

## Exercice : (Barème : 4/20)

On étudie un système composé d'un pont diviseur figure (a) dont la sortie alimente un montage à amplificateur linéaire figure (b).

### Partie A : Le diviseur de tension

Le circuit ci-dessous est alimenté par une tension continue  $E = 12 \text{ V}$ .

Les résistances sont  $R_1 = 100 \Omega$  et  $R_2 = 300 \Omega$ .

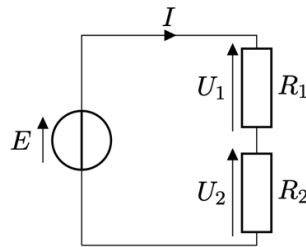


Figure a : Pont diviseur de tension

**P1.** Déterminer la résistance équivalente  $R_{eq}$  du circuit, calculer l'intensité  $I$  du courant.

**P2.** Donner l'expression littérale de la tension  $U_2$  en fonction de  $E$ ,  $R_1$  et  $R_2$ , calculer la tension  $U_2$ .

### Partie B : L'amplificateur opérationnel

On utilise la tension  $U_2$  comme tension d'entrée  $V_e$  d'un montage à A.L.I. idéal en régime linéaire. Données :  $R_e = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_f = 6 \text{ k}\Omega$ .

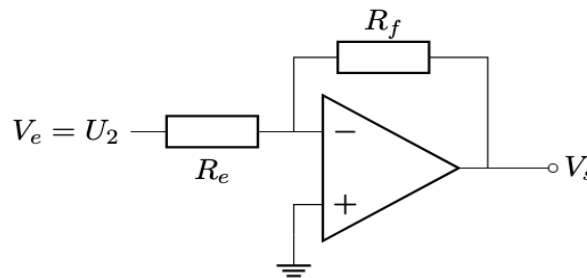


Figure b : Montage amplificateur inverseur

**P3.** Rappeler les deux propriétés d'un A.L.I. idéal en régime linéaire concernant les courants d'entrée ( $i^+$ ,  $i^-$ ) et la tension différentielle  $\varepsilon = V^+ - V^-$

**P4.** Montrer que la tension de sortie s'exprime par :  $V_s = \alpha V_e$ . Exprimer  $\alpha$  en fonction des résistances

**P5.** En déduire la valeur numérique de  $V_s$  à partir de la valeur de  $U_2$  trouvée en question 2.

# CHAÎNE DE TRACTION ÉLECTRIQUE

Modélisation, Acquisition et Commande d'un Système de Levage

## Partie 1 : Étude préliminaire

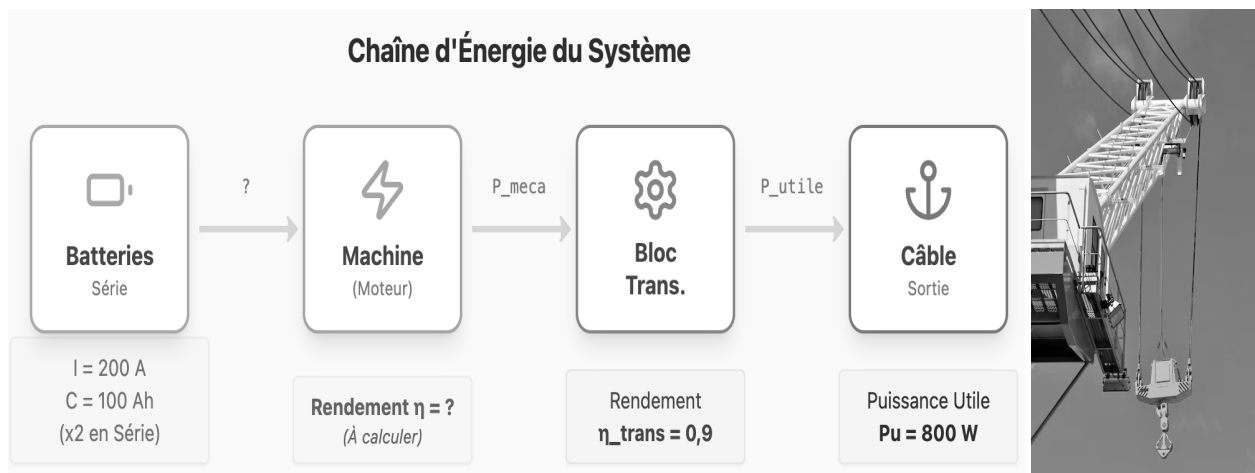


Figure 1 - Vue d'ensemble du système étudié

- Accélération de la pesanteur :  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .
- Les calculs doivent faire apparaître la formule littérale avant l'application numérique.

**Q1.** Le moteur du treuil est alimenté sous une tension continue de  $U = 24 \text{ V}$ . Lors d'un essai en charge, on mesure une intensité  $I = 50 \text{ A}$ .

Calculer la puissance électrique absorbée par le moteur à courant continu.

**Q2.** Le treuil soulève une charge de masse  $M = 400 \text{ kg}$  à une vitesse constante de  $v = 20 \text{ cm/s}$ .

Calculer d'abord la force de levage  $F$ , puis la puissance mécanique utile nécessaire.

**Q3.** La puissance mécanique utile disponible sur le câble est de  $800 \text{ W}$ . Calculer le rendement  $\eta$  de la machine, sachant que le rendement du bloc de transmission mécanique est de  $0,9$

**Q4.** Le système est alimenté par deux batteries montées en série de capacité  $Q=100 \text{ Ah}$ . Lors d'un fonctionnement intensif, le courant consommé est de  $200 \text{ A}$ .

Calculer l'autonomie théorique  $t$  (en heure) du système.

## Sujet : Présentation du système

Le système étudié est un treuil industriel de grande puissance destiné aux applications de levage industriel. Il est entraîné par une machine asynchrone (MAS) pilotée par un variateur de vitesse. Ce variateur est constitué d'un redresseur et d'un onduleur. L'ensemble est complété par un système d'acquisition permettant la mesure et le suivi des grandeurs électriques et mécaniques du dispositif.

### Données Techniques :

- **Réseau** : Triphasé 380 V (tension composée  $U_{res}$ ), 50 Hz.
- **MAS** :  $P_u = 11kW$ , 4 pôles, 220V/380V,  $N_n = 1440tr/min$ .
- **Vitesse maximale mécanique** :  $N_{max} = 1500 tr/min$ .

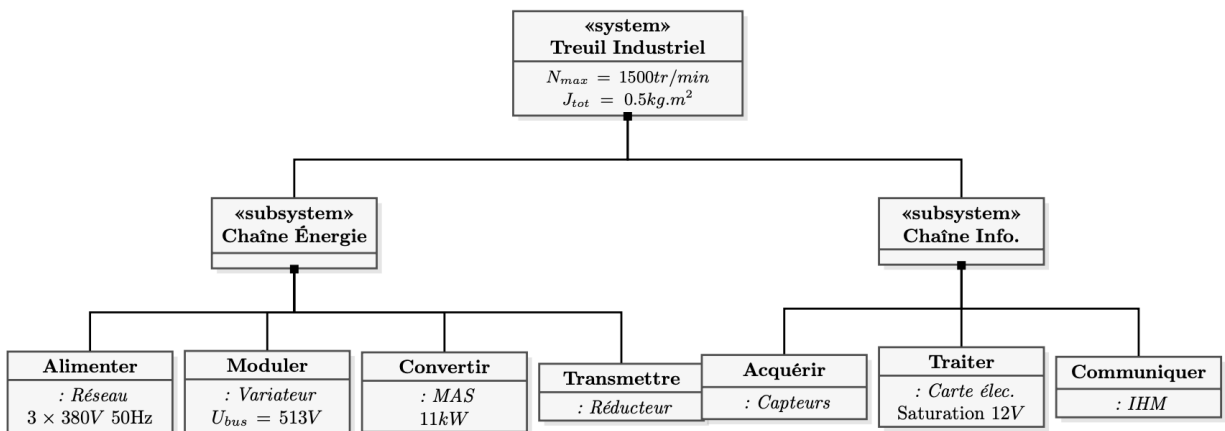


Figure 2 - Diagramme de Définition de Blocs (BDD)

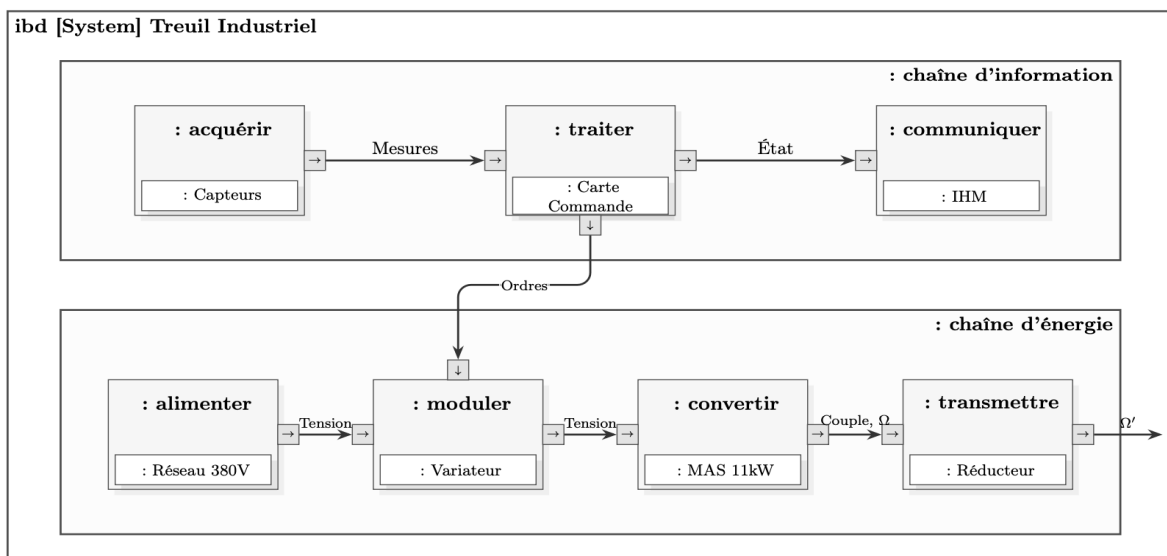


Figure 3 - Diagramme de Bloc Interne (IBD)

## Partie 2 : Étude de la motorisation asynchrone

L'objectif de cette partie est d'établir le modèle de la machine pour prédire son couple maximal pour l'application de levage.

Le schéma équivalent par phase ramené au stator est donné ci-dessous (modèle simplifié) :

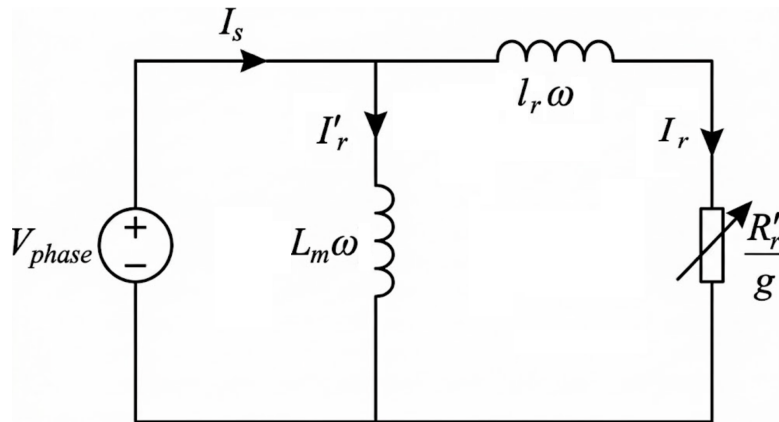


Figure 4 - Schéma équivalent par phase de la machine asynchrone

Avec :  $V_{phase} = V$  la tension simple,  $l_r\omega = 2.95\Omega$ ,  $R'_r = 0.5\Omega$ .

- Q5.** Pour le point nominal, calculer la valeur du glissement nominal  $g_n$ .
- Q6.** Calculer le couple utile nominal  $C_n$  développé par le moteur.
- Q7.** Exprimer la valeur efficace du courant rotorique  $I_r$  en fonction de la tension  $V$ .
- Q8.** Montrer que l'expression théorique du couple  $C_{em}$  est :

$$C_{em} = \frac{3V^2}{\Omega_s} \cdot \frac{\frac{R'_r}{g}}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (l_r\omega)^2}$$

- Q9.** Exprimer le glissement  $g_{max}$  qui correspond au couple max, en fonction de  $R'_r$  et  $l_r\omega$ .
- Q10.** Calculer la valeur numérique de ce glissement  $g_{max}$  et du couple maximal  $C_{max}$

## Partie 3 : Onduleur de tension triphasé

Le moteur asynchrone est alimenté par un onduleur à IGBT. Cette partie analyse la conversion de l'énergie continue en énergie alternative pour piloter la vitesse du moteur asynchrone.

La tension du bus continu est  $V_{DC} = 513V$ .

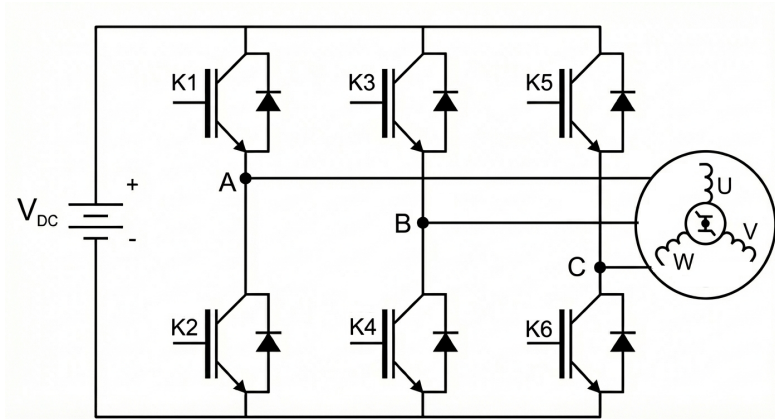


Figure 5 - Schéma de l'onduleur triphasé connecté à la machine asynchrone

### Commande Pleine Onde :

K1 est fermé sur  $[0, T/2]$ , K2 est fermé sur  $[T/2, T]$ .

Sachant que la commande de bras B est décalée de  $T/3$  ( $120^\circ$ ).

- Q11.** Tracer dans le **document réponse 1** (page 12) l'allure des tensions simples  $v_{A0}$  et  $v_{B0}$  (référencées au 0V du bus qui correspond à la borne - de  $V_{DC}$ ).
- Q12.** Tracer dans le **document réponse 1** (page 12) l'allure de la tension composée  $u_{AB}(t)$
- Q13.** Exprimer la valeur efficace de la tension composée  $U_{AB_{eff}}$  en fonction de  $V_{DC}$ .
- Q14.** Calculer cette valeur efficace pour  $V_{DC} = 513V$ .
- Q15.** Pour une commande par modulation de largeur d'impulsion. Quel est son intérêt vis-à-vis des harmoniques de courant ?

## Partie 4 : Redresseur - Conversion AC/DC

Le variateur est alimenté par le réseau triphasé 380V entre phase via un redresseur en pont PD3.

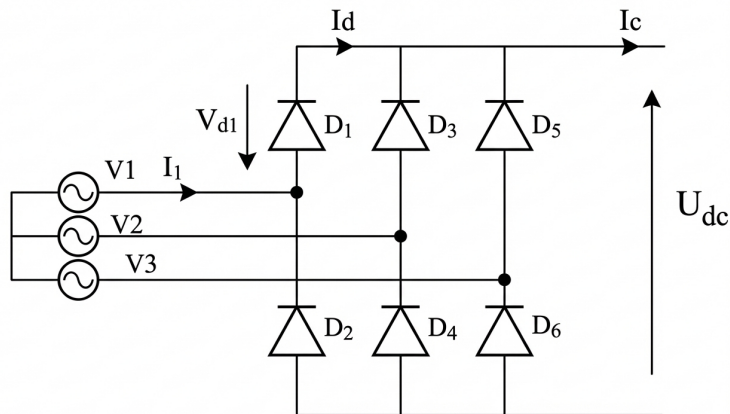


Figure 6 - Schéma de redresseur triphasé

Le pont est alimenté par les trois tensions simples suivantes :

$$V_1 = V_{max} \sin(\theta) \quad V_2 = V_{max} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad V_3 = V_{max} \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$$

- Q16.** Représenter sur le **document réponse 2**, (page 13) l'allure de la tension redressée  $U_{dc}$  en sortie du pont redresseur PD3.
- Q17.** Exprimer la tension moyenne  $\langle U_{dc} \rangle$  en fonction de la tension efficace composée du réseau  $U_{res}$ .
- Q18.** Calculer la valeur de la tension moyenne  $\langle U_{dc} \rangle$ .
- Q19.** Si le moteur absorbe  $11kW$ , calculer la valeur moyenne du courant  $I_c$  débité par le redresseur, en supposant le rendement unitaire.
- Q20.** Représenter, sur le **document réponse 2**, (page 13) la tension  $V_{D1}$  aux bornes de la diode D1 et le courant qui traverse la diode D1.
- Q21.** Représenter sur le même **document réponse 2**, (page 13) l'allure de courant  $i_1(t)$  et son fondamental  $i_f(t)$  de valeur efficace  $I_f = 0,78 I_c$ .

## Partie 5 : Chaîne d'acquisition et asservissement

Cette partie concerne la régulation de vitesse du système. Elle aborde le choix du capteur, le conditionnement du signal et le réglage du correcteur.

L'électronique de commande est alimentée en  $\pm 15V$  et sature si la tension d'entrée dépasse  $12V$ .

### 5.1 Choix du capteur de vitesse

Le bureau d'études hésite entre trois modèles de dynamos tachymétriques :

Référence	DT-Alpha	DT-Beta	DT-Gamma
Constante de FEM ( $k_E$ )	$60 V/1000 tr.min^{-1}$	$6 V/1000 tr.min^{-1}$	$20 V/1000 tr.min^{-1}$
Vitesse Max Mécanique	$4000 tr/min$	$6000 tr/min$	$1200 tr/min$

**Q22.** Critère mécanique : Éliminer une référence qui ne convient pas pour la vitesse maximale du système. Justifier.

**Q23.** Critère électrique : Pour les deux références restantes, calculer la tension délivrée à la vitesse maximale  $1500 tr/min$ . Pour éviter la saturation électrique, quelle référence qui convient au système.

**Q24.** Convertir la constante  $k_E$  du capteur choisi (en  $V/1000tr.min^{-1}$ ) en constante  $k_t$  exprimée en  $V \cdot s/rad$ .

### 5.2 Conditionnement du signal (AOP)

On utilise le montage suivant pour adapter le signal du capteur  $e = k_t \cdot \Omega$ .

Avec  $k_t = 0.057 V \cdot s/rad$ .

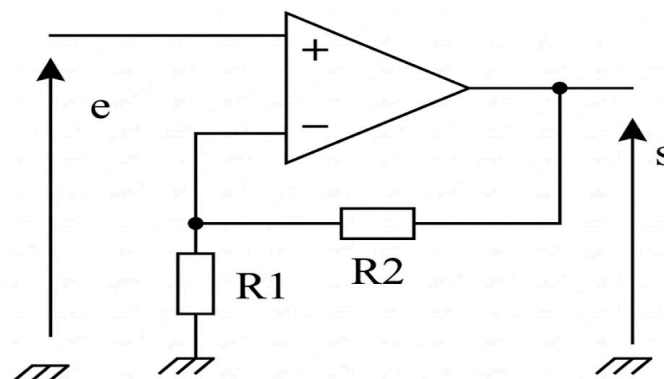


Figure 7 - Amplificateur opérationnel

- Q25.** Exprimer  $s$  en fonction de  $e$  et des résistances  $R_1, R_2$ .
- Q26.** On souhaite calibrer la sortie à  $s = 10.0V$  pour  $N = 1440 \text{ tr/min}$ .  
Calculer le gain  $A = s/e$  nécessaire.

### 5.3 Boucle de régulation de vitesse

Le comportement dynamique du moteur est modélisé par une fonction de transfert du premier ordre :

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_m}{1 + \tau p}$$

Avec  $\tau = 0.5 \text{ s}$  et  $K_m \approx 6.25$ .

La chaîne de retour est constituée du capteur et de l'amplificateur. On note  $K_r$  le gain global de cette chaîne, tel que.  $V_{mesure}(p) = K_r \cdot \Omega(p)$ . avec  $K_r = 0.066$ .

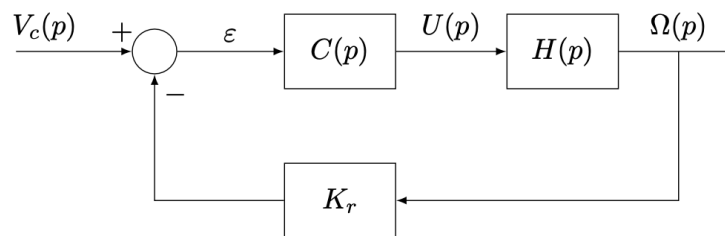


Figure 8 - Schéma fonctionnel de l'asservissement en vitesse

- Q27. Correcteur Proportionnel (P) :** On choisit  $C(p) = K_p$ . On applique une consigne de tension  $V_c = 10 \text{ V}$  qui représente l'image de la vitesse nominale.
- Exprimer l'erreur statique en régime permanent  $\varepsilon$  en fonction de  $V_c, K_p, K_m$  et  $K_r$ .
  - Le système est-il précis ? Justifier.
- Q28. Correcteur PI :** On adopte un correcteur  $C(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right)$ . Avec  $T_i = \tau = 0.5 \text{ s}$  pour compenser le pôle dominant. Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte  $FTBO(p)$ .
- Q29.** Que devient l'erreur statique avec ce correcteur PI ?
- Q30.** Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée  $FTBF(p)$ .
- Q31. Réglage de la dynamique :** On souhaite en boucle fermée un temps de réponse à 5% de  $t_{r5\%} = 0.15 \text{ s}$ . Calculer la valeur du gain proportionnel  $K_p$  nécessaire.

## Partie 6 : Initiation à l'IA Régression et Classification

Le variateur embarque un microcontrôleur IA pour surveiller la température du moteur. Pour prévenir les pannes d'une machine asynchrone, on analyse l'échauffement du stator  $\Delta T$  en fonction du courant  $I$ , avec  $\Delta T = T_{\text{mesurée}} - T_{\text{ambiante}}$ , afin d'obtenir un modèle linéaire.

### 6.1 Estimation par Régression Linéaire - Capteur virtuel

On cherche à estimer l'échauffement du stator  $\Delta T$  (difficile à mesurer directement) en fonction du courant  $I$ . Relevés expérimentaux :

Point	Courant $I$	Échauffement $\Delta T$
A	10 A	18 °C
B	20 A	35 °C
C	30 A	53 °C
D	40 A	70 °C
E	50 A	88 °C

On suppose une relation linéaire :  $\Delta T = a \cdot I + b$ .

**Q32.** Sur le **document réponse 3**, (page 14) tracer le nuage de points et la droite d'ajustement. Déterminer les coefficients  $a$  et  $b$ .

### Implémentation en Python - Apprentissage Supervisé

Un automaticien a rédigé le script ci-dessous pour intégrer ce modèle mathématique dans la supervision.

```

1 import numpy as np
2 from sklearn.linear_model import LinearRegression
3
4 # Donnees de la machine asynchrone
5 Courant = np.array([[10], [20], [30], [40], [50]])
6 Echauffement = np.array([18, 35, 53, 70, 88])
7
8 # Initialisation et apprentissage
9 modele_moteur = LinearRegression()
10 modele_moteur.fit(Courant, Echauffement)
11
12 # Affichage des parametres appris
13 print("Parametre_1:", modele_moteur.coef_[0])
14 print("Parametre_2:", modele_moteur.intercept_)

```

À l'aide du document annexe (page 11) :

- Q33.** Indiquer à quoi correspondent physiquement les termes informatiques `coef_[0]` et `intercept_` pour notre machine.
- Q34.** Le variateur mesure un courant de  $I = 45\text{A}$ . Écrire la ligne de code qu'il faudrait ajouter à ce programme pour prédire l'échauffement correspondant.

## 6.2 Diagnostic par les K-Plus Proches Voisins (KNN)

On souhaite déterminer si le treuil est en état "Normal" ou en "Surcharge".

Base de données d'apprentissage :

- **P1 (Normal)** :  $N = 1400\text{ tr/min}$ ,  $I = 20\text{ A}$ .
- **P2 (Normal)** :  $N = 1410\text{ tr/min}$ ,  $I = 22\text{ A}$ .
- **P3 (Surcharge)** :  $N = 1000\text{ tr/min}$ ,  $I = 80\text{ A}$ .

Nouveau point mesuré :  $M(N = 1405, I = 21)$ .

On utilise la distance Euclidienne simplifiée entre deux points de mesure :

$$d = \sqrt{(N_2 - N_1)^2 + (I_2 - I_1)^2}.$$

- Q35.** Calculer la distance  $d_1$  entre le nouveau point  $M$  et le point  $P1$ .
- Q36.** Comparer qualitativement cette distance avec la distance entre  $M$  et  $P3$  (Surcharge).
- Q37.** Quel est le "plus proche voisin" de  $M$  et quel est l'état du système ?

## DOCUMENT ANNEXE

### Guide d'utilisation de la librairie IA scikit-learn

Pour comprendre comment l'ordinateur crée un modèle mathématique, étudions un exemple totalement différent : **L'estimation de la distance de freinage ( $D$ ) en fonction de la vitesse d'un chariot ( $V$ ).**

L'équation mathématique cherchée est de la forme :  $D = k \cdot V + D_0$  (où  $k$  est la pente et  $D_0$  le point d'origine, à vitesse nulle).

Voici comment un programmeur code cette situation en Python :

```
# 1. Variables : X (la cause/entree) et Y (la consequence/sortie)
Vitesse_X = np.array([[10], [15], [20]])
Distance_Y = np.array([5, 8, 11])

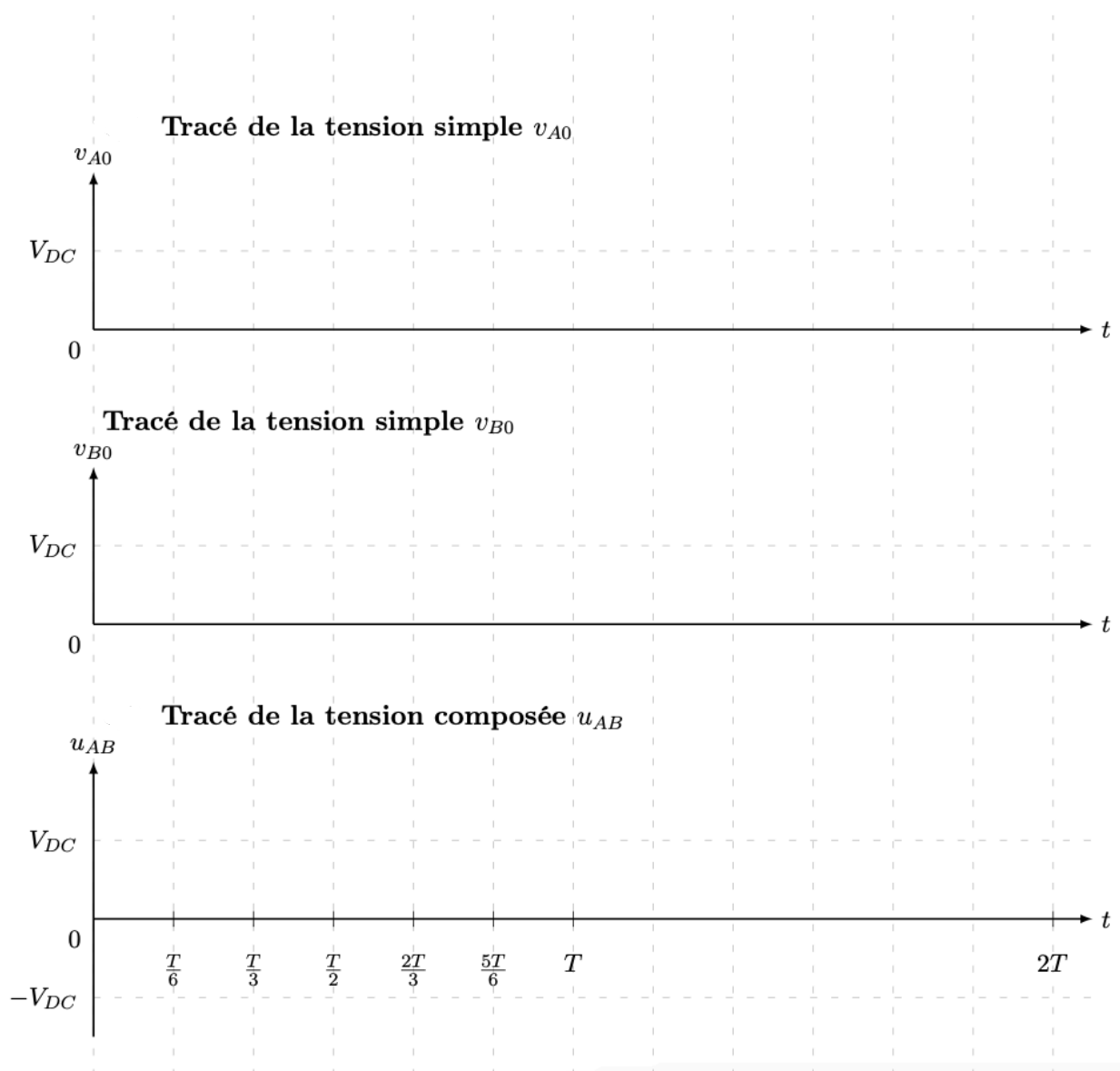
# 2. Apprentissage de la droite (Recherche du meilleur modele)
algorithme = LinearRegression()
algorithme.fit(Vitesse_X, Distance_Y)

# 3. Recuperation de l'equation mathematique D = k*V + D0
valeur_pente_k = algorithme.coef_[0]
valeur_origine_D0 = algorithme.intercept_

# 4. Utilisation du modele pour une nouvelle situation (Prediction)
nouvelle_vitesse = np.array([[18]])
distance_calculée = algorithme.predict(nouvelle_vitesse)
```

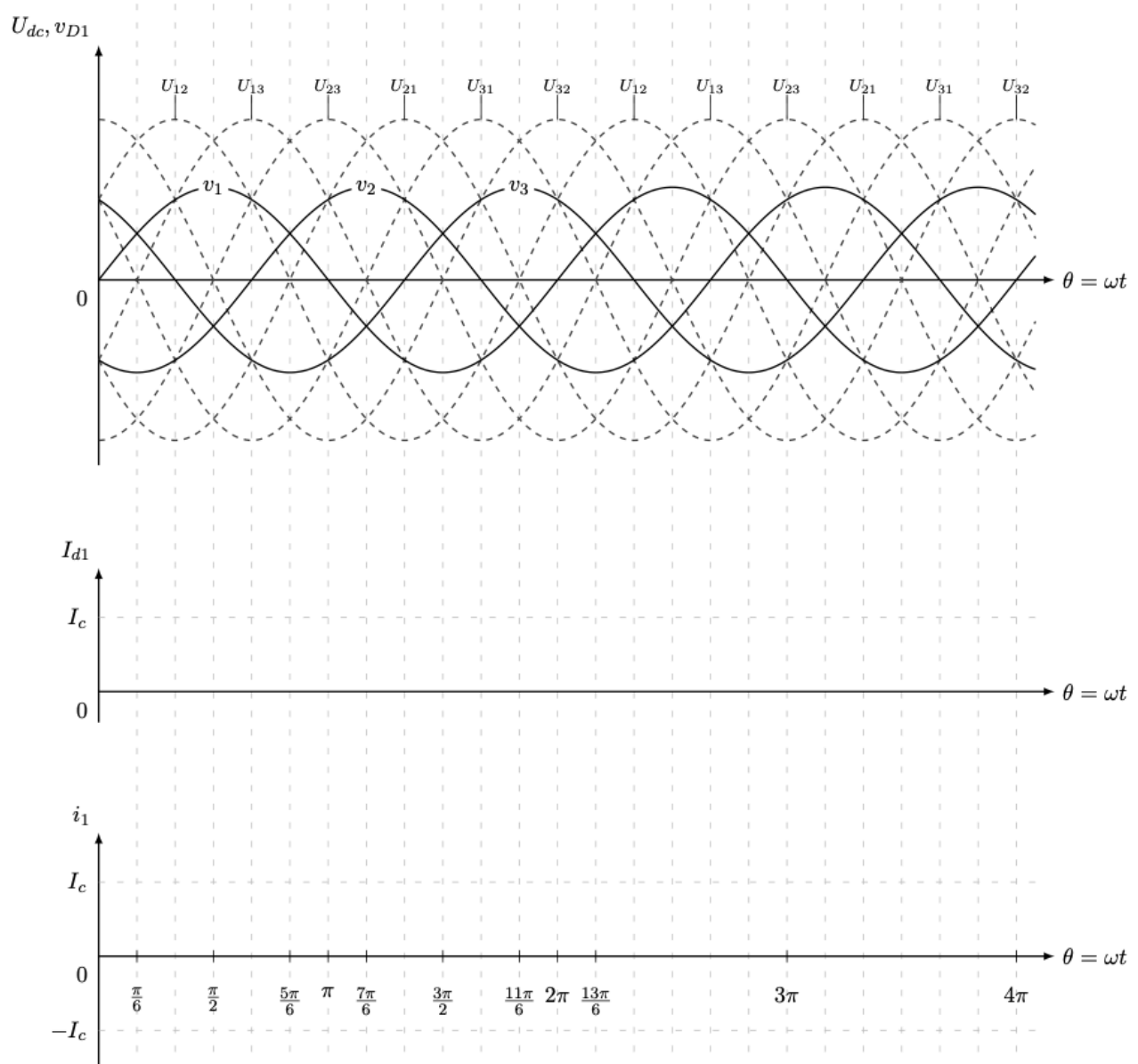
NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT RÉPONSE 1



**NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE**

**DOCUMENT RÉPONSE 2**



NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

### DOCUMENT RÉPONSE 3

GRAPHIQUE (Capteur virtuel) :

