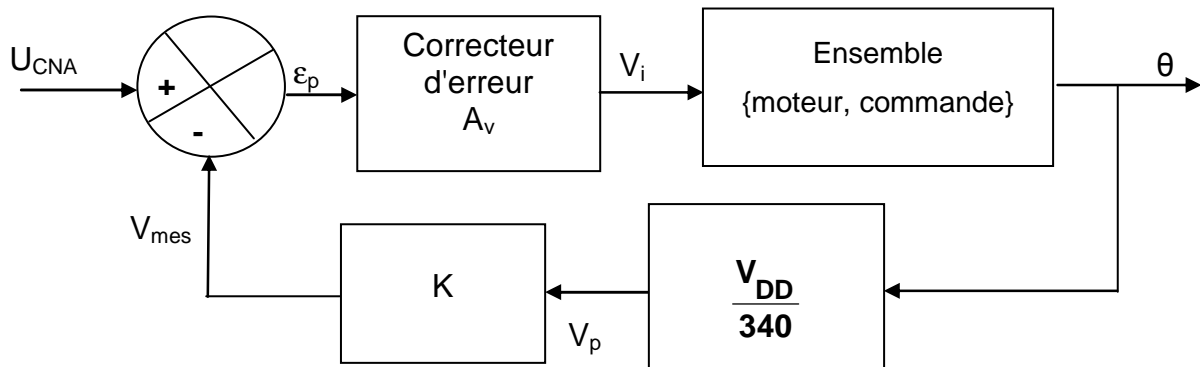
**B.6.3** Calculer la puissance  $P_j$  dissipée par effet Joule au niveau de l'induit.

**B.6.4** Calculer la puissance utile  $P_U$  fournie par le moteur, sachant que les pertes totales  $P_t$  incluant les pertes par effet Joule s'élèvent à 8W.

**B.6.5** Calculer le rendement  $\eta$  du moteur.

## PARTIE C : SYNTHESE

Le schéma fonctionnel de principe de l'asservissement de position est rappelé **figure 16**.

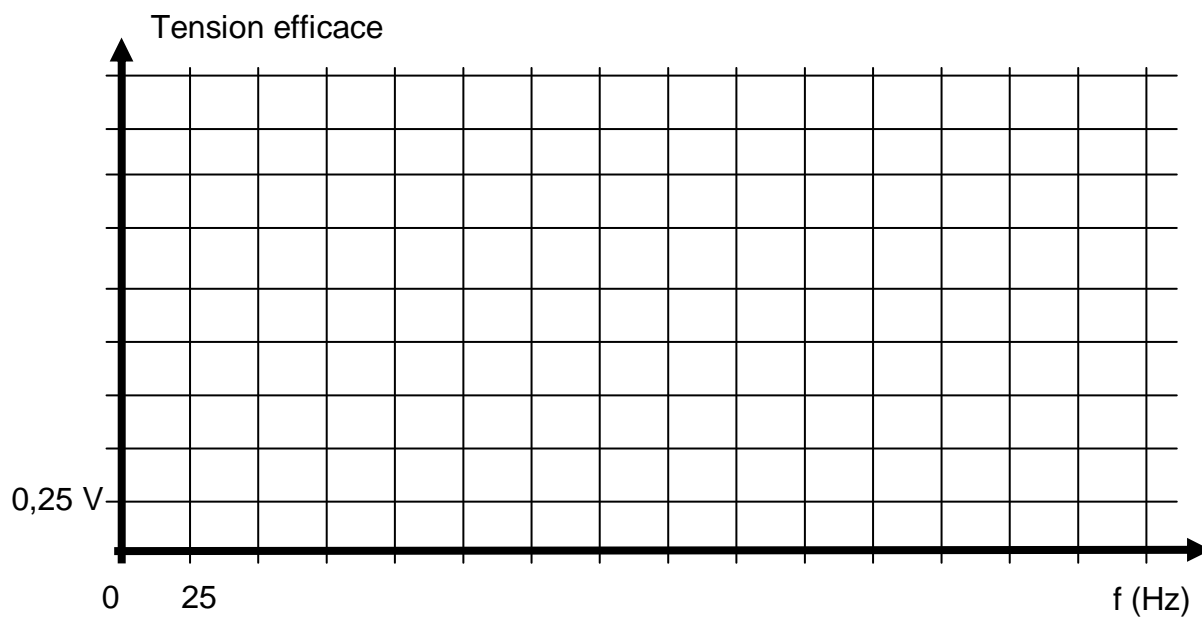


**Figure 16**

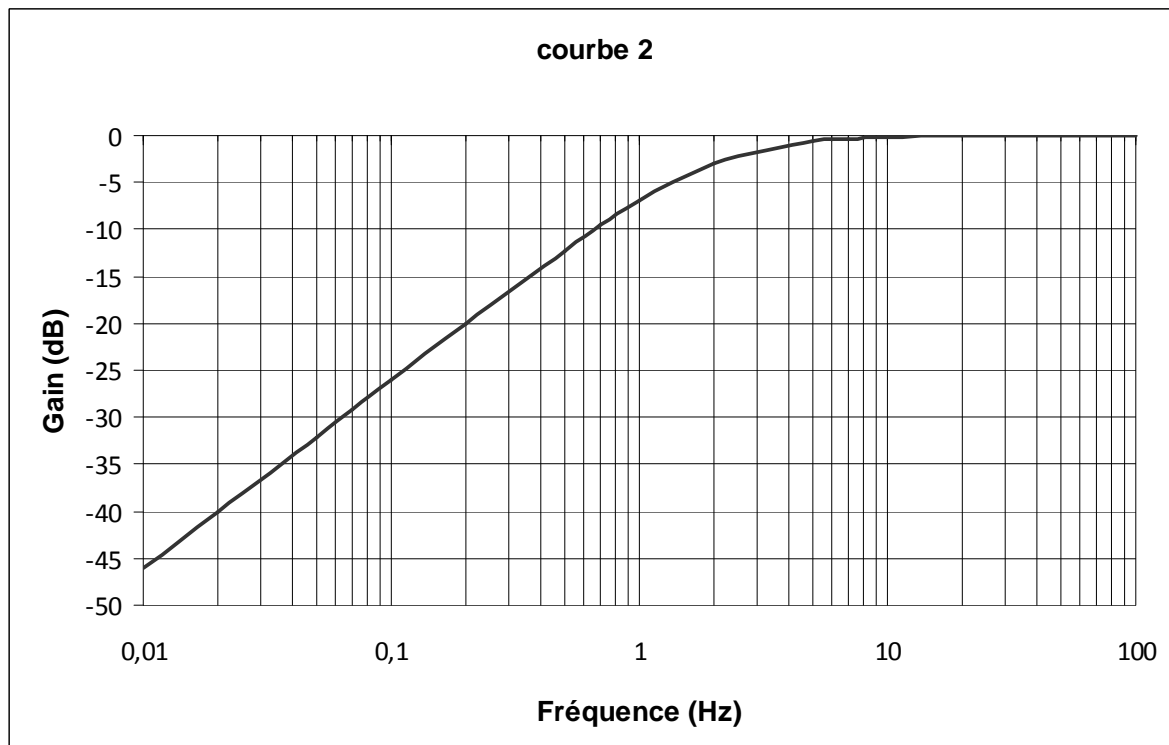
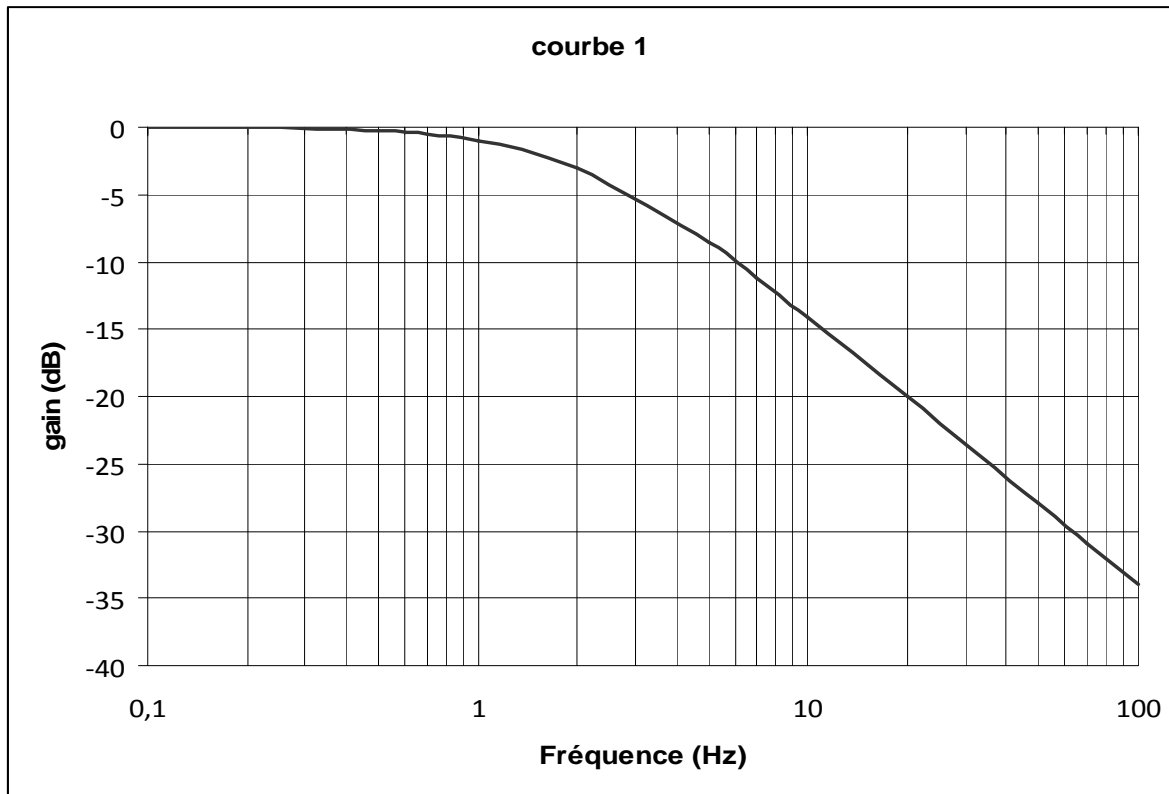
- C.1.** Donner l'expression de la fonction de transfert  $T_R$  de la chaîne de retour.
- C.2.** Exprimer la tension d'erreur  $\epsilon_p$  en fonction de  $U_{CNA}$ ,  $\theta$  et des éléments de la chaîne de retour.
- C.3.** A l'aide du **document réponse n°3** à rendre avec la copie et de la question B.3, calculer la valeur numérique de la tension d'erreur  $\epsilon_p$  pour  $\theta = 18,2^\circ$  puis pour  $\theta = 72,8^\circ$ .
- C.4.** Interpréter physiquement les résultats obtenus à la question C.3.
- C.5.** Quelle serait la conséquence d'une augmentation du coefficient d'amplification  $K$  sur l'asservissement puis sur l'ensemble du dispositif d'orientation des pales ?

**Document Réponse N°1 à rendre avec la copie**

Spectre en valeurs efficaces de  $v_2$



## Document Réponse N°2 à rendre avec la copie

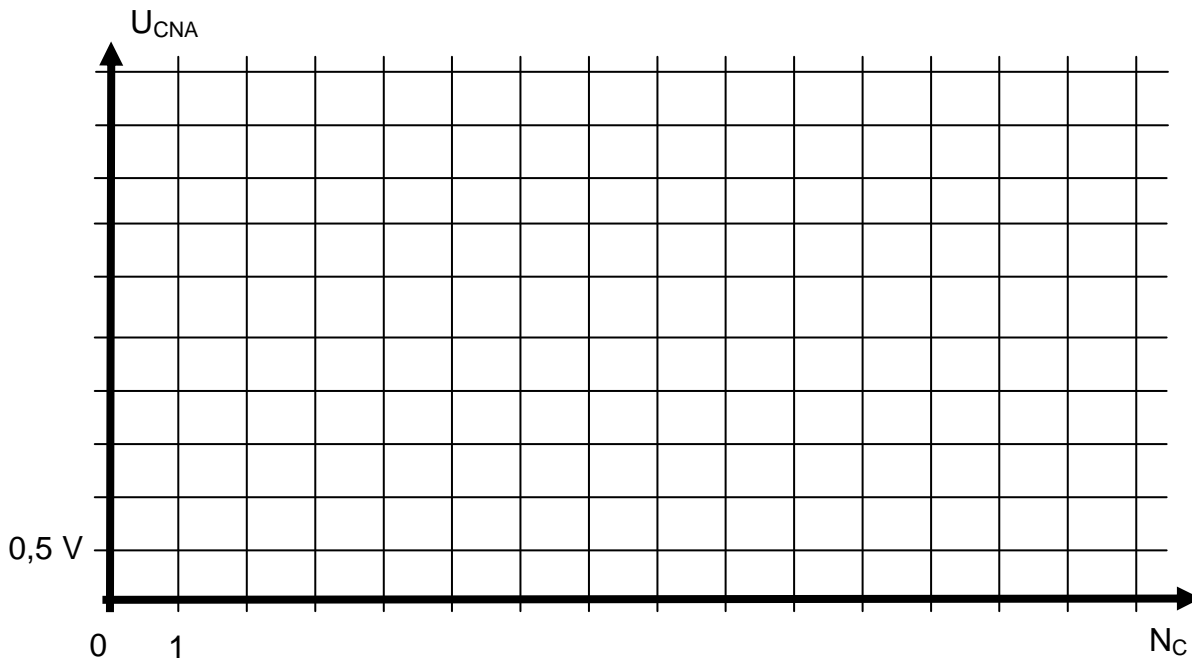


## Document Réponse N°3 à rendre avec la copie

Tableau de données

$\theta$ (en degré)	$a_3 a_2 a_1 a_0$	$N_c$ (décimal)	$U_{CNA}(V)$
0	0000	0	0
6,06	0001	1	0,312
12,13	0010	2	
18,2	0011	3	0,938
24,27	0100	4	1,250
30,33	0101	5	1,563
36,44	0110	6	1,875
42,46	0111	7	
48,53	1000	8	2,5
54,6	1001	9	2,813
60,67	1010	10	3,125
66,73	1011	11	3,438
72,8	1100	12	3,75
78,87	1101	13	4,063
84,93	1110	14	4,375
91	1111	15	

Caractéristique du CNA



**Document Réponse N°4 à rendre avec la copie**

