

Question 31 : y-a-t-il risque de résonance ? Dans quelles conditions faut-il arrêter l'éolienne ?

6. OPTIMISER LA CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE »

Objectif : vérifier s'il est possible d'envisager l'asservissement de position de chacune des pales au cours de la rotation afin d'optimiser la production de l'éolienne, sachant que le couple disponible sur l'axe du rotor de l'éolienne dépend de l'angle que font les pales par rapport à la direction du vent apparent (voir début de l'étude).

Pour réaliser l'orientation des pales on utilise des moteurs à courant continu dont les équations sont rappelées ci-dessous :

$$u = ri + l \frac{di}{dt} + K\Omega \quad (1)$$

$$C_m = Ki \quad (2)$$

$$E = K\Omega \quad (3)$$

Où l et r sont respectivement l'inductance et la résistance rotorique, C_m le couple moteur,

$\Omega = \frac{d\theta}{dt}$ la vitesse de rotation du moteur et E la force contre électromotrice.

Le repère $(G, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z})$ est lié au bâti, le repère $(G, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z})$ est lié au rotor de l'éolienne et le repère $(G, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z})$ est lié à la pale. On note $\vec{\Omega}_{10} = \omega_{10} \vec{z}$ la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne et $\vec{\Omega}_{21} = \omega_{21} \vec{z} = \Omega \vec{z}$ la vitesse du rotor du moteur à courant continu par rapport au stator.

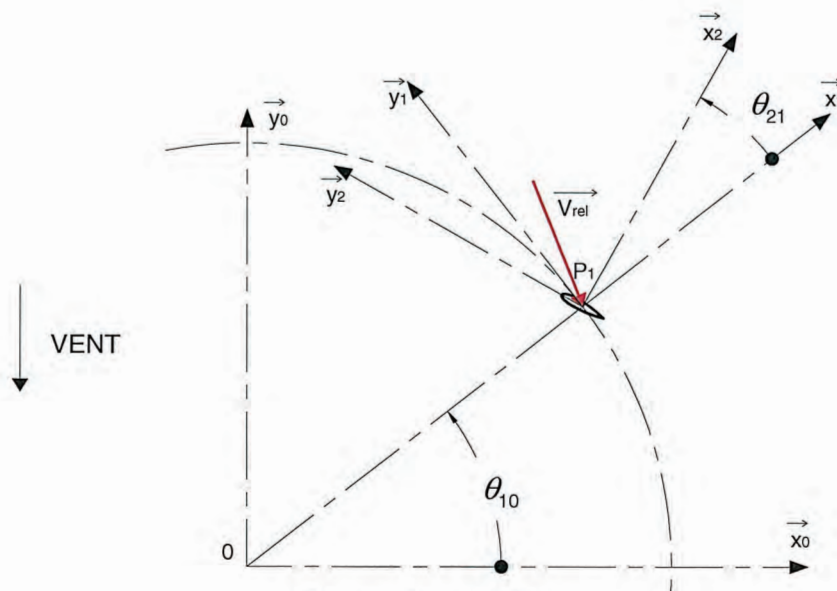


Figure 15 : repères

Question 32 : montrer sous l'hypothèse de l'équilibrage dynamique de l'ensemble tournant que le théorème du moment dynamique appliqué au rotor du moteur à courant continu

s'écrit $J \frac{d^2\theta}{dt^2} = Ki - f\Omega$. Préciser les hypothèses qui conduisent à cette modélisation.

On définit :

- J , inertie équivalente de l'ensemble tournant ramené au moteur ;
- f , coefficient de frottement visqueux.

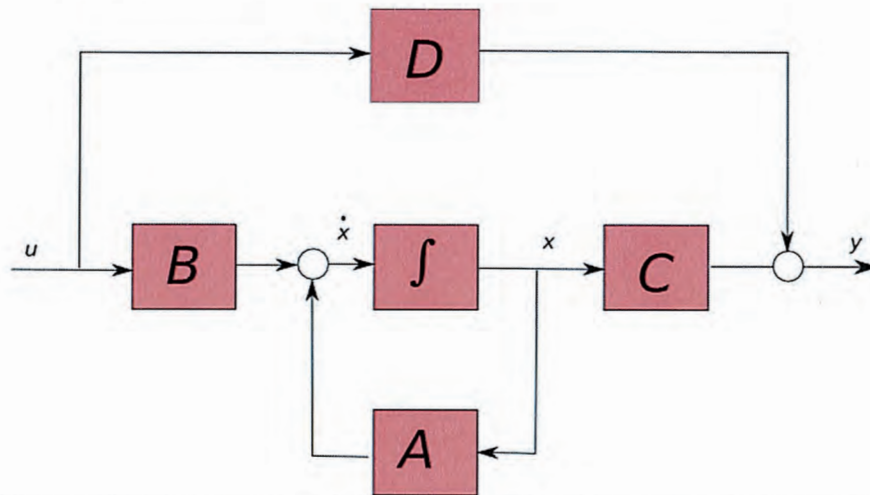


Figure 16 : forme canonique du modèle d'état en boucle ouverte

On pose $x_1 = \Omega = \frac{d\theta}{dt}$. Le vecteur d'état X est défini par $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ i \\ \theta \end{bmatrix}$. Par ailleurs on

supposera dans toute la suite du problème que les conditions initiales sont nulles, c'est à dire que le vecteur $X(0) = X_0 = [0]$.

Question 33 : montrer que l'on peut mettre le modèle du système sous la forme

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (4)$$

$$\text{avec } A = \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & \frac{K}{J} & 0 \\ -\frac{K}{I} & -\frac{r}{I} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ I \end{bmatrix}$$

La sortie du système s'écrit sous la forme : $y = CX + Du \quad (5)$

Question 34 : quelle est la grandeur de sortie du système ? En déduire les matrices C et D .

Question 35 : appliquer la transformation de Laplace aux équations 4 et 5 et montrer que $Y(p) = [C(pI - A)^{-1}B + D]U(p)$ où I est la matrice unité d'ordre 3. Exprimer $H(p) = \frac{Y(p)}{U(p)}$

fonction de transfert du système en boucle ouverte.

Question 36 : montrer que les pôles de la fonction de transfert en boucle ouverte du système sont les valeurs propres de A . Calculer ces pôles. Que peut-on en conclure sur la nature du système en boucle ouverte?

6.2. Commande du système par retour d'état

Le système est maintenant bouclé comme indiqué sur la figure ci-dessous :

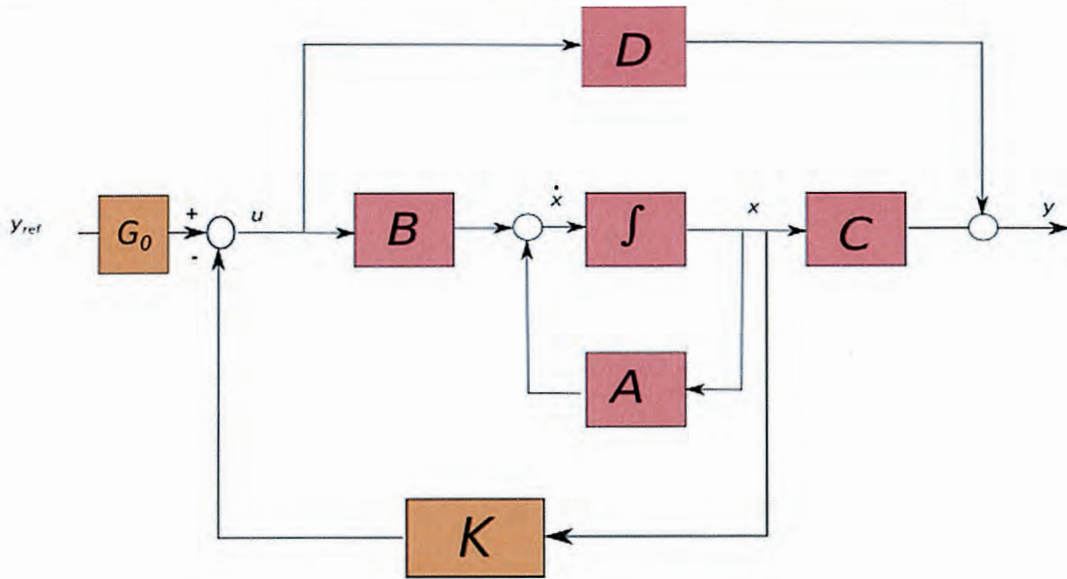


Figure 17 : modèle d'état du système en boucle fermée

On cherche à déterminer le gain de retour d'état $K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}$ et le gain G_0 tels que

$$u(t) = G_0 y_{ref}(t) - [K]^T X(t)$$

afin d'obtenir une réponse satisfaisante du système en boucle fermée.

Dans l'espace d'état, une commande classique consiste à mesurer l'état du système (vecteur $X(t)$) puis à l'aide d'un gain de retour d'état K à produire une contre réaction permettant de placer les pôles du système en boucle fermée dans le plan complexe. Ainsi, en imposant la position des pôles, on peut régler la dynamique du système.

Question 37 : déterminer la fonction de transfert en boucle fermée du système, la mettre sous la forme $\dot{X} = A_{BF} X + B_{BF} y_{ref}$.

Question 38 : on souhaite qu'en régime permanent $\theta_\infty = y_{ref}$. Déterminer G_0 en fonction de K_3 et des paramètres du système.

Question 39 : on suppose que le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée du système peut se mettre sous la forme $D(p) = (p - r_0)(p - p_1)(p - \overline{p_1})$, r_0 est un réel et p_1 est une racine complexe telle que $p_1 = r_1 + ic_1$. Déterminer r_0 et p_1 .

Question 40 : choisir à l'aide des différentes simulations proposées sur la figure 18 les pôles correspondants à la réponse la plus satisfaisante. Par ailleurs, on souhaite que le temps de réponse à un échelon soit de l'ordre de 0,1s. En déduire les valeurs de K_1 , K_2 et K_3 .

Pôles	Réponse 1	Réponse 2	Réponse 3	Réponse 4
r_0	-1	-2	-0,5	-1
p_1	$-1+j$	$-1+j$	$-1+j$	$-0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$
$\overline{p_1}$	$-1-j$	$-1-j$	$-1-j$	$-0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

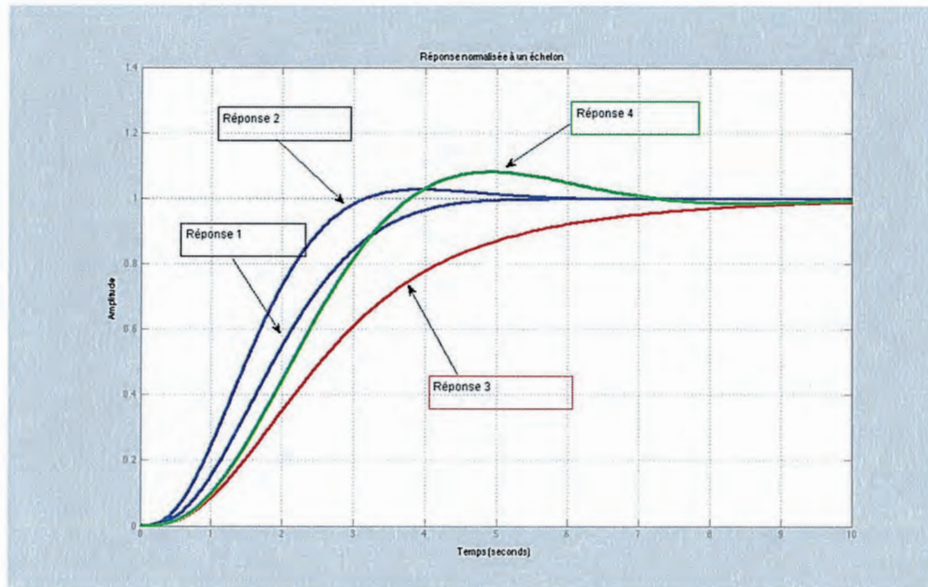


Figure 18 : réponse normalisée pour différents placements de pôles

Question 41 : au vu des résultats de cette étude, conclure sur la faisabilité de la commande des pales de l'éolienne.

7. CONCLUSION GÉNÉRALE

Le rendement global d'une installation éolienne est caractérisé par le coefficient de puissance C_P défini par le rapport entre la puissance électrique réellement produite et la puissance théorique du vent qui traverse l'éolienne.

Question 42 : calculer la puissance éolienne théorique qui est la puissance liée à l'énergie cinétique de la colonne d'air de masse m se déplaçant à la vitesse $V = 10 \text{ m.s}$ et qui traverse le rotor de l'éolienne d'une surface $S = 64 \text{ m}^2$.

Question 43 : si on retient une puissance électrique produite égale à 10 kW, en déduire C_P , coefficient de puissance de l'éolienne.

Question 44 : quels sont les ordres de grandeur des rendements d'une installation hydroélectrique, d'une installation photovoltaïque, d'une installation solaire thermique ? Comparer avec le rendement de l'éolien.

Question 45 : déterminer la masse du mât et la masse de la fondation, puis calculer le bilan carbone de l'installation de l'éolienne.

Désignation	Quantité	Bilan Carbone en kg CO ₂ par kg	Bilan Carbone en kg de CO ₂
Éolienne	1	-	3 500 kg
Mât en acier(7850 kg/m ³)		1,31 kg CO ₂ / kg	
Fondation en béton armé (2500 kg/m ³)		0,121 kg CO ₂ / kg	
Total			

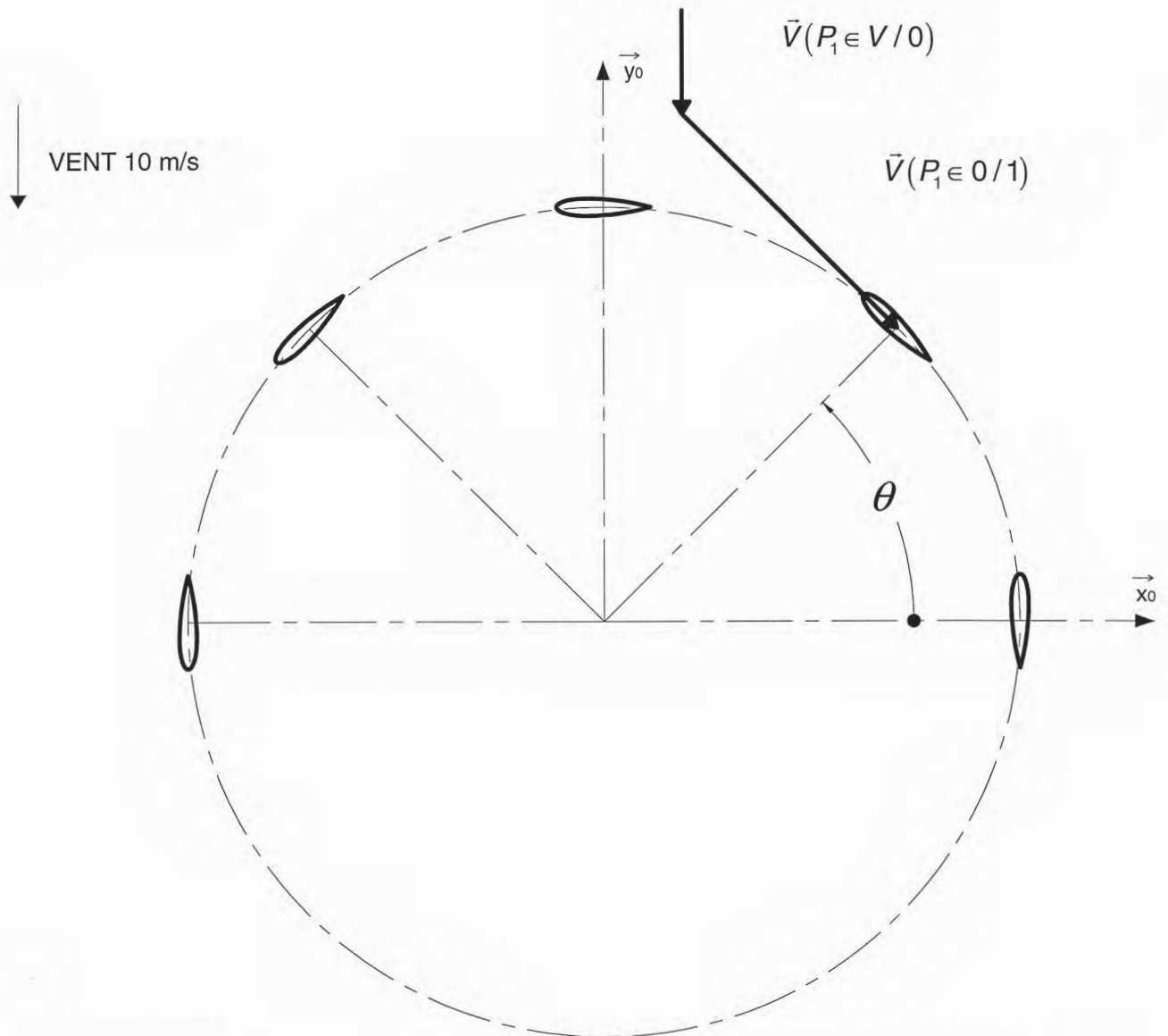
Question 46 : pour une durée de vie de l'éolienne de 20 ans et une production d'énergie annuelle estimée à 35 000 kWh, calculer les émissions en kg de CO₂ pour 1 kWh produit. Comparer avec les énergies fossiles.

Production de 1 kWh avec	Émission correspondante en kg de CO ₂
Charbon	0,75 kg
Mazout	0,60 kg
Gaz	0,35 kg

Document réponse DR1

Vitesse de rotation de l'éolienne $\omega_{10} = \dot{\theta} = 70 \text{ tours / min}$

Rayon de l'éolienne $R = 4 \text{ m}$. Vitesse de vent $V = 10 \text{ m / s}$



Position Pale θ	0°	45°	90°	135°	180°
Angle d'incidence α					
Vent relatif V_{rel}					
Coefficient $C_x(\alpha)$	0	0,8	0,85	0,9	0
Portance $R_x \text{ (N)}$					
Coefficient $C_y(\alpha)$	0,02	0,06	0,22	0,18	0,02
Trainée $R_y \text{ (N)}$					
$\ \vec{R}(V \rightarrow P)\ \text{ (N)}$					