

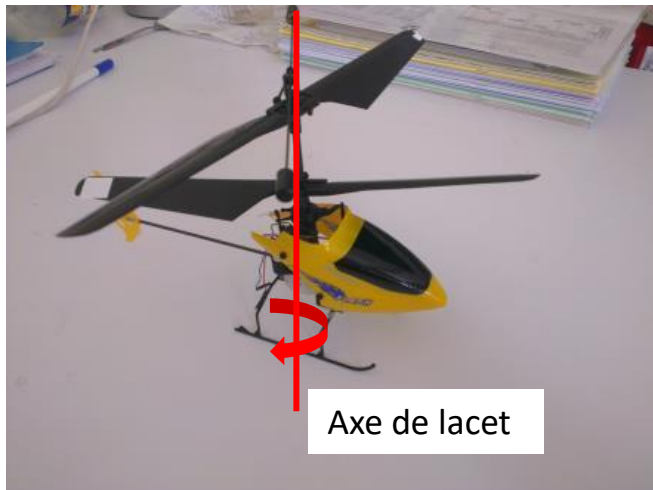
Hélicoptère birotor

Objectif : Asservir un drone birotor en position autour de son axe de lacet

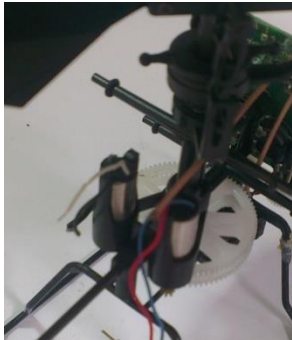
A. Présentation de la maquette

B. Modélisation

C. Pilotage



Système réel

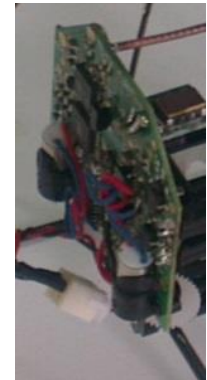


2 hélices
2 moteurs

« Stabilisateur »



Carte de commande



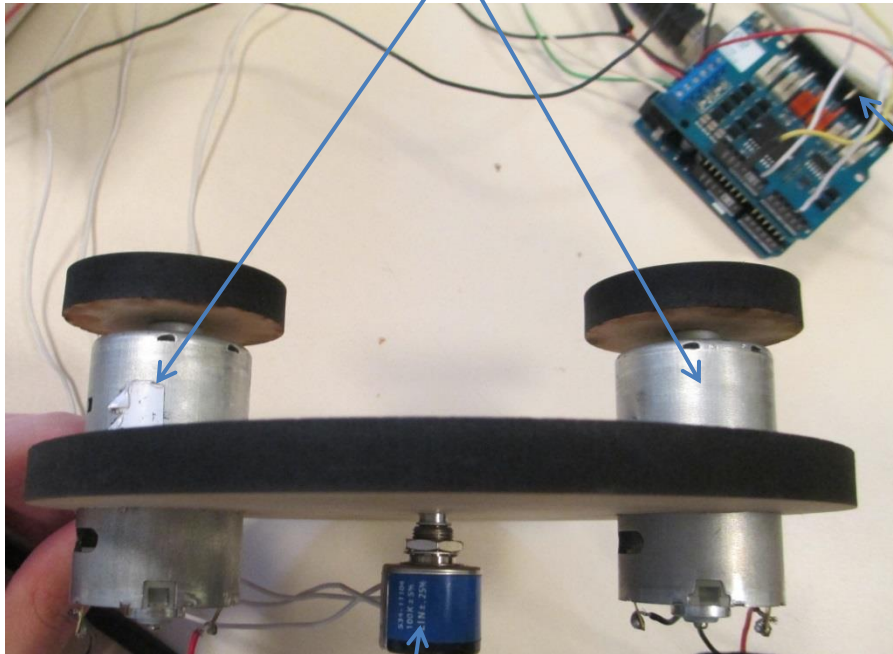
Plateau cyclique



Maquette



2 volants d'inertie
2 moteurs



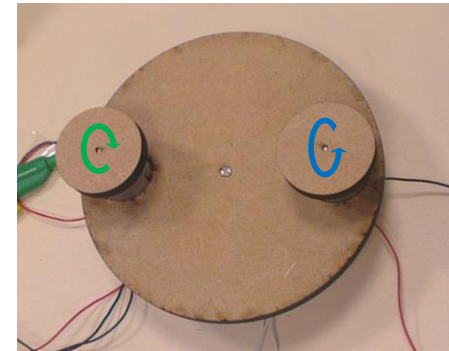
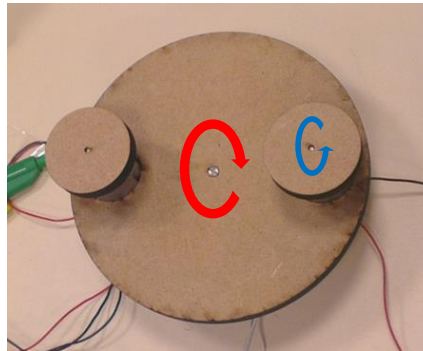
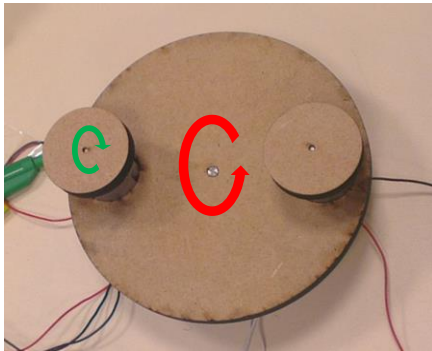
Carte arduino
shield moteur



potentiomètre



Mise en évidence du mouvement de lacet



- Rotation hélice du haut / Rotation moteur gauche
- Rotation hélice du bas / Rotation moteur droit
- Rotation châssis / Rotation plateau tournant

Modélisation du moteur à courant continu

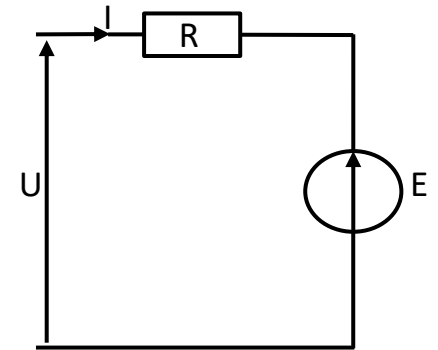


$$I_2 \cdot \frac{d\omega}{dt} = C m_2(t) - C r_2(t) - f_2 \cdot \omega(t)$$

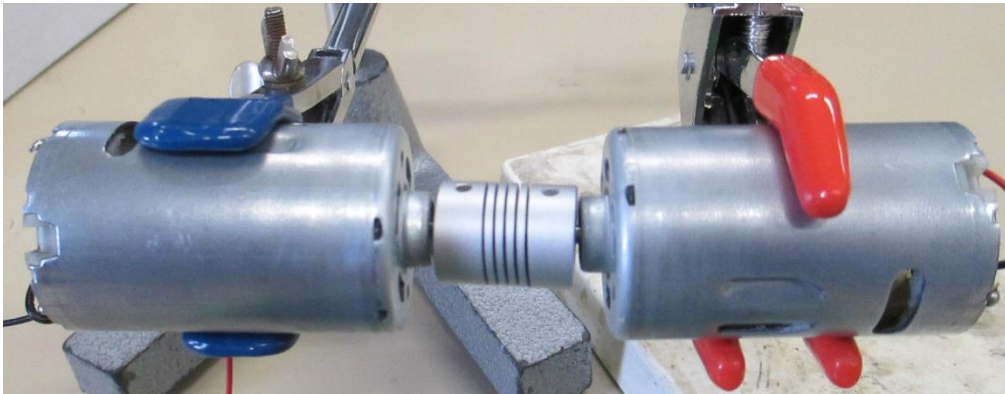
$$u(t) = E(t) + R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$E(t) = K_e \cdot \omega(t)$$

$$C m_2(t) = K_c \cdot i(t)$$

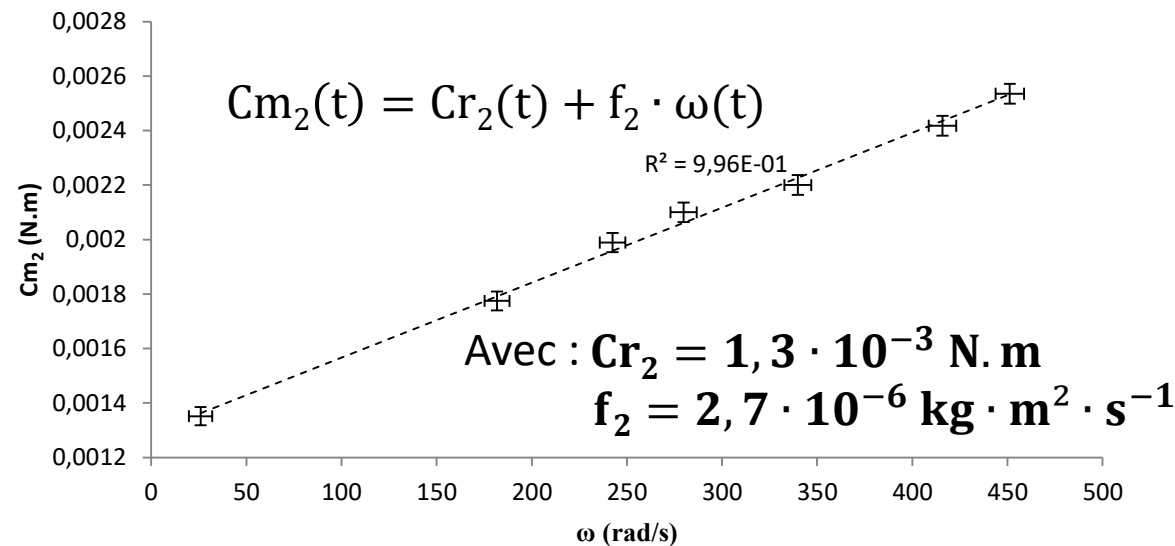
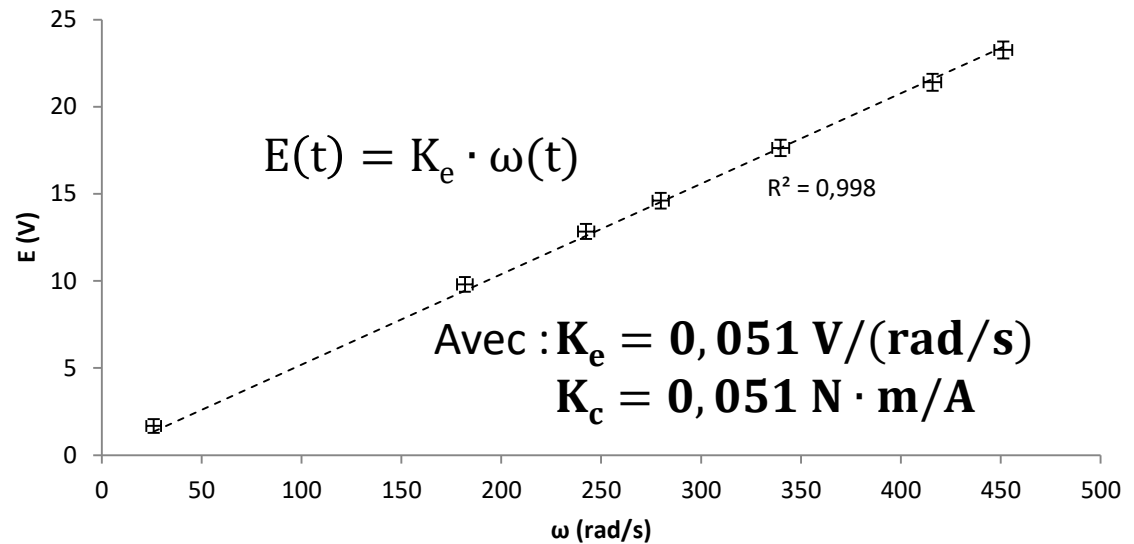
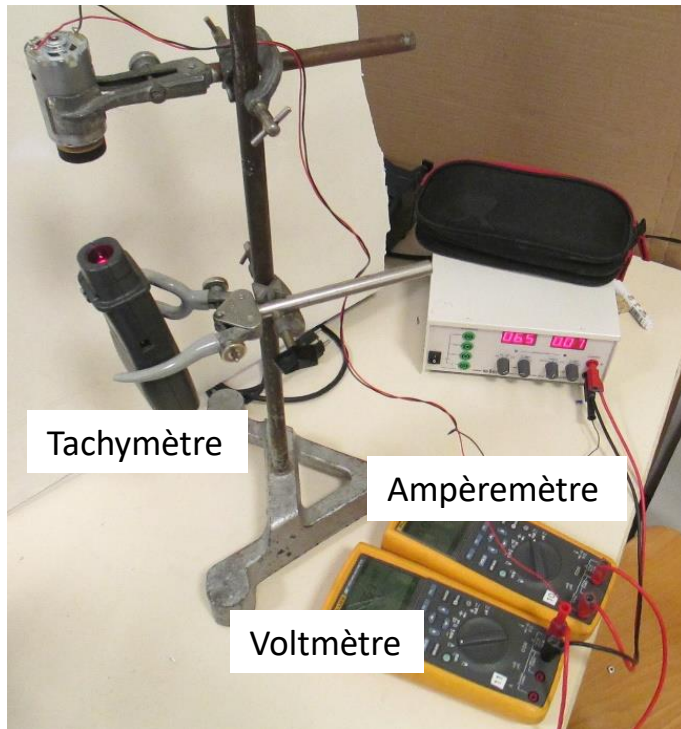


Moteur : essai à rotor bloqué



$$R = (9,96 \pm 0,12) \, \Omega \text{ à } 95\%$$

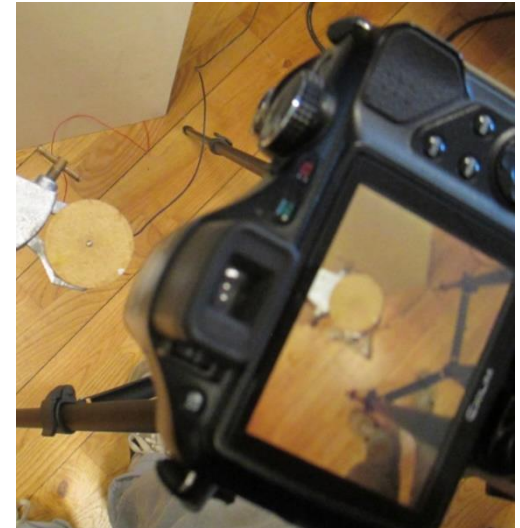
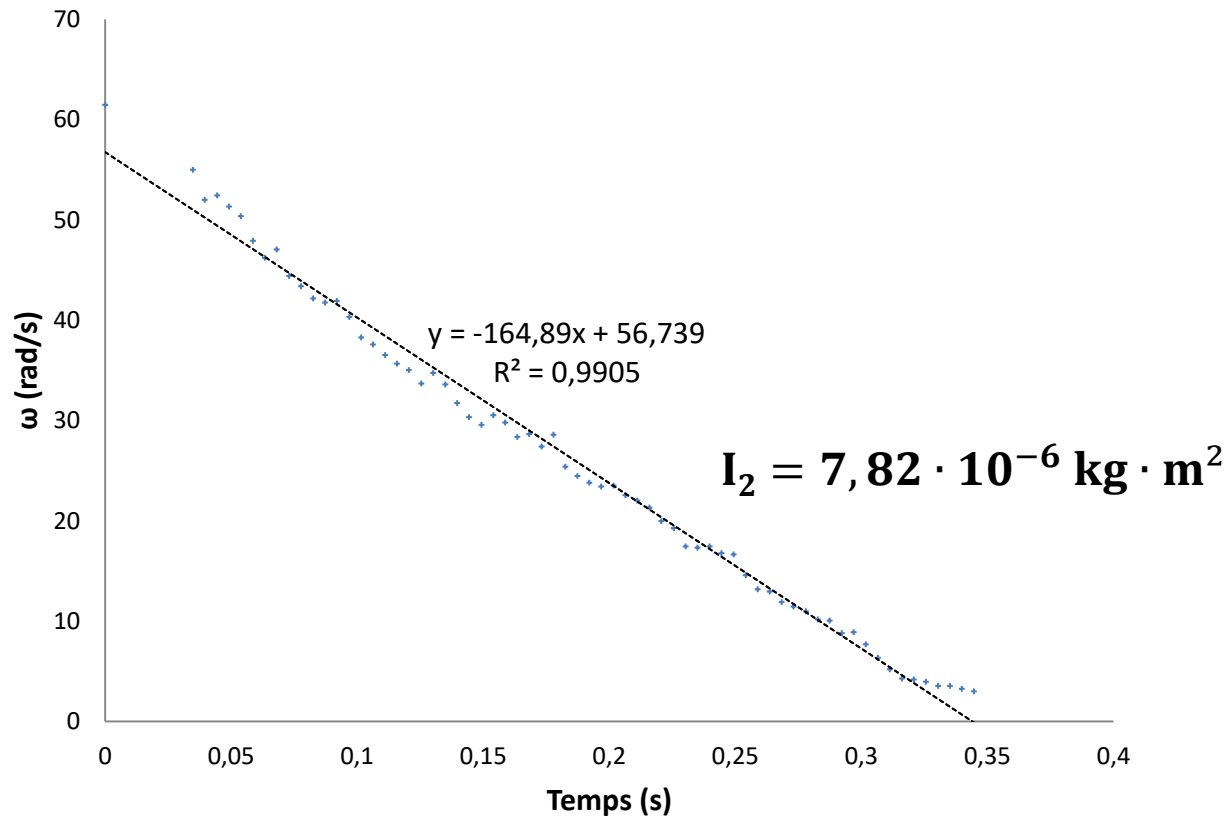
Moteur : essai à vide



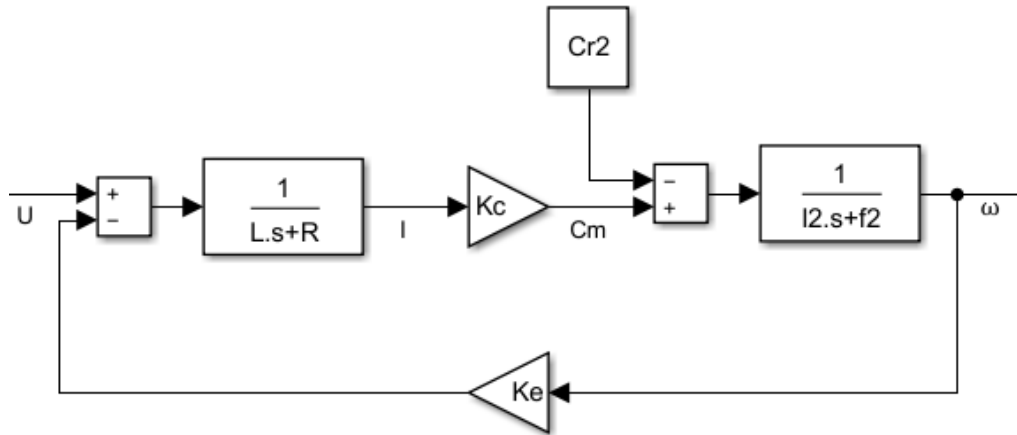
Moteur : essai de lâché

Détermination de l'inertie I_2 : TMD suivant l'axe du moteur en lâché :

$$I_2 \frac{d\omega}{dt} = -Cr_2 \text{ avec } Cr_2 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$$



Moteur : conclusion



$$R = 9,96 \, \Omega$$

$$K_e = 0,051 \, \text{V}/(\text{rad}/\text{s})$$

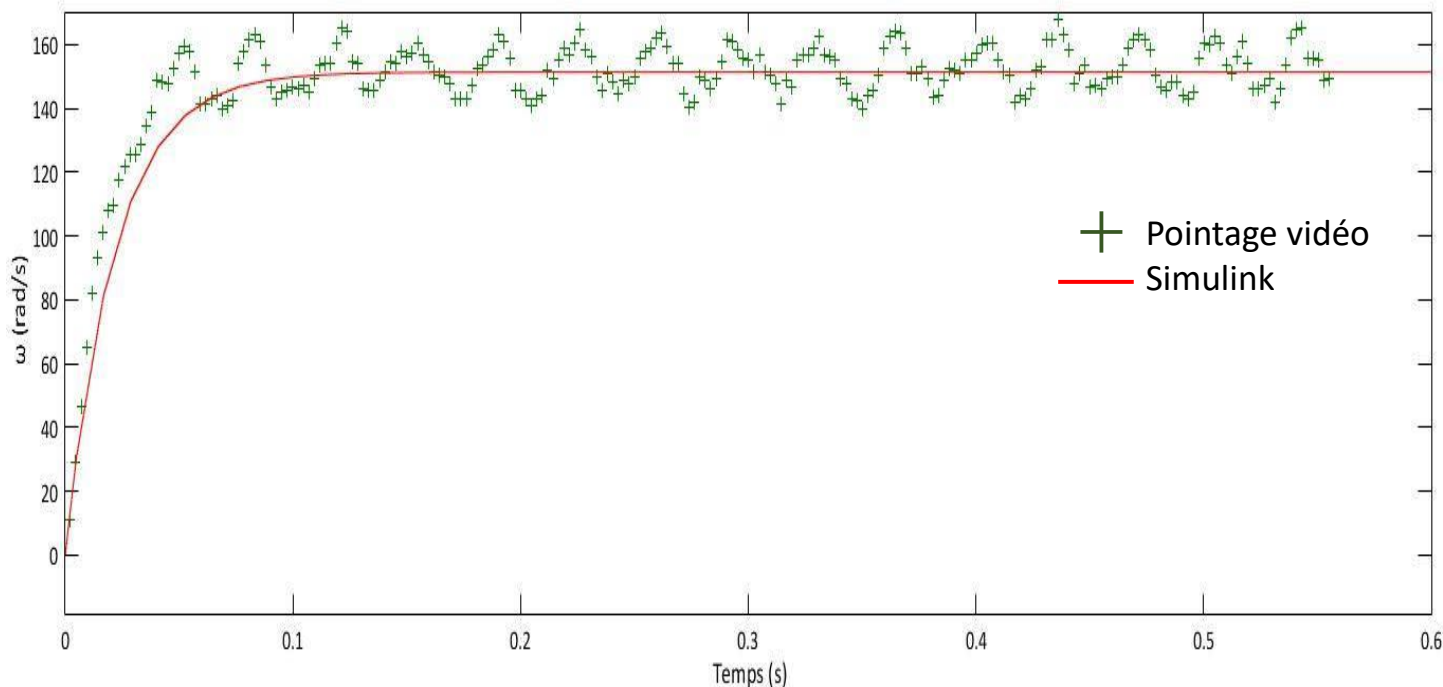
$$K_c = 0,051 \, \text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$$

$$I_2 = 7,82 \cdot 10^{-6} \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

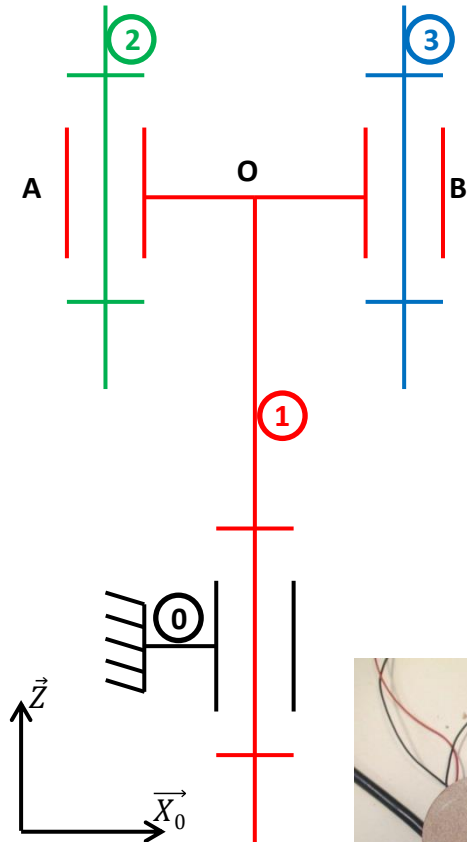
$$Cr_2 = 1,3 \cdot 10^{-3} \, \text{N} \cdot \text{m}$$

$$f_2 = 2,7 \cdot 10^{-6} \, \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Saut échelon de 10V à un des moteur :



Equations du mouvement du plateau



Longueurs :
 $\overrightarrow{OB} = r_2 \cdot \overrightarrow{x_1}$;
 $\overrightarrow{OA} = -r_3 \cdot \overrightarrow{x_1}$
 $r_3 = r_2$

On isole 3 (respectivement 2)

Théorème du moment dynamique en A suivant \vec{z} :

$$I_3 \cdot (\dot{\omega}_{31}(t) + \dot{\omega}_{10}(t)) = \mathbf{Cm}_3(t) - \mathbf{Cr}_3(t) - \mathbf{f}_3 \cdot \omega_{31}(t)$$

On isole {1+2+3}

Théorème du moment dynamique en O suivant \vec{z} , en posant

$$I_{eq} = I_1 + I_2 + m_2 \cdot r_2^2 + I_3 + m_3 \cdot r_3^2 :$$

$$I_{eq} \cdot \dot{\omega}_{10}(t) + I_2 \cdot \dot{\omega}_{21}(t) + I_3 \cdot \dot{\omega}_{31}(t) = -\mathbf{Cr}_1(t) - \mathbf{f}_1 \cdot \omega_{10}(t)$$

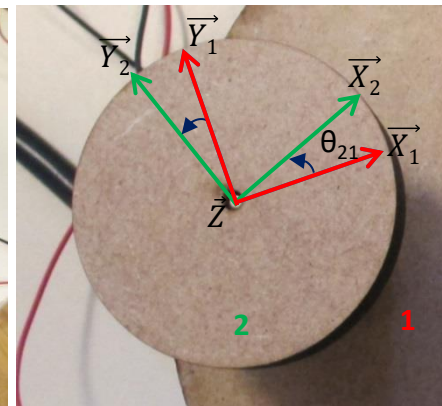
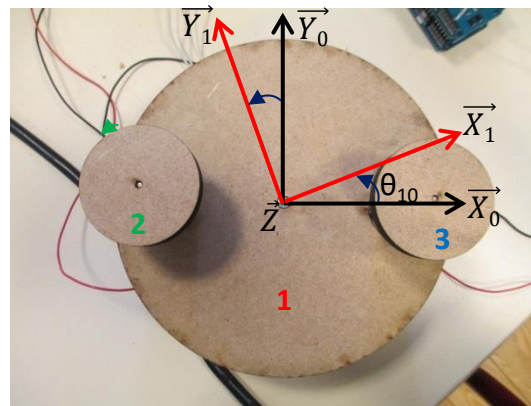
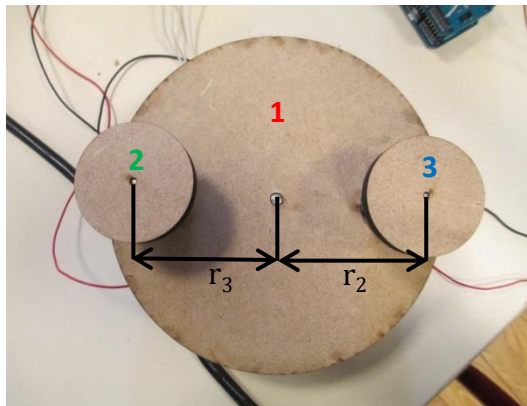
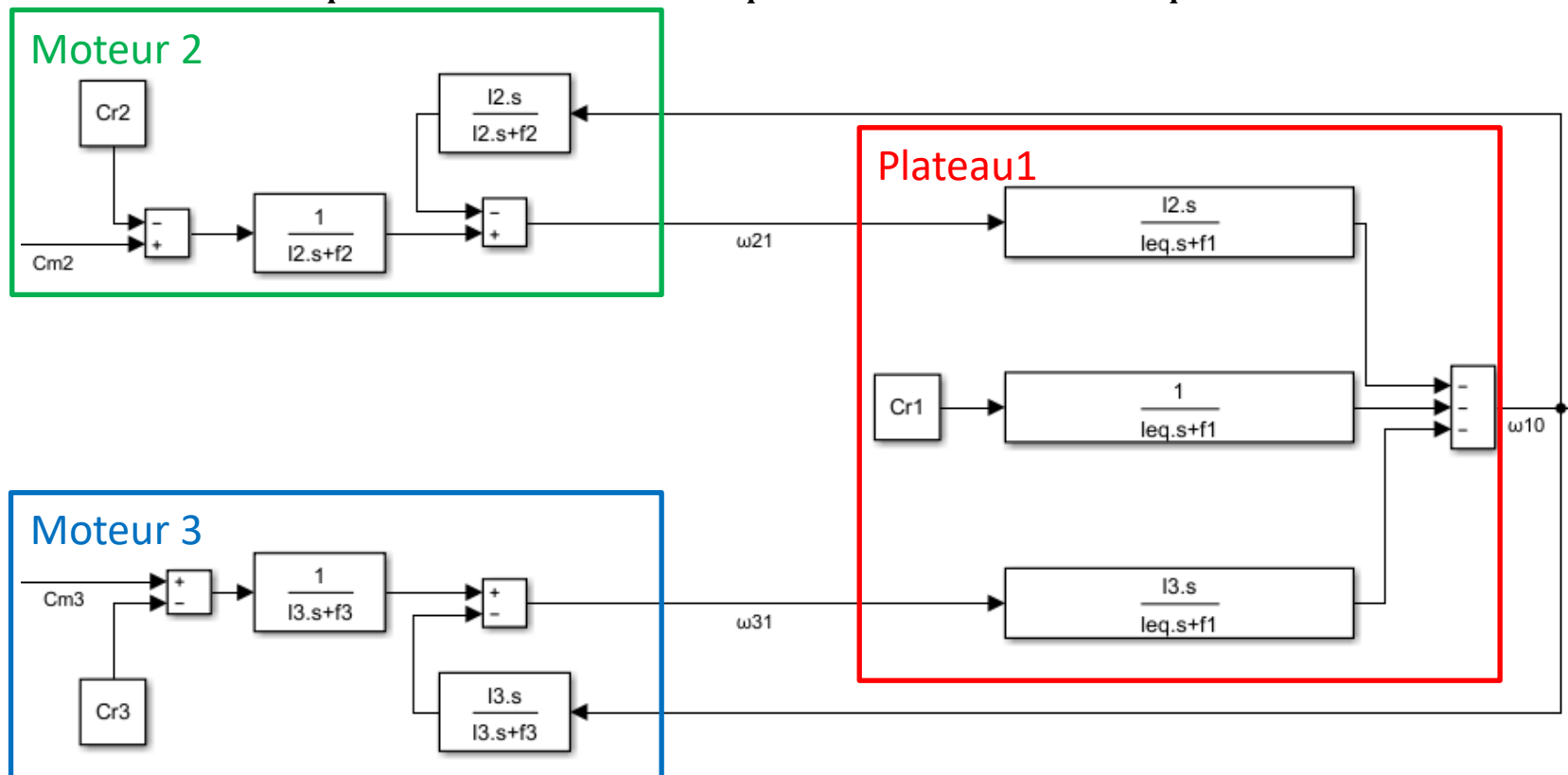


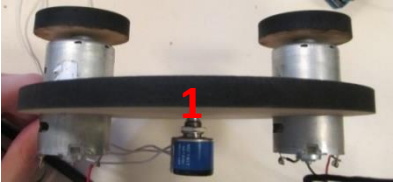
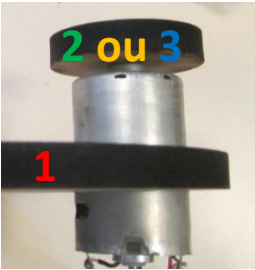
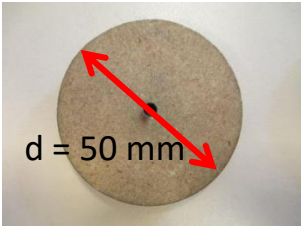
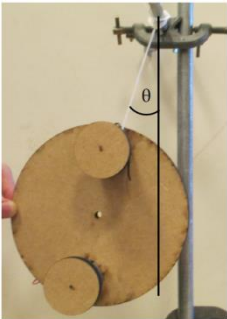
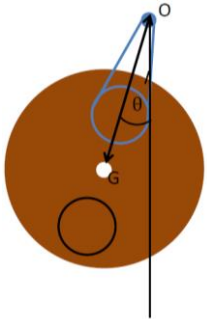
Schéma bloc

$$\Omega_{31}(p) = \frac{Cm_3(p) - Cr_3(p)}{f_3 + I_3 \cdot p} - \frac{I_3 \cdot p}{f_3 + I_3 \cdot p} \cdot \Omega_{10}(p)$$

$$\Omega_{10}(p) = -\frac{1}{I_{eq} \cdot p + f_1} \cdot Cr_1(p) - \frac{I_2 \cdot p}{I_{eq} \cdot p + f_1} \cdot \Omega_{21}(p) - \frac{I_3 \cdot p}{I_{eq} \cdot p + f_1} \cdot \Omega_{31}(p)$$

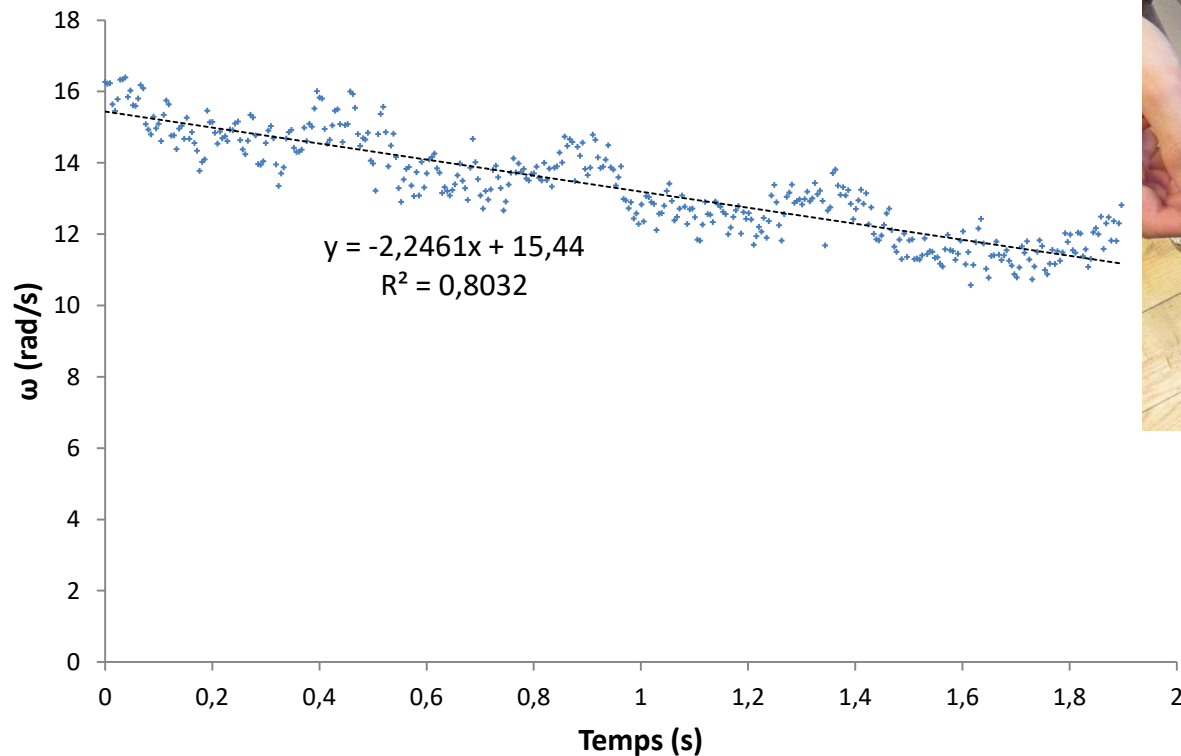


Moments d'inerties

Ensemble	Masses pesées	Méthode	Inertie
<p>1</p> 	$M_{\text{moteur}} = 210,7 \text{ g}$ $M_{\text{plateau}} = 130,8 \text{ g}$ $M_1 = 2 \cdot M_{\text{moteur}} + M_{\text{plateau}}$ $= 552,2 \text{ g}$	Géométrique	$I_1 = 2,05 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
<p>2 ou 3</p> 	$M_{\text{volant}} = 12 \text{ g}$ 	Expérimentale Géométrique	$I_2 = I_3 = 7,82 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ $I_{\text{volant}} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
<p>« Inertie équivalente »</p> 	$M_2 = M_3 \approx M_{\text{moteur}} = 210,7 \text{ g}$ 	A partir des inerties précédentes Expérimentale	$I_{\text{eq}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ $I_{\text{eq}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

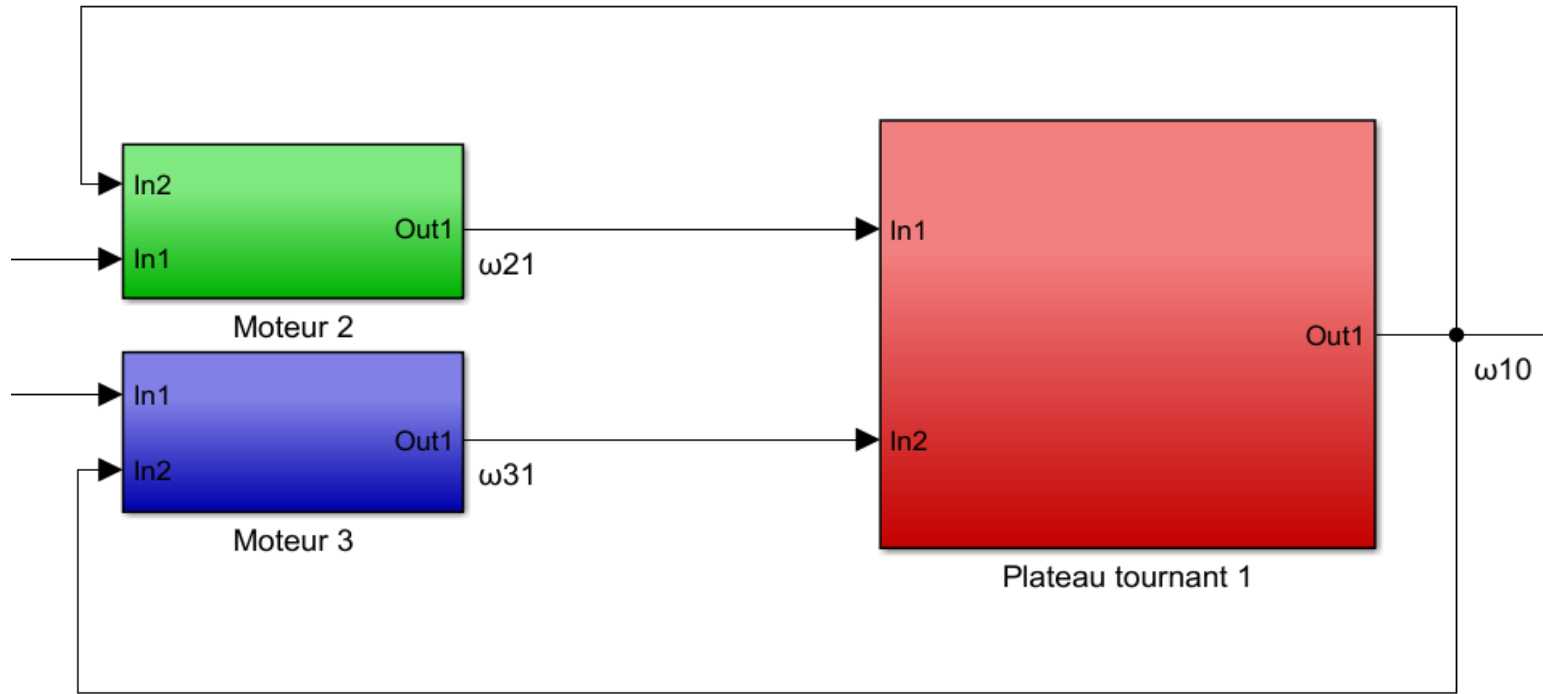
Couple résistant au niveau du potentiomètre

TMD suivant l'axe du potentiomètre en lâché : $I_{eq} \frac{d\omega}{dt} = -Cr_1$
avec $I_{eq} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$



$$Cr_1 = 0,008 \text{ N.m}$$

Schéma bloc final



$$R = 9,96 \, \Omega$$

$$K_c = 0,051 \, \text{N} \cdot \text{m/A}$$

$$K_e = 0,051 \, \text{V}/(\text{rad/s})$$

$$I_1 = 2,05 \cdot 10^{-3} \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_2 = I_3 = 7,82 \cdot 10^{-6} \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

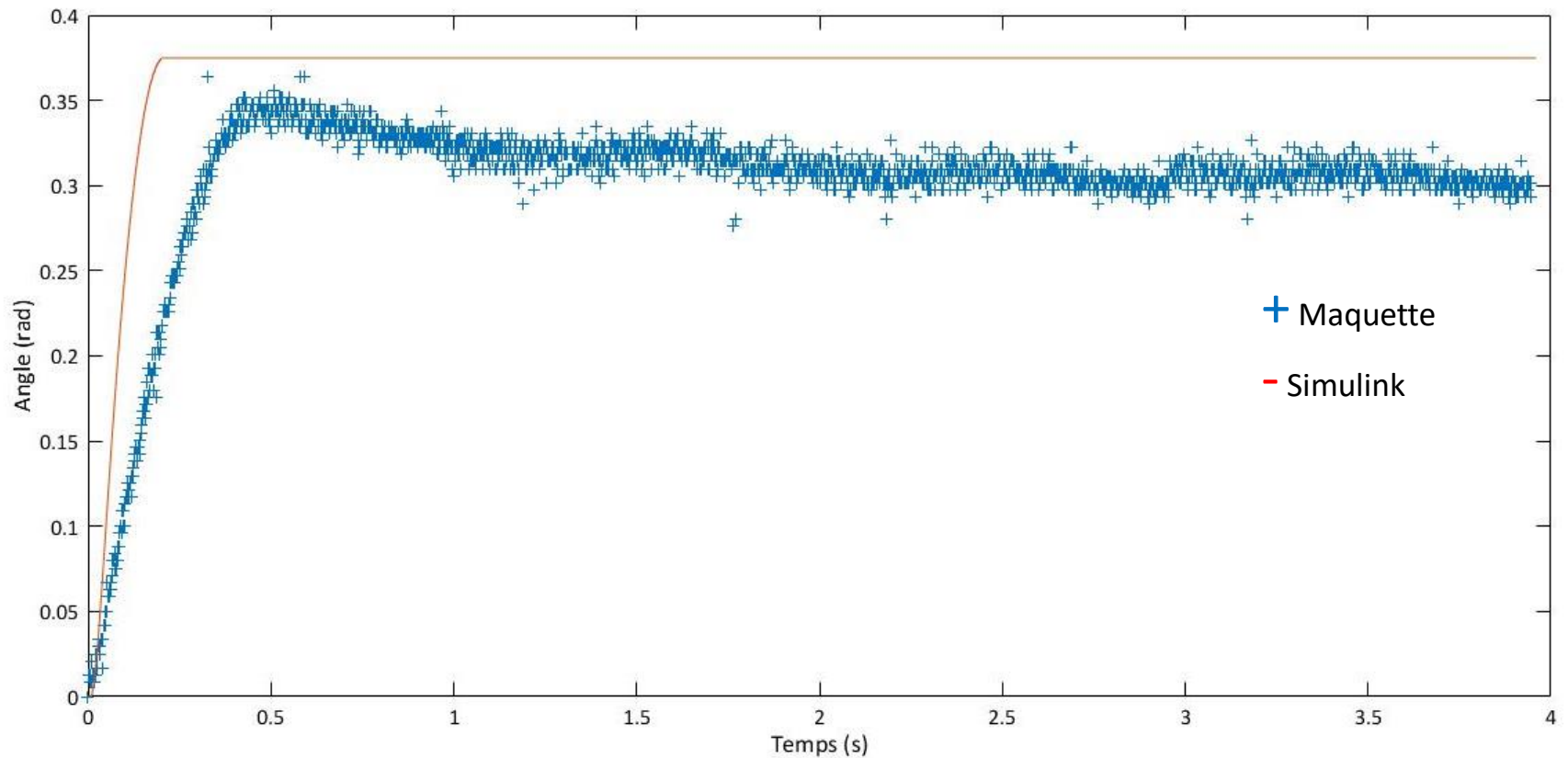
$$I_{eq} = 3,6 \cdot 10^{-3} \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$Cr_1 = 8 \cdot 10^{-3} \, \text{N} \cdot \text{m}$$

$$Cr_2 = Cr_3 = 1,3 \cdot 10^{-3} \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Validation : essai en boucle ouverte

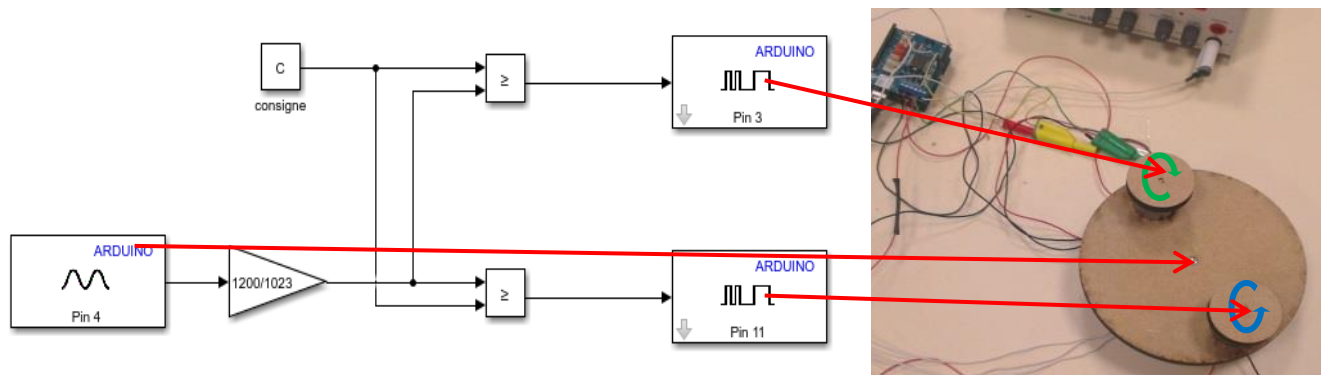
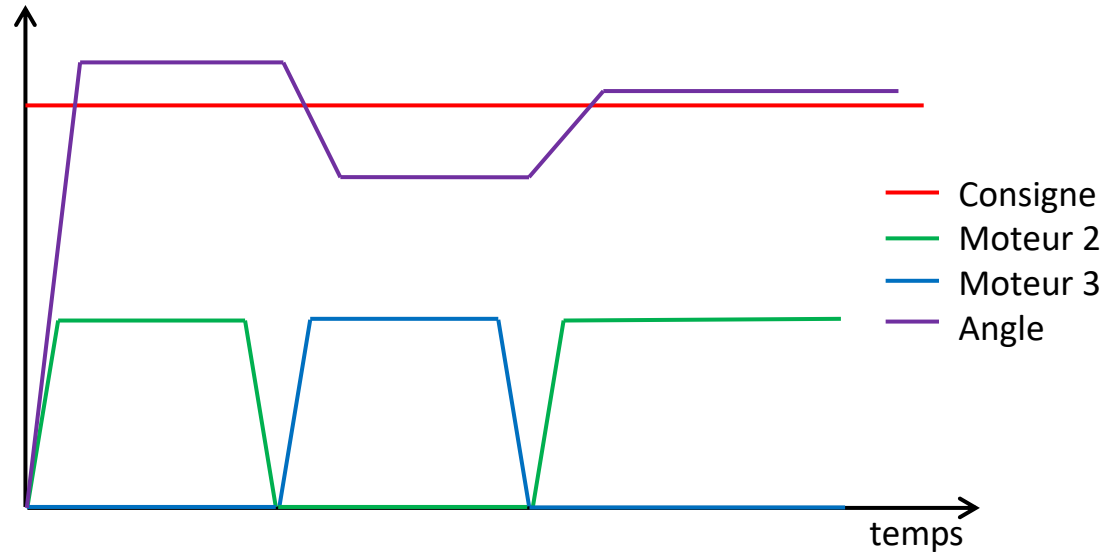
Saut échelon de 20V à un seul des moteurs :



Première approche

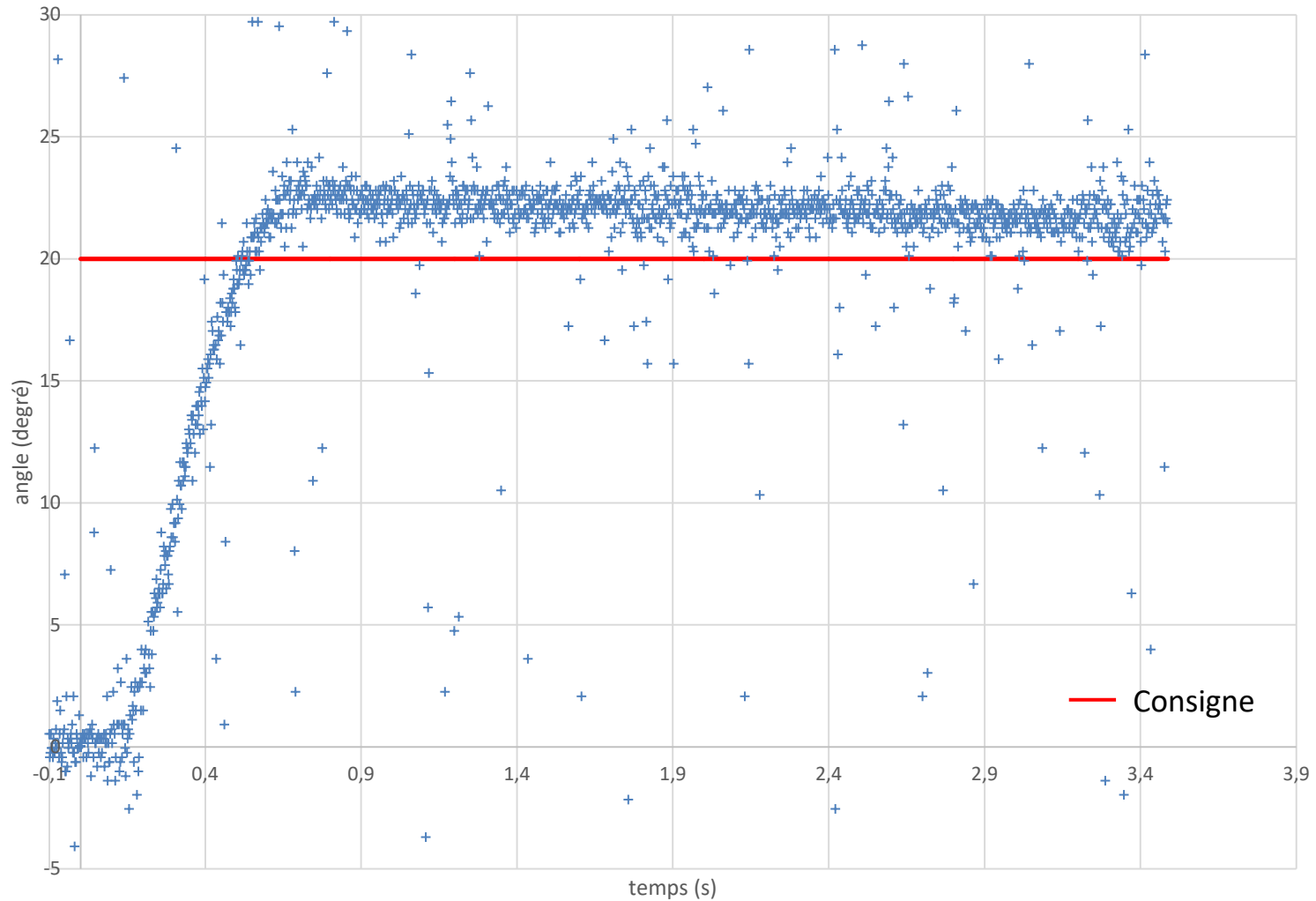
Si $\text{angle} < \text{consigne}$:
le moteur 2 tourne

Si $\text{angle} > \text{consigne}$:
le moteur 3 tourne



Première approche

Réponse à une consigne de 20°

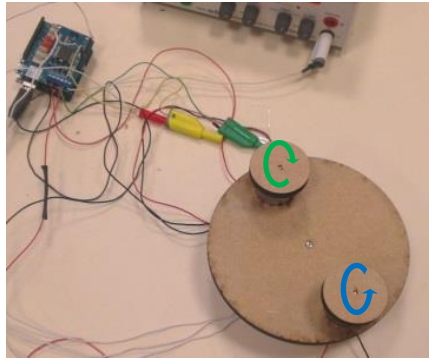


Seconde approche

```
while (abs(angle-C) > 2)
{
  //Acceleration variable, a augmente quand on se rapproche de la consigne
  a = 3*abs(Consigne-abs(angle-C))+5;

  //Acceleration
  if (C>angle)
  {
    pwma += 5;
    analogWrite(Va,pwma);
    delay(a);
    angle = analogRead(pot);
  }
  if (C<angle)
  {
    pwmb += 5;
    analogWrite(Vb,pwmb);
    delay(a);
    angle = analogRead(pot);
  }

  //Arrêt
  if (pwma >= 250)
  {
    for (int i=0; i<=50; i++)
    {
      pwma -=5;
      analogWrite(Va,pwma);
      delay(d); // on définit d pour que la maquette reste immobile quand le moteur ralentit
    }
    pwma = 0;
    analogWrite(Va,pwma);
  }
  if (pwmb >= 250)
  {
    for (int i=0; i<=50; i++)
    {
      pwmb -=5;
      analogWrite(Vb,pwmb);
      delay(d); // on définit d pour que la maquette reste immobile quand le moteur ralentit
    }
    pwmb = 0;
    analogWrite(Vb,pwmb);
  }
}
```



Tant que $|\text{angle} - \text{consigne}| > \text{précision}$

Si consigne < angle :

→ On augmente la vitesse du moteur 2

→ Plus on s'approche de la consigne, plus le « temps d'accélération » est grand

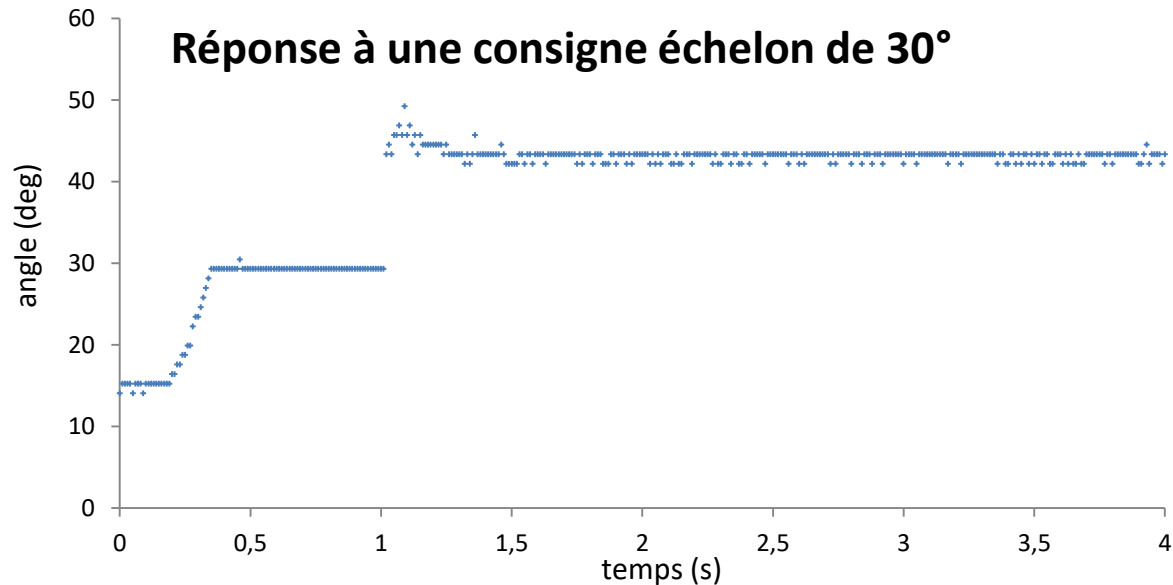
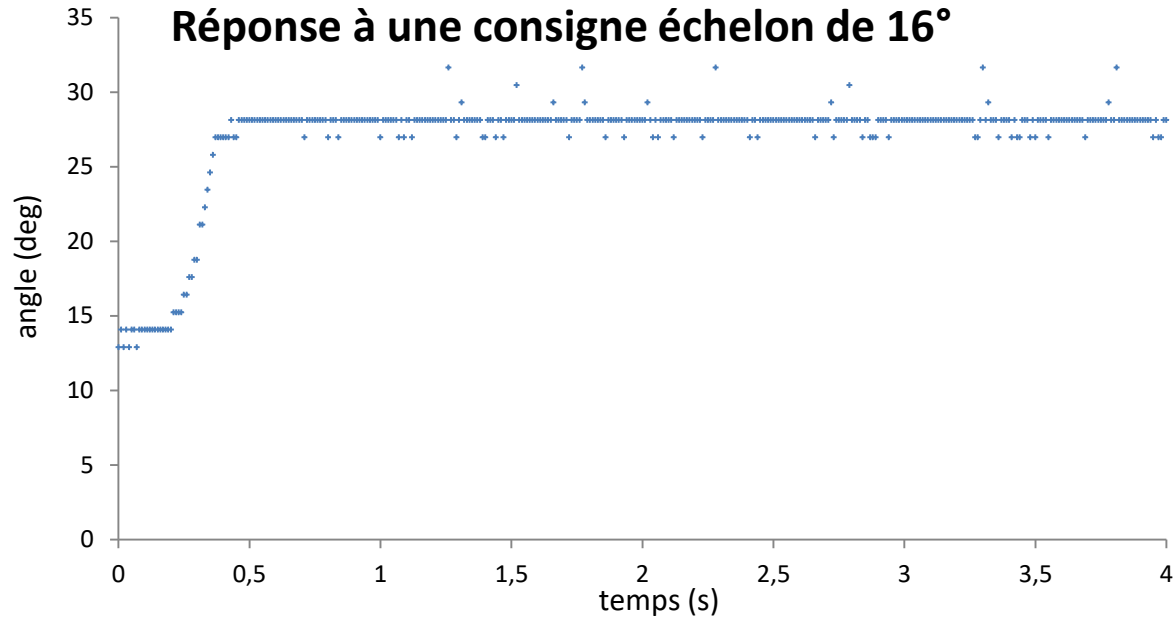
Si consigne > angle :

→ On augmente la vitesse du moteur 3

→ Plus on s'approche de la consigne, plus le « temps d'accélération » est grand

Arrêt des moteurs grâce aux frottements s'ils tournent à pleine vitesse.

Seconde approche



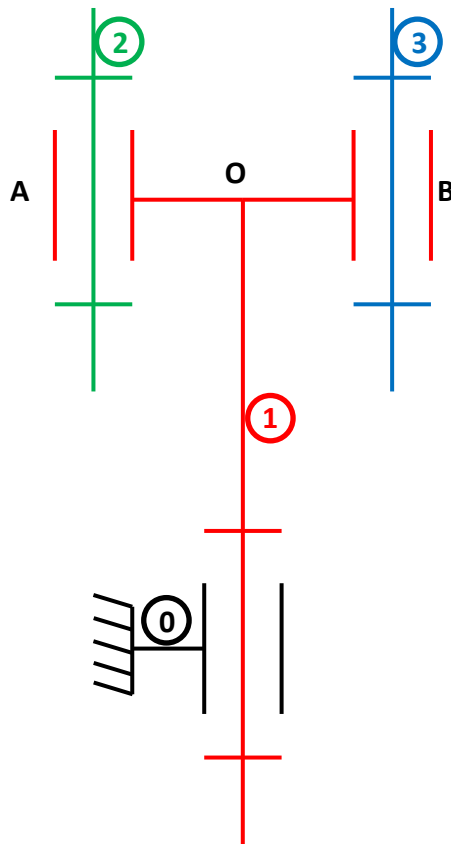
Hélicoptère birotor

Objectif : Asservir un drone birotor en position autour de son axe de lacet

Conclusion

Annexes

Equations du mouvement du plateau tournant



Bâti 0 : $R_0(0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z})$

Plateau 1 :

- Repère $R_1(0, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z})$
- Masse m_1
- Moment d'inertie par rapport à l'axe $(0, \vec{z})$ I_1

Solide 2 :

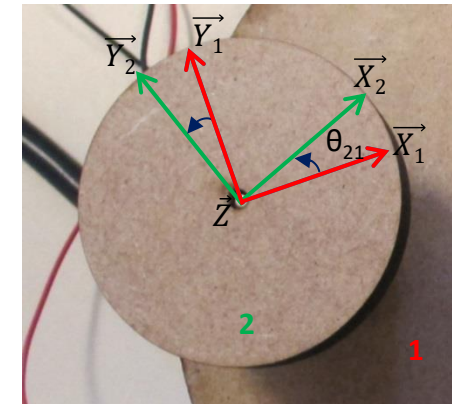
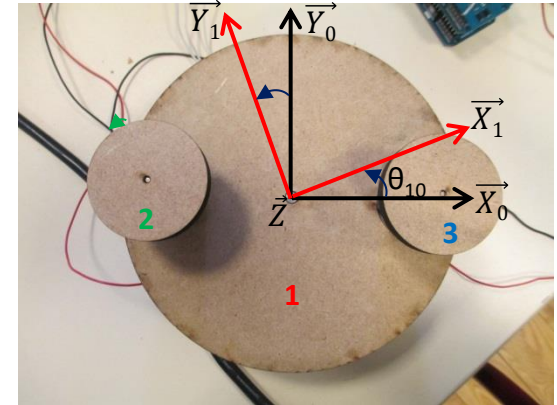
- Repère $R_2(0, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z})$
- Masse m_2
- Moment d'inertie par rapport à l'axe (A, \vec{z}) I_2

Solide 3 :

- Repère $R_3(0, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z})$
- Masse m_3
- Moment d'inertie par rapport à l'axe (A, \vec{z}_0) I_3

Longueurs : $\vec{OB} = r_2 \cdot \vec{x}_1$; $\vec{OA} = -r_3 \cdot \vec{x}_1$

On applique un couple Cm_2 sur le solide 2 – respectivement Cm_3 sur le solide 3 – grâce à deux moteurs montés sur le plateau 1



Annexes

Equations du mouvement du plateau tournant

On isole 3 (respectivement 2)

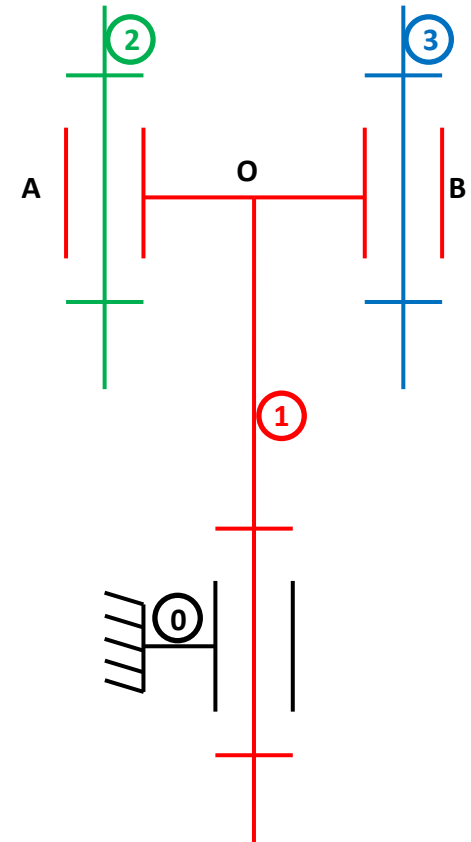
Inventaire des actions mécaniques extérieures :

- $\overrightarrow{M(A, g \rightarrow 3)} \cdot \vec{z} = 0$
- $\overrightarrow{M(A, 1 \rightarrow 3)} \cdot \vec{z} = C m_3 - C r_3 - f_3 \cdot \omega_{31}$

Théorème du moment dynamique en A suivant \vec{z} :

- $\overrightarrow{M(A, \bar{3} \rightarrow 3)} \cdot \vec{z} = \overrightarrow{\delta(A, 3/0)} \cdot \vec{z}$

$$\text{Donc : } \mathbf{I}_3 \cdot (\dot{\omega}_{31}(\mathbf{t}) + \dot{\omega}_{10}(\mathbf{t})) = \mathbf{C} \mathbf{m}_3(\mathbf{t}) - \mathbf{C} \mathbf{r}_3(\mathbf{t}) - \mathbf{f}_3 \cdot \omega_{31}(\mathbf{t})$$



Annexes

Equations du mouvement du plateau tournant

On isole 1+2+3 :

Inventaire des actions mécaniques extérieures :

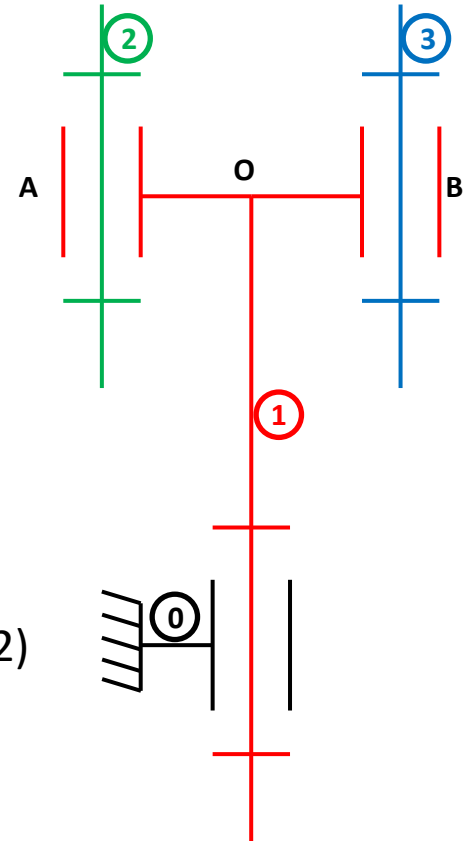
- $\overrightarrow{M(O, g \rightarrow 1)} \cdot \vec{z} = 0$
- $\overrightarrow{M(O, g \rightarrow 2)} \cdot \vec{z} = 0$
- $\overrightarrow{M(O, g \rightarrow 3)} \cdot \vec{z} = 0$
- $\overrightarrow{M(O, 0 \rightarrow 1)} \cdot \vec{z} = -Cr_1 - f_1 \cdot \omega_{10}$

Théorème du moment dynamique en O suivant \vec{z} :

- $\overrightarrow{M(O, 1 + 2 + 3 \rightarrow 1 + 2 + 3)} \cdot \vec{z} = \overrightarrow{\delta(O, 1 + 2 + 3/0)} \cdot \vec{z}$
- $\overrightarrow{\delta(O, 1/0)} \cdot \vec{z} = I_1 \cdot \dot{\omega}_{10}$
- $\overrightarrow{\delta(O, 3/0)} \cdot \vec{z} = I_3 \cdot \dot{\omega}_{31} + (I_3 + m_3 \cdot r_3^2) \cdot \dot{\omega}_{10}$ (de même pour 2)

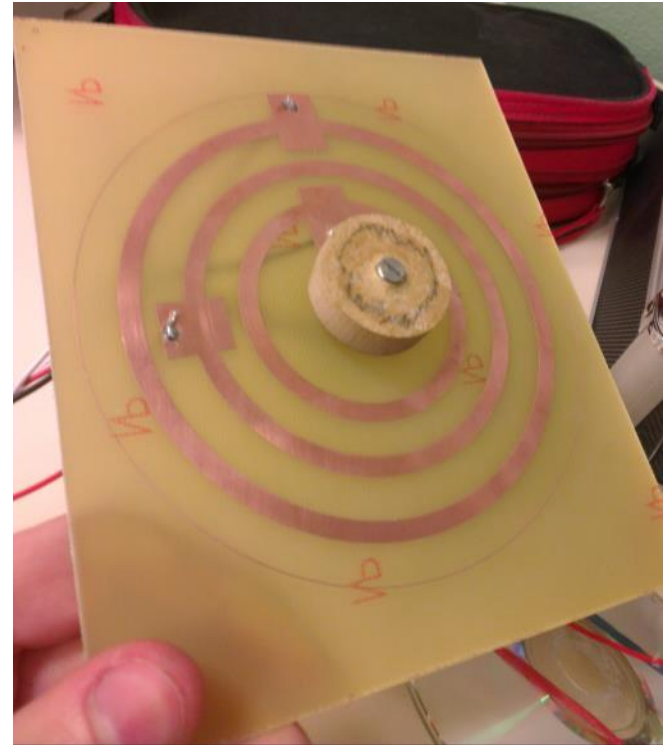
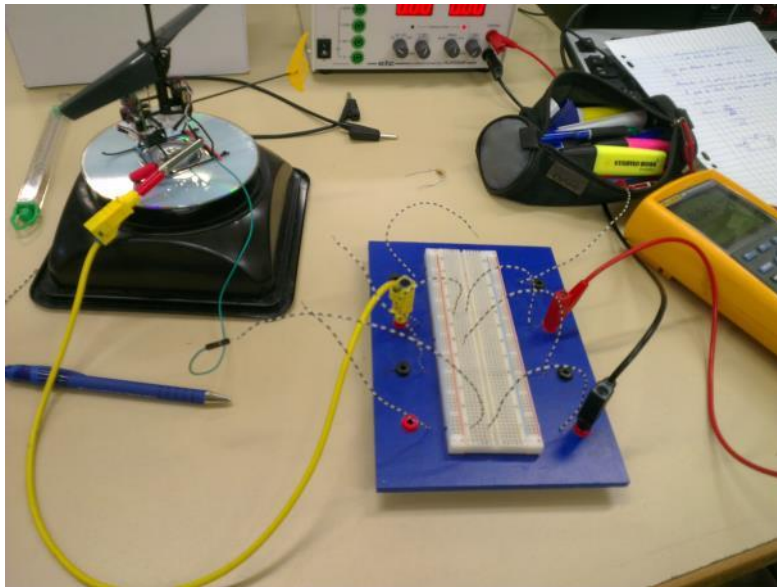
En posant $I_{eq} = I_1 + I_2 + m_2 \cdot r_2^2 + I_3 + m_3 \cdot r_3^2$:

$$I_{eq} \cdot \dot{\omega}_{10}(t) + I_2 \cdot \dot{\omega}_{21}(t) + I_3 \cdot \dot{\omega}_{31}(t) = -Cr_1(t) - f_1 \cdot \omega_{10}(t)$$



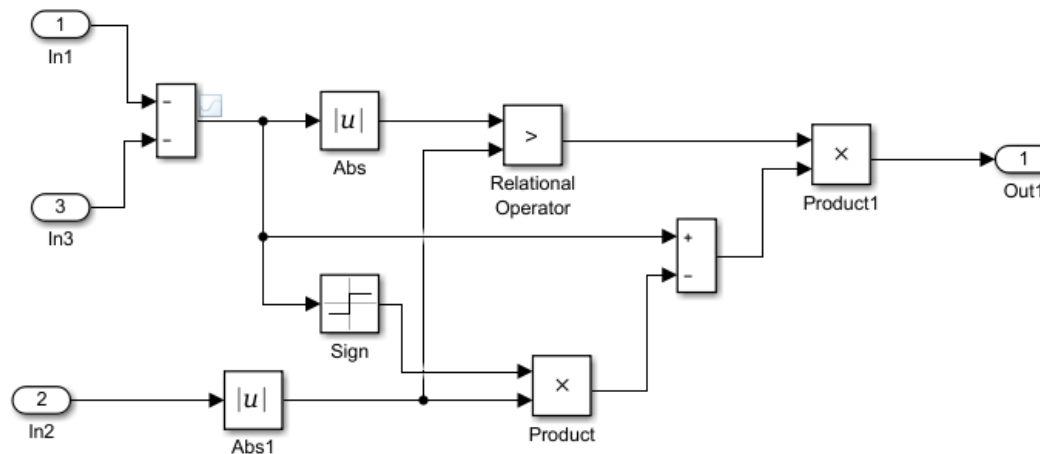
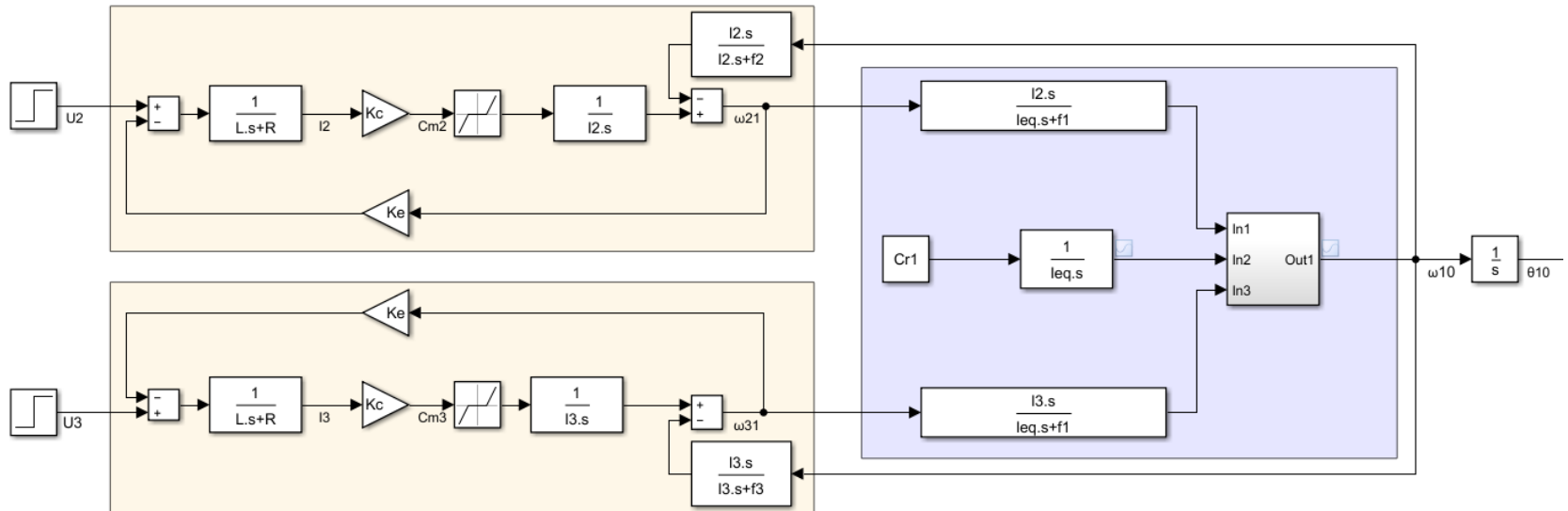
Annexes

Anciennes maquettes



Annexes

Schéma bloc complet



Annexes

Essai de lâché à l'oscilloscope

