



MEAL MATE

(Robot serveur de repas)

- NOM ET PRÉNOM : MOHAMED AYOUB BALKHOUAR
- PROFESSEUR ENCADRANT : ABDELLAH EL OMARI
- CODE CNC: SF 092T

PLAN DE LA PRÉSENTATION:

Introduction

Objectif 1: choisir le matériau de construction des plateaux.

Objectif 2: Système de déplacement des plateaux.

Objectif 3: Asservissement du moteur de déplacement des plats.

Objectif 4: Système de déplacement du robot.

Objectif 5: L'alimentation convenable pour le robot

1.CONTEXTUALISATION :



Figure 1:Distribution manuelle des repas en milieu hospitalier : un défi logistique



Figure 2:le nombre très grand des patients qui exige un effort énorme du personnel hospitalier

2. PROBLÉMATIQUE :

DE NOS JOURS ET EN RAISON DE TAUX ÉLEVÉ DES MALADES, ET DE LA DIVERSITÉ DES MALADIES, LE BESOIN D'UN ROBOT QUI ASSURE LE DÉPLACEMENT DES PLATEAUX DES MALADES SELON LEURS EXIGENCES S'EST FAIT SENTIR. ALORS COMMENT PEUT-ON ASSURER LA TRANSITION DE CE PROCESSUS(ROBOTISATION DE L'ACHEMINEMENT DES PLATEAUX DES MALADES)?

1. DIAGRAMME DE CAS D'UTILISATION:

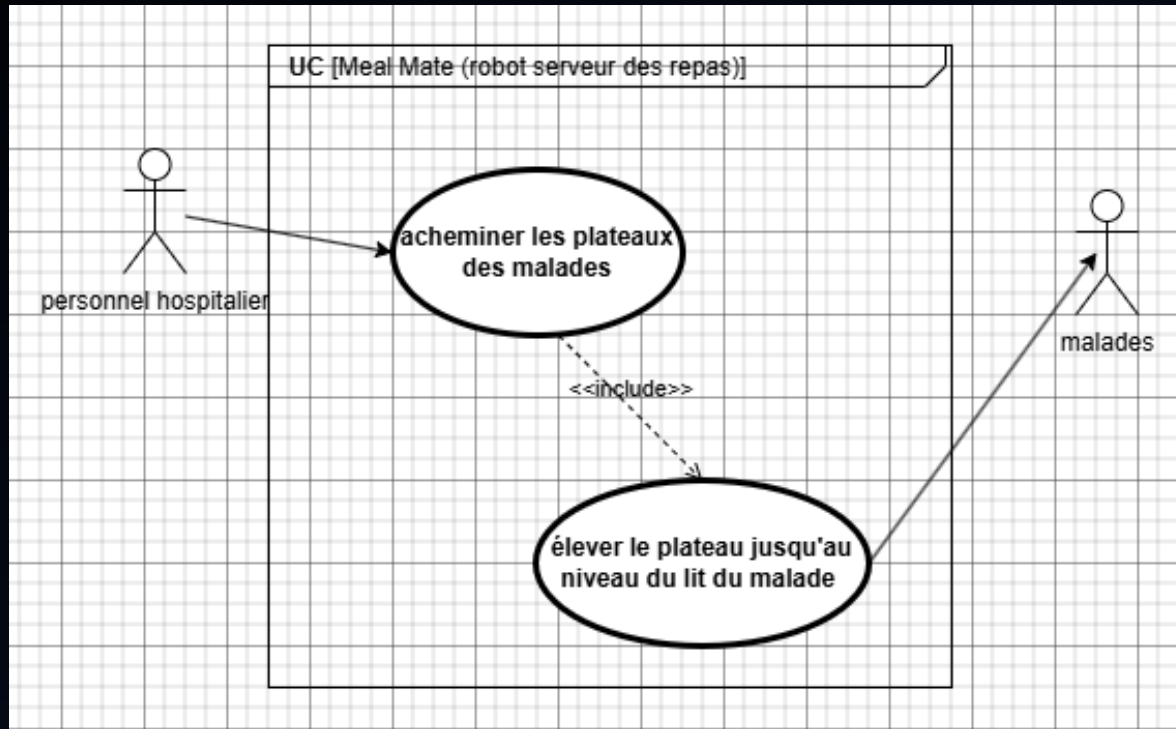


Figure 3 : Diagramme de cas d'utilisation

2. DIAGRAMME DES EXIGENCES:

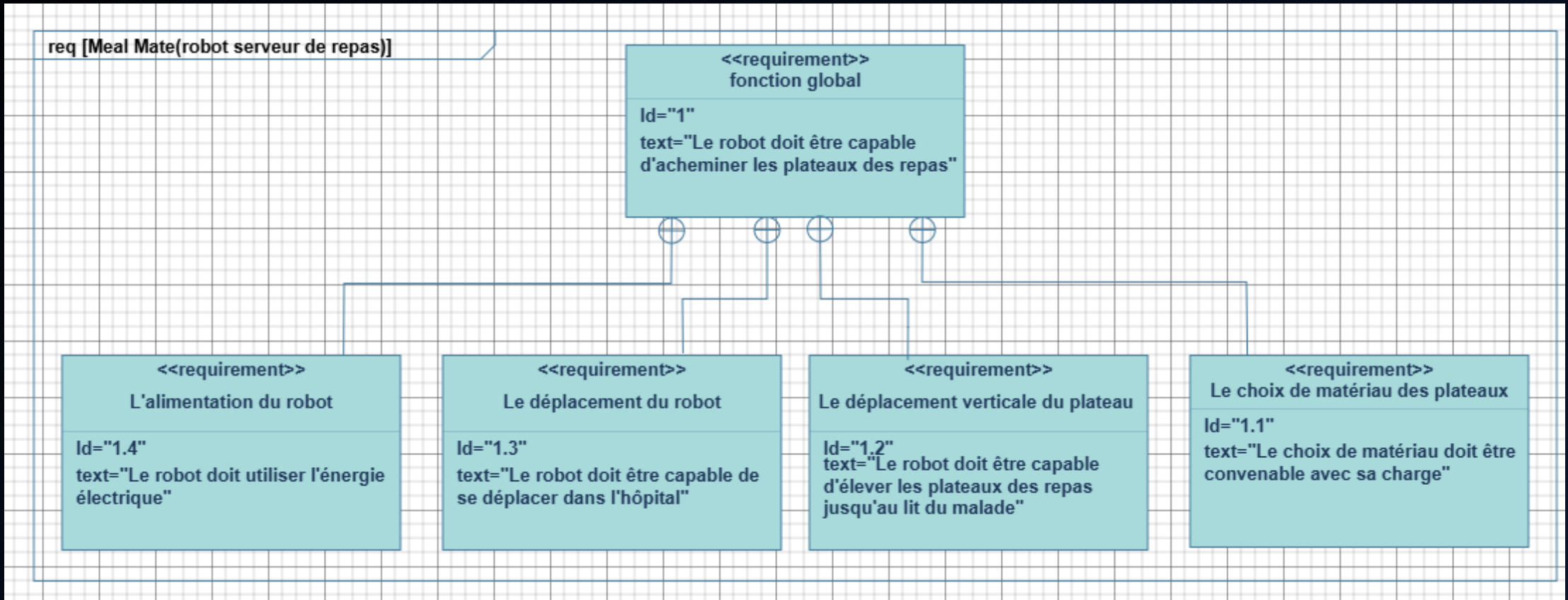


Figure 4 : Diagramme des exigences

2. DIAGRAMME DES EXIGENCES:

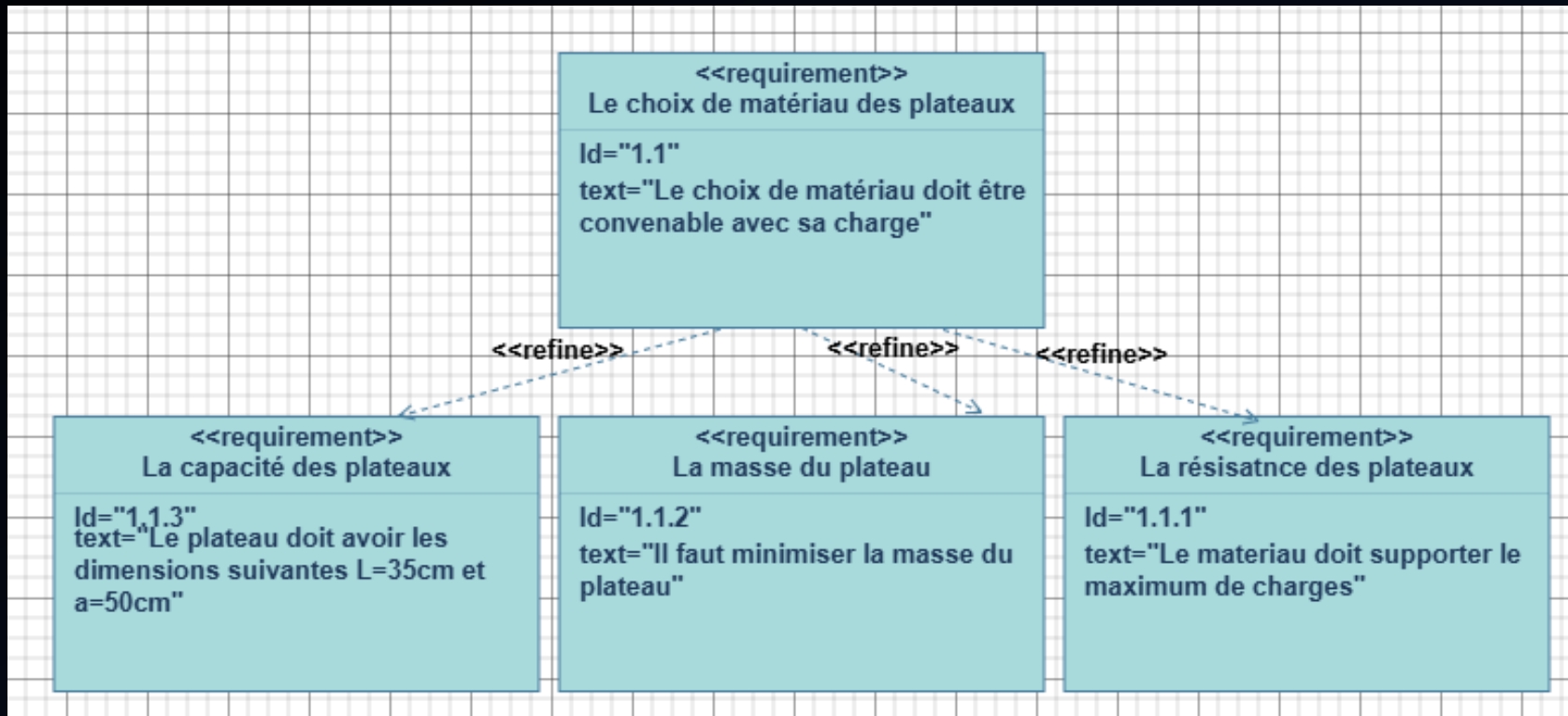


Figure 5 : Diagramme des exigences Id=1.1

2. DIAGRAMME DES EXIGENCES:

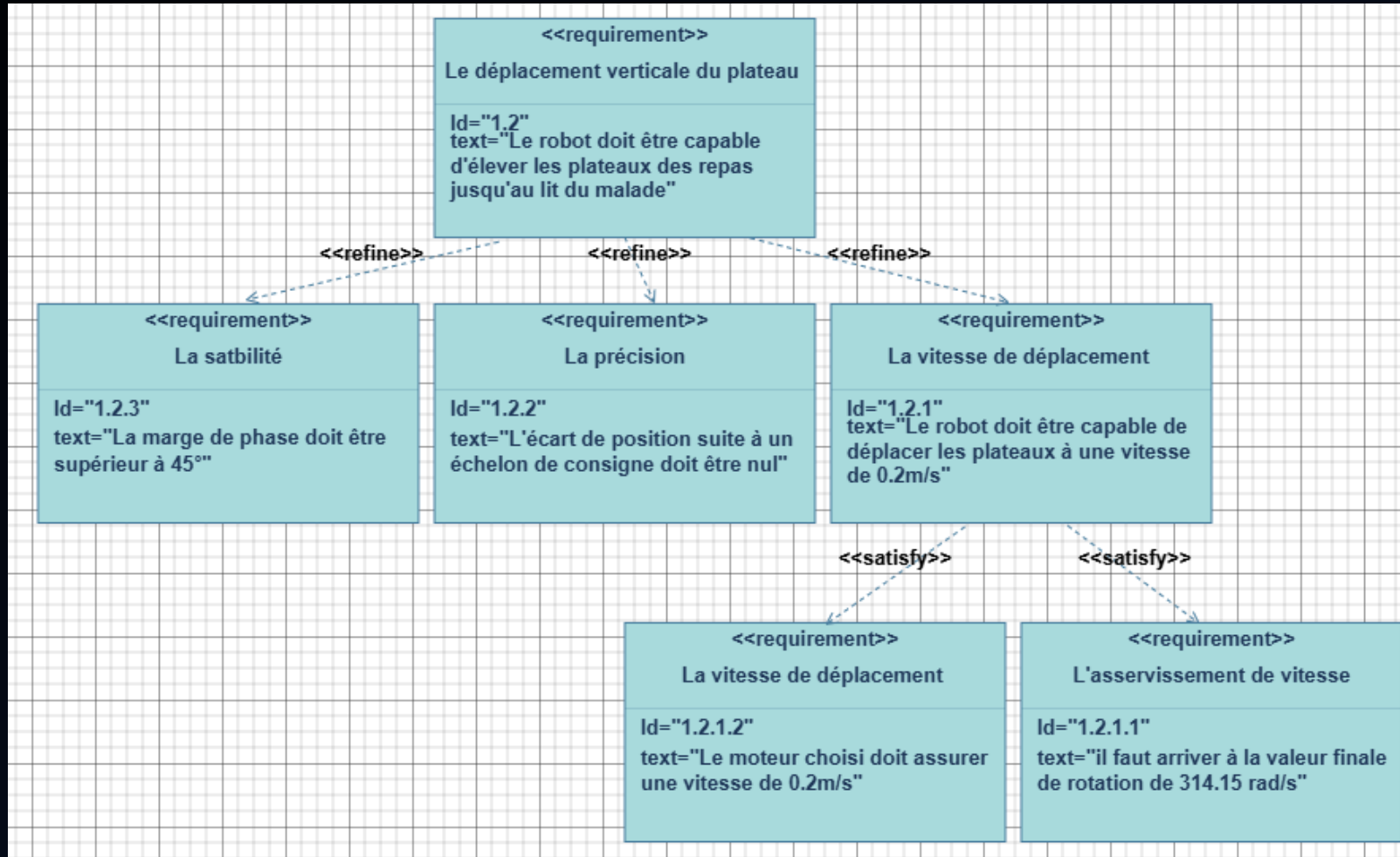


Figure 6 :
Diagramme des
exigences Id=1.2

2. DIAGRAMME DES EXIGENCES:

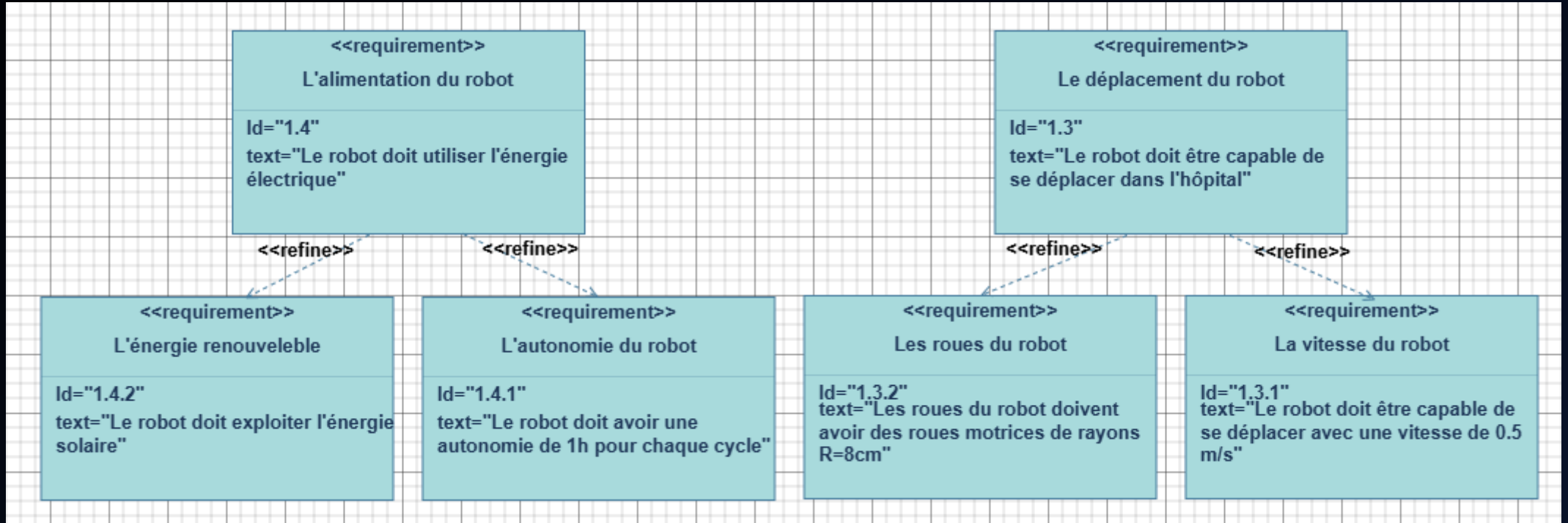


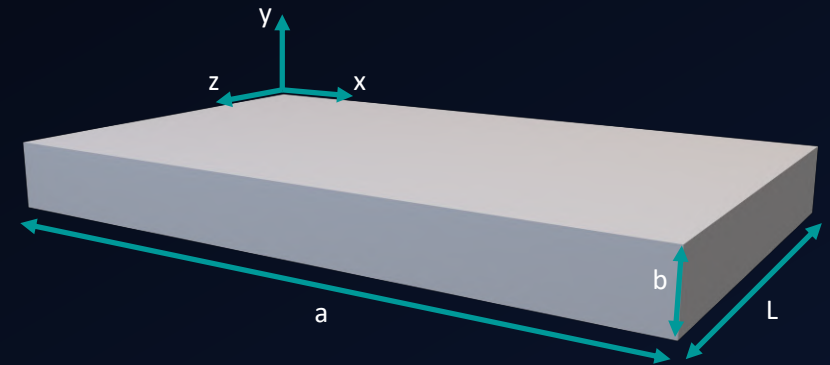
Figure 7 : Diagramme des exigences Id=1.4 et Id=1.3

CHOISIR LE MATÉRIAU DE CONSTRUCTION DES PLATEAUX.

1. PROBLÉMATIQUE
2. MODÉLISATION
3. L'EXPRESSION DU TORSEUR DE COHÉSION
4. CHOIX DE MATÉRIAUX
 - 4.1.OBJECTIF
 - 4.2.INDICE DE PERFORMANCE
 - 4.3.CHOIX DE MATÉRIAUX À PARTIR DU PROGRAMME EN PYTHON
5. DIMENSIONNEMENT DU PLATEAU
 - 5.1. EFFORT TRANCHANT ET MOMENT FLÉCHISSANT
 - 5.1 LES EXPRESSIONS DE LA CONTRAINTE NORMALE MAXIMALE ET b_{MIN}

1. PROBLÉMATIQUE:

On considère le plateau comme une plaque mince de longueur a (50cm), largeur L (35cm) et épaisseur b soumis à des efforts sous l'effet du poids des différents denrées alimentaires. Notre robot conçu pour transporter et servir les patients pour bien, optimiser l'énergie consommée par le robot on doit limiter sa masse .



2.MODÉLISATION:

- P : la résultant des charges répartie extérieure due aux poids des aliments ,de $M_t = 1 \text{ Kg}$.
- $P = M_t \times g = L \times q = 9,81\text{N}$
- La réaction entre le plateau et l'écrou est supposée comme encastrement.
- $L = 35\text{cm}$

- Schéma:

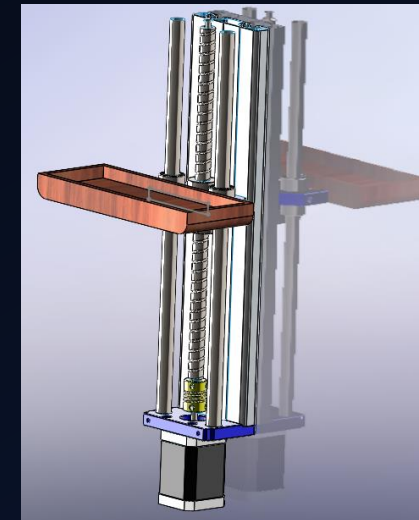
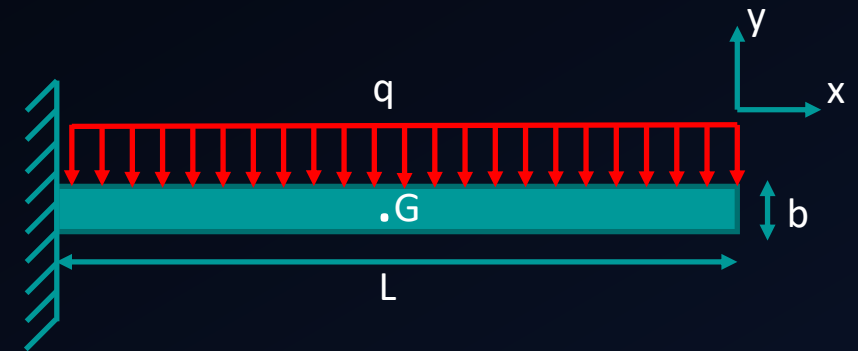


Figure 8 : modèle du plateau en SolidWorks

3. L'EXPRESSION DU TORSEUR DE COHÉSION:

- Détermination du torseur

de cohésion:

- Zone GB:

$$\vec{R} = (-q) \cdot (L - x) \cdot \vec{y}$$

$$\vec{M}_G = \vec{M}_N + \vec{GN} \wedge \vec{R}$$

$$= \vec{0} + \frac{(L-x)}{2} \cdot \vec{x} \wedge (-q) \cdot (L-x) \cdot \vec{y}$$

$$= -q \cdot \frac{(L-x)^2}{2} \cdot \vec{z}$$

- $\{\tau\}_G = \left\{ \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ -q \cdot (L-x) & 0 \\ 0 & -q \cdot \frac{(L-x)^2}{2} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Torseur de Flexion}$



4.1.OBJECTIF

Exigence:	Critère:	Niveau:
Id=1.1.1	La résistance des plateaux.	Le plateau doit supporter le maximum de charges(doit supporter une charge de flexion).
Id=1.1.2	La masse de plateau.	Il faut minimiser la masse «m».
Id=1.1.3	La capacité des plateaux.	Le plateau doit avoir les dimensions suivantes: L=35cm et a=50cm .

4.2. INDICE DE PERFORMANCE

- La contrainte en flexion pour une poutre :

$$\sigma_{\max} = (M_{f_{z\max}} / I_{Gz}) \cdot y_{\max}$$

$$\text{Avec: } I_{Gz} = \frac{L \cdot b^3}{12} \text{ et } y_{\max} = b/2$$

$$\sigma_{\max} = \frac{6 \cdot M_{f_{z\max}}}{L \cdot b^2}$$

- La masse (l'objectif):

$$m = \rho \times v = \rho \times a \times b \times L$$

- La contrainte de résistance:

$$\sigma_{\max} \leq R_e / s$$

- D'où après simplification de calcul:

$$m = \underbrace{(a \times L \times \left(\sqrt{\frac{6 \cdot s \cdot M_{f_{z\max}}}{L}} \right))}_{\text{Paramètres fixe relatifs à la géométrie et à la charge extérieure}} \times \underbrace{\frac{\rho}{R_e^{1/2}}}_{\text{Paramètre relatif au matériau = indice de performance}}$$

- On trouve l'indice de performance :

$$I = \frac{\rho}{R_e^{1/2}}$$

- Donc pour minimiser la masse il faut minimiser l'indice de performance .

4.2.INDICE DE PERFORMANCE

$$I = \frac{\rho}{Re^{1/2}}$$

$$\Rightarrow \log(I) = \log(\rho) - \frac{1}{2} \cdot \log(Re)$$

$$\Rightarrow \log(Re) = 2 \cdot \log(\rho) - 2 \cdot \log(I)$$

- Équation d'une droite de pente $a = 2$:

$$y = ax + b$$

```
66 # Tracer la droite de performance :  $\sigma_e = k * \rho^2$ 
67 rho_range = np.logspace(2, 4, 100) # Masse volumique entre 100 et 10 000 kg/m3
68 sigma_range = k * rho_range**2
69 plt.plot(rho_range, sigma_range, 'r-', linewidth=2, label="Droite de performance (pente = 2)")
70
```

Figure 9 : Code de traçage de la droite de performance

4.3.CHOIX DE MATÉRIAUX À PARTIR DU PROGRAMME EN PYTHON

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 # === 1. Définition des matériaux sous forme de liste ===
5 materials = [
6     ["Acier inoxydable (304)", 8000, 210],
7     ["Acier inoxydable (316)", 8000, 205],
8     ["Aluminium anodisé", 2700, 150],
9     ["Polypropylène (PP)", 900, 25],
10    ["Polycarbonate (PC)", 1200, 60],
11    ["Polyéthylène haute densité (PEHD)", 950, 30],
12    ["Polyéthylène basse densité (PEBD)", 910, 20],
13    ["Polyméthacrylate de méthyle (PMMA - Plexiglas)", 1180, 70],
14    ["Silicone alimentaire", 970, 3],
15    ["Verre trempé", 2500, 50],
16    ["Bambou", 700, 80],
17    ["Hêtre", 720, 110],
18    ["Chêne", 750, 90],
19    ["Acajou", 650, 100],
20    ["Teck", 980, 140]
21 ]
22
```

Figure 10: partie 1 du code python

4.3. CHOIX DE MATÉRIAUX À PARTIR DU PROGRAMME EN PYTHON

```
23 # === 2. Calcul de l'indice de performance :  $I = \rho / \sqrt{\sigma}$  ===
24 for mat in materials:
25     rho, sigma = mat[1], mat[2]
26     indice_performance = rho / np.sqrt(sigma)
27     mat.append(indice_performance) # Ajout de l'indice de performance à la liste
28
29 # === 3. Filtrer les matériaux au-dessus de la droite ( $\sigma > k * \rho^2$ ) ===
30 k = 10**-5 # Constante pour la droite de performance
31 materials_above_line = [mat for mat in materials if mat[2] > k * mat[1]**2]
32
33 # === 4. Sélection des 5 meilleurs matériaux selon l'indice de performance ===
34 top_5 = sorted(materials_above_line, key=Lambda x: x[3], reverse=True)[:5]
```

Figure 11 : partie 2 du code python

4.3. CHOIX DE MATÉRIAUX À PARTIR DU PROGRAMME EN PYTHON

```
35
36 # === 5. Affichage des 5 meilleurs matériaux ===
37 print("\nTop 5 des matériaux situés au-dessus de la droite de performance :\n")
38 for mat in top_5:
39     print(f"{mat[0]} - Indice de performance : {mat[3]:.2f} - Masse volumique : {mat[1]} kg/m3 - Résistance élastique : {mat[2]} MPa")
40
41
42 # === 6. Création du graphique ===
43 plt.figure(figsize=(10, 6))
44
45 # Générer des couleurs pour chaque matériau
46 colors = plt.cm.viridis(np.linspace(0, 1, len(materials)))
47
48 # Dictionnaire pour stocker les labels uniques pour la légende
49 legend_handles = {}
50
51 # Tracer chaque matériau avec une couleur unique et ajouter à la légende
52 for i, mat in enumerate(materials):
53     rho, sigma = mat[1], mat[2]
54     is_top_5 = mat in top_5
55     color = 'red' if is_top_5 else colors[i] # Mettre en rouge les meilleurs matériaux
56     scatter = plt.scatter(rho, sigma, s=80, color=color, edgecolors='k')
57
58     # Ajouter à la légende (évite les doublons)
59     if mat[0] not in legend_handles:
60         legend_handles[mat[0]] = scatter
61
62     # Afficher les noms uniquement pour les matériaux rouges
63     if is_top_5:
64         plt.text(rho * 1.05, sigma, mat[0], fontsize=9)
65
```

Figure 12 : partie 3 du code python

4.3. CHOIX DE MATÉRIAUX À PARTIR DU PROGRAMME EN PYTHON

```
66 # Tracer la droite de performance :  $\sigma_e = k * \rho^2$ 
67 rho_range = np.logspace(2, 4, 100) # Masse volumique entre 100 et 10 000 kg/m3
68 sigma_range = k * rho_range**2
69 plt.plot(rho_range, sigma_range, 'r-', Linewidth=2, Label="Droite de performance (pente = 2)")
70
71 # Mise en forme du diagramme
72 plt.xscale("log")
73 plt.yscale("log")
74 plt.xlabel("Masse volumique (kg/m3)")
75 plt.ylabel("Résistance élastique (MPa)")
76 plt.title("Diagramme d'Ashby : Matériaux pour plateaux alimentaires")
77 plt.grid(True, which="both", linestyle="--", linewidth=0.5)
78
79 # Ajouter la légende en dehors du graphique
80 plt.legend(handles=legend_handles.values(), Labels=legend_handles.keys(), Loc="upper left", bbox_to_anchor=(1, 1), fontsize=8)
81
82 # Ajuster l'affichage pour laisser de la place à la légende
83 plt.tight_layout(rect=[0, 0, 0.8, 1])
84
85 # Sauvegarde et affichage du graphique
86 plt.savefig("diagramme_ashby_plateaux_indices.png", bbox_inches="tight")
87 plt.show()
```

Figure 13 : partie 4 du code python

4.3.CHOIX DE MATÉRIAUX À PARTIR DU PROGRAMME EN PYTHON

Top 5 des matériaux situés au-dessus de la droite de performance :

Aluminium anodisé - Indice de performance : 220.45 - Masse volumique : 2700 kg/m³ - Résistance élastique : 150 MPa
Polyéthylène basse densité (PEBD) - Indice de performance : 203.48 - Masse volumique : 910 kg/m³ - Résistance élastique : 20 MPa
Polypropylène (PP) - Indice de performance : 180.00 - Masse volumique : 900 kg/m³ - Résistance élastique : 25 MPa
Polyéthylène haute densité (PEHD) - Indice de performance : 173.45 - Masse volumique : 950 kg/m³ - Résistance élastique : 30 MPa
Polycarbonate (PC) - Indice de performance : 154.92 - Masse volumique : 1200 kg/m³ - Résistance élastique : 60 MPa

Diagramme d'Ashby : Matériaux pour plateaux alimentaires

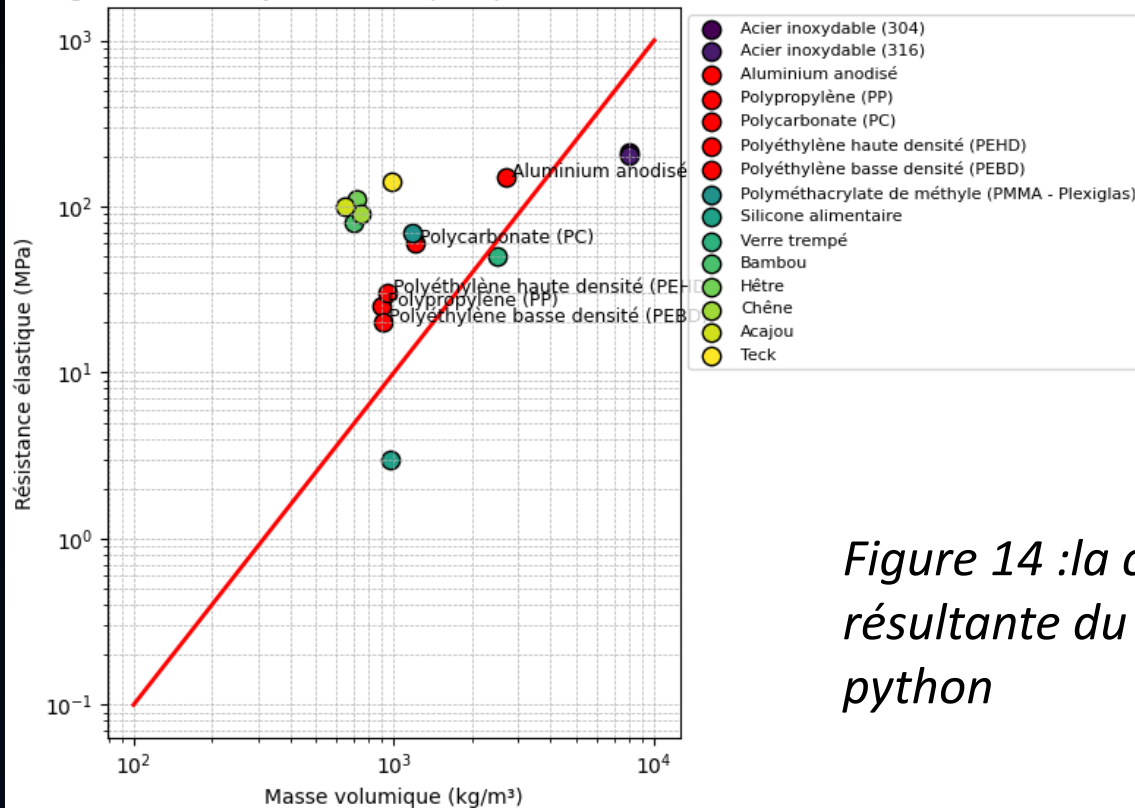


Figure 14 : la courbe résultante du code python

Le matériau choisi est : l'Aluminium Anodisé.

- $I = 220,45$
- $\rho = 2700 \text{ Kg} / \text{m}^3$
- $R_e = 150 \text{ MPa}$

5.1. EFFORT TRANCHANT ET MOMENT FLÉCHISSANT

- Effort tranchant et moment fléchissant:

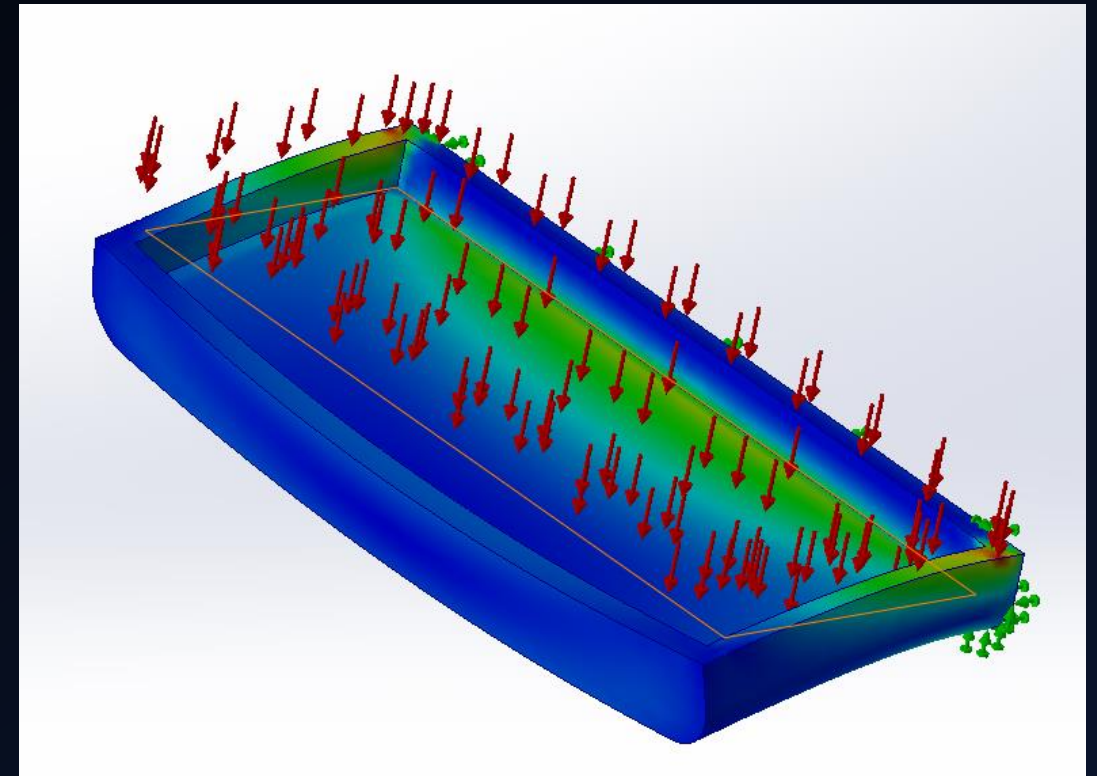
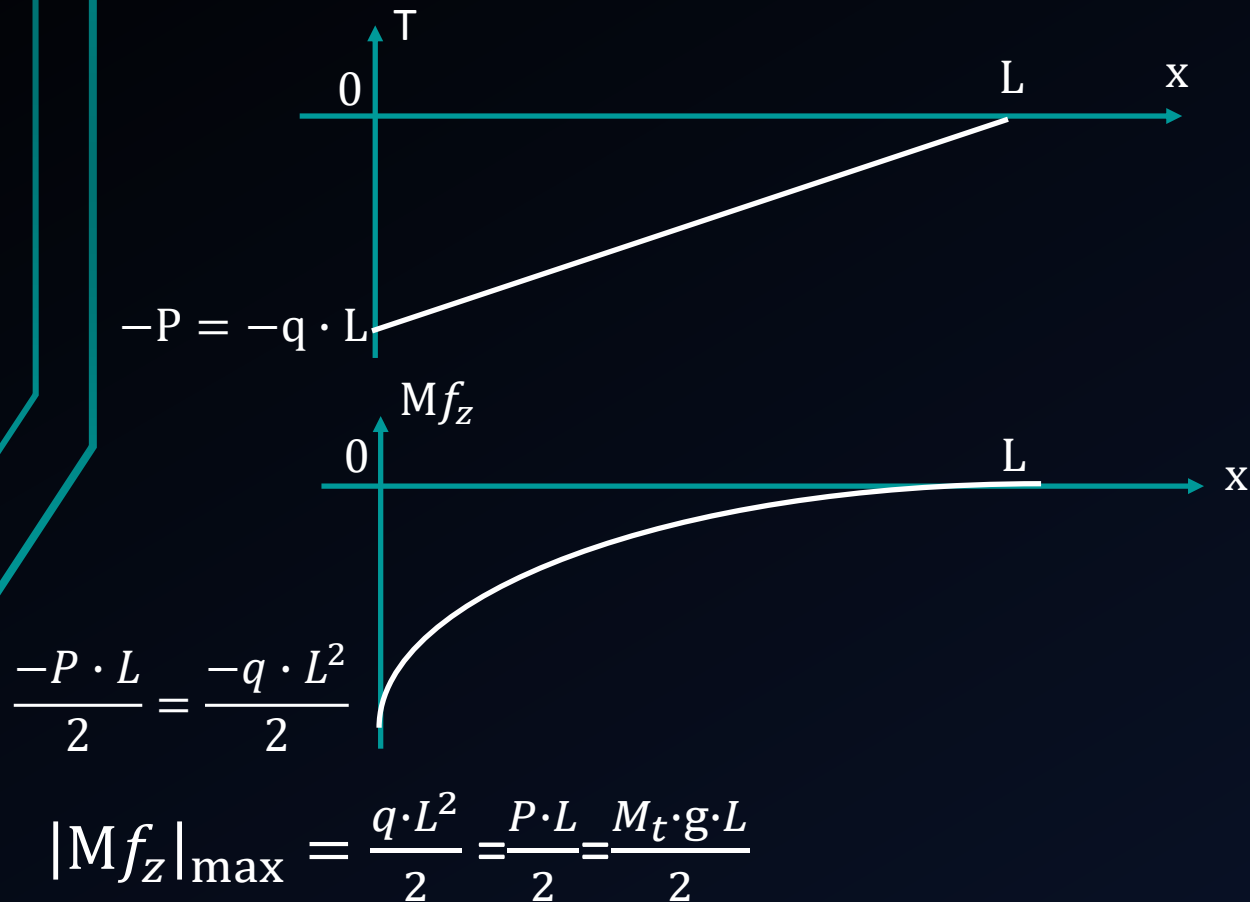


Figure 15 : modélisation des efforts en SolidWorks

5.1 LES EXPRESSIONS DE LA CONTRAINTE NORMALE MAXIMALE ET b_{MIN}

- Condition de résistance:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{max}} = \frac{|M_{fz}|_{\text{max}}}{I_{Gz}} \cdot y_{\text{max}} \\ \sigma_{\text{max}} \leq R_{pe} = R_e/s \end{cases}$$

$$\text{Avec: } I_{Gz} = \frac{L \cdot b^3}{12} \text{ et } y_{\text{max}} = b/2$$

$$\text{Avec: } R_e = 150 \text{ MPa et } s = 5$$


Alors:

$$b \geq \sqrt{\frac{6 \cdot s \cdot M_{fz\text{max}}}{R_e \cdot L}}$$

D'où on choisit :

$$b_{\text{min}} = \sqrt{\frac{6 \cdot s \cdot M_{fz\text{max}}}{R_e \cdot L}} = \sqrt{\frac{3 \cdot s \cdot M_t \cdot g}{R_e}} = 0,99 \text{ mm} \approx 1 \text{ mm}$$

On prend : 1mm



SYSTÈME DE
DÉPLACEMENT DES
PLATEAUX.

1. CAHIER DE CHARGES
2. MÉCANISME
3. CHOIX DE SOLUTION TECHNOLOGIQUE
4. DÉTERMINATION DE VITESSE ET COUPLE DU MOTEUR
5. CHOIX DU MOTEUR

1.CAHIER DE CHARGES:

- On pose le cahier de charges suivant pour essayer de choisir le moteur convenable pour notre robot:

Exigence	Critère	Niveau
Id=1.2.1.2	Vitesse de déplacement des plateaux	$V=0,2\text{m/s}$

2. Mécanisme :

- Le plateau doit être déplacé au niveau de lit du patient en faisant monter l'ascenseur. Ce déplacement est obtenu à partir d'un moteur électrique qui entraîne en rotation une vis, qui engendre ensuite la montée de l'écrou sur lequel est fixé l'ascenseur.

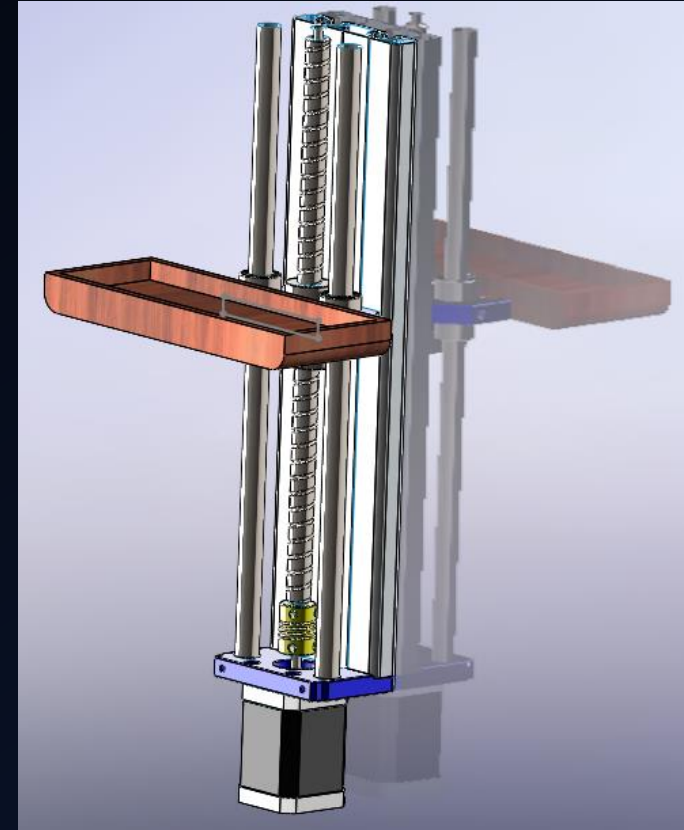


Figure 16 :modélisation du mécanisme en SolidWorks

3. Choix de solution technologique:

Critère	Vis à filets trapézoïdaux	Vis-écrou à billes
Capacité de charge	✓ Élevée	✗ Faible
rendement	✗ nécessite un effort plus important	✓ minimise les frottements
robustesse	✓ fort	✗ faible et sensible à la contamination
Coût	✓ Faible	✗ Élevé

- Bien que les systèmes vis-écrou à billes soient plus précis, le choix du système à filets trapézoïdaux s'avère plus avantageux pour les applications nécessitant une capacité de charge élevée, une robustesse accrue et un coût plus abordable.

4. Détermination de vitesse et couple du moteur:

- Détermination de la vitesse de rotation du moteur:

$$\omega = \frac{2\pi}{Pas} \cdot v$$

- Et pour maintenir la stabilité des plats et de réduire le risque de renversement on choisit la vitesse de déplacement $0,2 \text{ m/s}$, et on fixe la valeur du pas à 4mm .
- Alors $\omega = \frac{2\pi}{Pas} \cdot v = \frac{2\pi}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,2 = 314,15 \text{ rad/s} = 3000 \text{ tr/min}$

4. Détermination de vitesse et couple du moteur:

- L'Energie cinétique de l'ensemble {écrou + ascenseur, Vis + axe de moteur} (pour 10 plateaux) :

- $E_c = \frac{1}{2} \{10 \cdot M \cdot v^2 + (J_{\text{rotor}} + J_{\text{vis}} + J_{\text{acc}}) \cdot \omega^2 \}$ pour simplifier l'expression on pose M' tel que:

$$= \frac{1}{2} \{10 \cdot M \cdot v^2 + (J_{\text{rotor}} + J_{\text{vis}} + J_{\text{acc}}) \cdot \left(\frac{2\pi}{\text{Pas}} \cdot v\right)^2 \}$$

$$= \frac{1}{2} \{10 \cdot M + (J_{\text{rotor}} + J_{\text{vis}} + J_{\text{acc}}) \cdot \left(\frac{2\pi}{\text{Pas}}\right)^2 \} v^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} M' v^2$$

avec une vis d'acier en Carbon:

$$J_{\text{vis}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot v \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot h \cdot r^2 \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 8\,000 \cdot 1 \cdot \pi \cdot (20 \times 10^{-3})^4 = 2,01 \times 10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

et on fixe $M = 1000\text{g}$ la masse d'un plateau et le pas du vis $\text{Pas} = 4\text{mm}$ et la hauteur de l'ascenseur $h=1\text{m}$

4. Détermination de vitesse et couple du moteur:

- Détermination du couple:
 - Les puissances appliquées sur le système isolé
 - La puissance du moteur: $C \cdot \omega = C \cdot \frac{2\pi}{Pas} \cdot v$
 - La puissance de la pesanteur: $-10 \cdot M \cdot g \cdot v$
- Toutes les liaisons sont supposées parfaites

En appliquant (le Théorème de l'Energie cinétique)

$$\text{on a: } P_{\text{ext}} + P_{\text{int}} = \frac{dE_c}{dt}$$

$$\Rightarrow C \cdot \frac{2\pi}{Pas} \cdot v - 10 \cdot M \cdot g \cdot v = M' \cdot v \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$\Rightarrow C = \frac{Pas}{2\pi} \cdot (M' \cdot a + 10 \cdot M \cdot g)$$

4. Détermination de vitesse et couple du moteur:

Variables	Valeur numérique
J_{vis} : moment d'inertie de la vis	$2,01 \times 10^{-3} Kg \cdot m^2$
J_{rotor} : moment d'inertie du rotor	$0,1 Kg \cdot m^2$
J_{acc} : moment d'inertie de l'accouplement à soufflet	$8,7 \times 10^{-7} Kg \cdot m^2$
M : masse des plateaux	1000 g
$M' = \left\{ 10 \cdot M + (J_{rotor} + J_{vis} + J_{acc}) \cdot \left(\frac{2\pi}{Pas} \right)^2 \right\}$	251711,73 kg
a : accélération (pour des causes de sécurité et de risque de renversement des plateaux)	$0,5m/s^{-2}$

D'où :

$$\bullet C = \frac{Pas}{2\pi} \cdot (M' \cdot a + 10 \cdot M \cdot g) = 80,18 \text{ N.m}$$

5. Choix du moteur

Le modèle choisi est:

Avec: $N=4000 \text{ tr/min}$

$C=102 \text{ Nm}$

$J=0,1 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$

$R=2,41\Omega$

$L=33,9\text{mH}$

$P=5,9\text{KW}$

Figure 17 :
partie du
catalogue du
moteur


Caractéristiques mécaniques

Type	Moment d'inertie J - kgm ²	Vitesse mécanique max. (min ⁻¹)
LAK 4132A	0,10	4000
LAK 4132B	0,12	4000
LAK 4132C	0,14	4000
LAK 4132D	0,20	3000

LAK 4132 A

IC06/17/37/86W

Puis- sance (kW)	Vitesse nominale (min ⁻¹) à tension nominale (V)					Courant d'induit nominal (A)	Couple nominal (Nm)	Vitesse max. électrique** (min ⁻¹)	Rende- ment (%)	Circuit d'induit		Code FR 156
	260	400	440	460	500					Résis- tance (Ohm)	Induc- tance (mH)	
5.9	555					35.0	102	1750	60.1	2.41	33.9	341-CB
10.7		1000				35.0	102	1750	72.5	2.41	33.9	341-CB
12.1			1130			35.0	102	1750	74.7	2.41	33.9	341-CB
12.8				1199		35.0	102	1750	76.0	2.41	33.9	341-CB
14.0					1337	34.4	100	1750	78.2	2.41	33.9	341-CB



ASSERVISSEMENT DU MOTEUR DE DÉPLACEMENT DES PLATS.

1. SCHÉMA BLOC
2. CAHIER DE CHARGES
3. ASSERVISSEMENT EN VITESSE
 - 3.1 SCHÉMA BLOC DE LA BOUCLE VITESSE
 - 3.2 MODÉLISATION DE LA MCC
 - 3.3 LA FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE OUVERTE
 - 3.4 CHOIX DU CORRECTEUR
 - 3.5 RÉGLAGE DU CORRECTEUR
 - 3.6 LA SIMULATION DE L'ASSERVISSEMENT DE VITESSE
4. ASSERVISSEMENT EN POSITION

1. SCHÉMA BLOC:

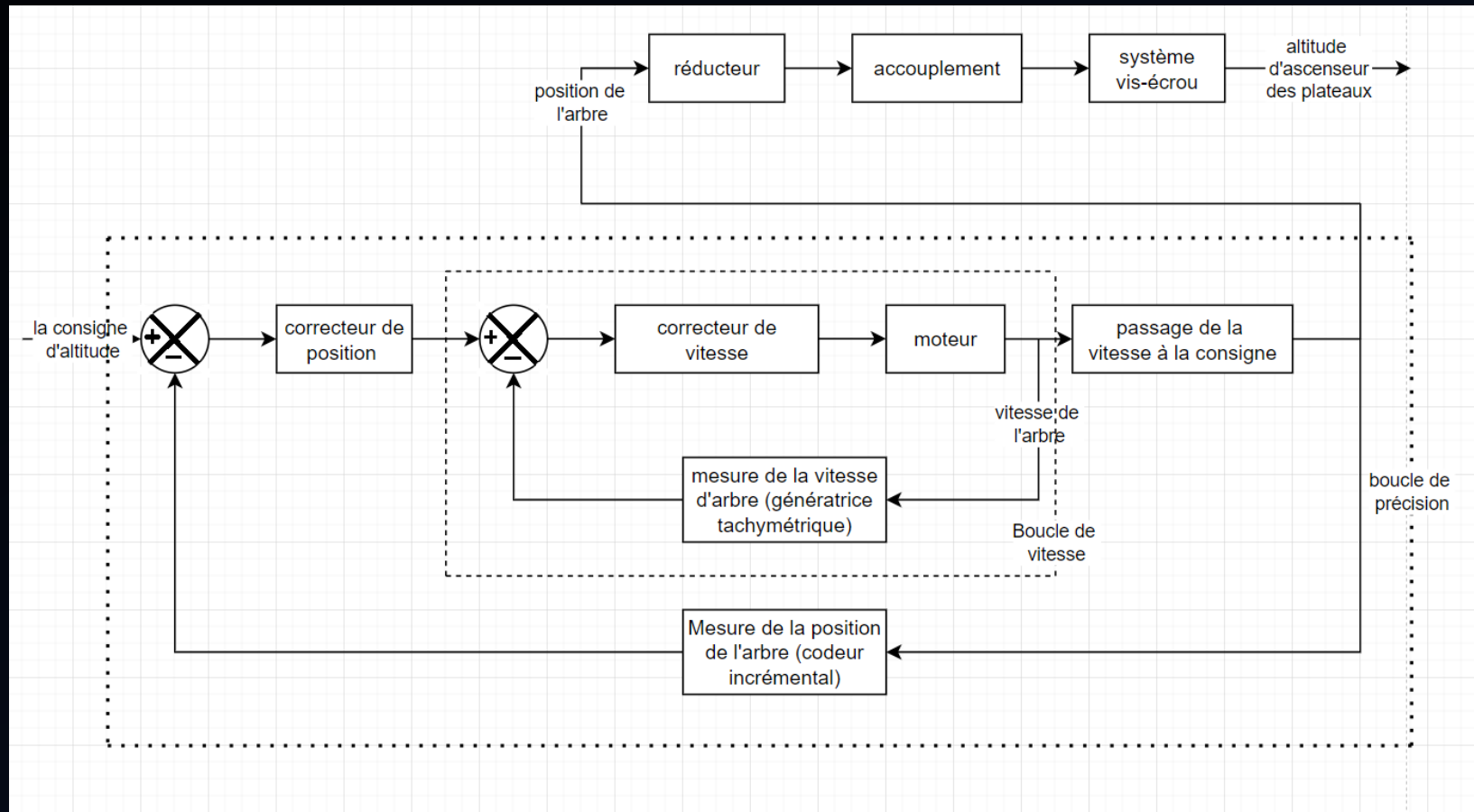


Figure 18 : schéma bloc du système

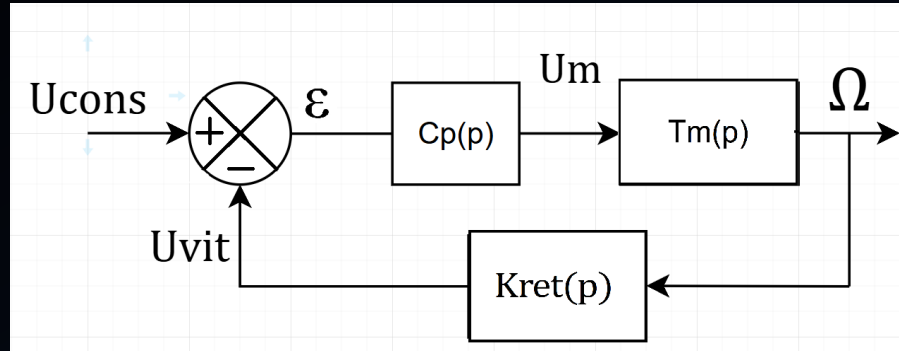
2.CAHIER DE CHARGES

- On pose le cahier de charge suivant pour essayer d'asservir le système:

Exigence	Critère	Niveau
Id=1.2.1.1	La vitesse du déplacement	atteindre la vitesse cible de 314,15 rad/s
Id=1.2.2	La précision	L'écart de position suite à un échelon de consigne doit être nul.
Id=1.2.3	La stabilité	La marge de phase doit être supérieure à 45°.

3.1 SCHÉMA BLOC DE LA BOUCLE VITESSE:

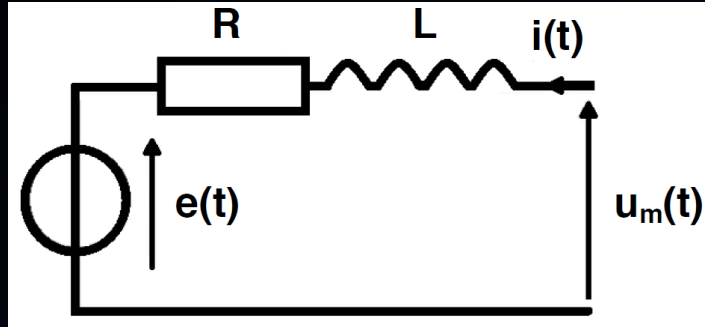
- Schéma bloc de la boucle vitesse:



- U_{cons} tension représentative de la consigne de vitesse de l'arbre (en V) ;
- U_{vit} tension représentative de la vitesse mesurée de l'arbre (en V)
- U_m tension de commande (en V)
- Ω vitesse de rotation de l'arbre (en rad/s)
- ε l'écart de la consigne
- $Cr(p)$ fonction de transfert du correcteur
- $Tm(p)$ fonction de transfert du moteur associé à son convertisseur
- $K_{ret}(p)$ fonction de transfert associée au capteur de vitesse (génératrice tachymétrique)

3.2 MODÉLISATION DE LA MCC:

- Schéma électrique de la MCC:



- équations temporelles:

$$u_m(t) = e(t) + Ri(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$c_m(t) = K \cdot \Phi \cdot i(t)$$

$$e(t) = K \cdot \Phi \cdot \omega(t)$$

$$C_m(t) - C_r(t) = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + f \cdot \omega(t)$$

- Transformée de LAPLACE:

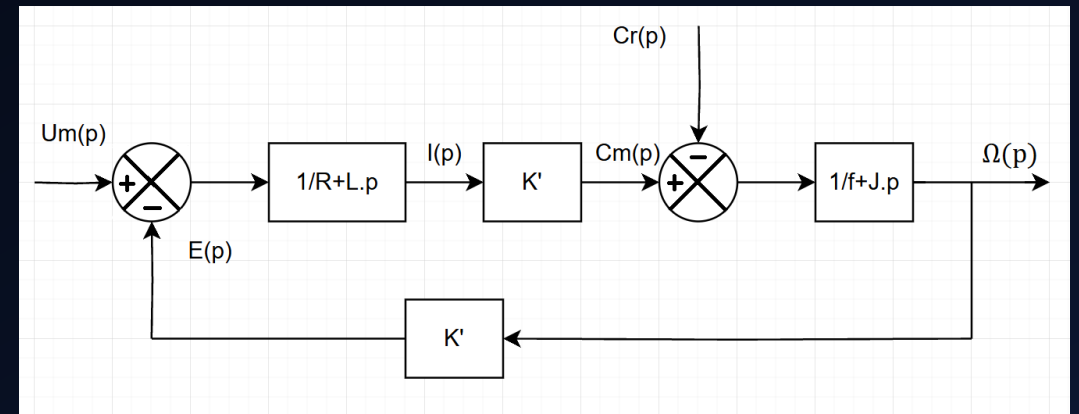
$$U = (R + L \cdot p) \cdot I$$

$$C_m = K \cdot \Phi \cdot I = K' \cdot I$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega = K' \cdot \Omega$$

$$C_m = Jp \cdot \Omega$$

- Schéma bloc de la MCC



3.2 MODÉLISATION DE LA MCC:

- Détermination de la constante K' :

En régime nominal, la tension d'induit U est liée à E par:

$$U = E + R \cdot I \Rightarrow E = U - R \cdot I$$

Alors: $K' = \frac{E}{\Omega} = \frac{U - R \cdot I}{\Omega}$

- Pour $U = 260V$ et $\Omega = \frac{2\pi}{60} \cdot 555 = 58,11 \text{ rad/s}$ et $R = 2,41 \Omega$ et $I = 35A$

$$K' = 3,02 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

3.2 MODÉLISATION DE LA MCC:

- Détermination de la fonction de transfert de moteur:

En négligeant les frottements et le couple résistant

$$\begin{aligned}\text{On a } T_m &= \frac{\frac{k'}{Jp(R+Lp)}}{1 + \frac{k'^2}{Jp(R+Lp)}} = \frac{k'}{k'^2 + JRp + JLp^2} \\ &= \frac{\frac{1}{k'}}{1 + \frac{JR}{k'^2}p + \frac{JL}{k'^2}p^2} \\ &= \frac{0,33}{1 + 0,026 \cdot p + 3,71 \cdot 10^{-4} \cdot p^2}\end{aligned}$$

$$\text{D'où } T_m = \frac{0,33}{1 + \frac{2m}{\omega_0} \cdot p + \frac{1}{\omega_0^2} \cdot p^2}$$

Par identification :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3,71 \cdot 10^{-4}}} = 51,91$$

$$m = 0,026 \cdot \frac{\omega_0}{2} = 0,67$$

$$Km = 0,33$$

3.3 LA FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE OUVERTE:

- Détermination $K_{ret}(p)$:

Pour les génératrices tachymétriques on trouve:

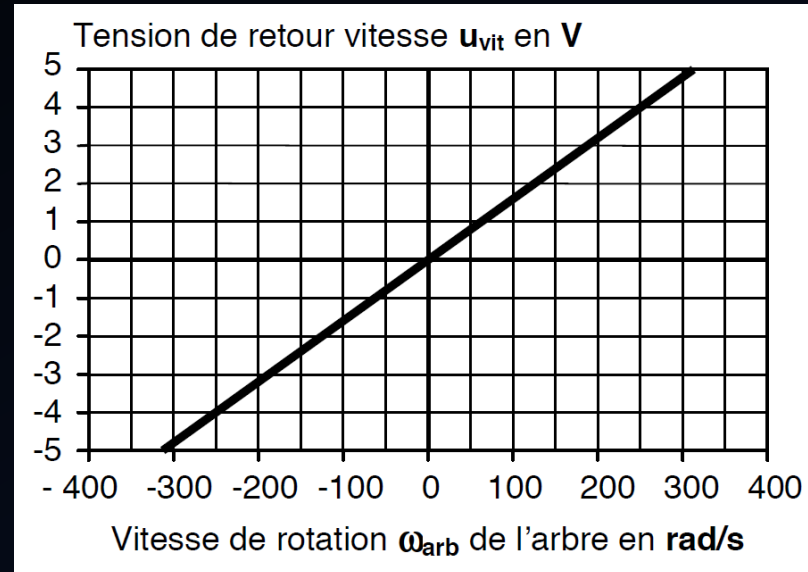


Figure 19 : tension de retour en fonction de la vitesse de rotation

- Alors on a:

$$K_{ret}(p) = \frac{\Delta U_{vit}}{\Delta \omega_{arb}} = \frac{4-0}{250-0} = 0,016 \text{ V.s/rad}$$

3.3 LA FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE OUVERTE:

- L'expression littérale de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée:

$$\begin{aligned} FTBO_{nc}(p) &= \frac{U_{vit}(p)}{\varepsilon_{vit}(p)} \\ &= Tm(p) \cdot K_{ret}(p) \\ &= \frac{Km}{1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2} \cdot K_{ret} \\ &= \frac{Km \cdot K_{ret}}{1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2} = \frac{5,28 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,026 \cdot p + 3,71 \cdot 10^{-4} \cdot p^2} \\ &= \frac{5,28 \cdot 10^{-3}}{3,71 \cdot 10^{-4} \cdot (p - p_1) \cdot (p - p_2)} \end{aligned}$$

- avec: $p_{1,2} = -35,04 \pm j \cdot 38,3$ rad/s

donc le pôle dominant : -35.5 rad/s (partie réelle).

3.4 CHOIX DU CORRECTEUR:

- les diagrammes de Bode:

Pour $K_{Cor} = 1$ (sans correction):

D'après les diagrammes de Bode on constate que le système est toujours stable sans correction, mais l'objectif est d'obtenir 3000 tr/min, alors:

$$U = E + R \cdot I = K' \cdot \Omega + R \cdot I = 3.02 \times 314.15 + 2.41 \times 35 = 1033V$$

Mais La tension requise (1033 V) dépasse largement la tension nominale (260 V), c'est pour cela on choisit d'utiliser un correcteur PI pour :

- Atteindre la vitesse cible.
- Éliminer l'erreur statique.
- Obtenir une marge de phase $> 45^\circ$.

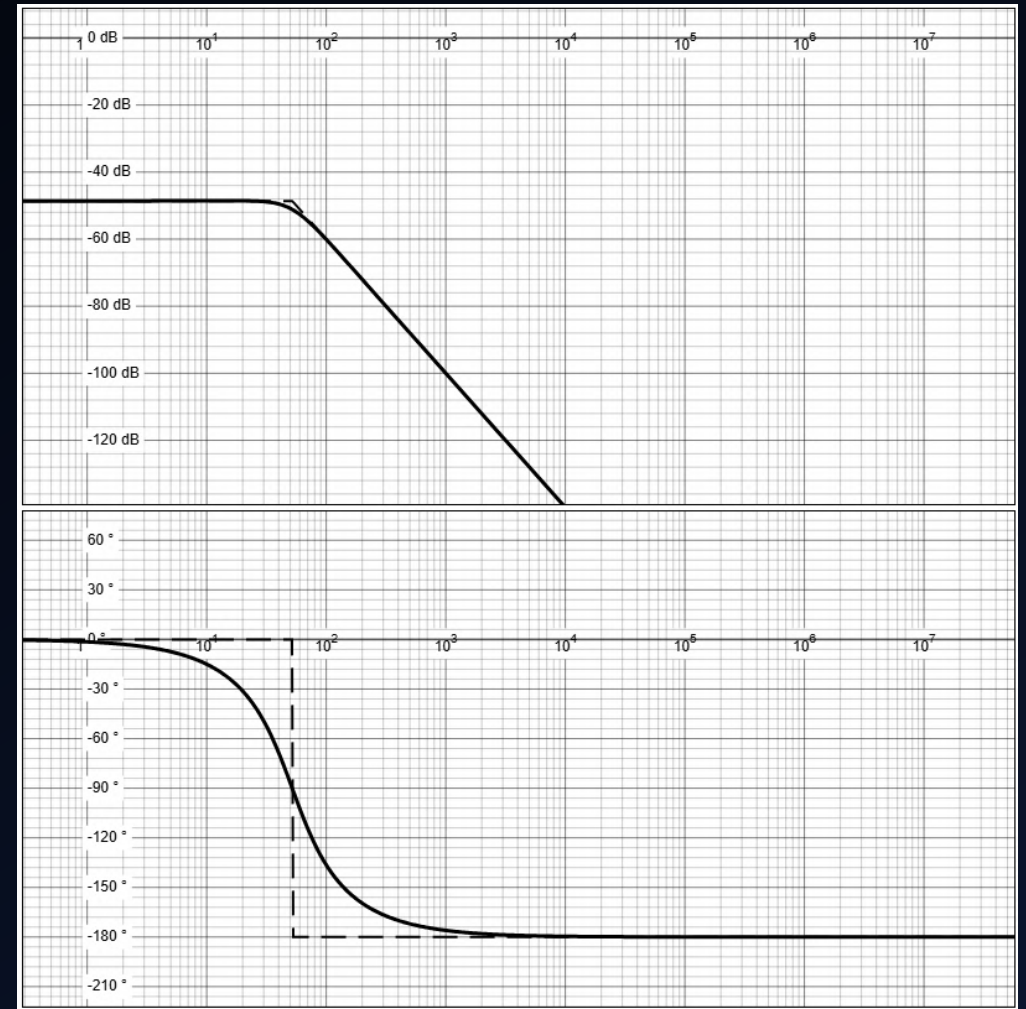


Figure 20 : les diagrammes de Bode

3.5 RÉGLAGE DU CORRECTEUR:

- Un correcteur PI a la forme :

$$Cr(p) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p}\right) = \frac{k_p \cdot (1 + T_i \cdot p)}{T_i \cdot p}$$

Méthode de réglage :

1. Choisir T_i pour compenser le pôle dominant de FTBO .
 2. Choisir k_p pour obtenir une marge de phase $> 45^\circ$ (stabilité).
- On a Pôle dominant : -35.04 rad/s
 - Alors pour compenser le pôle dominant , on choisit:

$$-\frac{1}{T_i} = -35.04 \Rightarrow T_i = \frac{1}{35,04} = 0,028 \text{ s}$$

3.5 RÉGLAGE DU CORRECTEUR:

- Effet de la Compensation:

$$\begin{aligned} \text{FTBO}_c(p) &= \frac{5,28 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,026 \cdot p + 3,71 \cdot 10^{-4} \cdot p^2} \cdot \frac{k_p \cdot (1 + T_i \cdot p)}{T_i \cdot p} \\ &= \left[\frac{5,28 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,026 \cdot p + 3,71 \cdot 10^{-4} \cdot p^2} \right] \cdot \left[k_p \cdot T_i \cdot \frac{(\frac{1}{T_i} + p)}{p} \right] \\ &= \left[\frac{14,23}{2695,4 + 70,08 \cdot p + p^2} \right] \cdot \left[k_p \cdot 35,04 \cdot \frac{(35,04 + p)}{p} \right] \end{aligned}$$

On a $2695,4 + 70,08 \cdot p + p^2 = (p + 35,04)^2 + (38,3)^2$
et la compensation du pôle dominant annule approximativement $(p + 35,04)$

- Alors on peut faire l'approximation :

$$\text{FTBO}_c(p) \approx \frac{k_p \cdot 14,23 \cdot 35,04}{p \cdot (p + 35,04)} = \frac{k_p \cdot 498,61}{p \cdot (p + 35,04)}$$

3.5 RÉGLAGE DU CORRECTEUR:

- Réglage de k_p pour la Marge de Phase:

$$FTBO_c(p) \approx \frac{k_p \cdot 498,61}{p \cdot (35,04 + p)} \text{ de phase } \varphi = -90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{35,04}\right)$$

la marge de phase :

$$M_\varphi = 180^\circ + \varphi(\omega_c) = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c}{35,04}\right) \text{ où } \omega_c \text{ est la pulsation de coupure}$$

Choix de ω_c pour $M_\varphi > 45^\circ$:

$$90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c}{35,04}\right) > 45^\circ \Rightarrow \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c}{35,04}\right) < 45^\circ \Rightarrow \omega_c < 35,04 \text{ rad/s}$$

Pour une marge de 60° (plus robuste que 45°) on trouve $\omega_c = 20 \text{ rad/s}$

Calcul de k_p à $\omega_c = 20 \text{ rad/s}$:

$$|FTBO_c(j\omega_c)| = 1 \Rightarrow \frac{k_p \cdot 498,61}{\omega_c \cdot \sqrt{\omega_c^2 + 35,04^2}} = 1 \Rightarrow k_p = \frac{\omega_c \cdot \sqrt{\omega_c^2 + 35,04^2}}{498,61} = 1,61$$

3.5 RÉGLAGE DU CORRECTEUR:

- Les paramètres finaux du correcteur :

$$\begin{cases} T_i = 0,028 \text{ s} \\ k_p = 1,61 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} Cr(p) &= 1,27 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,028 \cdot p}\right) = 1,27 \cdot \left(1 + \frac{35,04}{p}\right) \\ &= \frac{45,35 + 1,27 \cdot p}{p} \end{aligned}$$

3.6 LA SIMULATION DE L'ASSERVISSEMENT DE VITESSE:

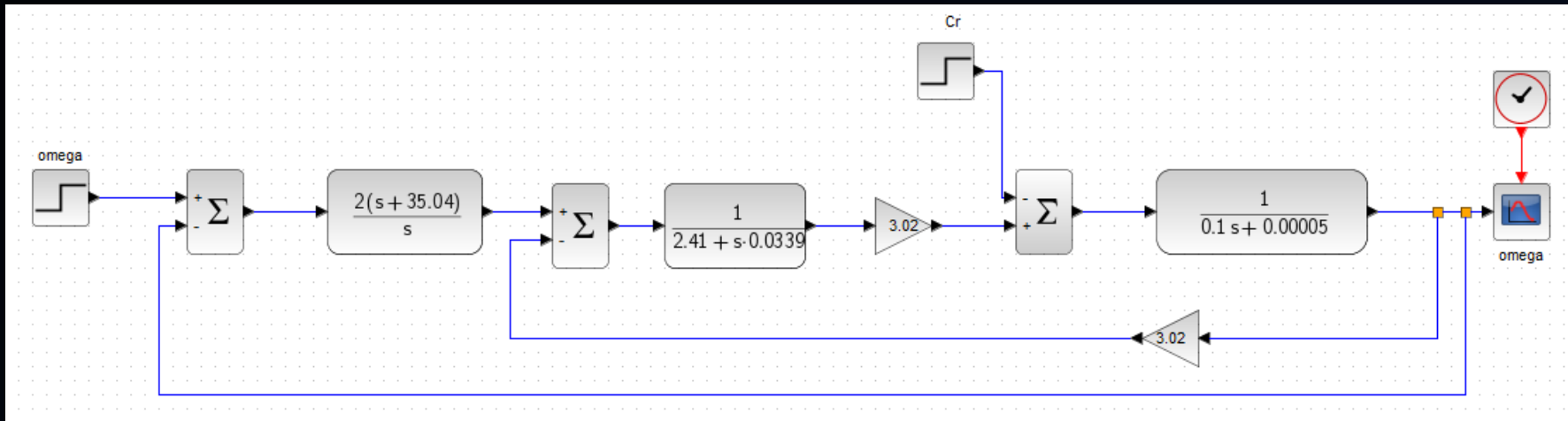
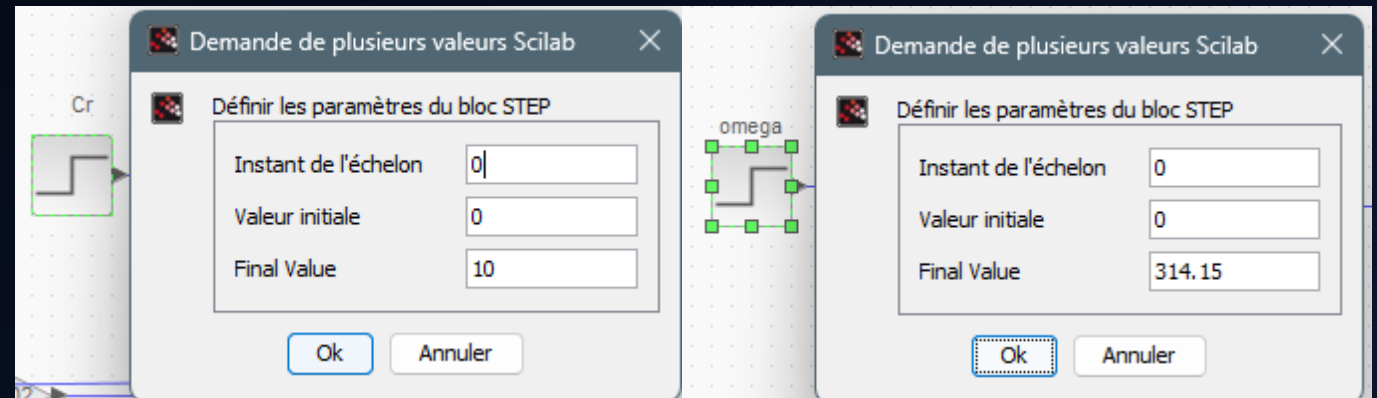


Figure 21 : la boucle vitesse dans Scilab

- Au lieu de $k_p = 1,61$ en simulation on prend $k_p = 2$
- Pour la valeur de la consigne pour une vitesse de $\Omega = 314,15 \text{ rad/s}$
- On fait la simulation à $Cr = 10 \text{ N.m}$ et $f = 5 \times 10^{-5} \text{ N.m.s/rad}$



3.6 LA SIMULATION DE L'ASSERVISSEMENT DE VITESSE:

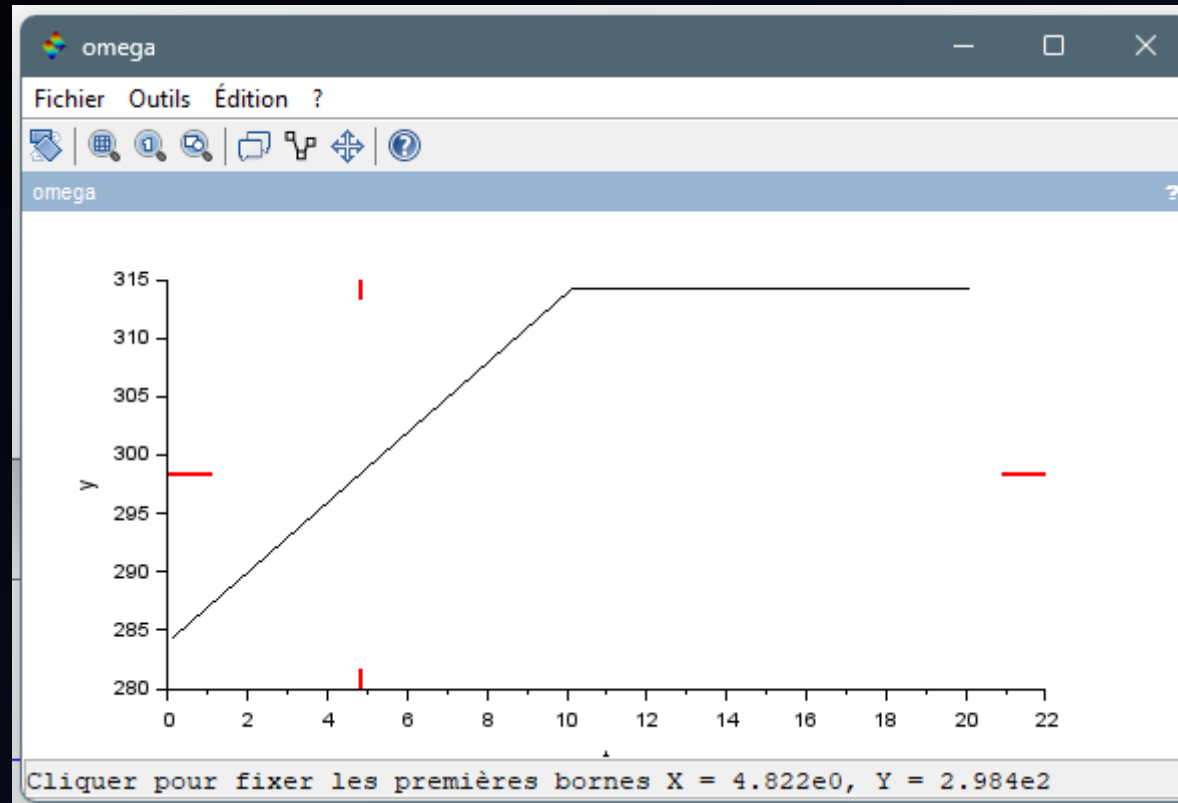
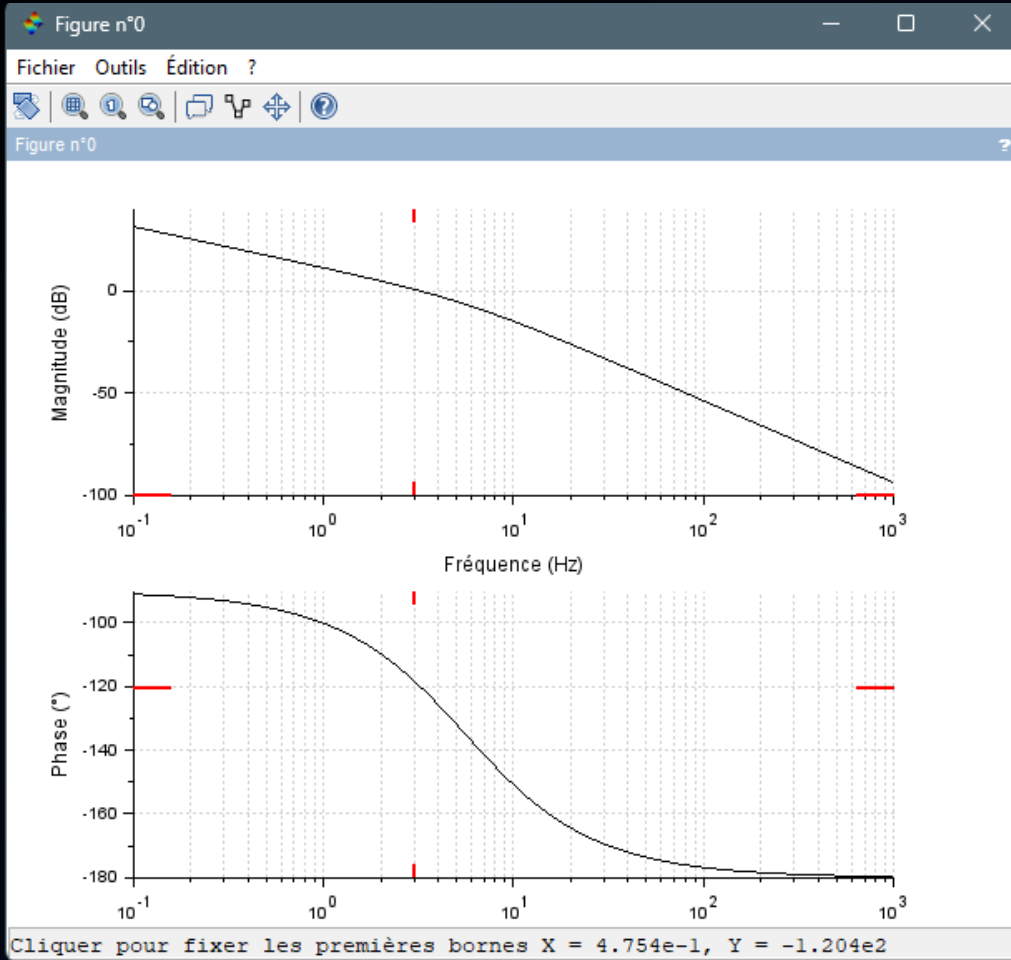


Figure 22 : le tracé de la vitesse de sortie en fonction de temps

- On a $314,15 \times 95\% = 298,44 \text{ rad/s}$ et $314,15 \times 105\% = 329,85 \text{ rad/s}$
- Alors la valeur finale de la vitesse est satble dans l'intervalle de $314,15 \text{ rad/s} \pm 5\%$
- Et un temps de réponse à 5% : $t_{r5\%} \approx 4,8s$

3.6 LA SIMULATION DE L'ASSERVISSEMENT DE VITESSE:



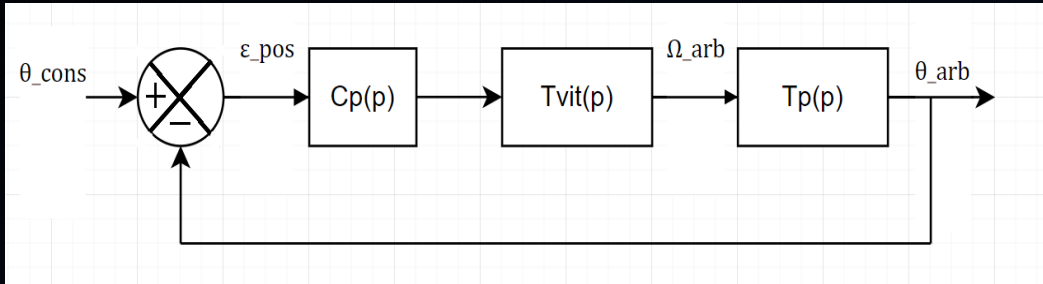
```
*diag bode 1.sci X  
1 jw=%s;  
2 A=(1.61*498.61)/(jw*(jw+35.04));  
3 FT=syslin('c',A);  
4 xgrid(5);  
5 f=1e-1:0.5e-1:1e3;  
6 bode(FT,f)
```

Figure 23 : les diagrammes de la FTBO corrigée

- En simulation la marge de phase $60^\circ > 45^\circ$

4. ASSERVISSEMENT EN POSITION

- Scéma bloc de la boucle de précision:



- $C_p(p)$ fonction de transfert du correcteur de la boucle de position ;
- $T_{vit}(p)$ fonction de transfert représentative de la boucle de vitesse
- $T_p(p)$ fonction de transfert permettant de passer de la vitesse angulaire à la position angulaire de l'arbre.

- θ_{cons} : grandeur représentative de la consigne de position de l'arbre (en rad).
- θ_{arb} : position de l'arbre (en rad).
- Ω_{arb} : vitesse de rotation de l'arbre (en rad/s)
- Avec: $T_p(p) = \frac{\theta_{arb}(p)}{\Omega_{arb}(p)} = \frac{1}{p}$
- D'où le système est de classe 1 c'est-à-dire écart de position angulaire nul (à entrée échelon). Alors les conditions de cahier de charges concernant la précision est satisfaite.



SYSTÈME DE DÉPLACEMENT DU ROBOT.

1. CAHIER DE CHARGES
2. CHOIX DE SOLUTION TECHNOLOGIQUE
3. DÉTERMINATION DE VITESSE ET COUPLE DU MOTEUR
4. CHOIX DU MOTEUR

1.CAHIER DE CHARGE:

- On pose le cahier de charges suivant pour essayer de choisir le moteur convenable pour notre robot:

Exigence	Critère	Niveau
Id=1.3.1	Vitesse de déplacement du robot	$V=0,5\text{m/s}$
Id=1.3.2	Rayon des roues motrices	$R=8\text{cm}$

2. CHOIX DE SOLUTION TECHNOLOGIQUE:

- En raison de sa capacité exceptionnelle à tourner sur place ,sa facilité de manœuvre et de sa stabilité accrue, la motorisation à quatre roues motrices une solution impeccable pour des déplacements fluides et des denrées alimentaires.

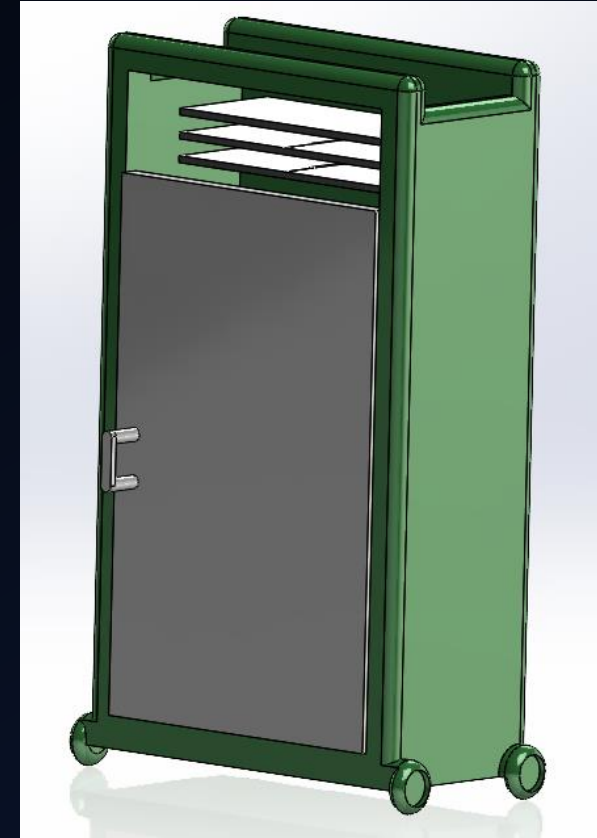


Figure 24 :modélisation du robot en SolidWorks

3. Détermination de vitesse et couple du moteur:

- Détermination de la vitesse du moteur:

on a $V=R \cdot \omega$

Alors :

$$\omega = \frac{V}{R} = \frac{0,5}{0,08} = 6,25 \text{ rad/s} \Rightarrow N = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega \approx 60 \text{ tr/min}$$

- Détermination de L'Energie cinétique :

L'Energie cinétique de l'ensemble {robot, axe de moteur}:

E_c' : l'Energie cinétique d'un seul moteur

$$\begin{aligned} E_c &= 4 E_c' = 4 \cdot \left(\frac{1}{2} \left\{ \frac{M}{4} v^2 + (J_{\text{rotor}} + J_{\text{acc}}) \cdot \omega^2 \right\} \right) \\ &= 2 \cdot \left\{ \frac{M}{4} + (J_{\text{rotor}} + J_{\text{acc}}) \cdot \left(\frac{1}{R} \right)^2 \right\} \cdot v^2 \\ &= 2 \cdot M' \cdot v^2 \end{aligned}$$

- Détermination des puissances appliquées au système isolé:

$$\begin{aligned} P &= P_{\text{ext}} + P_{\text{int}} = 4 \cdot C \cdot \omega - M \cdot g \cdot v = 4 \cdot C \cdot \frac{v}{R} - M \cdot g \cdot v \\ &= \left(\frac{4C}{R} - M \cdot g \right) \cdot v \end{aligned}$$

- Détermination du couple du moteur:

D'après le T.E.C on a: $P = \frac{dE_c}{dt}$

$$\text{Alors: } \frac{4C}{R} - M \cdot g = 4 \cdot M' \cdot a$$

$$\text{D'où: } C = \frac{R}{4} \cdot (M' \cdot a + M \cdot g)$$

3. Détermination de vitesse et couple du moteur:

Variables	Valeur numérique
J_{rotor} : moment d'inertie du rotor	$3,01 \times 10^{-6} Kg \cdot m^2$
J_{acc} : moment d'inertie de l'accouplement à soufflet	$8,7 \times 10^{-7} Kg \cdot m^2$
M=masse du robot	250 Kg
$M' = \left\{ \frac{M}{4} + (J_{rotor} + J_{acc}) \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^2 \right\}$	62,5Kg
a : accélération (pour des causes de sécurité et de risque de renversement des plateaux)	$1m/s^{-2}$

D'où :

$$\bullet C = \frac{R}{4} \cdot (M' \cdot a + M \cdot g) = 50,3 N.m$$

4. Choix du moteur

- Avant le choix du moteur on associe au moteur un réducteur de rapport $r = \frac{1}{42}$
- Alors $r = \frac{\omega_S}{\omega_e} = \frac{c_e}{c_S} \Rightarrow c_e = r \cdot c_S = \frac{1}{42} \cdot 50,3 = 1,19 \text{ N.m}$
 $\Rightarrow \omega_e = \frac{\omega_S}{r} = \frac{60}{\frac{1}{42}} = 2520 \text{ tr/min}$
- Avec supposition que le système est idéal

4. Choix du moteur

Le modèle choisi est:

Avec: $\omega=3000$ tr/min

$C=2,45$ N.cm

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = 3,01 \times 10^{-6} \text{Kg} \cdot \text{m}^2$$

$P=720\text{W}$

Figure 25 : partie du catalogue du moteur

MBT 1141 à bride (FT) de fixation à trous taraudés IM B14 (IM 3601)

A pattes ou à bride de fixation

Type	Brides à trous lisses						Brides à trous taraudés					Bout d'arbre					
	M	N	P	LA	S	T	M	N	P	S	T	D	E	O x Z	GA	F	W
MBT 1141	115	95	140	10	9	3	85	70	105	M5	2,5	14	30	M5 x 12	16	5	0

B4 - Sélection

- Moteur MBT - IP 40 - Classe F - Excitation par aimants permanents
- Moteur non ventilé IC 410

Service S1 - Température ambiante ≤ 40 °C - Vitesse nominale : 3 000 min⁻¹

Type	Puissance	Vitesse	Couple	Rendement moyen	Tension mini	Tension maxi
	kW	min ⁻¹	N.m	%	V	V
MBT 1141VL	0,72	3.000	2,45	84	24	48



L'ALIMENTATION CONVENABLE POUR LE ROBOT.

1.CAHIER DE CHARGE

2.DIMENSIONNEMENT DE LA BATTERIE

2.1CHOIX DE TYPE DE BATTERIES

2.2CALCUL DE L'ÉNERGIE ET LA CAPACITÉ NÉCESSAIRES

2.3SÉLECTION DE LA BATTERIE

3.AMÉLIORATION PAR UN PANNEAU SOLAIRE

3.1DÉTERMINATION DE L'IRRADIATION

3.2 DÉTERMINATION DU BESOIN ÉNERGÉTIQUE

3.3 DÉTERMINATION DU BESOIN ÉNERGÉTIQUE

3.4 SÉLECTION DU PANNEAU SOLAIRE

3.5 VÉRIFICATION DES PÉRIODES DE CHARGE

3.6 STRATÉGIE DE LA CHARGE DES BATTERIES DU ROBOT

1. CAHIER DE CHARGE:

- On pose le cahier de charge suivant pour essayer de dimensionner l'alimentation convenable pour notre robot:

Exigence	Critère	Niveau
Id=1.4.2	Énergie renouvelable	Le robot doit exploiter l'énergie solaire
Id=1.4.1	Autonomie	Le robot doit avoir une autonomie qui satisfait les trois cycles de 1 heure chacun.

2.1 CHOIX DE TYPE DE BATTERIES

Critère	Batterie Lithium	Batterie au Plomb
Densité énergétique	✓ Élevée (150-250 Wh/kg)	✗ Faible (30-50 Wh/kg)
Durée de vie	✓ Longue (3000-5000 cycles à 80% DoD)	✗ Courte (500-1000 cycles)
Maintenance	✓ Aucune (sans entretien)	✗ Nécessite un contrôle régulier (niveau d'eau, sulfatation)
Coût initial	✗ Élevé (~500-700€/kWh)	✓ Faible (~100-200€/kWh)
Coût total	✓ Économique (durée de vie supérieure)	✗ Plus cher long terme (remplacement)

- La batterie lithium-ion est clairement supérieure aux batteries au plomb pour notre robot sur le long terme.

2.2 CALCUL DE L'ÉNERGIE ET LA CAPACITÉ NÉCESSAIRES:

- Calcul de la puissance P_{bat} que doit fournir la batterie:

$$P_{bat} = \frac{5900}{0,60} + \frac{2880}{0,84} + 300 \approx 14000 \text{ W}$$

- Énergie requise (Autonomie de 1 heure à pleine puissance):

$$E = P_{bat} \times \Delta t = 14 \text{ kW} \times 1 \text{ h} = 14 \text{ kWh}$$

- Capacité batterie (260V) :

$$C = \frac{E}{V} = \frac{14000}{260} = 53 \text{ Ah (Arrondie à 55 Ah)}$$

composants	rendement	Pauissance
Moteur LAK2132M	60,1%	5900W
4*Moteur MBT 1141 VL	84%	4*720=2880W
Autres		300W

- pour estimer la puissance totale des autres composants du robot (hors moteurs de déplacement) non traités, tels que la commande, la communication, les capteurs, et les convertisseurs tension tension , on fixe la puissance absorbée $P=300\text{W}$.

2.3 SÉLECTION DE LA BATTERIE:

- Solution choisie : La batterie Samsung INR21700-50E
- Configuration de la Batterie
- ❖ Calcul du nombre de cellules :
 - Série :

$$\frac{260}{3,6} \approx 73 \text{ cellules}$$
 - Parallèle :

$$\frac{55}{4,9} \approx 12 \text{ cellules}$$
 - Total : $73 \times 12 = 876 \text{ cellules.}$
- ❖ Masse totale :
 - $876 \times 69 \text{ g} = 60,44 \text{ Kg}$

SAMSUNG SDI Confidential Proprietary			
Spec. No.	INR21700-50E	Version No.	0.2
3. Nominal Specifications (*1)			
Item	Specification		
3.1 Standard discharge Capacity	Min 4,900mAh - Charge : 0.5C(2,450mA), 4.2V, 0.02C(98mA) cutoff @ RT - Discharge : 0.2C(980mA), 2.5V cutoff @ RT * 1C = 4,900mA		
3.2 Rated discharge Capacity	Min 4,753mAh - Charge : 0.5C(2,450mA), 4.2V, 0.02C(98mA) cutoff @ RT - Discharge : 1C(4,900mA), 2.5V cutoff @ RT		
3.3 Charging Voltage	4.2V		
3.4 Nominal Voltage	3.6V		
3.5 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)		
3.6 Charging Current	Standard charge: 2,450mA		
3.7 Charging Time	Standard charge: 3hours		
3.8 Max. Charge Current	4,900mA (not for cycle life)		
3.9 Max. Discharge Current	9,800mA (for continuous discharge) 14,700mA (not for continuous discharge)		
3.10 Discharge Cut-off Voltage	2.5V		
3.11 Cycle life	Capacity \geq 3,802mAh @ after 500cycles (80% of the Rated Discharge Capacity @ RT) - Charge : 0.5C(2,450mA), 4.2V, CCCV 0.05C(245mA) cut-off @ RT - Discharge: 1C(4,900mA), 2.5V cut-off @ RT		
3.13 Recovery characteristics	Capacity recovery (after the storage) \geq 4,278mAh (90% of the Rated Discharge Capacity @ RT) - Charge : 0.5C(2,450mA), 4.2V, 0.02C(98mA) cutoff @ RT - Storage : 30 days @ 60°C - Discharge : 1.0C(4,900mA) 2.50V cut-off @ RT		
3.14 Cell Weight	69g max		
3.15 Cell Dimension	Cell height : Max.70.80mm Diameter : Φ Max.20.25mm		

Figure 26 : partie de la fiche technique de la batterie

3.1 DÉTERMINATION DE L'IRRADIATION:

- L'irradiance solaire moyenne au Maroc par mois :

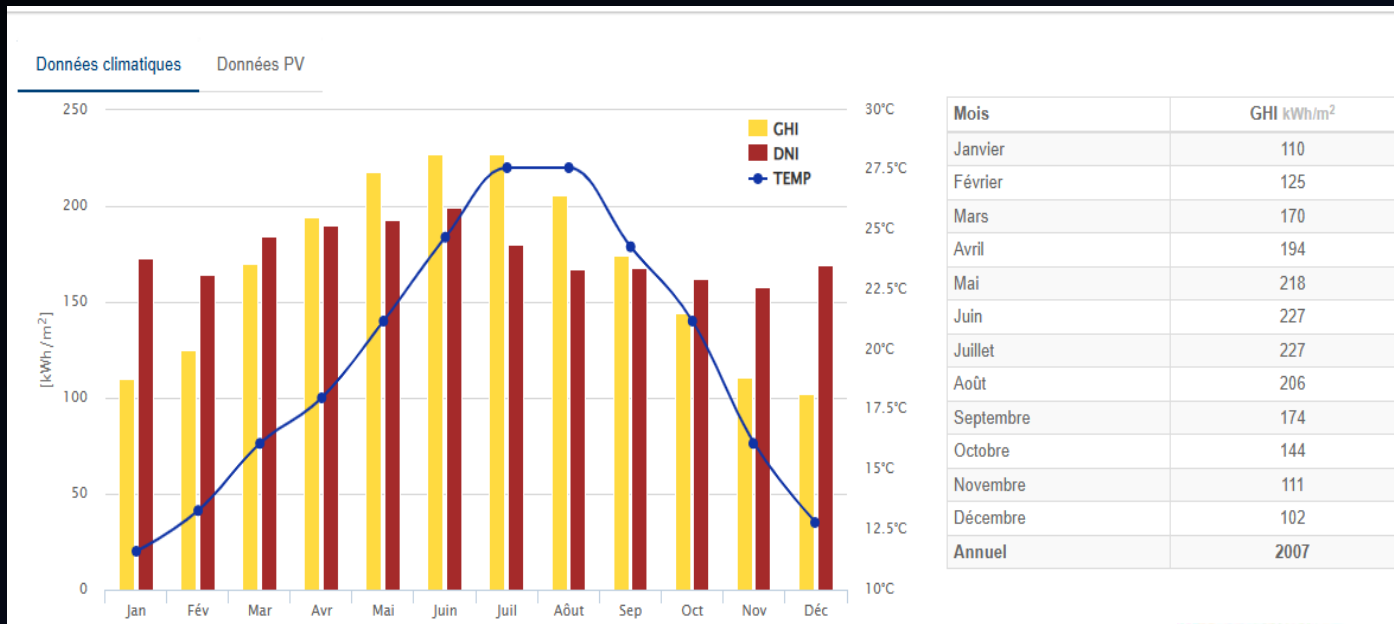


Figure 27 : statistiques des données climatiques de Atlas de la Ressource Solaire au Maroc

- Alors l'irradiation moyenne quotidienne:

$$I_r = \frac{GHI_{\text{annuel}}}{366} = \frac{2007}{366} = 5,48 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$$

Acronymes

GHI:	Somme mensuelle/annuelle d'Irradiation Globale Horizontale [kWh/m ²]
DNI:	Somme mensuelle/annuelle d'Irradiation Normale Directe [kWh/m ²]
TEMP:	Température moyenne journalière (24 heures) de l'air à 2 mètres [°C]

3.3 DÉTERMINATION DU BESOIN ÉNERGÉTIQUE:

- Le robot utilise sa batterie 3 fois par jour :

9h-10h : 1h de fonctionnement

13h-14h : 1h de fonctionnement

Total : 3h/jour

19h-20h : 1h de fonctionnement

Capacité batterie : 260V / 55Ah (14 kWh).

- Besoin énergétique quotidienne (Pertes système (10%)) :

$$E_{jours} = 14 \times 3 \times 1,1 \text{ kWh/jour} = 46,2 \text{ kWh/jour}$$

- Puissance crête (a puissance maximale qu'un panneau solaire peut produire dans des conditions standard):

$$P_{panneau} = \frac{E_{jours}}{I_r \times \eta} = \frac{46,2}{5,48 \times 0,85} = 9,91 \text{ kW} \approx 10 \text{ kW}$$

3.4 SÉLECTION DU PANNEAU SOLAIRE:

- à cause de son rendement élevé, permettant une production énergétique optimale sur une surface réduite, et sa fiabilité industrielle (garantie 25 ans), on choisit Le panneau SunPower Maxeon 3 400W pour notre robot hospitalier nécessitant une autonomie durable et un encombrement minimal.
- Nombre de panneaux SunPower 400W :

$$\frac{10000}{400} = 25 \text{ panneaux}$$
- Surface totale :

$$25 \times 1,76 \text{ m}^2 = 44 \text{ m}^2$$

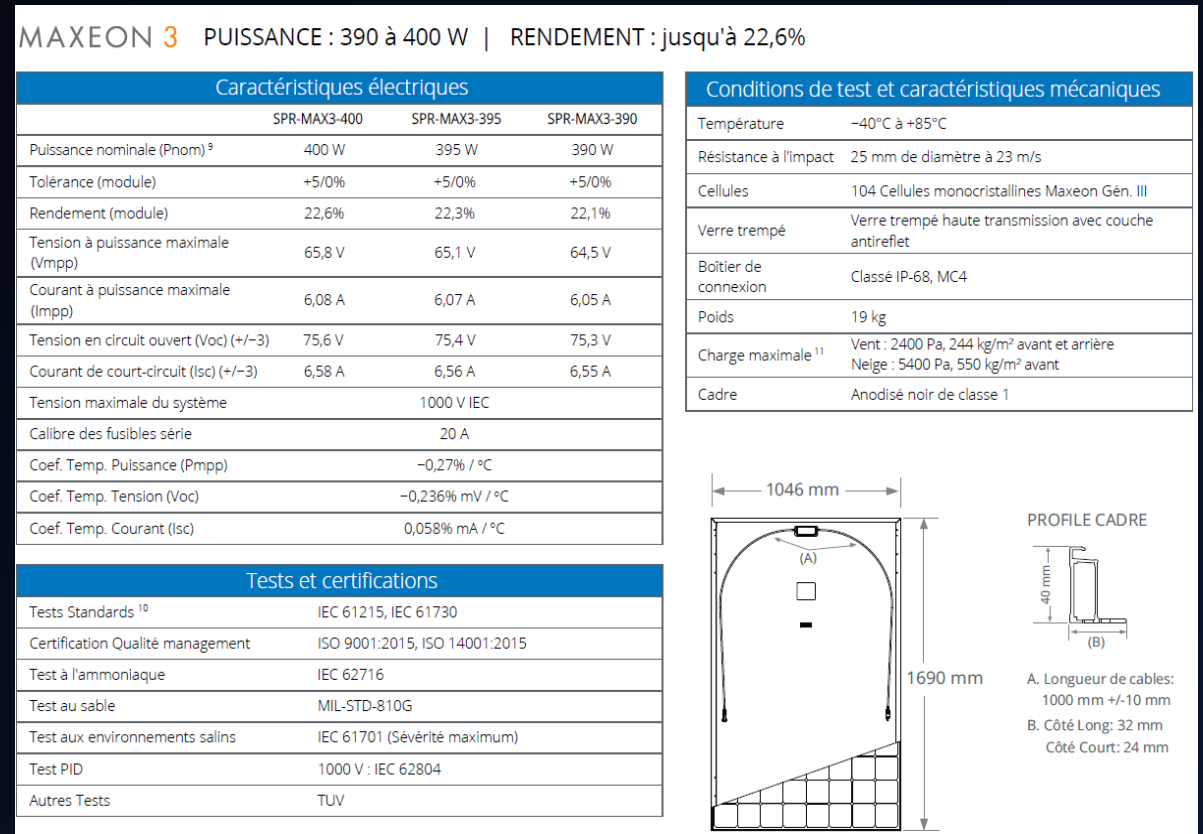


Figure 28 : partie de la fiche technique du panneau solaire

3.5 VÉRIFICATION DES PÉRIODES DE CHARGE:

- 10h-13h (3h) :

Charge Batterie B (14 kWh)

Production solaire : $P=10 \times 3 \times 0,7 = 21$ kWh (0,7 est le rapport des Pertes du système)

Excédent : $21 - 14 = 7$ kWh Stockage batterie tampon

- 14h-19h (5h) :

Charge Batterie A (14 kWh)

Production solaire : $P=10 \times 5 \times 0,7 = 35$ kWh

Excédent : $35 - 14 = 21$ kWh (Charge Batterie A (14 kWh) + Charge Batterie tampon (7 kWh))

- 10h-13h (3h) :

Utilisation Batterie A (14 kWh) pour le 3e cycle

3.6 STRATÉGIE DE LA CHARGE DES BATTERIES DU ROBOT:

Périodes de fonctionnement	Périodes de charge disponibles :
9h-10h → Batterie tampon utilisée, Batterie B en charge.	10h-13h (3h) → Charge Batterie B.
13h-14h → Batterie B utilisée, Batterie A en charge.	14h-19h (5h) → Charge Batterie A.
19h-20h → Batterie A utilisée.	20h-9h → Pas de solaire → Utilisation du réseau ou batterie tampon.

CONCLUSION.

Ce projet a essayé d'étudier quelques aspects d'un robot serveur de repas adapté aux besoins hospitaliers, en abordant des aspects clés tels que le choix des matériaux des plateaux, la sélection des moteurs, et l'alimentation électrique. Cependant, certaines parties d'étude n'ont pas été approfondies ou même non traitées et pourraient faire l'objet de recherches futures. Parmi celles ci, on peut citer l'optimisation des trajectoires du robot pour éviter les obstacles, l'intégration de systèmes de communication avancés pour une coordination avec le personnel médical, ou encore l'analyse des coûts pour une industrialisation du projet.

Merci pour votre attention.