

**CNC2022**  
TIPE.2022



# EXOSQUELETTE

SANTE PREVENTION

**RÉALISÉ PAR :**  
ACHRAF MANSOURI

ROYAUME DU MAROC



Ministère de l'Éducation Nationale,  
du Préscolaire et des Sports

# PLAN

- 1- Introduction**
- 2- Diagramme SysML**
- 3- Analyse des solutions**

3-1- Traitement du signal électromyogramme EMG

3-2- Asservissement de position de l'articulation de l'exosquelette

- 4- Conclusion**

# 1 - INTRODUCTION

L'exosquelette est un appareil qui apporte à un être humain des capacités qu'il ne possède pas ou qu'il a perdues à cause d'un accident. Ce type d'appareil peut permettre à une personne de soulever des charges lourdes et diminuer considérablement les efforts à fournir sans la moindre fatigue.

les employés peuvent faire leur travail en toute efficacité, mais l'intervention d'un système mécanique peut protéger les travailleurs dans le but d'éviter et de prévenir les troubles musculosquelettiques, et améliorer les conditions de travail. Leur utilisation pose toutefois de nouvelles questions relatives à la santé et la sécurité des opérateurs.



# 1 - INTRODUCTION

## ➤ **Problématique**

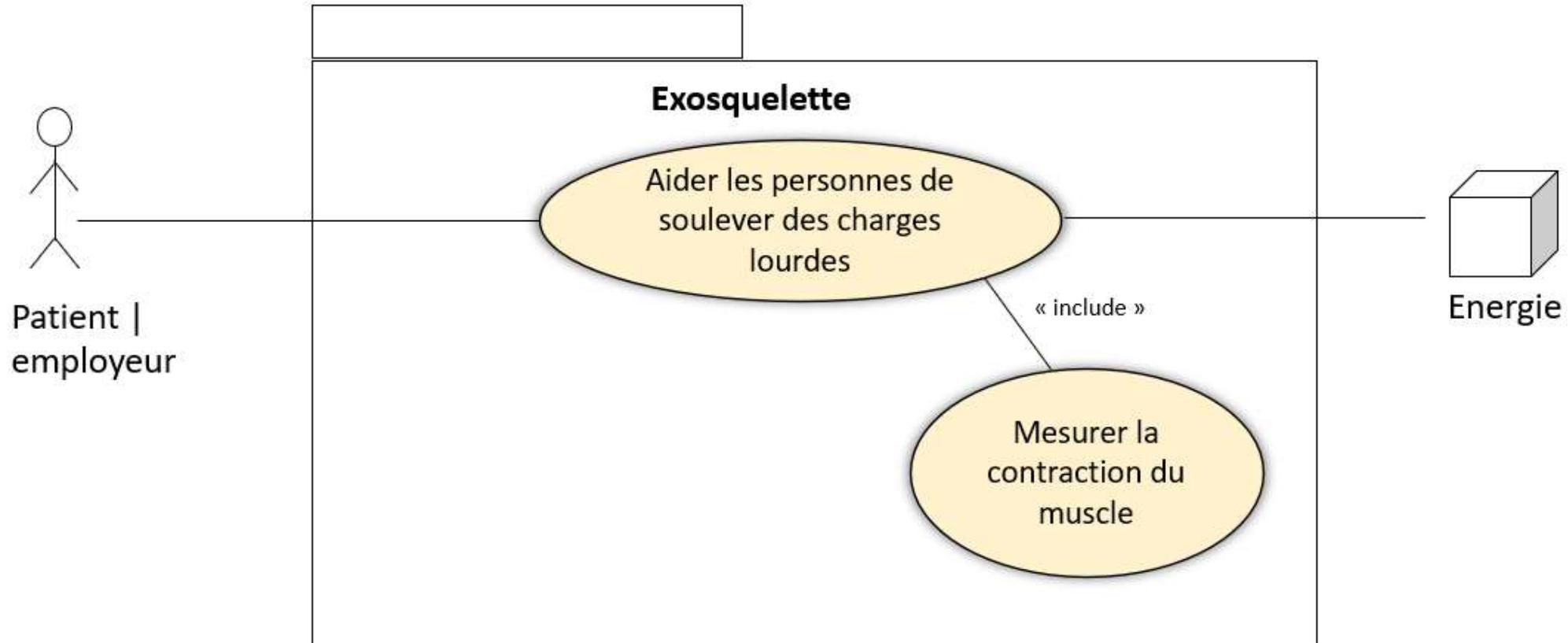
Pour éviter les dégâts physiques des employés qui exécutent leurs tâches, comment un système exosquelette peut apporter une assistance physique et une prévention des troubles musculosquelettiques (TMS) aux employés

## ➤ **Objectifs**

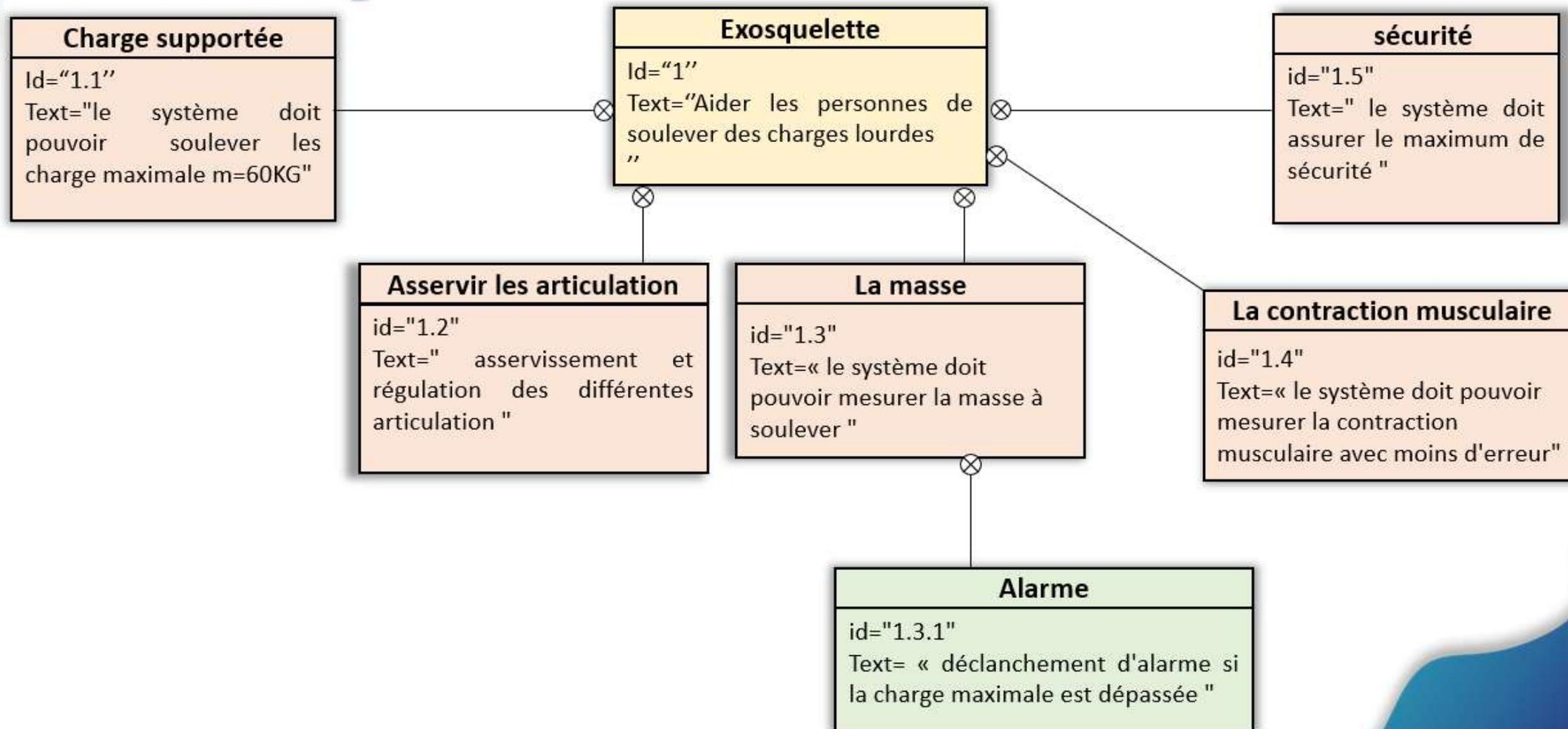
- Etude du système mécanique de l'exosquelette
- Etude et choix des moteurs des articulation (genou, hanche)
- Etude d'asservissement de position des différentes articulations
- Etude de la chaine d'acquisition de l'exosquelette



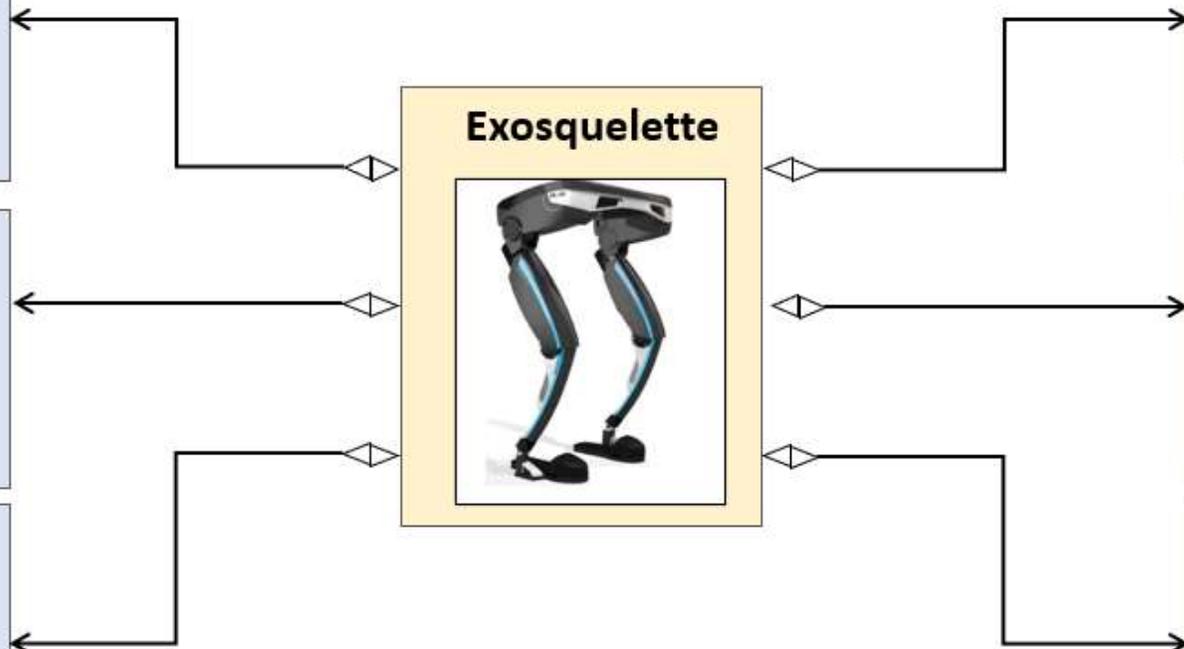
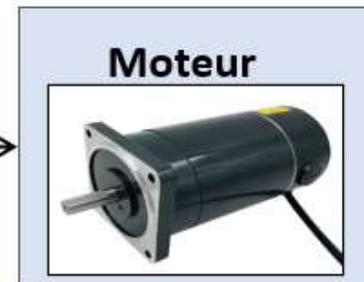
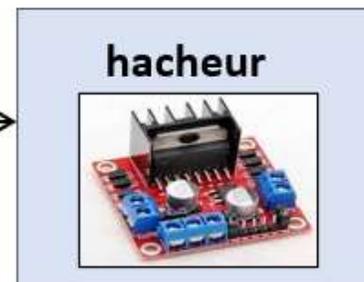
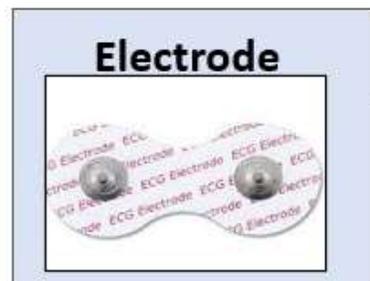
## ➤ Cas d'utilisation



## ➤ Cas d'exigence



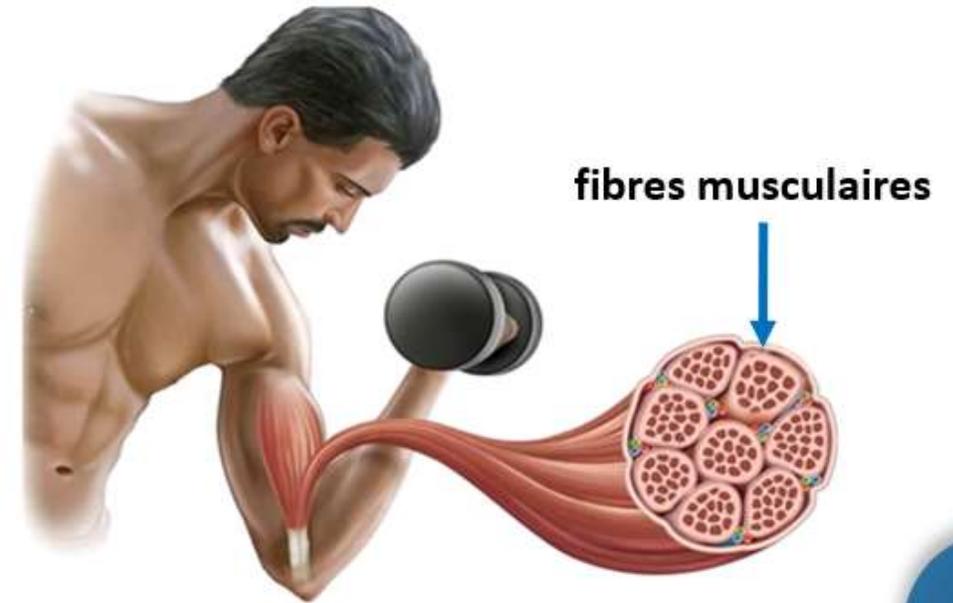
## ➤ Diagramme BDD



# **SIGNAL ÉLECTROMYOGRAMME EMG**

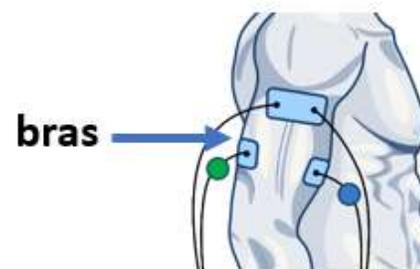
## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

Un **électromyogramme (EMG)** est un potentiel électrique généré au niveau des **fibres musculaires** quand les muscles sont contractés. Il permet d'obtenir des informations sur l'état des muscles. Pour détecter ces signaux, **Les électrodes de surface sont fixées sur la peau au niveau du muscle ciblé.**



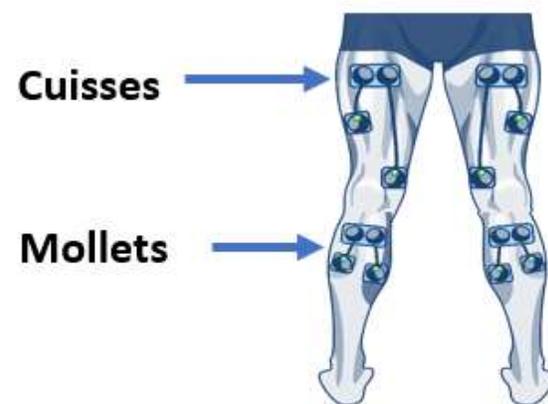
## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

pour établir la consigne de déplacement, consiste à utiliser les signaux électriques apparaissant au niveau des muscles (**bras, cuisses et mollets**) dès que la personne contracte ces derniers. L'intention de contracter un muscle s'initie au niveau du cerveau.



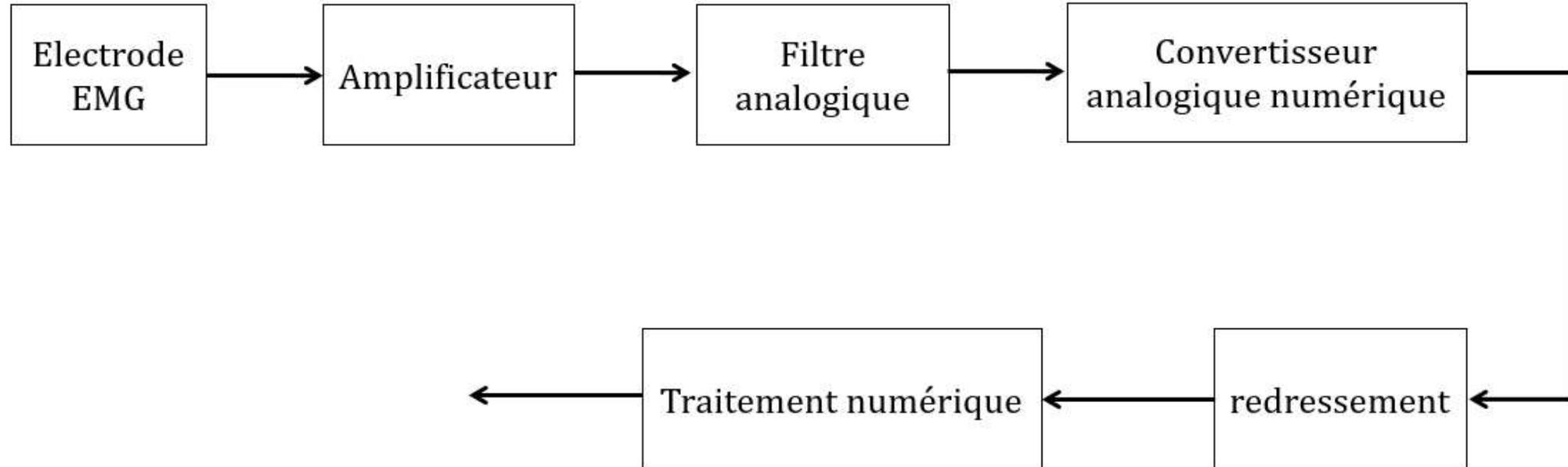
### ➤ Caractéristique de signal EMG

- Le signal est Fortement bruité.
- L'amplitude maximale est d'ordre de 10 mV
- bande passante est comprise entre 10 et 500 Hz.



## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

### ➤ Chaîne d'acquisition du signal EMG



## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

### ➤ Description de la chaîne d'acquisition

- **Amplificateur :**  
amplifier et adapter pour atteindre le niveau de tension 3V des convertisseur CAN.
- **Filtrage analogique:**  
filtrer les bruits et ainsi limiter la bande passante du signal EMG
- **Convertisseur analogique numérique**  
conversion du signal en numérique

Le signal, une fois converti en numérique, subit un redressement, d'une multiplication par 2 et d'un filtrage numérique passe-bas de fréquence de coupure égale à 6 Hz. Le calcul de la valeur efficace de ce signal filtré est une image de l'intention de contraction du muscle.

## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

### ➤ Signal EMG

#### 1 - TÉLÉCHARGER LES DONNÉES D'UN SIGNAL EMG DEPUIS LE SITE DE MATWORKS



Star Strider **LEVEL 10** **MVP** on 16 Oct 2015

👍 Vote | 1 🔗 Link 🗨️ Translat

 emg\_healthy.txt

The *Physionet* EMG signals can be downloaded as `.mat`, `.txt`, or other format files that you can read into your workspace. You just have to search *Physionet* for the appropriate file options.

I just downloaded the attached file. To load and plot it, save it to a directory on your MATLAB path, then run this:



```
emg_healthy - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage Aide
0.00025 -0.0333
0.0005 -0.0350
0.00075 -0.0350
0.001 -0.0300
0.00125 -0.0300
0.0015 -0.0333
0.00175 -0.0317
0.002 -0.0333
0.00225 -0.0333
Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

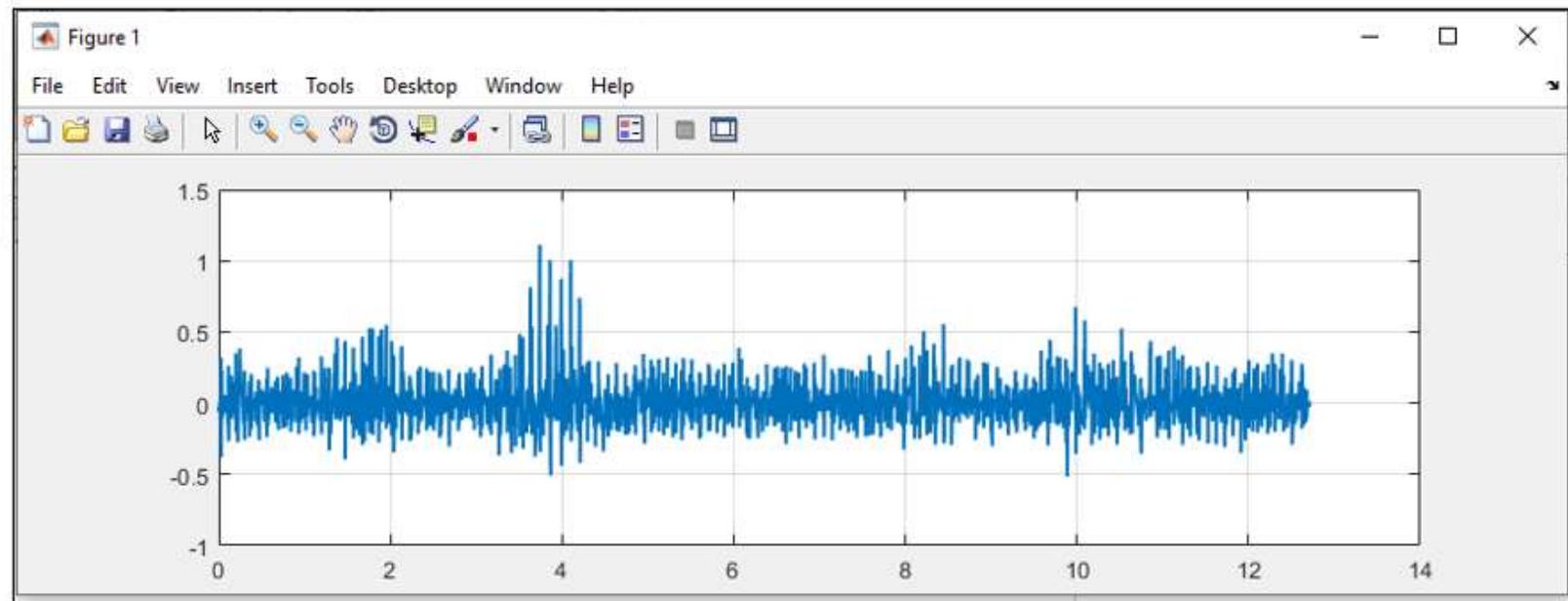
### ➤ Signal EMG

## 2 - AFFICHAGE : ÉTUDE TEMPORELLE ET FRÉQUENTIELLE

```
emg = load('emg_healthy.txt');  
figure(1)  
plot(emg(:,1), emg(:,2), 'LineWidth', 1)  
grid
```

$V_{\max} = 1.1133 \text{ V}$

$V_{\min} = -0.5150 \text{ V}$



Signal temporelle EMG

# 3 - CHOIX ET ANALYSE DES SOLUTIONS

## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

### ➤ Signal EMG

## 2 - AFFICHAGE : ÉTUDE TEMPORELLE ET FRÉQUENTIELLE

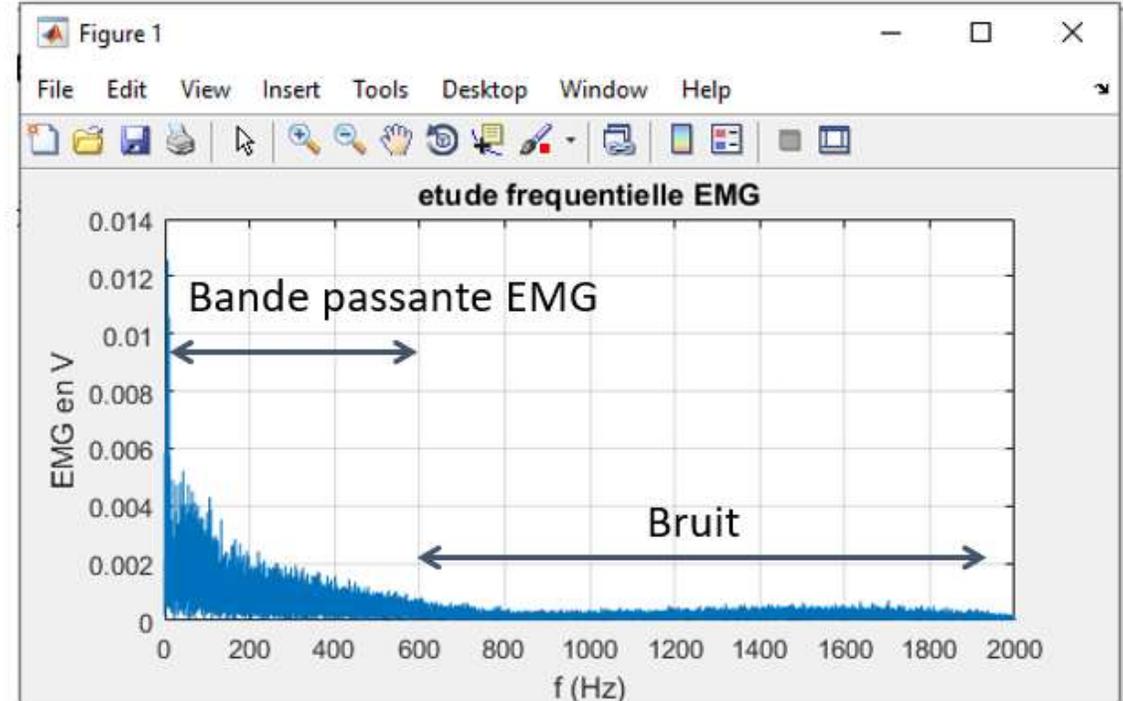
### SPECTRE

```

Ts= emg(2,1)- emg(1,1);
Fs= 1/Ts;
L = size(emg(:,1),1);
t = emg(:,1);
s=emg(:,2);

Y = fft(s);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(f,P1)

```



Signal fréquentielle EMG

## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

### ➤ Signal EMG

### 3 - FILTRAGE DU SIGNAL EMG

**Objectif** : utilisation d'un filtre passe bas pour garder la bande passante et supprimer le bruit

#### Calcul de filtre passe bas

```

Fs = 4000; % Sampling Frequency
N = 40; % Order
Fpass = 500; % Passband Frequency
Fstop = 550; % Stopband Frequency
Wpass = 1; % Passband Weight
Wstop = 1; % Stopband Weight
dens = 20; % Density Factor

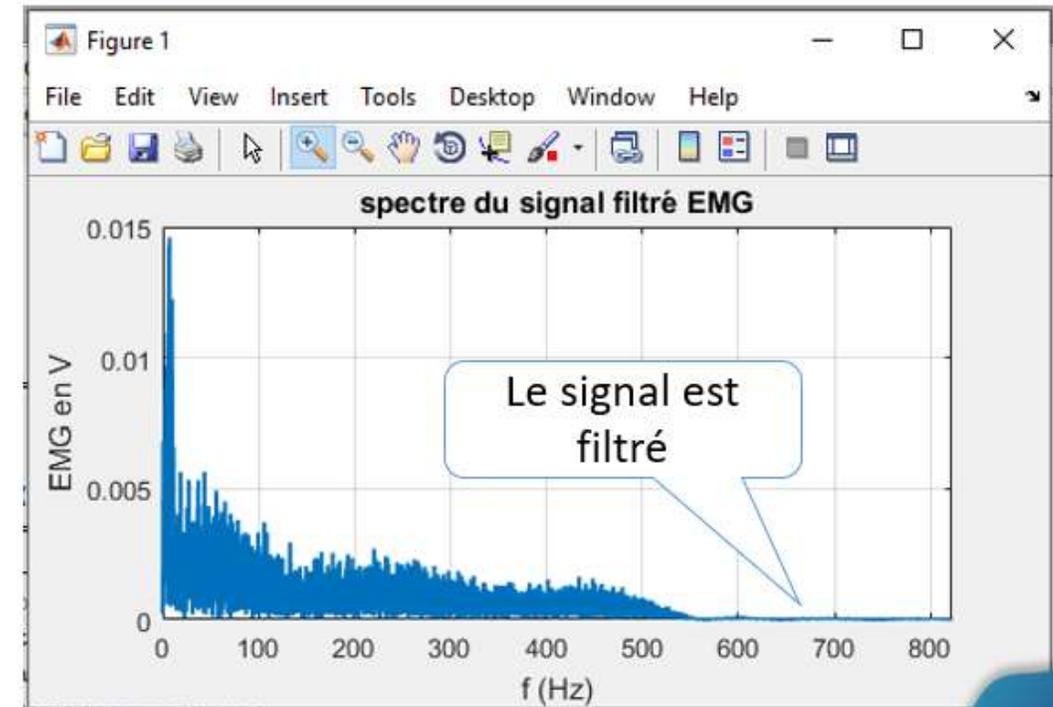
% Calculate the coefficients using the FIRPM function.
b = firpm(N, [0 Fpass Fstop Fs/2]/(Fs/2), [1 1 0 0], [Wpass Wstop], ...
{dens});
  
```

**Filtre passe bas de  
fréquence coupure  
fc=500 Hz**

#### Filtrer le signal

```

s=emg(:,2);
x = filter(b,1,s);
  
```



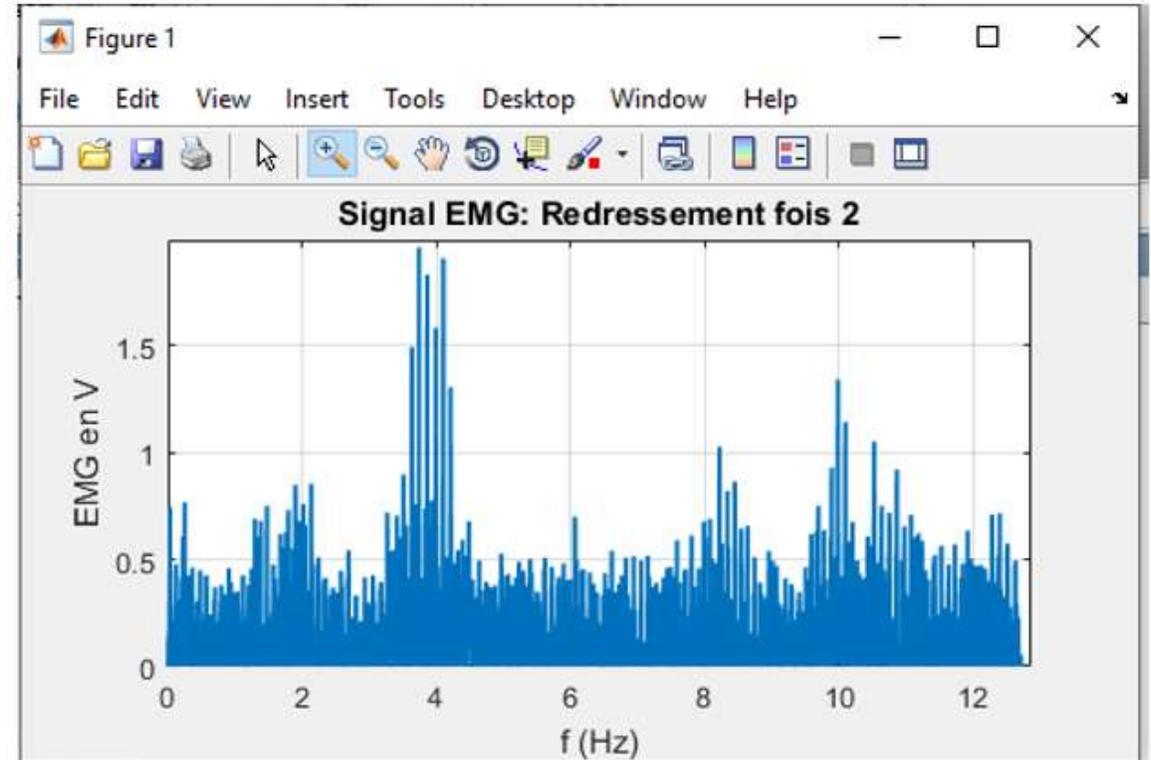
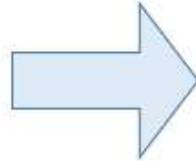
# 3 - CHOIX ET ANALYSE DES SOLUTIONS

## 3-1 - Acquisition de signal électromyogramme EMG

### ➤ Signal EMG

#### 4 - REDRESSEMENT ET MULTIPLICATION PAR 2

```
s=emg(:,2);  
x = filter(b,1,s);  
v = 2*abs(x);
```

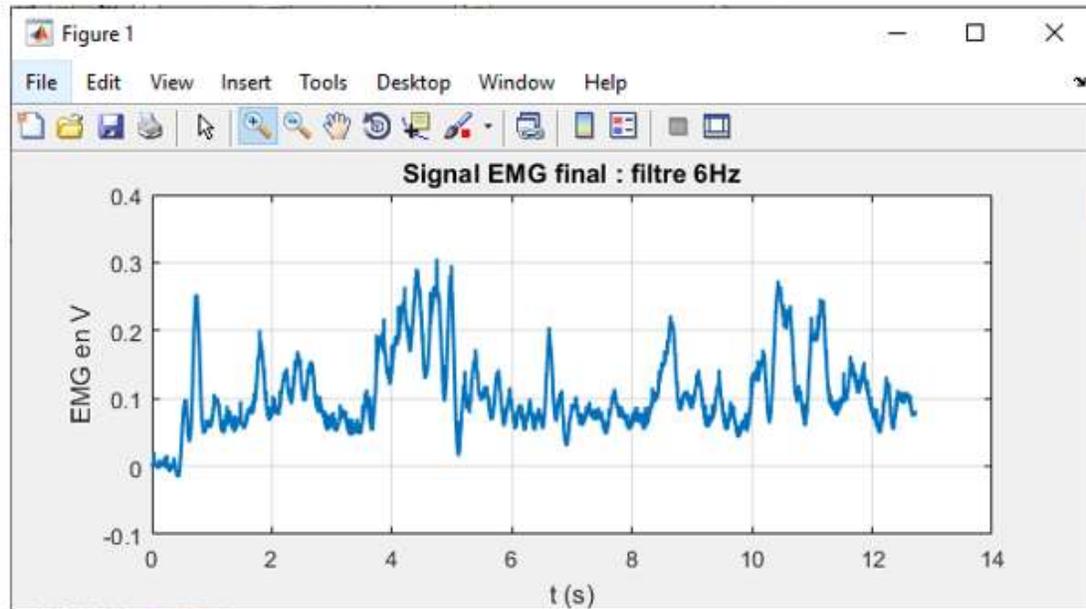


## 3-1- Acquisition de signal électromyogramme EMG

### ➤ Signal EMG

#### 5 - FILTRAGE NUMÉRIQUE : FILTRE DE FRÉQUENCE DE COUPURE 6HZ

```
x = filter(b,1,s);
v = 2*abs(x);
x1 = filter(c,1,v);
```



#### 6 - CALCUL DE LA VALEUR EFFICACE DU SIGNAL TROUVÉ

```
>> rms(x1)

ans =

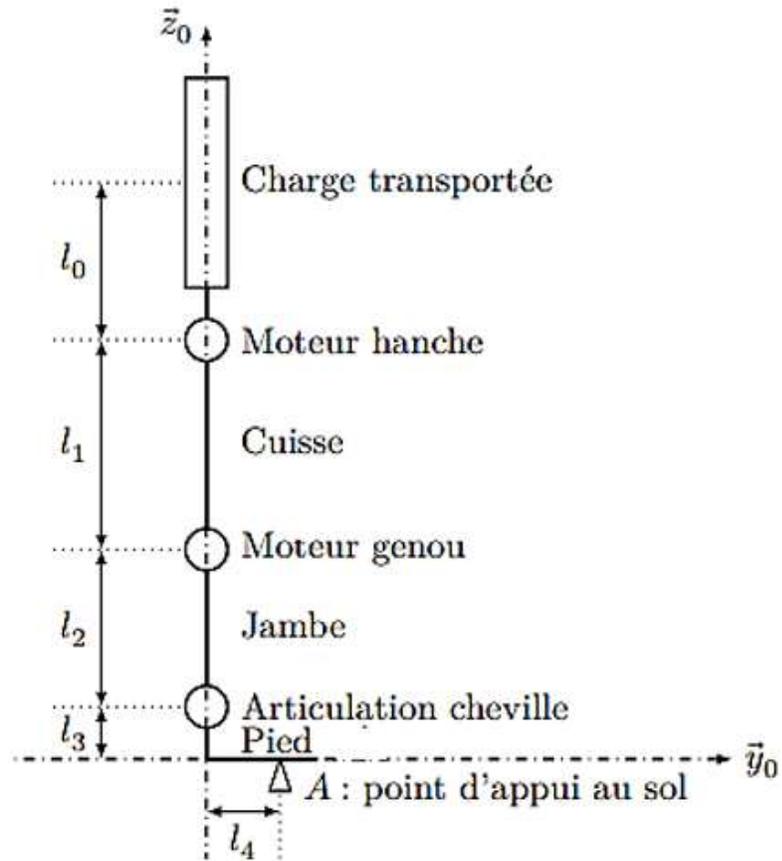
    0.1192
```

Cette valeur correspond à une image de l'intention de contraction du muscle

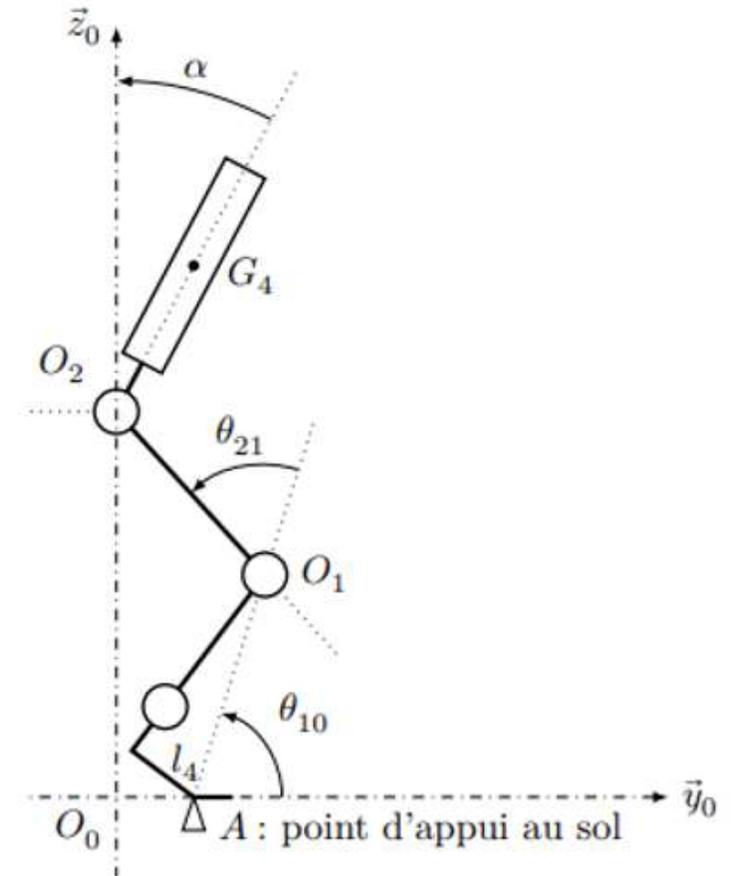
# **ASSERVISSEMENT DE LA POSITION DES ARTICULATION**

## 3-2- Asservissement de la position des articulation

## ➤ Schéma cinématique

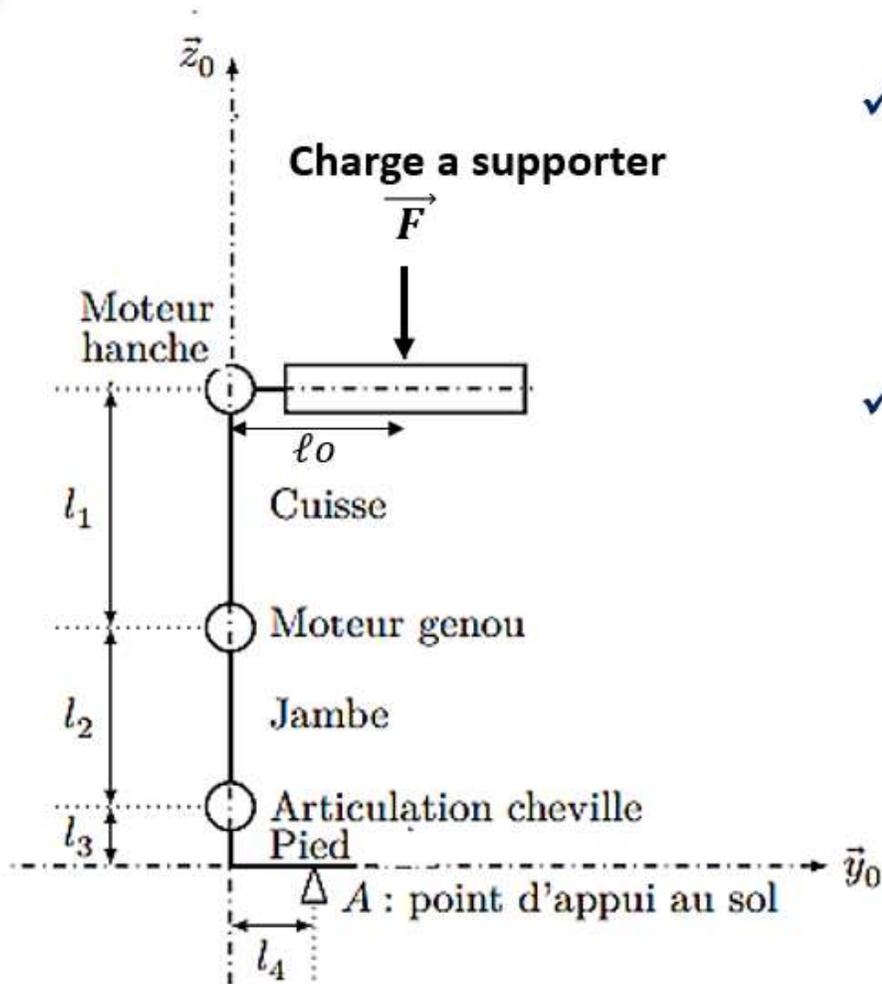


- $l_0 = 25 \text{ cm}$
- $l_1 = 43.1 \text{ cm}$
- $l_2 = 43.3 \text{ cm}$
- $l_3 = 6.9 \text{ cm}$
- $l_4 = 13 \text{ cm}$

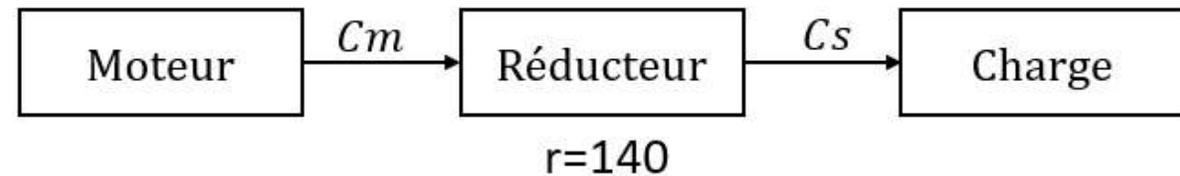


## 3-2- Asservissement de la position des articulation

## ➤ Choix de moteur

✓ Calcul du couple moteur hanche  $C_s$ 

- › L'effort maximal appliqué a l'axe moteur :  $F = M.g \Rightarrow F \simeq 600 \text{ N}$
- › Le couple maximale a l'axe moteur :  $C_s = F \ell_o \Rightarrow C_s \simeq 150 \text{ Nm}$

✓ Calcul du couple moteur  $C_m$ 

- › Le couple moteur :  $C_m \simeq \frac{C_s}{r} \Rightarrow C_m \simeq 1.07 \text{ Nm}$

## 3-2- Asservissement de la position des articulation

### ➤ Le moteur choisi

Les machines choisies pour les 2 articulations sont de type « brushless », de marque Infranor et de modèle FP0105. Elles sont alimentées à partir d'une batterie Lithium-ion via un contrôleurs Roboteque FBL2360A.



| Grandeur                                      | Valeur                                  |
|---|---|
| Vitesse maximale sous 48 V                    | 3000 tr·min <sup>-1</sup>               |
| Couple permanent rotor à l'arrêt              | 2 N·m                                   |
| Courant permanent rotor à l'arrêt             | 13,3 A                                  |
| Couple nominal à 3000 tr·min <sup>-1</sup>    | 1,85 N·m                                |
| Couple maximal instantané                     | 12 N·m                                  |
| Constante de force électromotrice (fem) $K_E$ | 0,05 V·s·rad <sup>-1</sup>              |
| Constante de couple $K_T$                     | 0,15 N·m·A <sup>-1</sup>                |
| Résistance d'un enroulement                   | 0,25 $\Omega$                           |
| Inductance cyclique d'un enroulement          | 0,1 mH                                  |
| Inertie du rotor                              | $0,13 \times 10^{-3}$ kg·m <sup>2</sup> |
| Nombre de pôles                               | 8                                       |

### 3-2- Asservissement de la position des articulation

#### ➤ Le module de la machine synchrone autopilotée

l'autopilotage du moteur brushless (FP0105-84) conduit du point de vue comportemental à un modèle équivalent à celui d'un moteur à courant continu (MCC).

Les équations du modèle équivalent sont :



$$C_m = C_{em} = k_c \cdot I \cdot \cos(\Psi) \longrightarrow \text{MS autopilotée } \Psi = 0 \longrightarrow \begin{cases} C_m = k_c \cdot I \\ E = k_e \cdot \Omega \end{cases} \longrightarrow \text{Comportement de la MCC}$$

## 3-2- Asservissement de la position des articulation

## ➤ Le module de la machine synchrone autopilotée

## Domaine temporel

## Domaine de Laplace

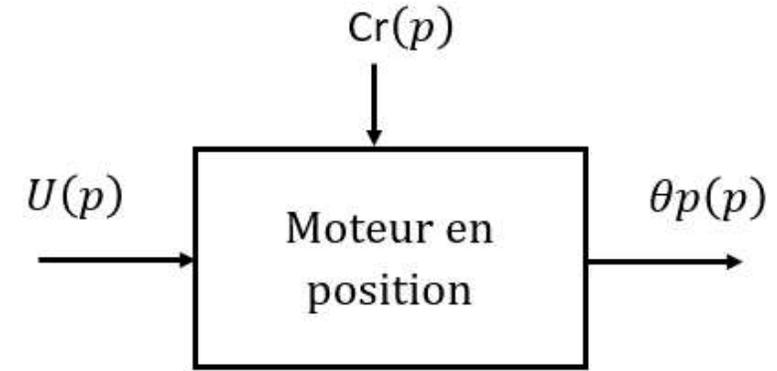
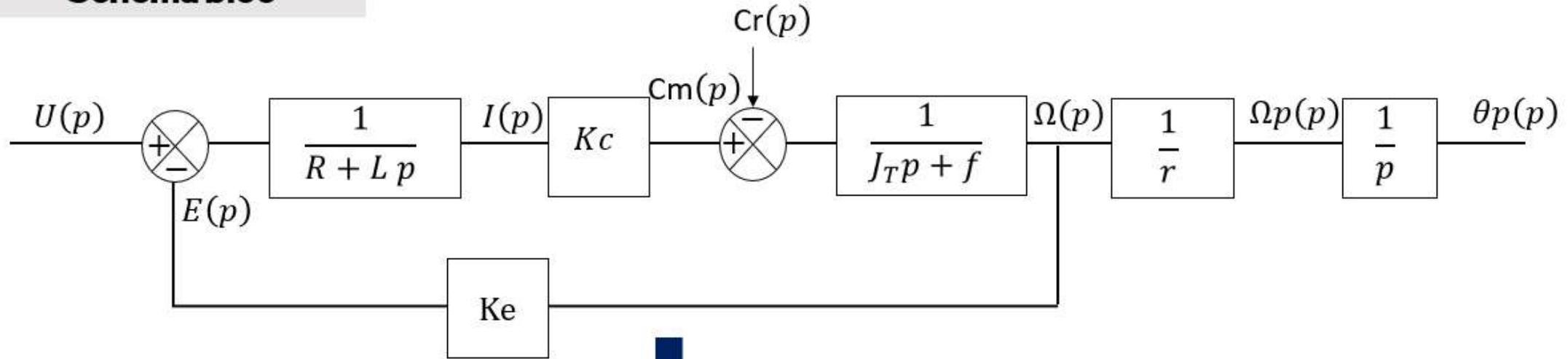
- Equations électrique :  $u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t)$   $\longleftrightarrow$   $I(p) = \frac{1}{R + Lp} [U(p) - E(p)]$
- Equations mécanique :  $j \frac{d\Omega(t)}{dt} = Cm(t) - Cr(t) - f \Omega(t)$   $\longleftrightarrow$   $\Omega(p) = \frac{1}{j_T p + f} [Cm(p) - Cr(p)]$
- Equations électromécanique 1 :  $e(t) = ke\Omega(t)$   $\longleftrightarrow$   $E(p) = ke \Omega(p)$
- Equations électromécanique 2 :  $Cm(t) = kc i(t)$   $\longleftrightarrow$   $Cm(p) = kc I(p)$
- Equations de vitesse après réducteur :  $\Omega_p(t) = \frac{1}{r} \Omega(t)$   $\longleftrightarrow$   $\Omega_p(p) = \frac{1}{r} \Omega(p)$
- Equations entre vitesse et position :  $\theta_p(t) = \int \Omega_p(t) dt$   $\longleftrightarrow$   $\theta_p(p) = \frac{1}{p} \Omega_p(p)$

# 3 - CHOIX ET ANALYSE DES SOLUTIONS

## 3-2- Asservissement de la position des articulation

➤ Le module de la machine synchrone autopilotée

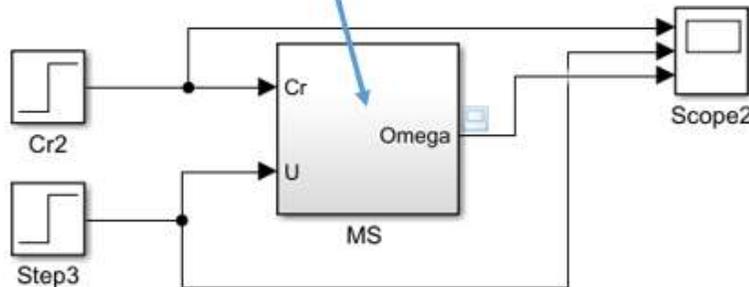
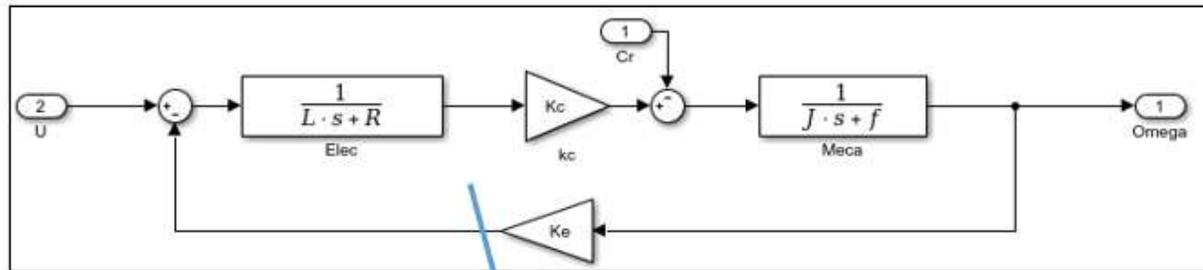
Schéma bloc



## 3-2- Asservissement de la position des articulation

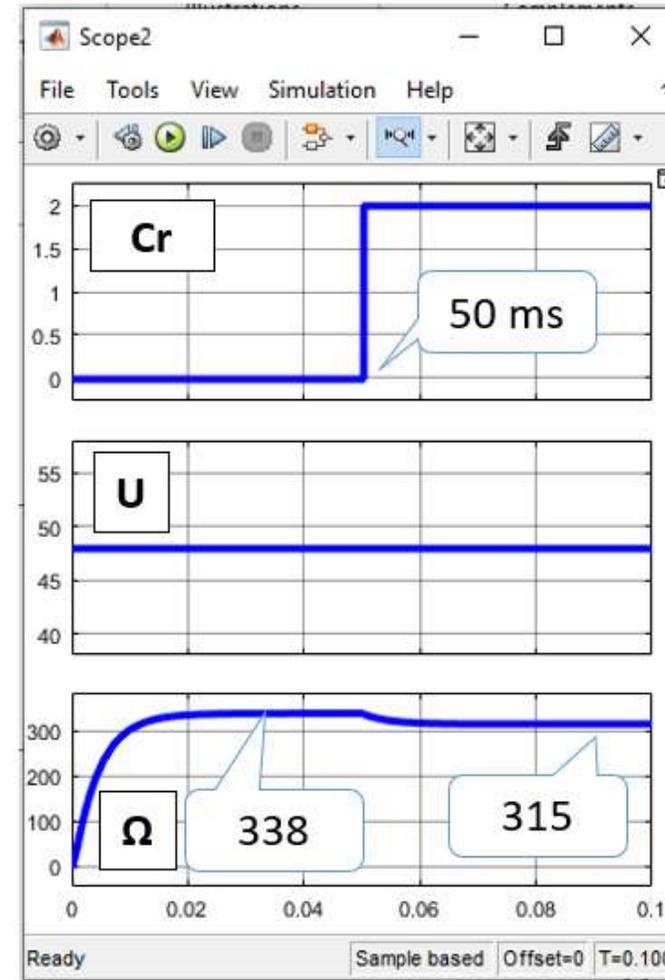
### ➤ Simulation de la boucle ouverte du machine

#### Machine synchrone en vitesse



On choisi le coefficient de frottement  $f$ , à charge nominale  $Cr = 2 \text{ Nm} \rightarrow N = 3000 \text{ tr/min}$  soit  $\Omega = 314 \text{ rad/s}$

$$f = 55 \text{ mN.m.s/rad}$$



#### Entrées échelon

- $t=0 \rightarrow U=48 \text{ V}$
- $t=50 \text{ ms} \rightarrow Cr=2 \text{ Nm}$

#### Les qualités

- $Tr$  à 5% :  $tr=13 \text{ ms}$
- Système est stable
- La vitesse est influe par  $Cr$

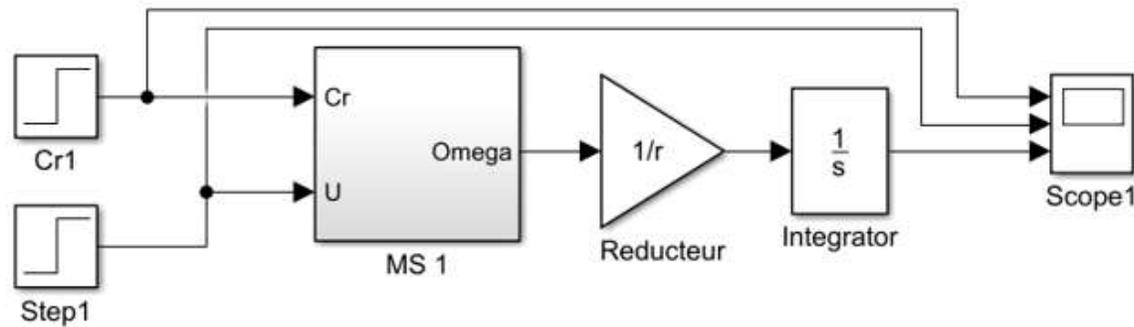
#### Conclusion

#### Asservissement de la boucle vitesse

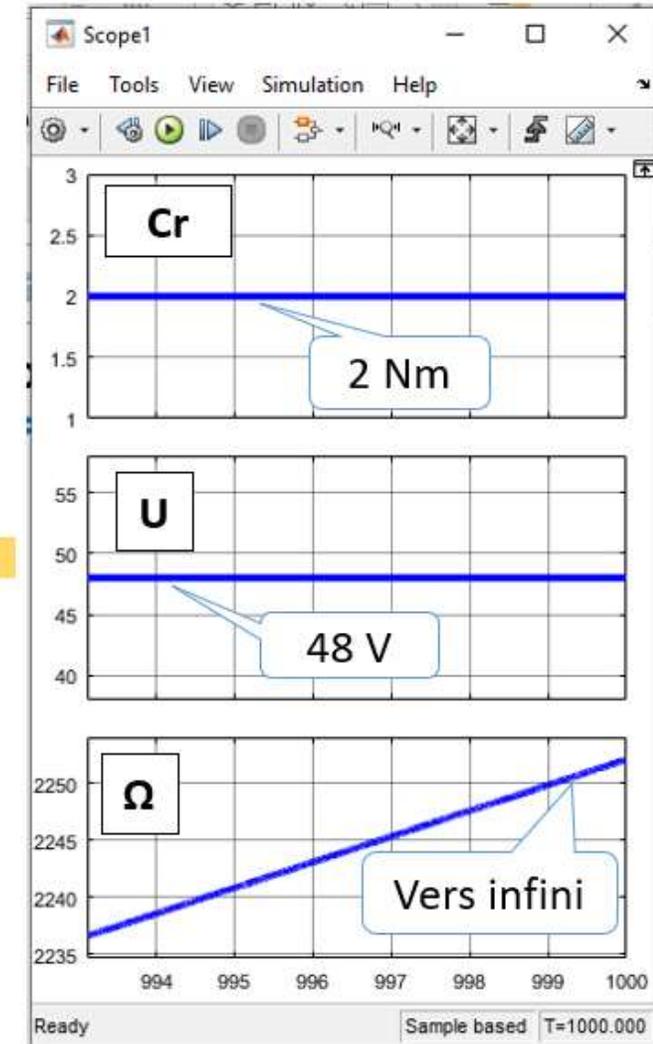
## 3-2- Asservissement de la position des articulation

### ➤ Simulation de la boucle ouverte du machine

#### Machine en position



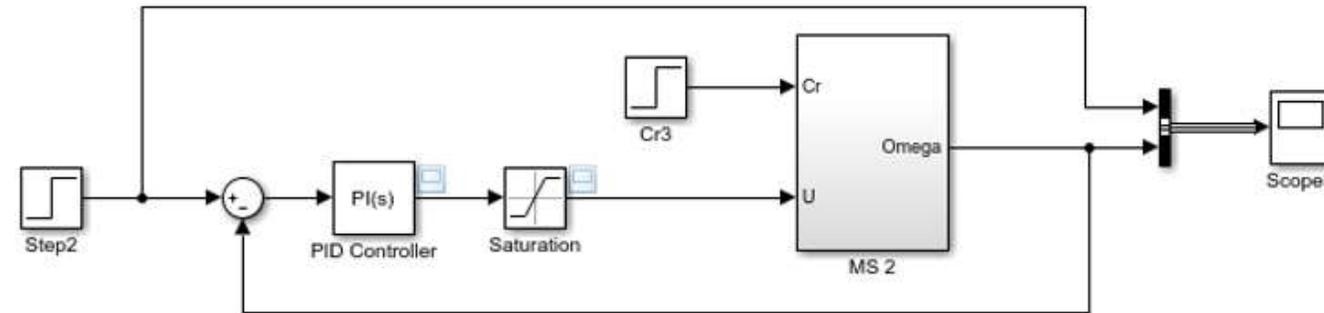
La machine en position est instable, il est indispensable de la mettre en boucle fermée pour la rendre stable



## 3-2- Asservissement de la position des articulation

### ➤ Asservissement et régulation de vitesse de la machine

#### Schéma bloc



#### Fonction de transfert de la machine

$$M(p) = \frac{1}{\frac{Rf+KeKc}{Kc} + \frac{Rj t+fL}{Kc} p + \frac{Lj t}{Kc} p^2}$$

$$M(p) = \frac{Km}{(1+\tau_1 p)(1+\tau_2 p)}$$

$$km = 7.06 \quad \tau_1 = 4.3 \text{ ms}$$

$$\tau_2 = 0.414 \text{ ms}$$

#### Qualités recherchées

- Rapide le plus possible
- Pas de dépassement
- Stable et précis

#### Calcul de correcteur sans saturation

- Les qualités peut satisfaites par un correcteur PID

$$C(p) = kp \left( 1 + \frac{1}{Ti p} \right)$$

- On utilise la technique de compensation de pôles

**Ti = τ1 = 4.3 ms** et on calcul Kp pour avoir m=1

## 3-2- Asservissement de la position des articulation

### ➤ Asservissement et régulation de vitesse de la machine

#### Fonction de transfert en BO

$$FTBO(p) = \frac{kp}{\tau_1 p} \frac{Km}{1 + \tau_2 p}$$

#### Fonction de transfert en BF

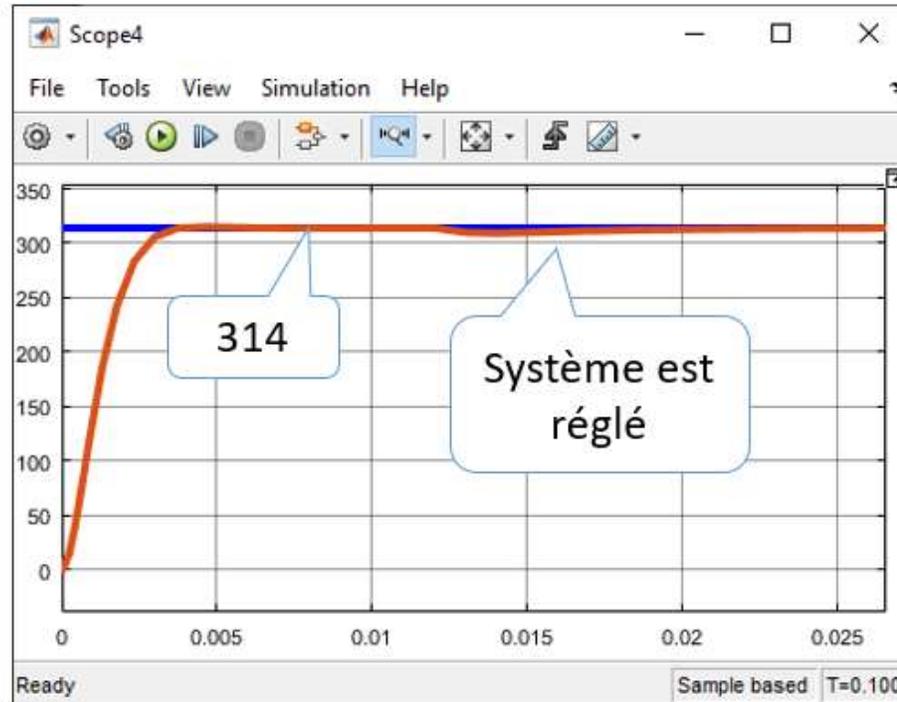
$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_1}{kp Km} p + \frac{\tau_1 \tau_2}{kp Km} p^2}$$

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + \frac{2m}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2}$$

$$\text{Donc } m = \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2} \frac{1}{kp Km}} = 3$$

$$\text{Alors : } Kp = 1.47$$

#### Résultats

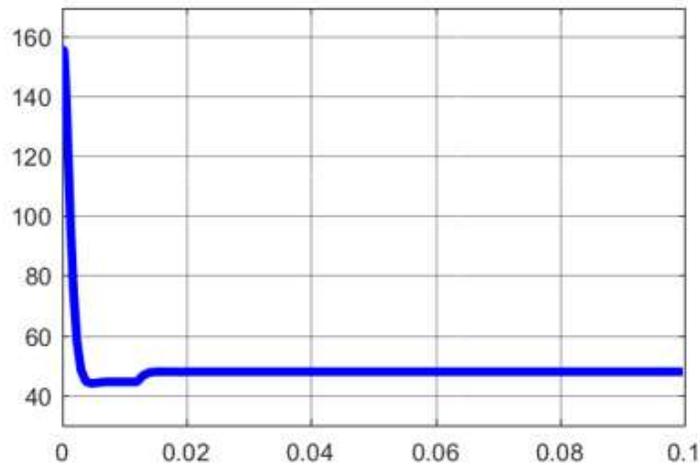


- Temps de réponse:  $t_r = 3 \text{ ms}$
- Pas de dépassement
- Système stable
- Système précis

## 3-2- Asservissement de la position des articulation

### ➤ Asservissement et régulation de vitesse de la machine

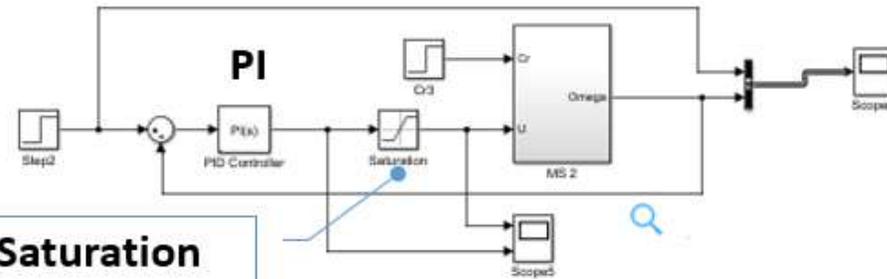
#### Surtension au niveau de moteur



La tension fournie par le correcteur est supérieur à la tension nominale du moteur

➔ Nécessite une saturation

#### Schéma bloc



Saturation  
- 48 v < U < 48 V

#### Les paramètres

Les paramètre son calculés par logiciel

Source:   [Compensator formula](#)

Proportional (P):

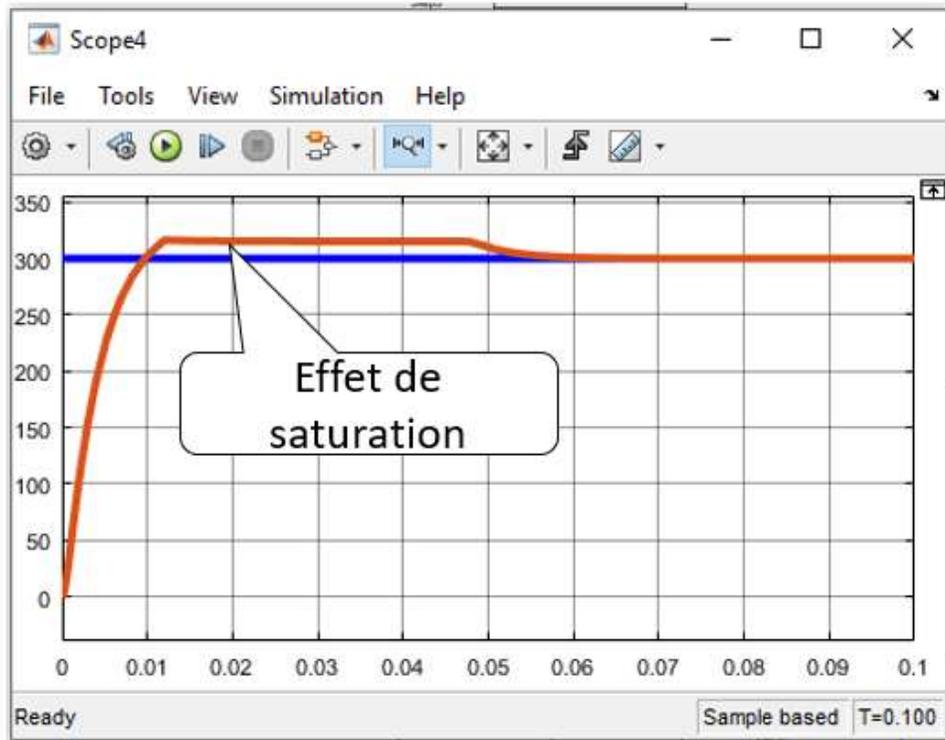
Integral (I):

$$P \left( 1 + I \frac{1}{s} \right)$$

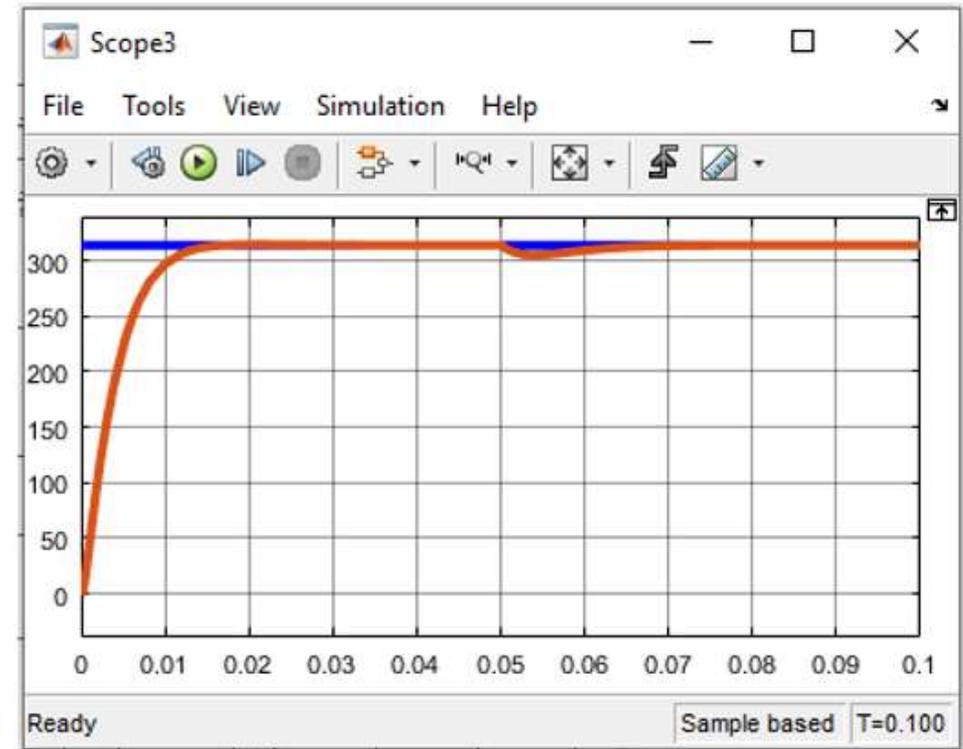
## 3-2- Asservissement de la position des articulation

### ➤ Asservissement et régulation de vitesse de la machine

#### Réponse avec le correcteur précédent

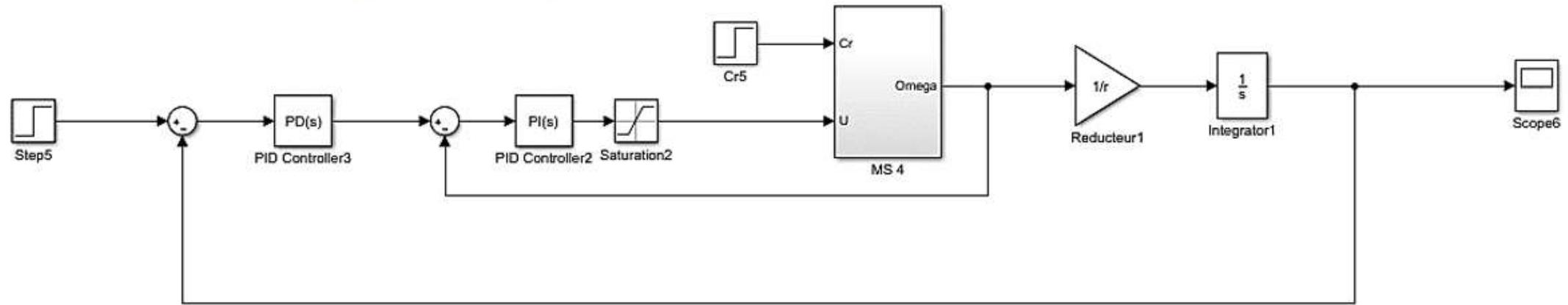


#### Nouvelle réponse



## 3-2- Asservissement de la position des articulation

### ➤ Asservissement et régulation de position de la machine



### Correcteur PD

Augmentation de la stabilité

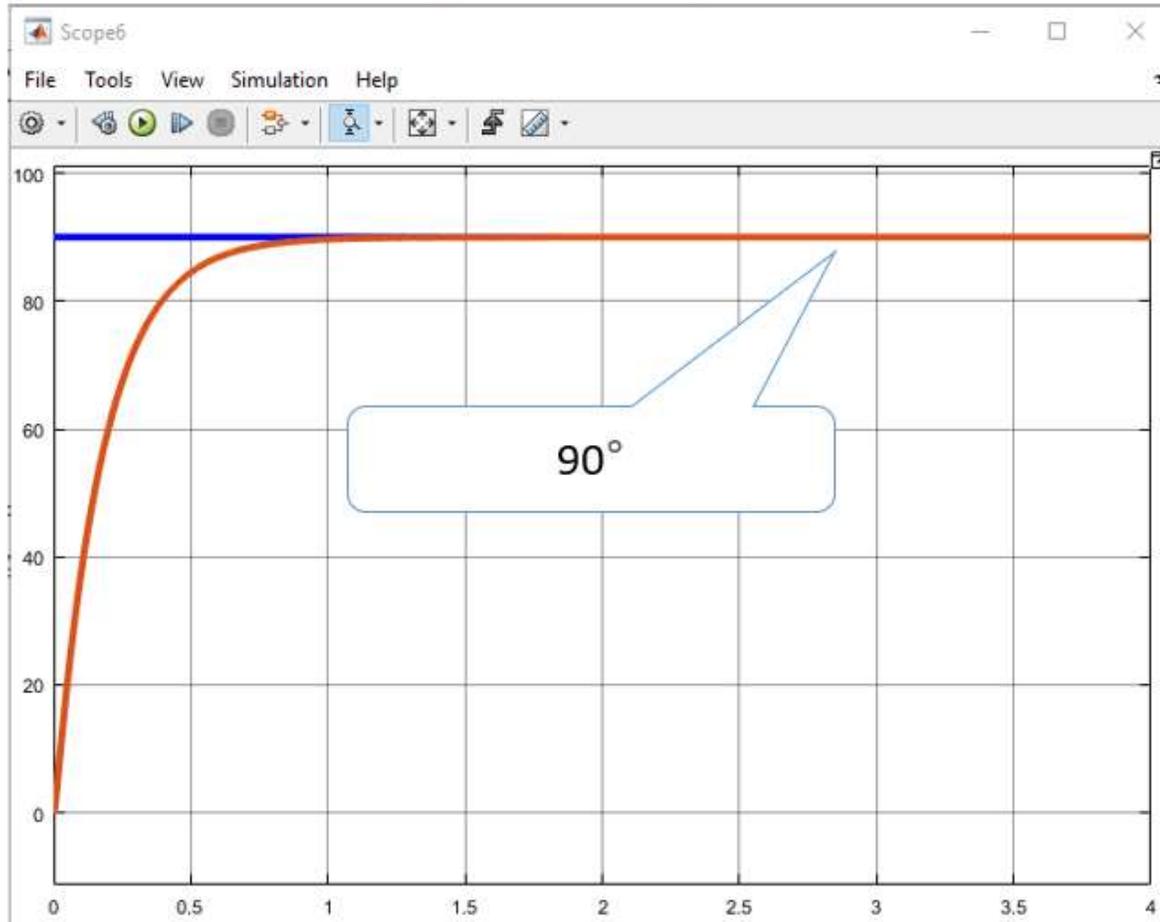
### Paramètres du correcteur PD

Les paramètres de correcteur sont calculés par le logiciel de simulation

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| Source:                 | internal         |
| Proportional (P):       | 770.184167176416 |
| Derivative (D):         | 0.00179643578933 |
| Filter coefficient (N): | 100              |

## 3-2- Asservissement de la position des articulation

### ➤ Asservissement et régulation de position de la machine



#### Qualité d'asservissement

- Système est bien réglé
- Système est stable
- Système précis
- Temps de réponse  $t_r=0.6s$

# 4 - CONCLUSION

Pour conclure. Ce sujet de TIPE a été très enrichissant pour moi, car il m'a permis de découvrir le domaine médical, ses acteurs, contraintes. Il m'a permis de participer concrètement à ses enjeux. Mon sujet de TIPE m'a aussi permis de découvrir le domaine de l'informatique pratique et sa relation avec la programmation des carte électroniques programmables et ainsi, il ma permet d'acquérir des bonnes méthodes de recherche et bien aussi la communication avec nos profs pour récupérer les informations utiles.

ACHR-17 11/4/2017

**MERCI POUR  
VOTRE  
ATTENTION**