

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Étude de la stabilité d'un surfeur : influence de la posture et du centre de masse



Sommaire

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Introduction

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION



- En France dans les années 1950
- entre 30 et 40 millions de surfeurs
- 600000 en France
- entre aux JO en 2021



- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Quelle posture rend un surfeur le plus stable possible ?



Objectif du TIPE

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

L'objectif de ce TIPE est d'étudier la stabilité d'un surfeur sur un support instable à l'aide d'une maquette expérimentale. En faisant varier la position des bras, l'inclinaison du buste et la répartition des masses, il s'agit d'identifier les paramètres influençant l'équilibre. L'étude vise à comparer différentes postures afin de déterminer une configuration optimale maximisant la stabilité.

Maquette :

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

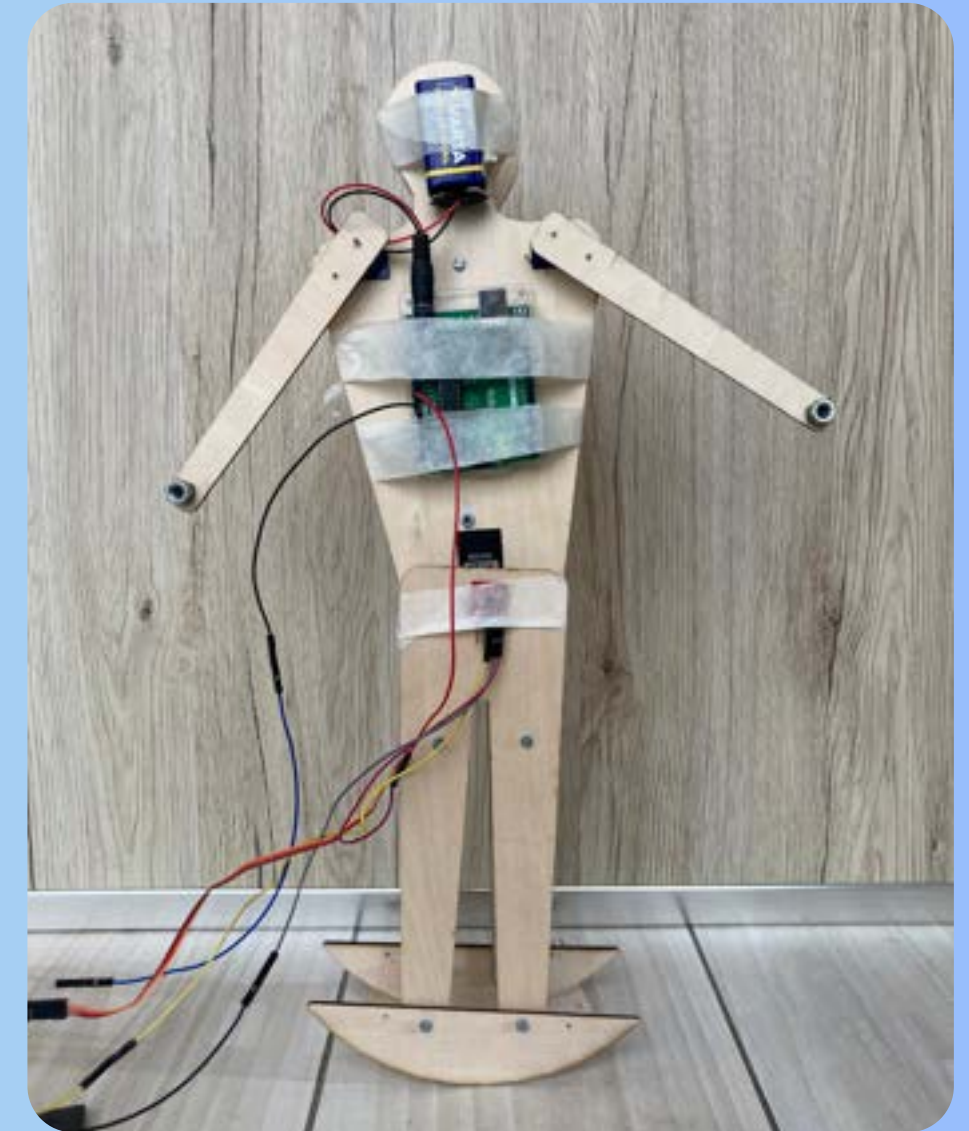
Conception :



Première maquette :



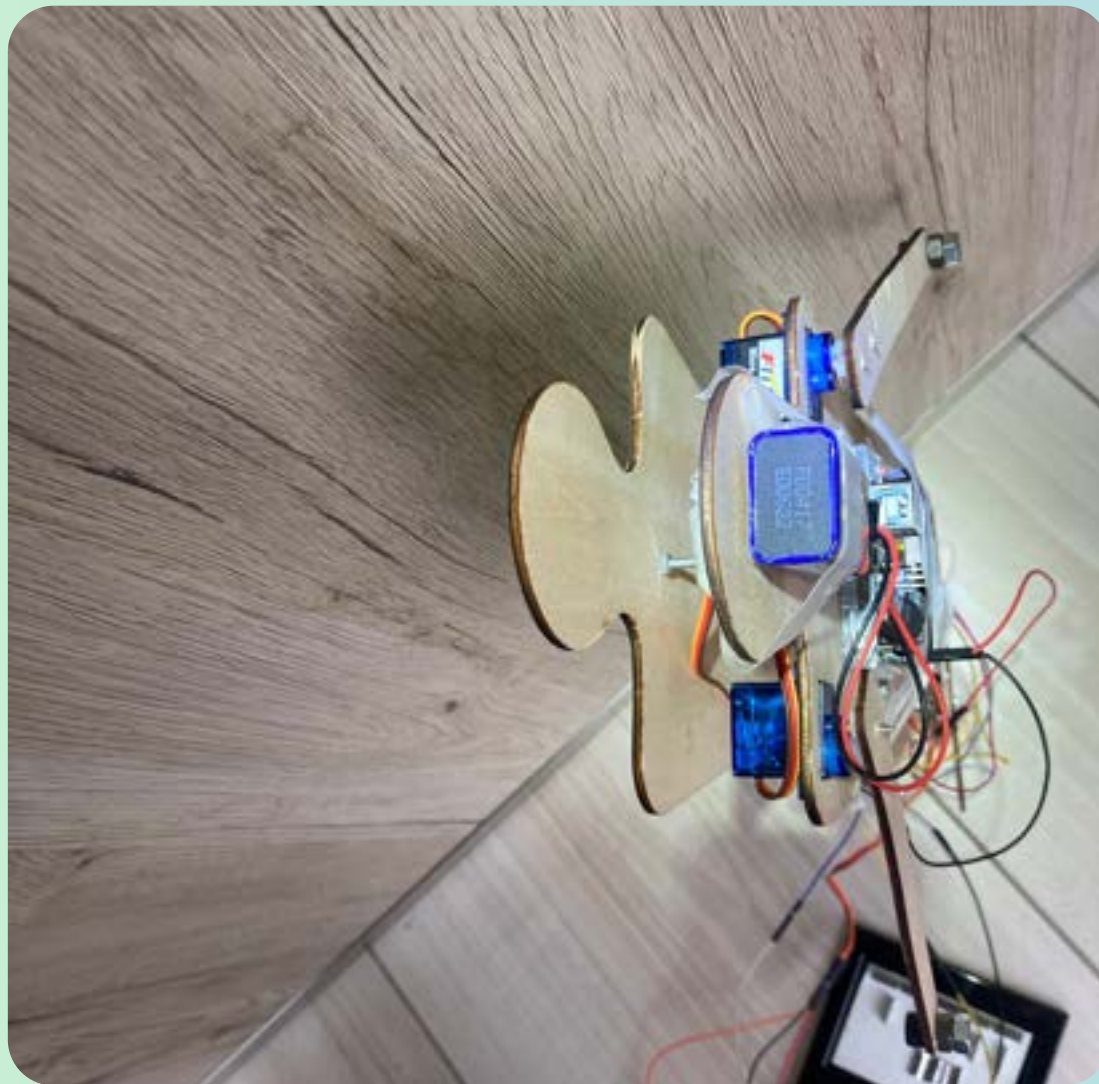
Version finale :



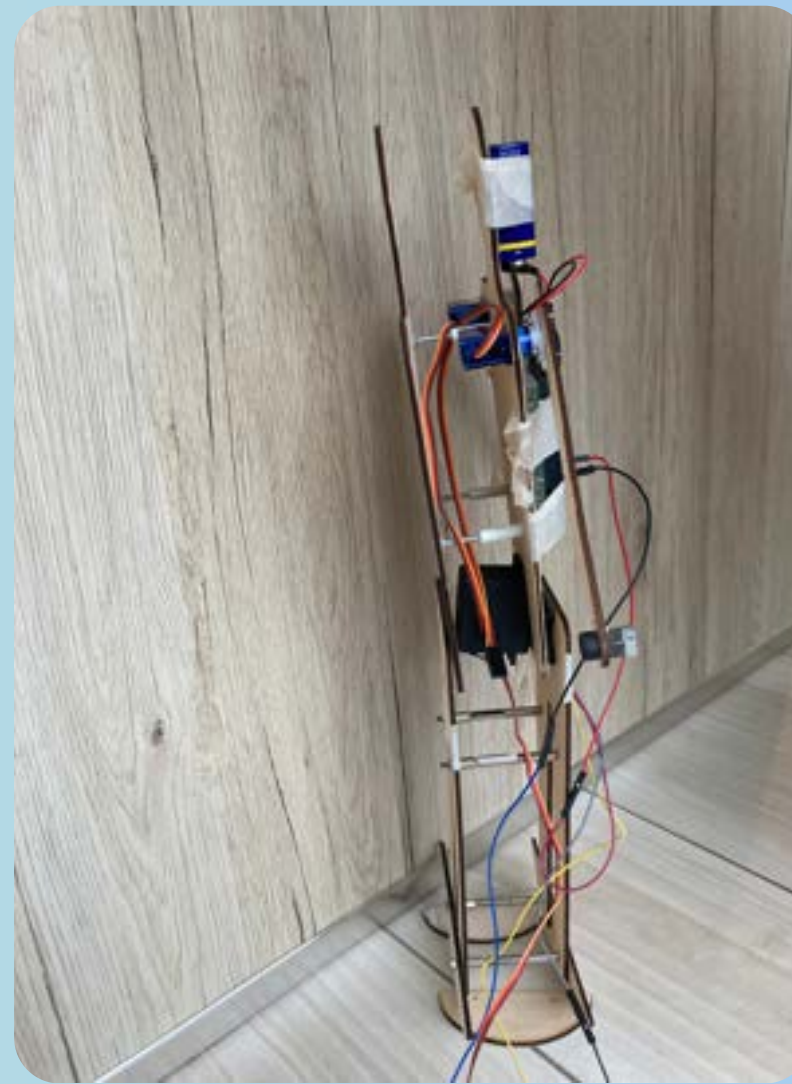
Points de vues

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Vue de dessus :



Vue de côté :



Support :



Expérience :

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Objectif: déterminer quelle posture initiale permet au surfeur de retrouver l'équilibre le plus rapidement après une perturbation

influence :

- inclinaison des bras
- inclinaison initiale du buste

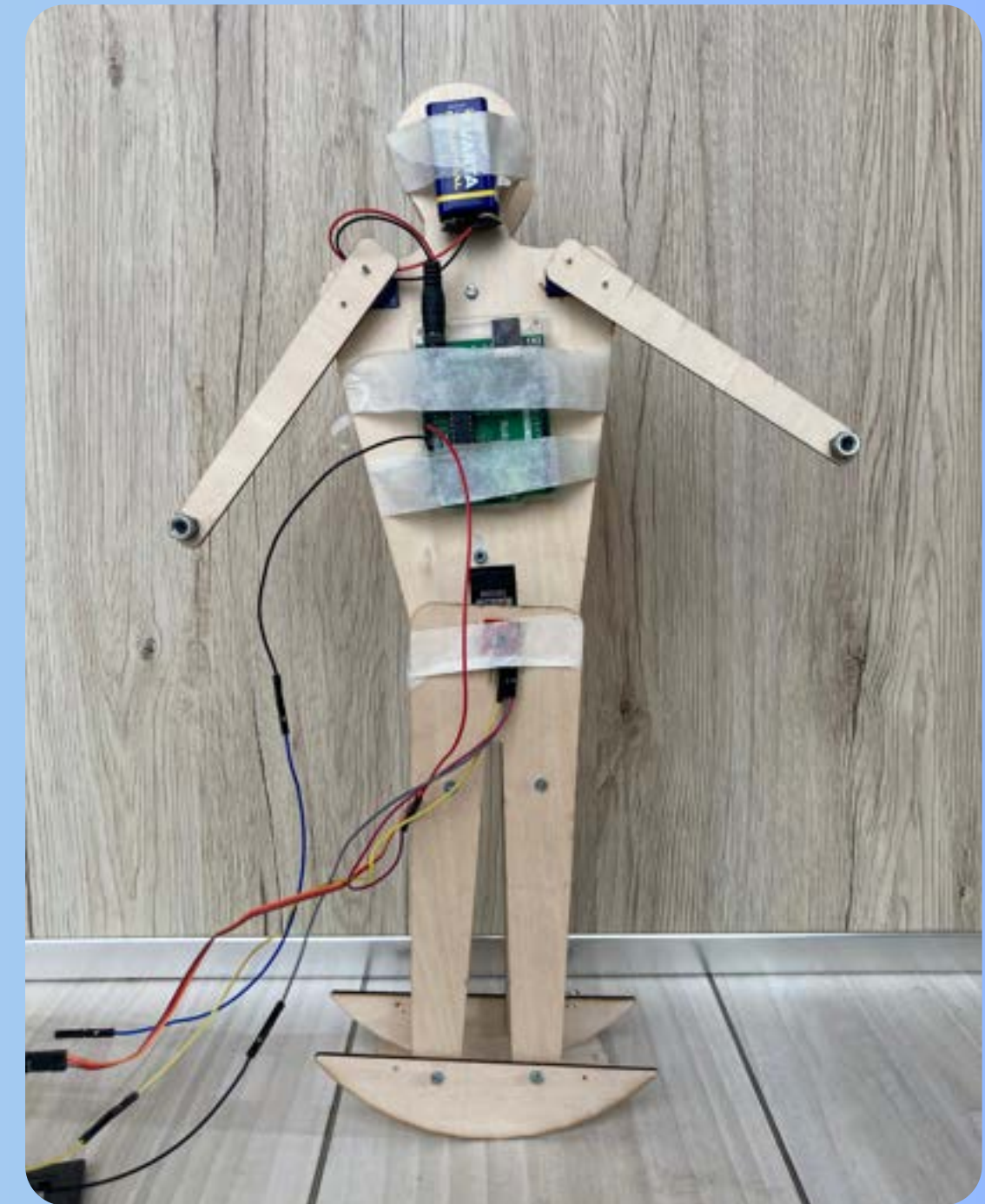
Deux critères sont étudiés :

- le temps de retour vers l'équilibre
- le nombre d'oscillations avant stabilisation

Dispositif expérimental

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

- maquette de surfeur montée sur une planche mobile
- deux servomoteurs commandant les bras
- un servomoteur commandant le buste
- un capteur d'inclinaison
- une carte Arduino réalisant la boucle de rétroaction
- une carte Arduino pour le capteur d'inclinaison
- une pile 9V
- une alimentation (ordinateur)



Principe de l'expérience

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

1. le surfeur est placé dans une position initiale donnée
2. une perturbation est appliquée
3. le système évolue librement
4. la boucle de rétroaction corrige automatiquement l'inclinaison
5. les oscillations du système sont observées
6. Nous mesurons alors :
 - le temps nécessaire pour revenir proche de l'équilibre
 - le nombre d'oscillations avant stabilisation

Perturbation

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Une inclinaison initiale de :

10°

dans le sens HORAIRE est appliquée à chaque position testée

Cette perturbation modélise une perte d'équilibre due à une **vague** ou à la houle.

Positions étudiées

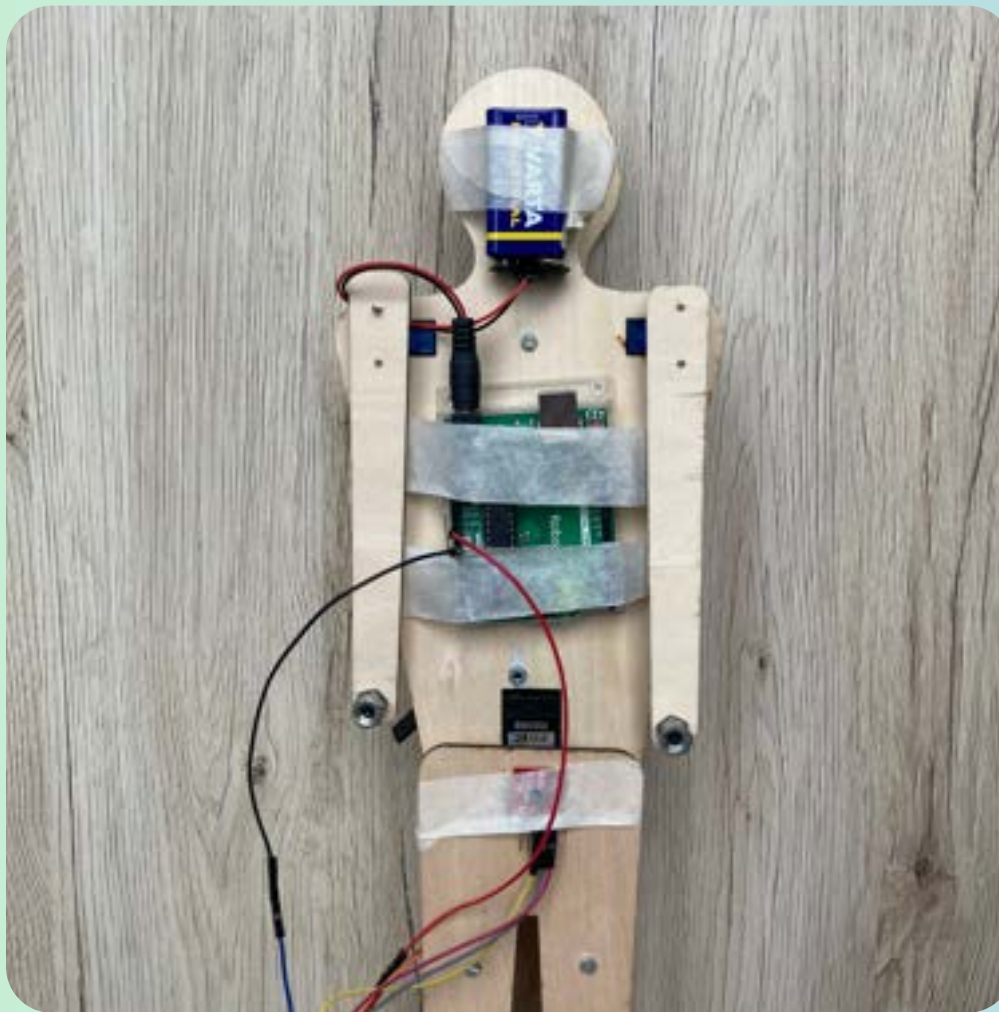
- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Position	Inclinaison des bras	Inclinaison initiale du buste
Position 1	0°	0°
Position 2	45°	0°
Position 3	90°	0°
Position 4	45°	5° (sens trigo)
Position 5	45°	10° (sens trigo)

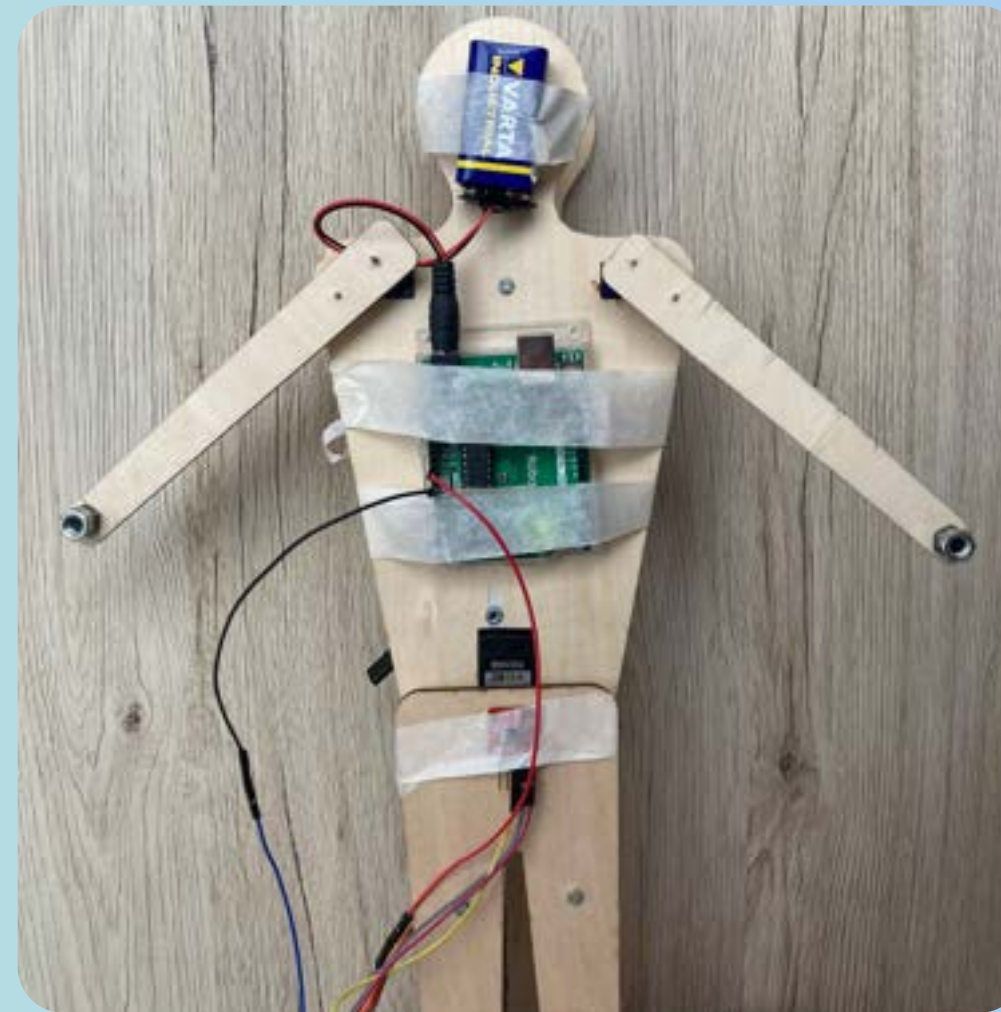
Positions étudiées

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

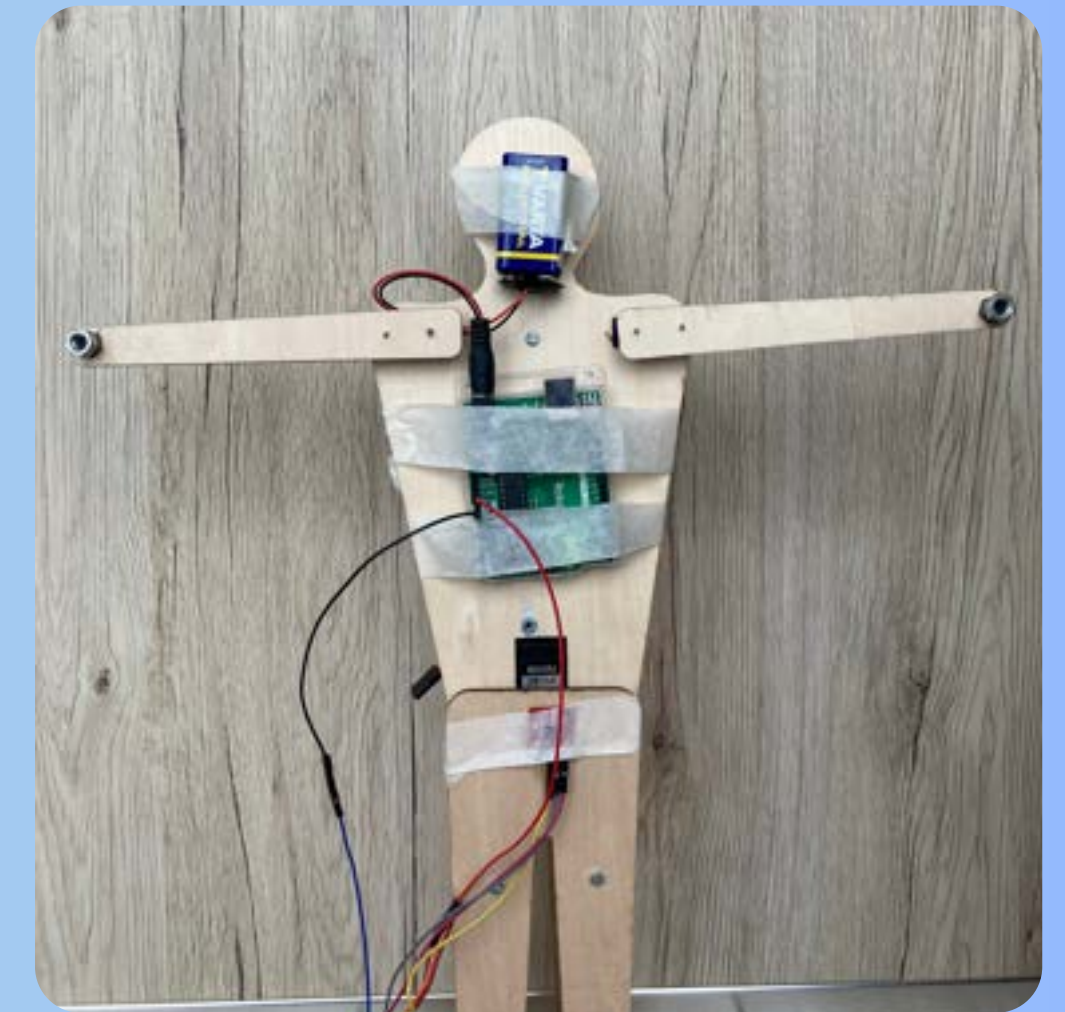
Position n° 1 :



Position n° 2 :



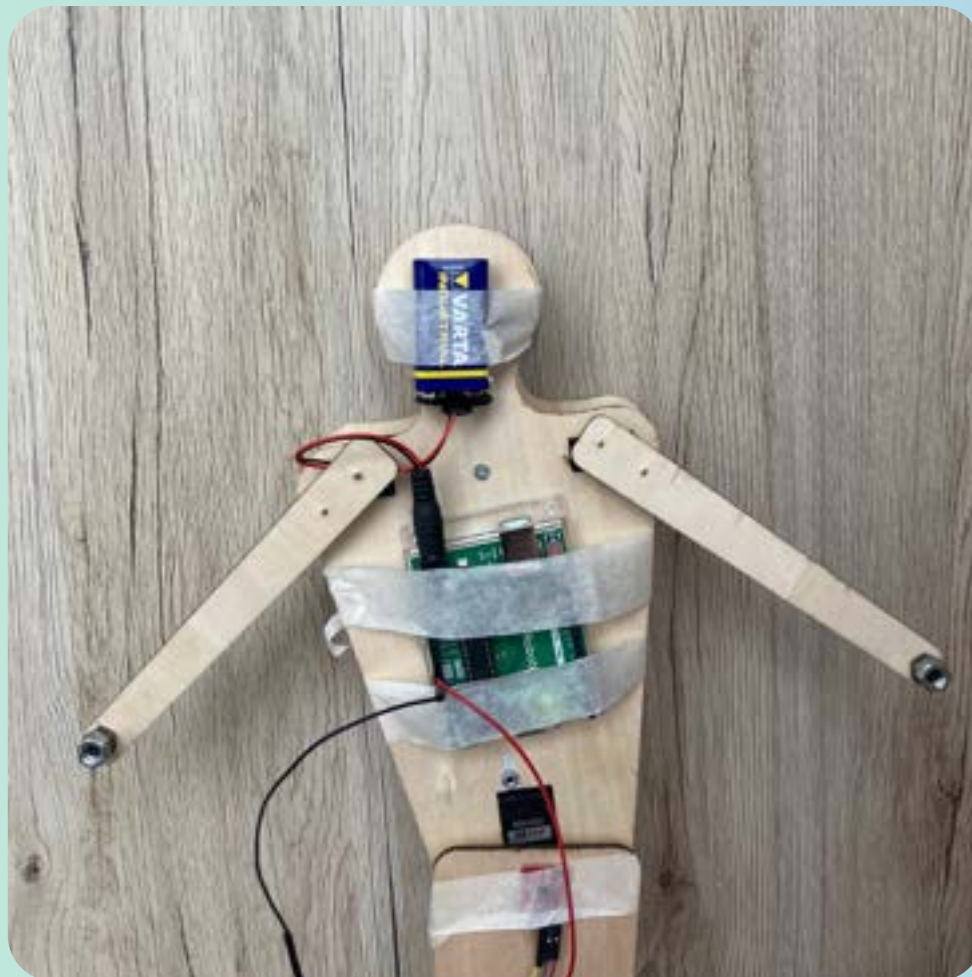
Position n° 3 :



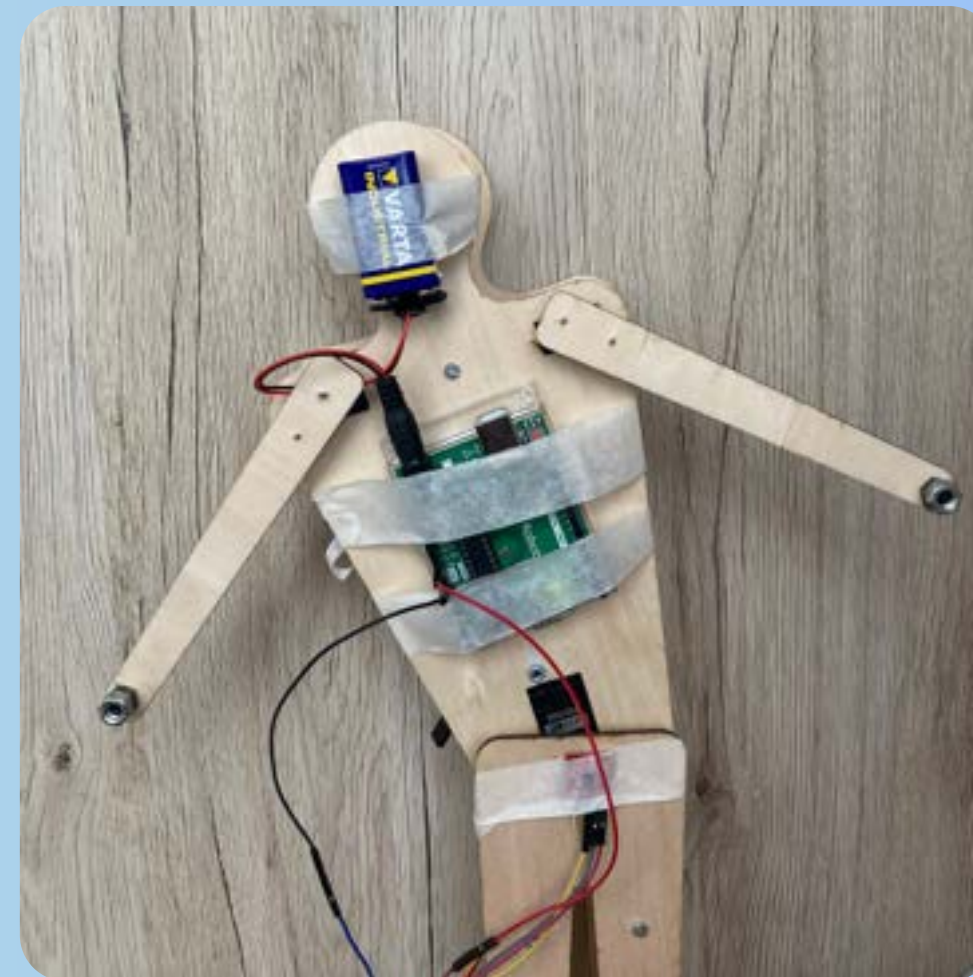
Positions étudiées

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Position n°4 :



Position n°5 :



Rapport au thème

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Le maintien de l'équilibre repose sur une boucle de rétroaction : une inclinaison du support entraîne une modification de la posture du surfeur, qui agit en retour pour corriger cette inclinaison. Cette adaptation continue illustre directement les notions de cycle et de boucle du thème de l'année.



Etude théorique

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Assimilation du surfeur à un pendule inversé. Le mouvement étudié est uniquement latéral.

Notations :

- m :masse totale du système
- g :intensité de la pesanteur
- h :hauteur du centre de masse
- J :moment d'inertie du système
- $\theta(t)$:angle d'inclinaison du système
- K :gain de la boucle de rétroaction

Etude théorique

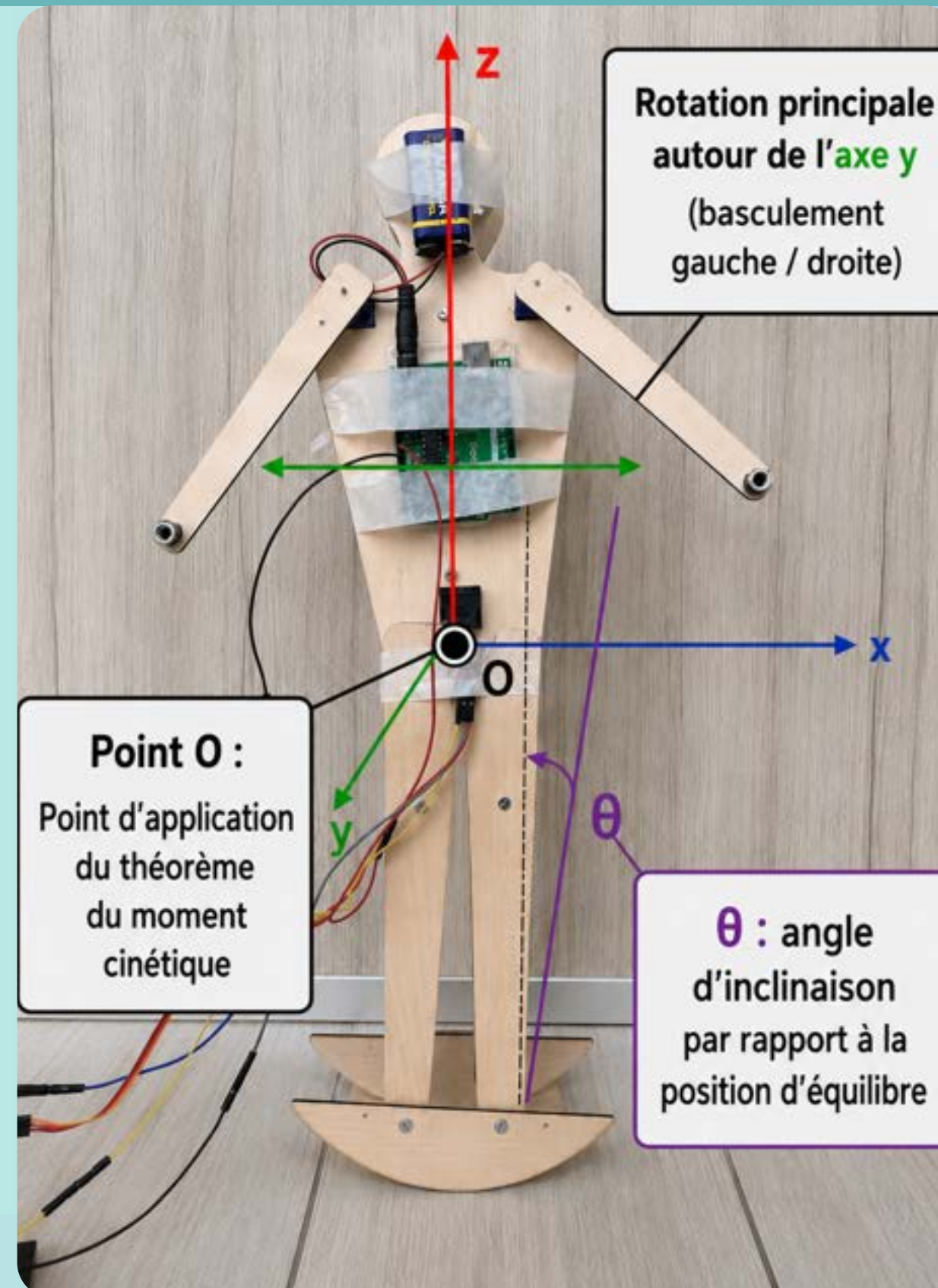
- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

utilisation de l'approximation des petits angles :

$$\sin(\theta) \approx \theta$$

Définition axes

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION



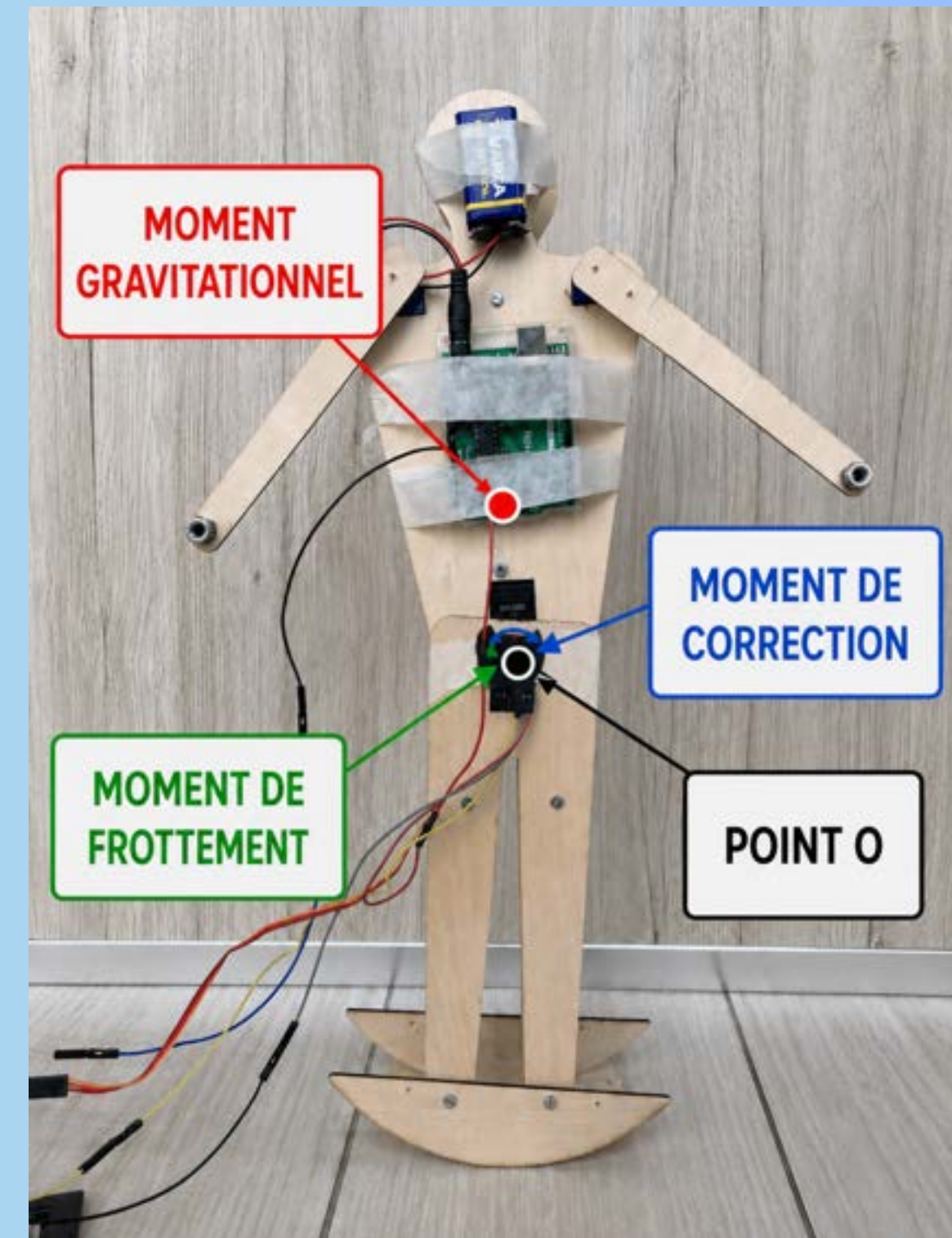
Théorème du moment cinétique

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

$$J\ddot{\theta} = \sum M$$

Les moments appliqués au système sont :

- le moment gravitationnel
- le moment correcteur créé par le buste
- les frottements



Moment gravitationnel

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

$$M_g = mgh \sin(\theta)$$
$$\approx mgh\theta$$

Moment déstabilisant :
si le système penche dans le sens horaire
le poids le fait tomber encore davantage vers la droite.

Moment correcteur

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

$$M_c = -K\theta$$

Signe négatif : si le système penche dans le sens horaire, le buste agit dans le sens trigo

Frottements

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

$$M_f = -f\dot{\theta}$$

f = coefficient de frottement.

Équation différentielle

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

TMC :

$$J\ddot{\theta} = M_g + M_c + M_f$$

$$J\ddot{\theta} + f\dot{\theta} + (K - mgh)\theta = 0$$

Résolution

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

pulsation propre :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K - mgh}{J}}$$

ED :

$$\ddot{\theta} + \frac{f}{J}\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0$$

forme solutions :

$$\theta(t) = e^{rt}$$

Résolution

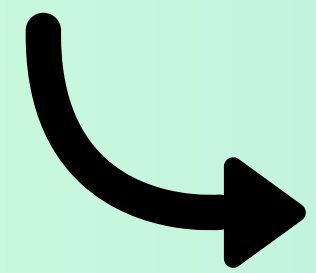
- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

EC :

$$r^2 + \frac{f}{J}r + \omega_0^2 = 0$$

forme solutions :

$$\theta(t) = Ae^{-\lambda t} \cos(\Omega t + \varphi)$$

 **systeme pseudo-periodique**

Résolution

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

avec :

$$\lambda = \frac{f}{2J}$$

et :

$$\Omega = \sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}$$

Influence inclinaison bras

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

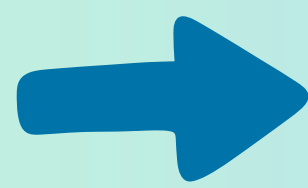
moment d'inertie :

$$J = \sum m_i r_i^2$$

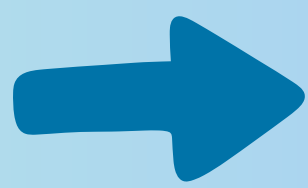
Or :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K - mgh}{J}}$$

J



ω_0



moins d'oscillations

Influence inclinaison bras

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION



Si J devient trop grand, le système devient moins réactif, le temps de retour augmente !

Influence inclinaison bras

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

- **bras à 0°** : système très réactif mais instable
- **bras à 90°** : système stable mais trop lent
- **bras à 45°** : compromis intéressant entre stabilité et réactivité

Influence inclinaison buste

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

buste: de masse M_b , située à une distance d de l'axe

Moment du buste:

$$M_b \approx -m_b g d \theta_0$$



opposé à la perturbation

Influence inclinaison buste

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

TMC devient:

$$J\ddot{\theta} = mgh\theta - m_bgd\theta_0$$

Ainsi :

- le moment créé par le buste réduit l'accélération angulaire
- le système tombe donc moins vite
- la correction devient plus facile.

Influence inclinaison buste

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

- un petit angle initial du buste améliore la stabilité
- un angle trop important créerait une sur correction

Conclusion théorique

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

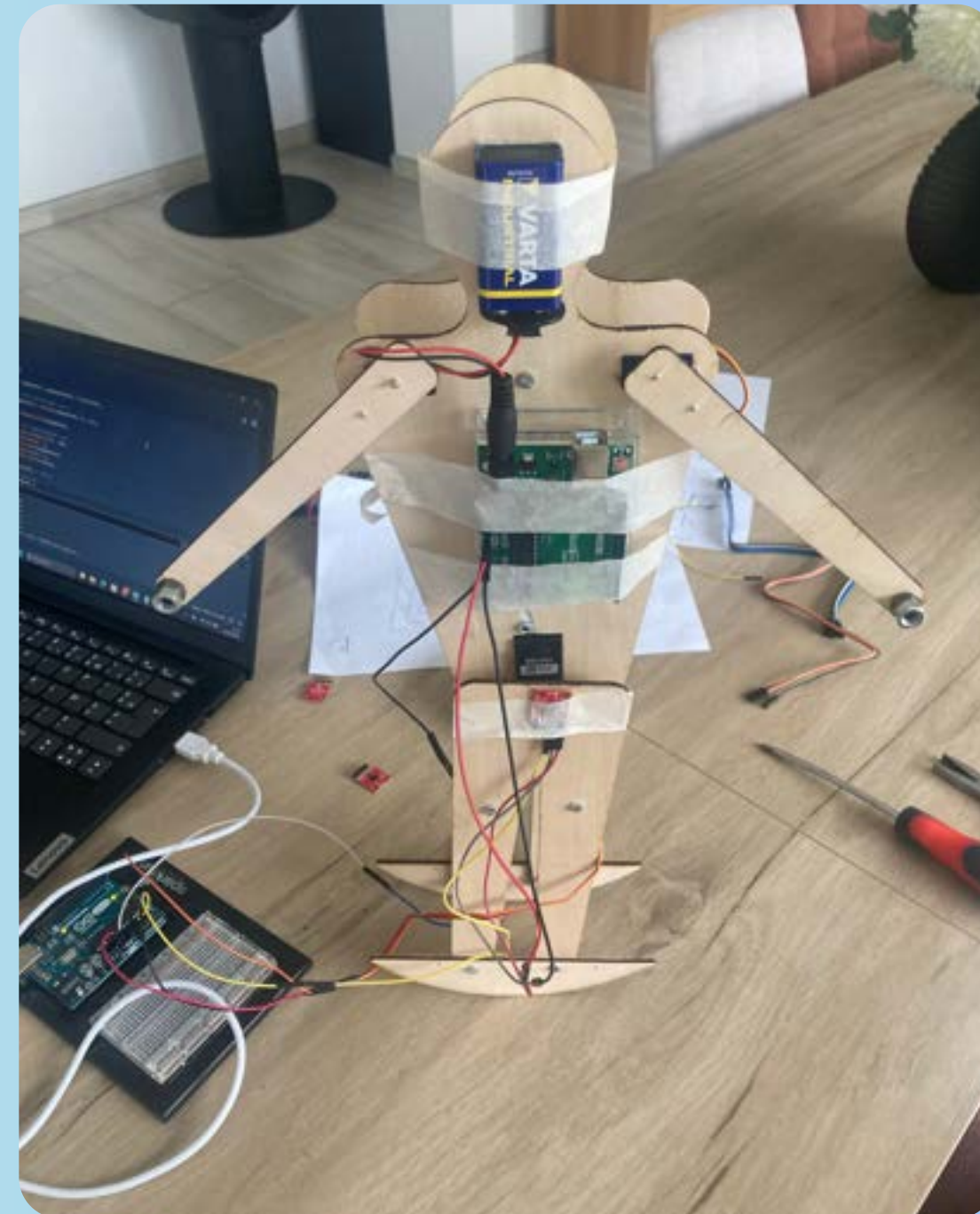
La position la plus stable est la :

Position 4

- Bras à 45°
- buste incliné de 5° dans le sens trigo

Etude pratique

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION



Résultat

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Position	Bras	Buste	Temps de retour(s)	Nombre d'oscillations
1	0°	0°	6.8	9
2	45°	0°	4.3	6
3	90°	0°	5.9	4
4	45°	5° GAUCHE	3.2	3
5	45°	10° GAUCHE	4.8	5

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

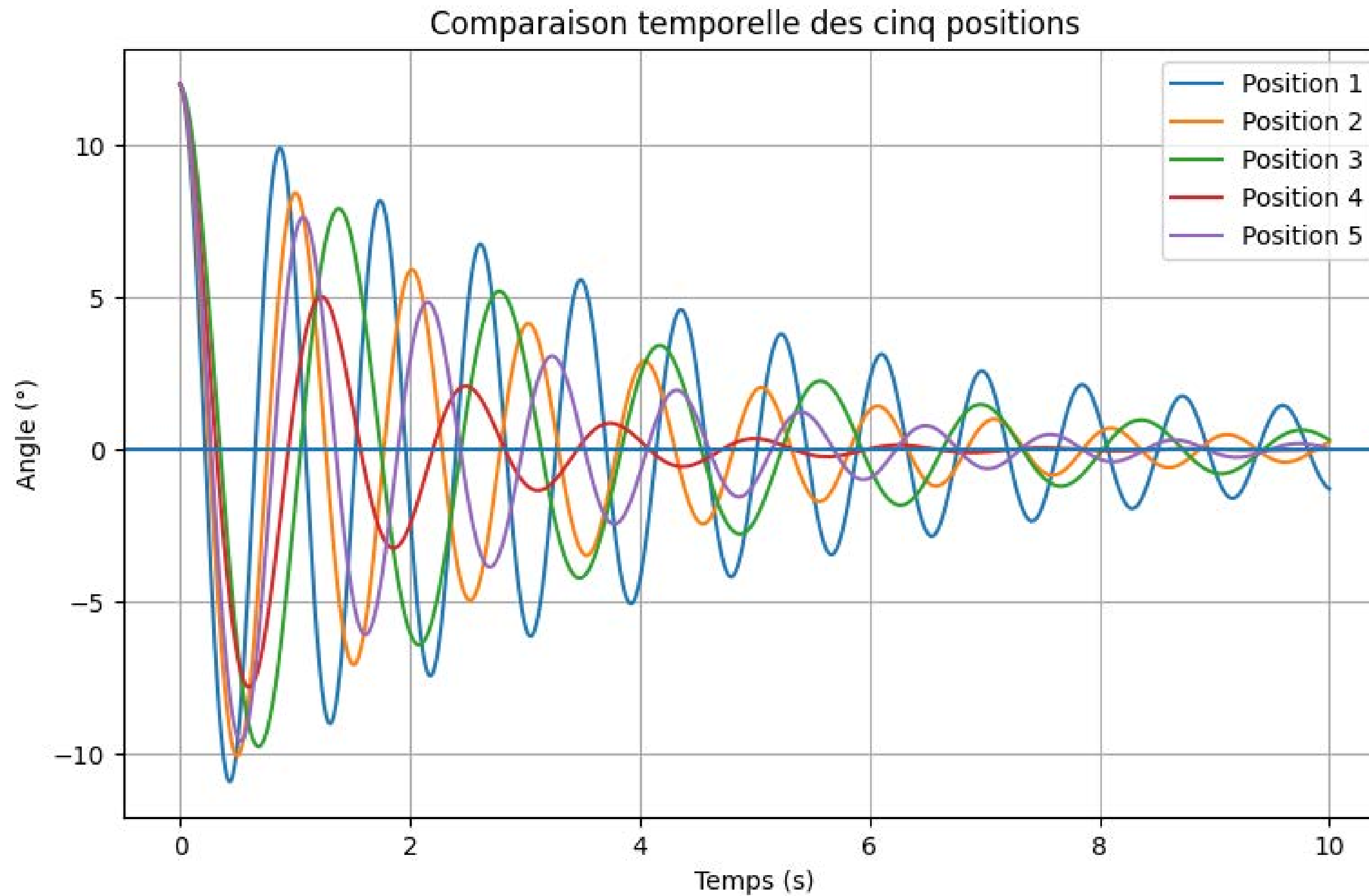
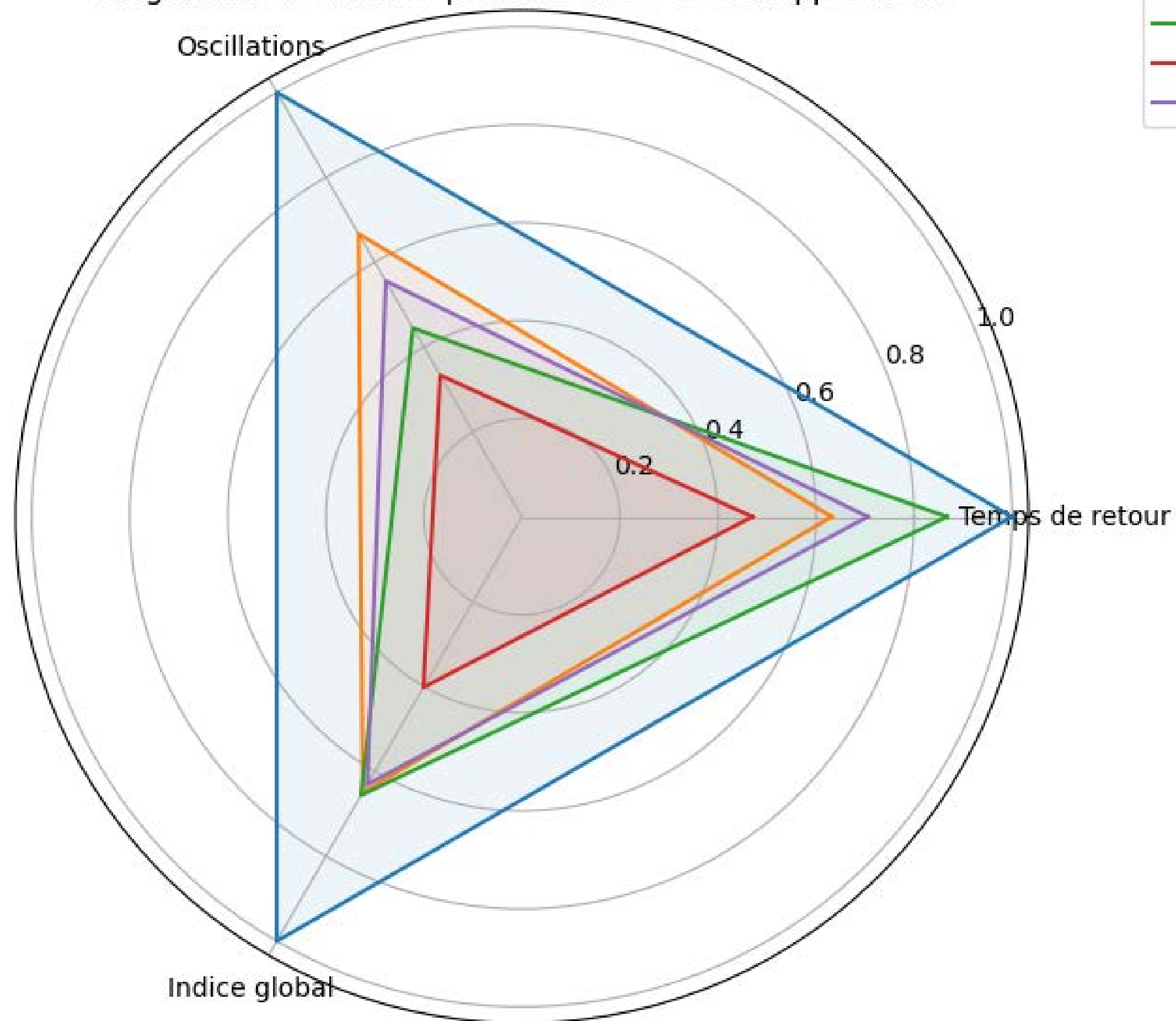


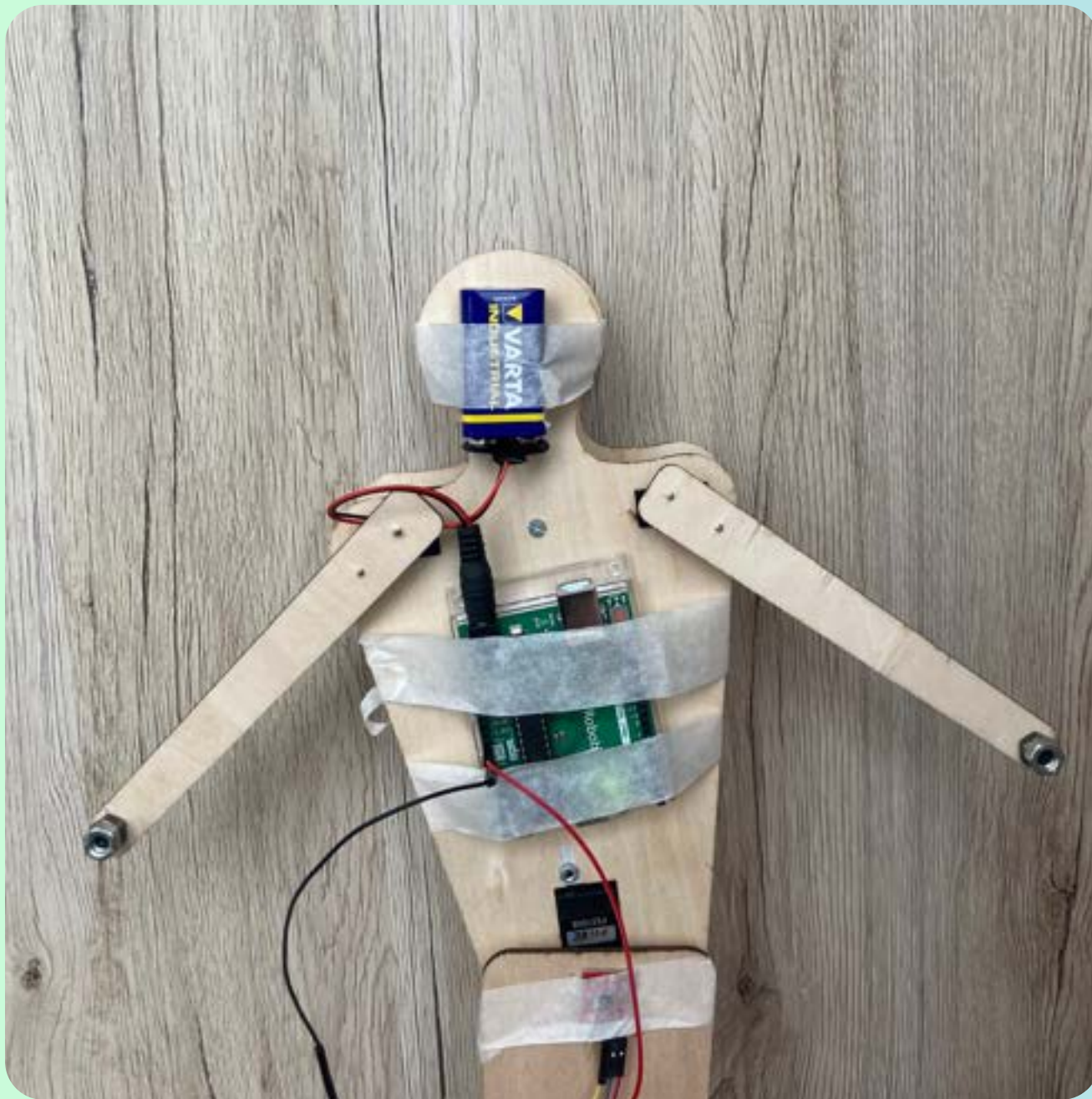
Diagramme radar des performances des cinq positions



- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Conclusion et Perspectives

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION



- Position à adopter pour maximiser la stabilité : autour de la position 4
- Limites du modèle (plan latéral et simplification des actions humaines)
- Améliorations possibles

Remerciements

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

Merci de votre attention

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

```
1  #include <Servo.h>
2
3  // ===== SERVOS =====
4  Servo servoBuste;
5  Servo servoBrasG;
6  Servo servoBrasD;
7
8  // ===== CAPTEUR =====
9  int pinX = A0;
10
11 // ===== PARAMÈTRES =====
12 float K = 1.5;
13 float theta = 0;
14 float theta_ref = 90;
15
16 // ===== POSTURE =====
17 int angleBras = 60;          // A modifier pour chaque test
18 int angleBusteInit = 90;    // position neutre calibrée
19
20 // ===== FILTRAGE =====
21 float theta_filtre = 0;
22 float theta_old = 0;
23
24 // ===== TEMPS =====
25 unsigned long t0 = 0;
```

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

```
26
27 void setup() {
28     Serial.begin(115200);
29
30     servoBuste.attach(8);
31     servoBrasG.attach(10);
32     servoBrasD.attach(11);
33
34
35     // ===== POSITION INITIALE =====
36     servoBrasG.write(angleBras);
37     servoBrasD.write(angleBras);
38     servoBuste.write(angleBusteInit);
39
40     Serial.println("Appuie sur une touche + ENTREE pour demarrer...");
41
42     // ===== ATTENTE UTILISATEUR =====
43     while (Serial.available() == 0) {}
44     Serial.read();
45
46     // ===== INITIALISATION TEMPS =====
47     t0 = millis();
48
49     Serial.println("temps_ms,angle_deg");
50 }
```

- INTRODUCTION
- EXPLICATION DE L'EXPERIENCE
- ETUDE THEORIQUE
- ETUDE PRATIQUE
- CONCLUSION

```
51
52 void loop() {
53
54     // ===== LECTURE CAPTEUR (MOYENNE) =====
55     int rawX = analogRead(pinX);
56
57     // ===== CONVERSION ANGLE =====
58     float theta = 1.33 * (rawX - 270);
59     // ===== BOUCLE DE RETROACTION =====
60     float correction = -K * (theta - theta_ref);
61
62     int angleBuste = angleBusteInit + correction;
63
64     // ===== LIMITES SERVO =====
65     angleBuste = constrain(angleBuste, 45, 135);
66     servoBuste.write(angleBuste);
67     // ===== ENREGISTREMENT =====
68     Serial.print(millis() - t0);
69     Serial.print(",");
70     Serial.print(angleBuste);
71     Serial.print(",");
72     Serial.println(theta);
73
74     delay(20); // ~50 Hz
75 }
```