

CNC 2026
Concours National Commun

TRAVAUX D'INITIATIVE
PERSONNELLE ENCADRÉS

T.I.P.E. 2026

Cycles / Boucles



Sujet :

Robot autonome de maintenance des façades vitrées

préparé par :

• El Kalai Achraf

Code CNC:

• OJ011T

Plan

I Introduction & problématique

II Objectifs du TIPE

- 1 Étude comparative des solutions d'adhésion
- 2 Dimensionnement du système de dépression
- 3 Fonctionnement autonome du robot
- 4 Intégration des capteurs internes & externes
- 5 Validation expérimentale du système

III Conclusion & perspectives

Nettoyage des façades vitrées

868 000

*accidents du travail en hauteur
chaque année dans le monde*

Source : Organisation Internationale du Travail (OIT)

Le nettoyage de façades vitrées en hauteur reste l'une des activités les plus dangereuses du secteur BTP. Les méthodes traditionnelles exposent les travailleurs à des risques mortels, tout en étant coûteuses et inefficaces.

Les 4 défis majeurs

Sécurité

30 à 40 % des accidents du BTP sont liés aux travaux en hauteur. Le nettoyage de façades figure parmi les 5 métiers les plus à risque.

Coût

Main d'œuvre spécialisée, nacelles, échafaudages : un coût moyen de 15 à 25 €/m² qui limite la fréquence d'entretien.

Efficacité

Résultat variable selon l'opérateur et les conditions. Zones inaccessibles souvent négligées, qualité non homogène.

Logistique

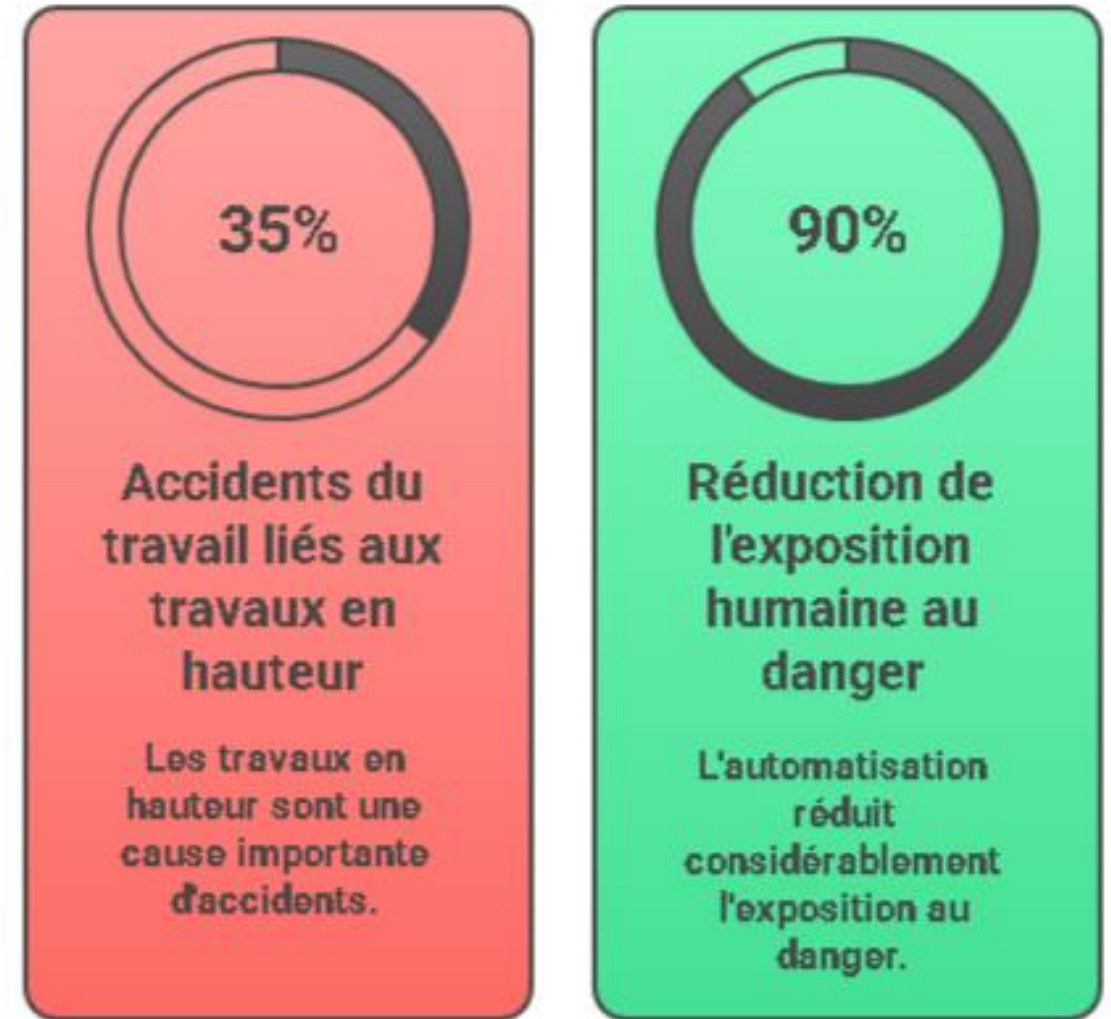
Contraintes météo, autorisations, fermetures de voirie. Chaque intervention nécessite une planification complexe.

Sécurité :

Environ 30 à 40 % des accidents du travail dans le BTP sont liés aux travaux en hauteur.

Le nettoyage de façades figure parmi les 5 métiers les plus à risque en milieu urbain vertical.

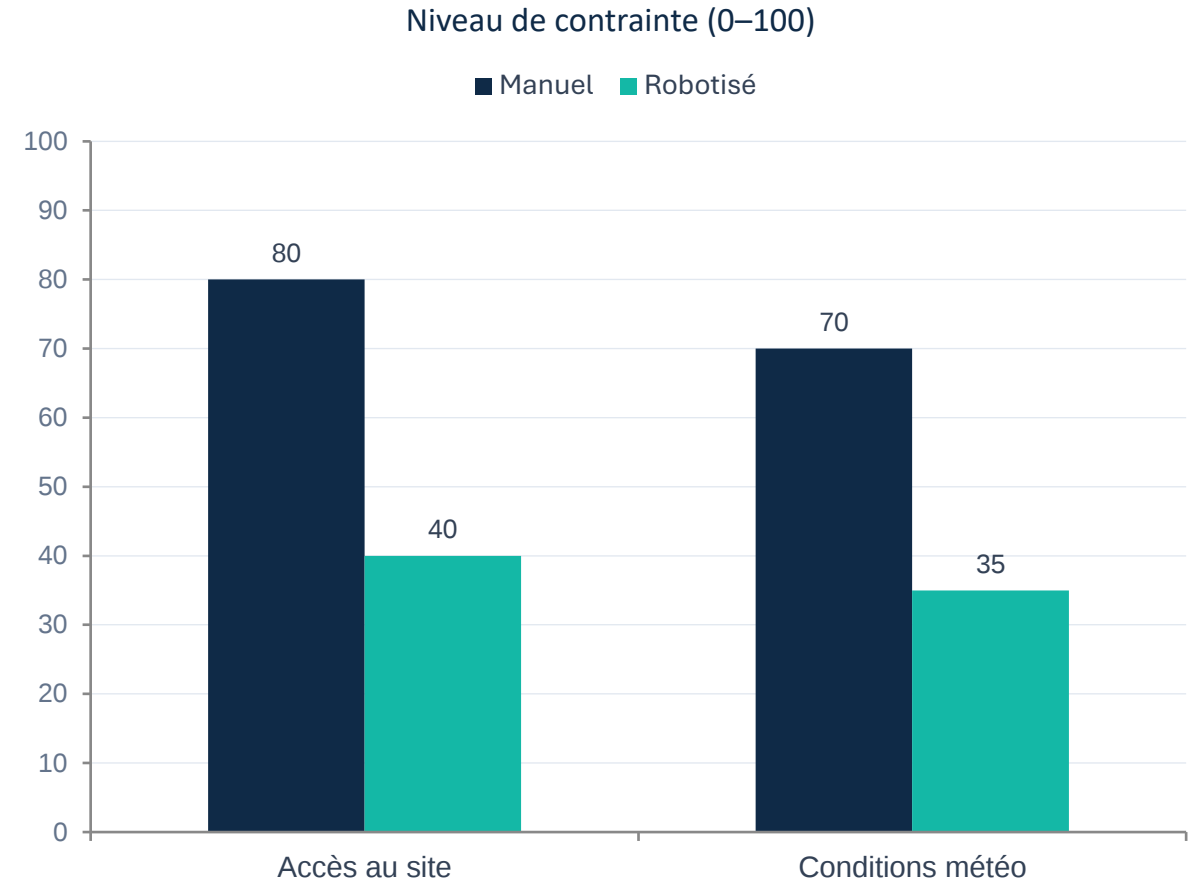
L'automatisation permet de réduire jusqu'à 90 % l'exposition humaine au danger.



Ressource: Organisation Internationale du Travail (OIT / ILO)

Logistique :

Ce diagramme met en évidence que la méthode manuelle est fortement contrainte par l'accès au site et les conditions météorologiques. À l'inverse, la solution robotisée réduit nettement ces contraintes, ce qui facilite l'intervention et améliore la fiabilité du nettoyage.

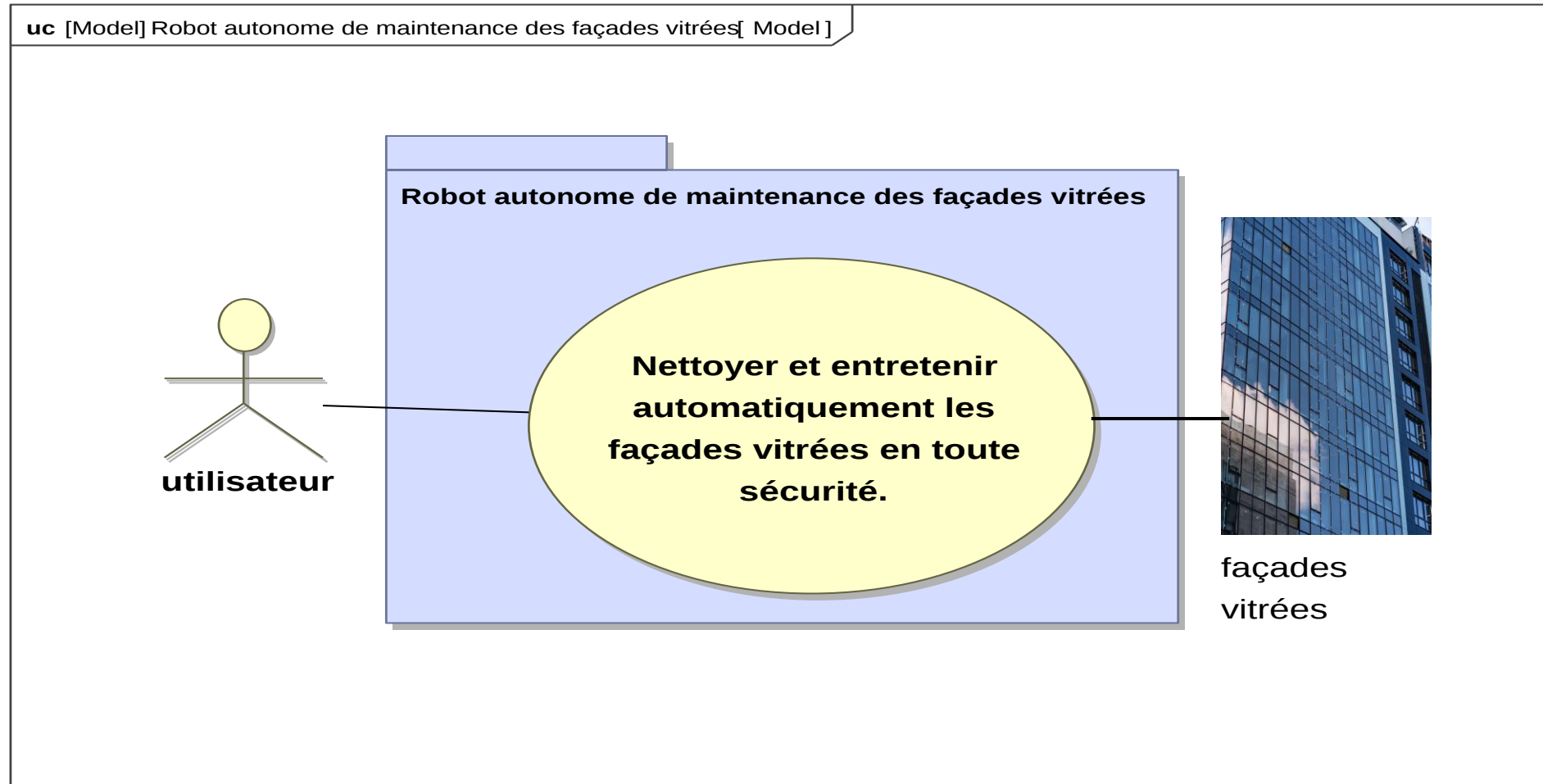


Ressource: Organisation Internationale du Travail (OIT / ILO)

- Problématique :

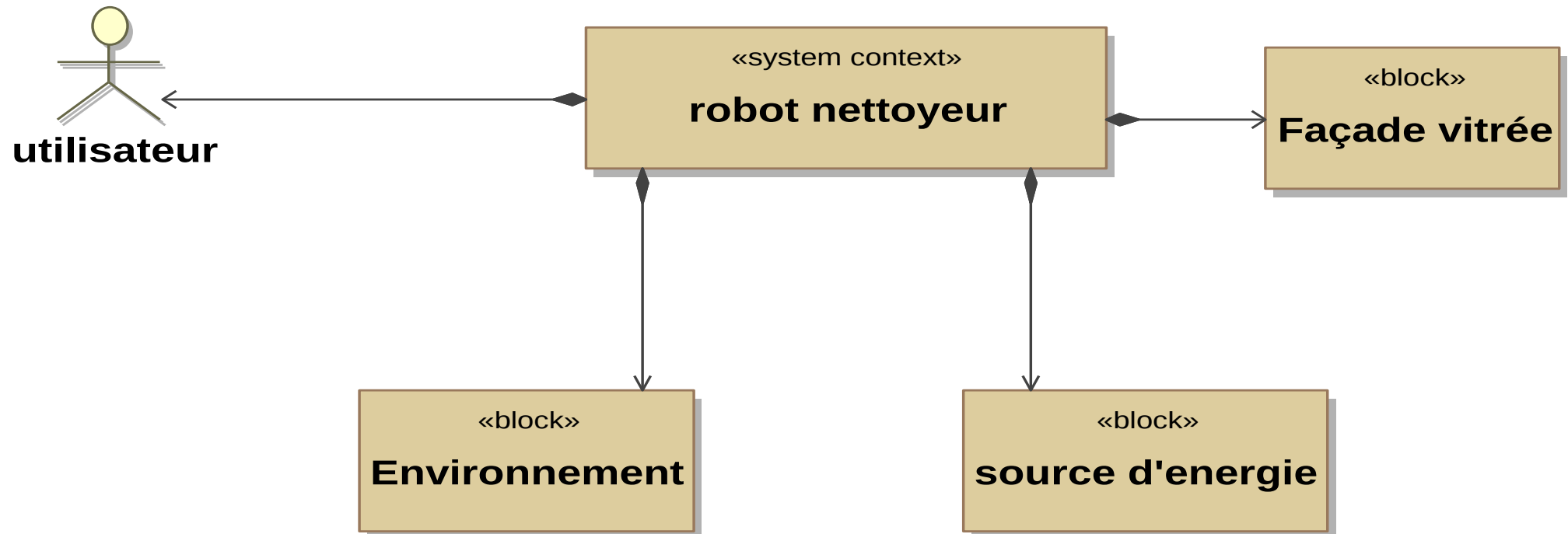
« Comment assurer le nettoyage efficace, sécurisé et durable des façades vitrées des immeubles de grande hauteur, tout en réduisant les risques humains, les coûts et les contraintes logistiques liés aux méthodes traditionnelles ? »

- Diagramme cas d'utilisation



- Diagramme de contexte

bdd [Block] Robot autonome de maintenance des façades vitrées[Robot autonome de maintenance des façades vitrées]



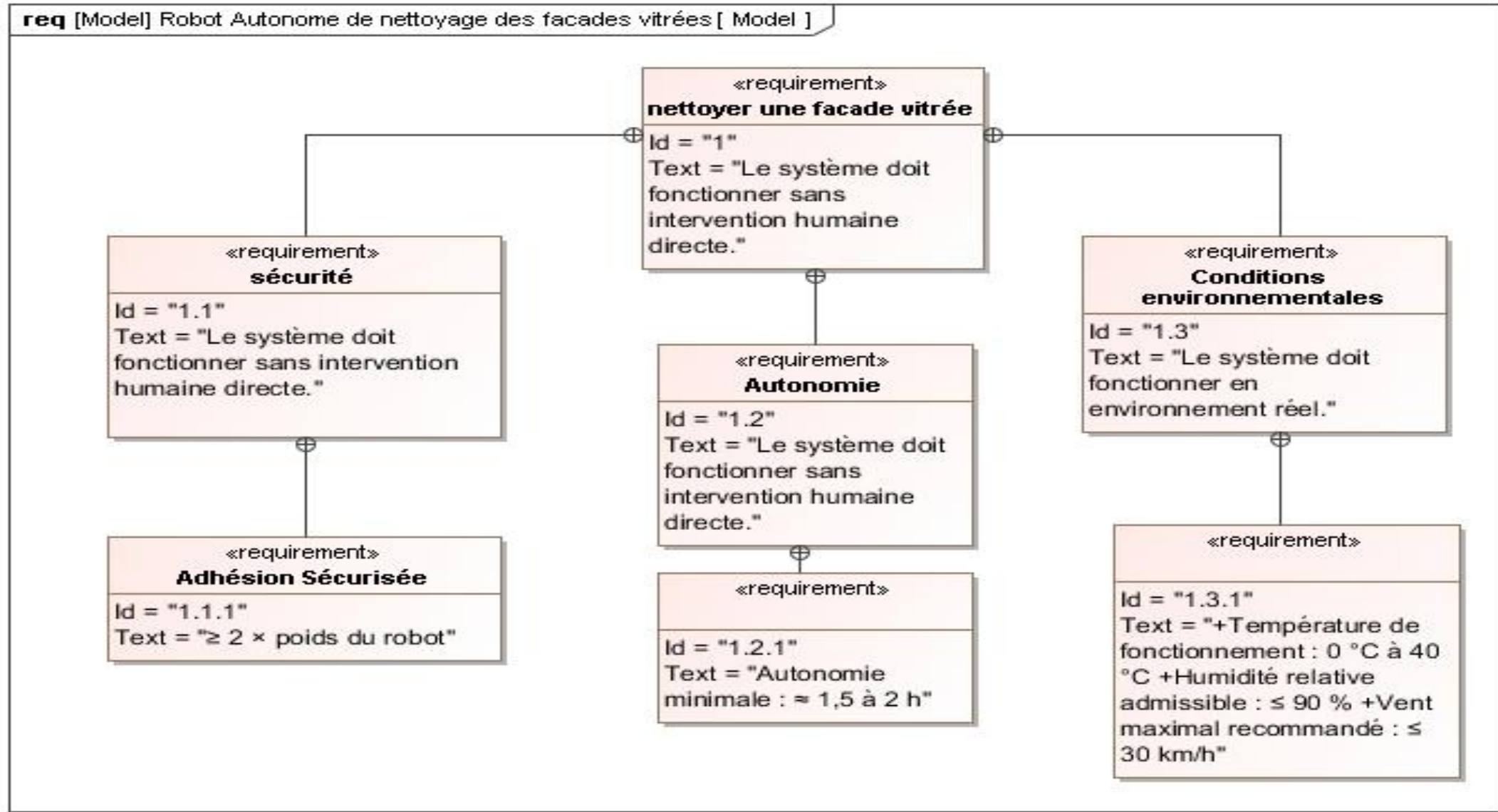
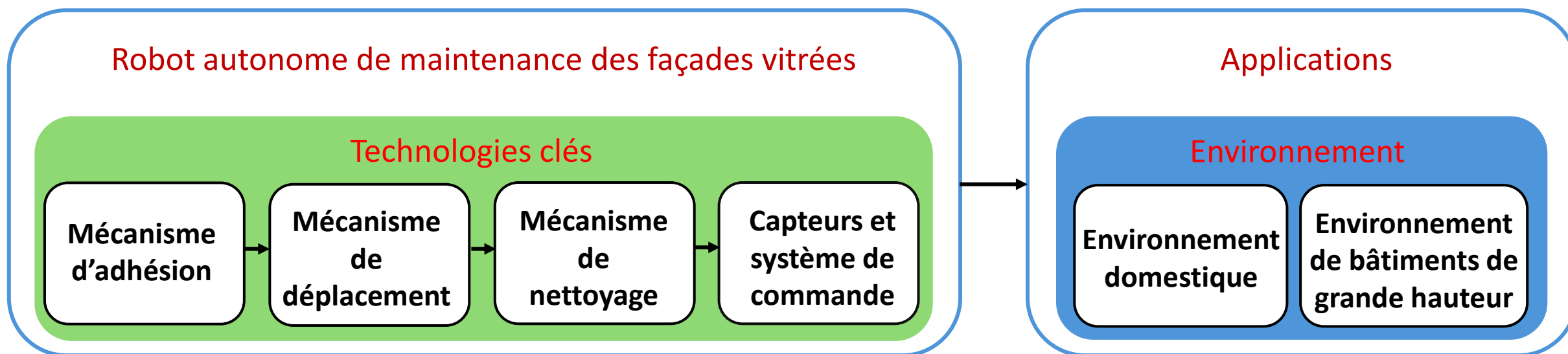


Schéma des technologies clés et des domaines d'application du Robot autonome de maintenance des façades vitrées.



OBJECTIF 1

01

Étude comparative des solutions d'adhésion

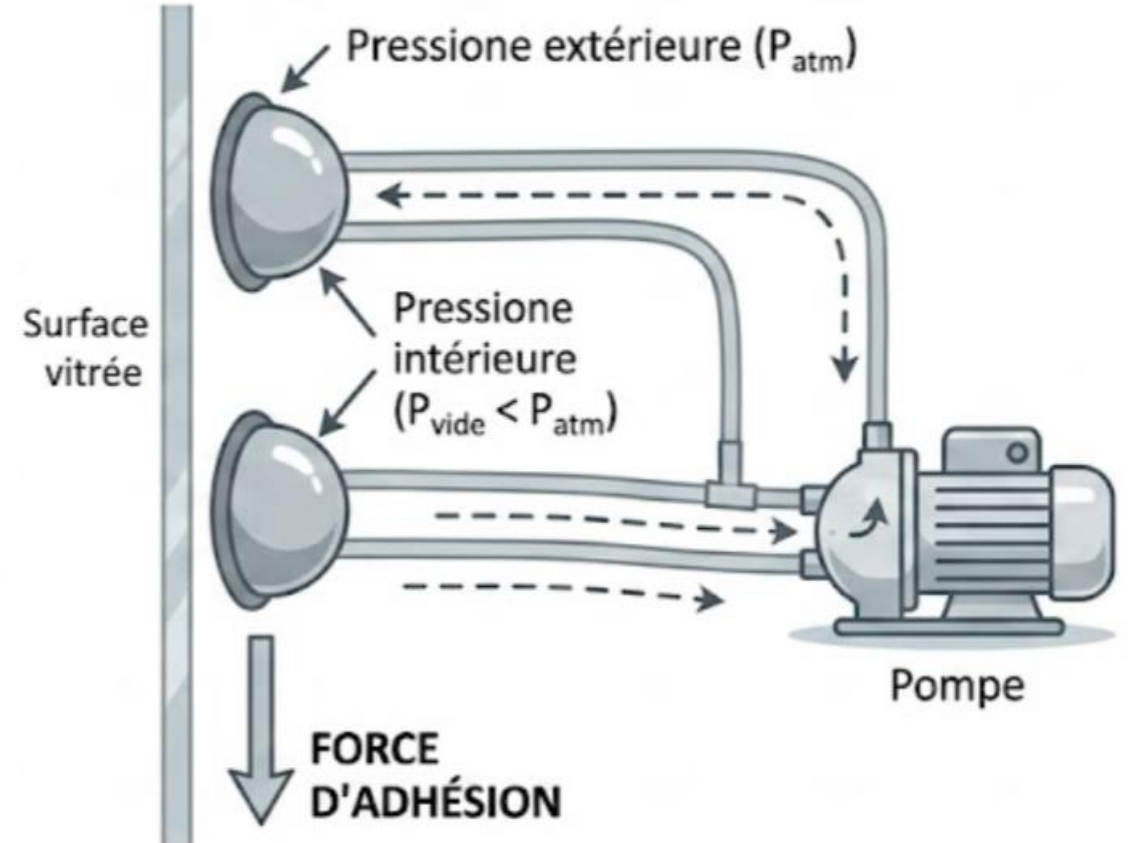
Principe du système d'adhésion par dépression

Comment ça fonctionne ?

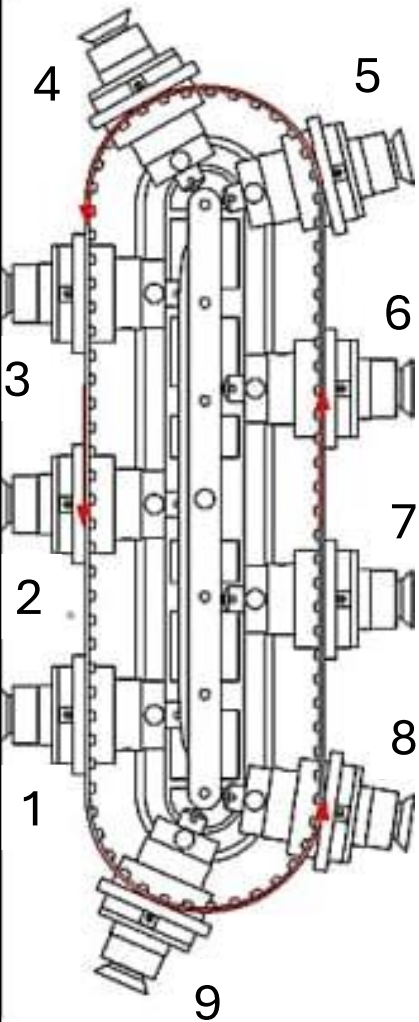
Le système de dépression permet au robot d'adhérer à une surface vitrée verticale en créant une pression inférieure à la pression atmosphérique entre le robot et la vitre.

Deux composants clés :

1. La ventouse : assure le contact et l'étanchéité avec la vitre.
2. La pompe à vide : crée et maintient la dépression.



1. Étude de la ventouse :



a) les ventouses mobiles :

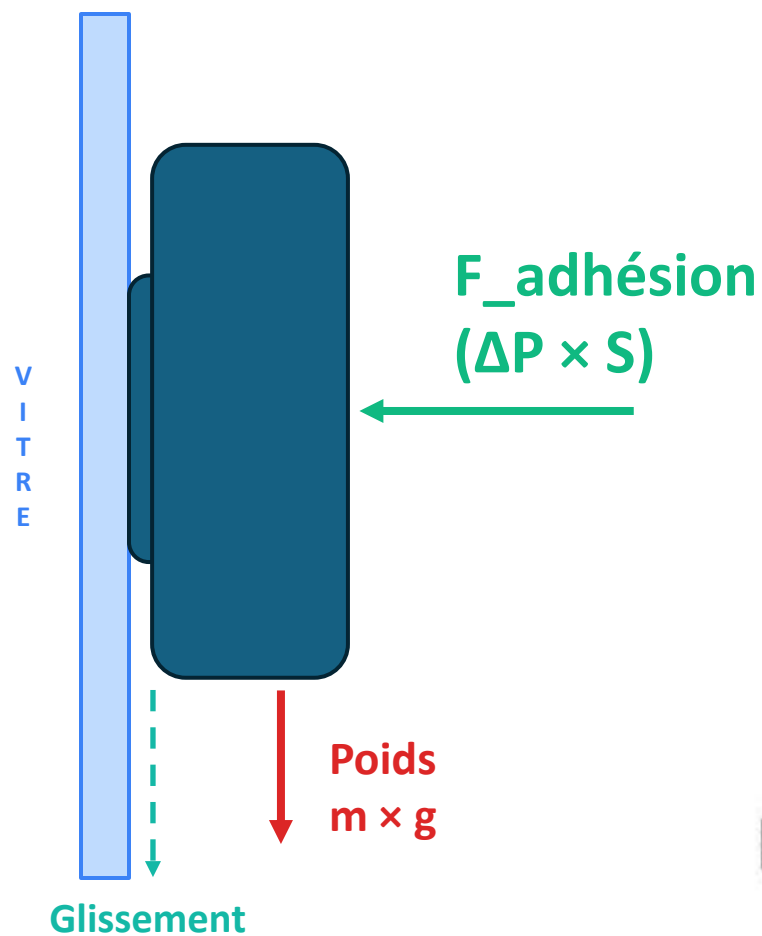
Les ventouses mobiles fonctionnent par création et relâchement successifs de la dépression, alternant phases d'adhésion et de décollage afin de permettre le déplacement du robot.



a) les ventouses fixes:

Les ventouses fixes assurent une adhésion continue en créant une dépression permanente entre la ventouse et la vitre, ce qui plaque le robot contre la surface grâce à la pression atmosphérique.

Comment le robot glisse tout en restant collé ?



1

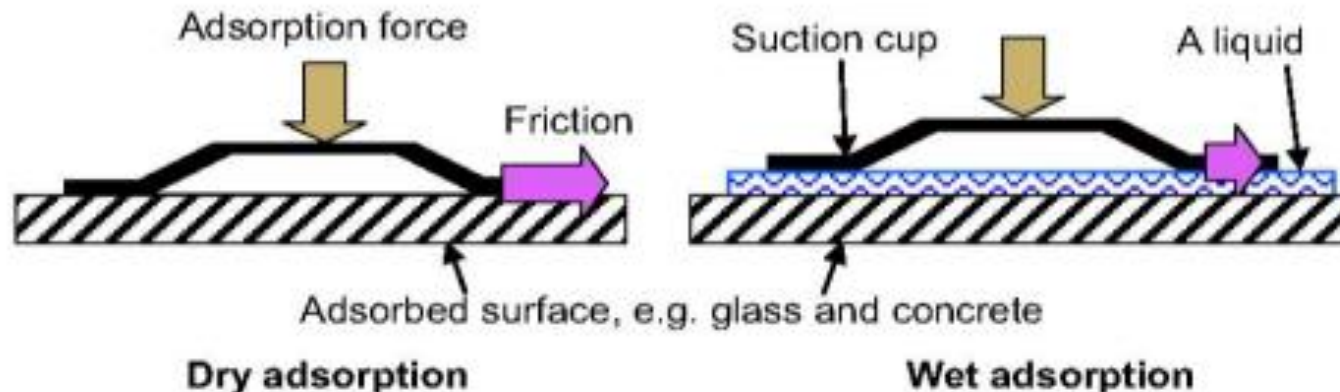
Adhésion perpendiculaire

La dépression (ΔP) crée une force NORMALE à la vitre qui plaque le robot. Cette force est perpendiculaire au mouvement.

2

Glissement tangentiel

Les joints souples aux bords de la ventouse permettent un glissement PARALLÈLE à la surface. Le film d'air/eau lubrifie le contact.



Modélisation statique et dynamique du robot :

Hypothèses:

- on se place en statique
- on modélise la liaison sol/robot (contact linéique) par un glisseur

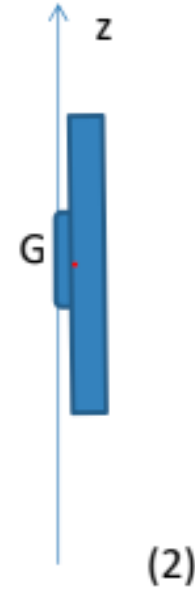
Avec : $T_{\text{sol} \rightarrow \text{robot}, G} = \begin{Bmatrix} -- & 0 \\ Y & -- \\ Z & -- \end{Bmatrix} G$ et $T_{\text{pes}} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -mg \sin \alpha & 0 \\ -mg \cos \alpha & 0 \end{Bmatrix} G$

En appliquant TRS sur l'axe z :

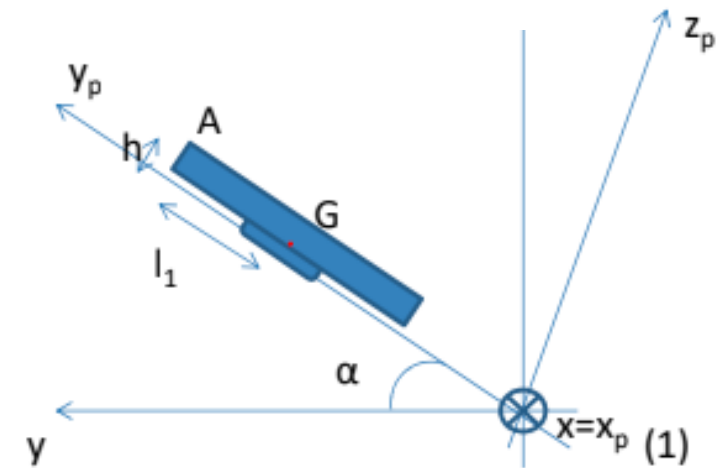
$$0 = -mg + PS + \frac{h(\sin \alpha) mg}{l_1 + hf}$$

Donc Masse maximale supportée :

$$m_{\max} = P \cdot S \left(\frac{l_1 + hf}{g(l_1 + hf) - hg \sin \alpha} \right)$$



(2)



(1)

02

OBJECTIF 2

Dimensionnement du système de dépression

Modélisation et Dimensionnement:

Condition de sécurité fondamentale:

Pour garantir la sécurité du robot pendant le franchissement, au moins une chambre doit maintenir une adhésion suffisante :

$$F_{adhésion} \geq s \times m \times g \quad \text{avec } s \geq 2$$

Force d'adhésion d'une chambre:

$$F_n = \Delta P \times S$$

Où :

- ΔP : différence de pression (Pa) = $P_{atm} - P_{chambre}$
- S : surface effective de la chambre (m²)

Système de Franchissement des Joints Inter-Panneaux:

Problématique:

Les façades vitrées des immeubles de grande hauteur sont constituées de multiples panneaux de verre séparés par des joints structuraux (cadres métalliques, joints silicone, profilés aluminium). Ces discontinuités représentent un défi majeur pour le déplacement du robot nettoyeur.

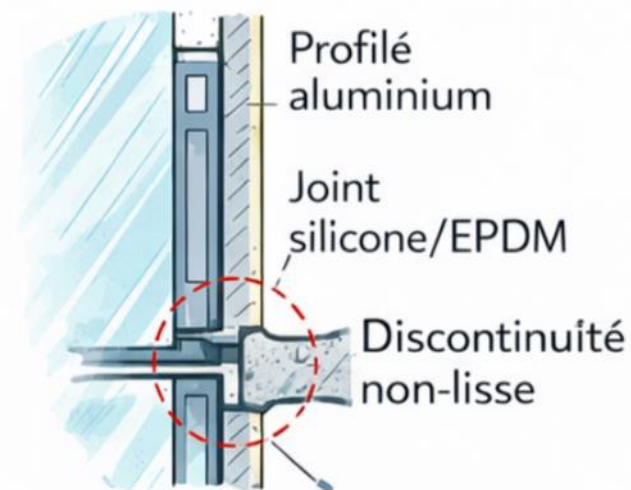
Caractéristiques des joints:

Paramètre	Valeur typique
Largeur	10 à 25 mm
Profondeur	5 à 15 mm
5 à 15 mm	Aluminium, acier, silicone
Surface	Non-lisse, coefficient de friction variable

Problèmes identifiés lors du franchissement:

1. Perte d'étanchéité de la chambre de dépression.
2. Chute brutale de la force d'adhésion.
3. Risque de basculement du robot.
4. Blocage mécanique des roues/chenilles.

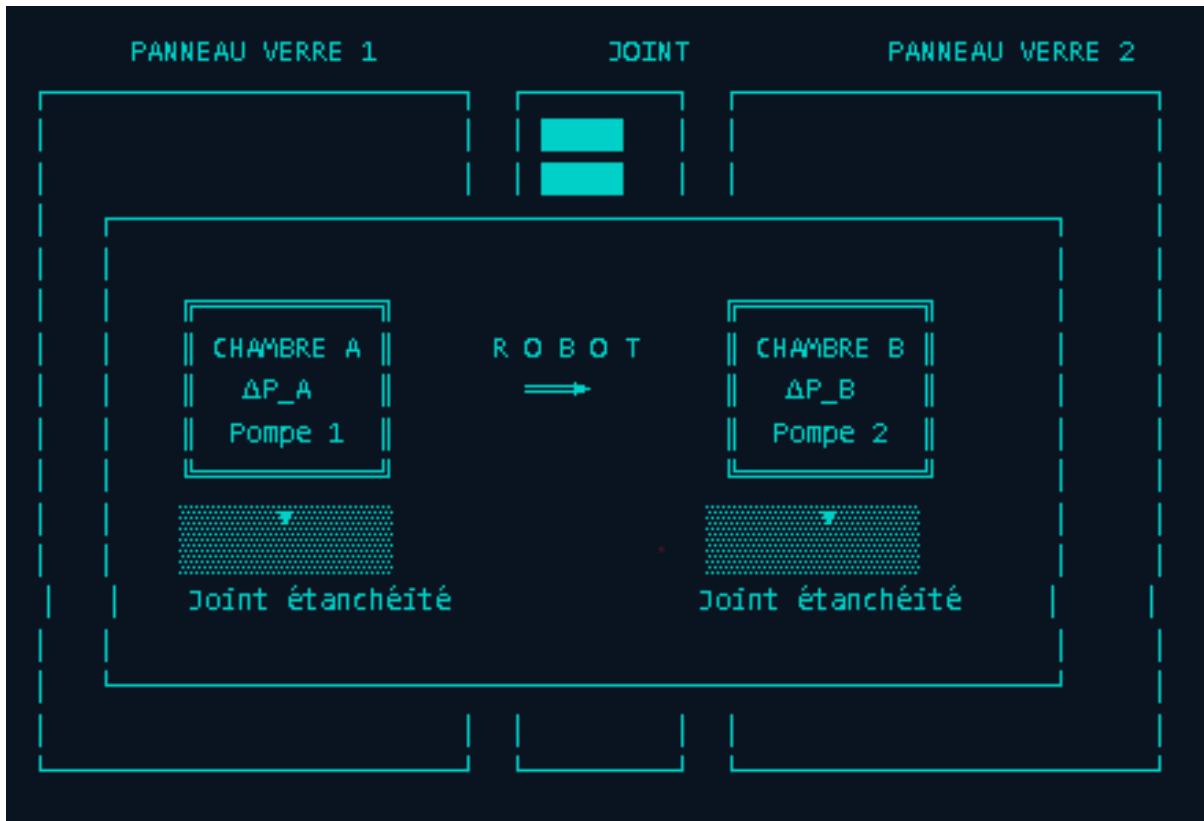
Panneaux vitrés



Joint entre panneaux

Solution Proposée : Système de Double Chambre de Dépression:

Schéma du Principe de fonctionnement:



Séquence de franchissement:

Phase 1 - APPROCHE : Les deux chambres sont actives

Phase 2 - DÉTECTION : Capteur IR détecte le joint à do

Phase 3 - PRÉPARATION : Augmentation ΔP sur chambre A (arrière)

Phase 4 - FRANCHISSEMENT B: Chambre B traverse (perte étanchéité)

Phase 5 - RÉCUPÉRATION : Chambre B sur nouveau panneau.

Phase 6 - FRANCHISSEMENT A : Chambre A traverse, sécurisée par B

Choix de la pompe à vide

Rôle de la pompe à vide

Élément clé de l'adhésion

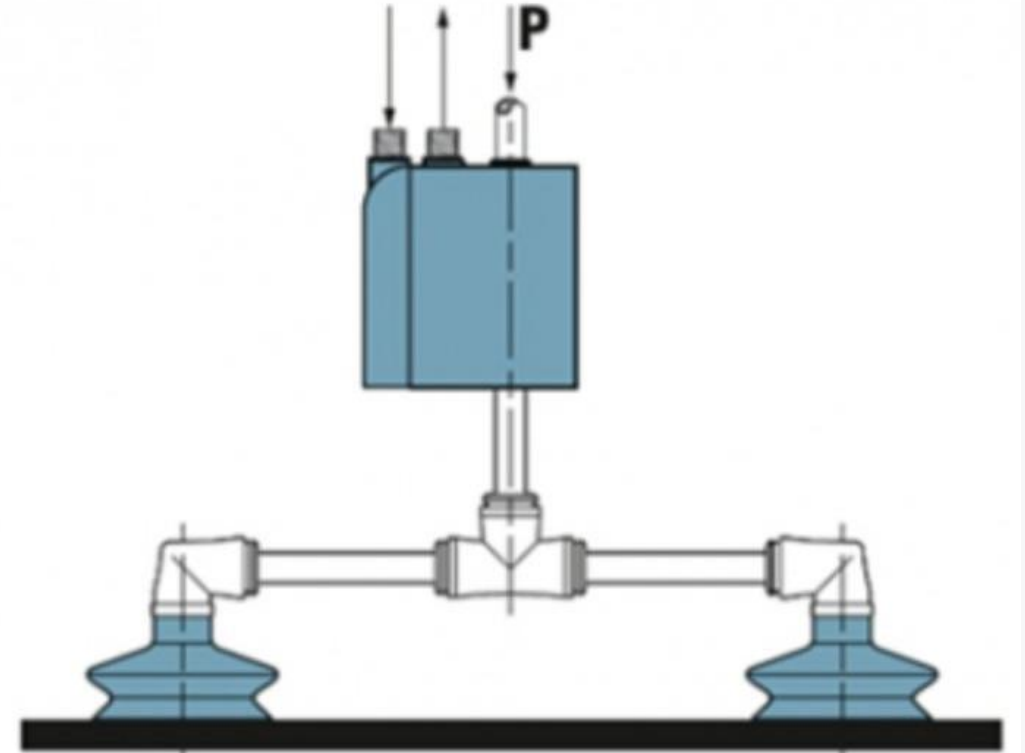
Composant central du système de maintien du robot.

Génération de la dépression

Crée le vide nécessaire au fonctionnement des ventouses.

Maintien vertical assuré

Garde le robot plaqué sur la surface vitrée verticale.

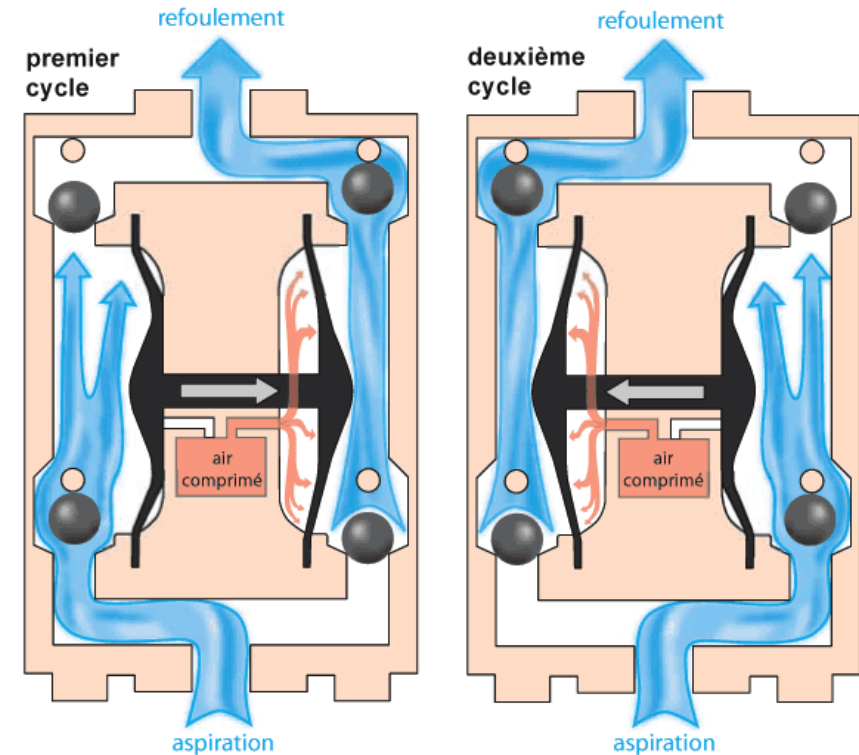


Choix de la pompe à vide

a) Pompe à membrane :

Principe de fonctionnement :

La **pompe à membrane** fonctionne grâce à l'oscillation d'une membrane souple qui aspire et refoule l'air sans contact mécanique direct avec des pièces lubrifiées.

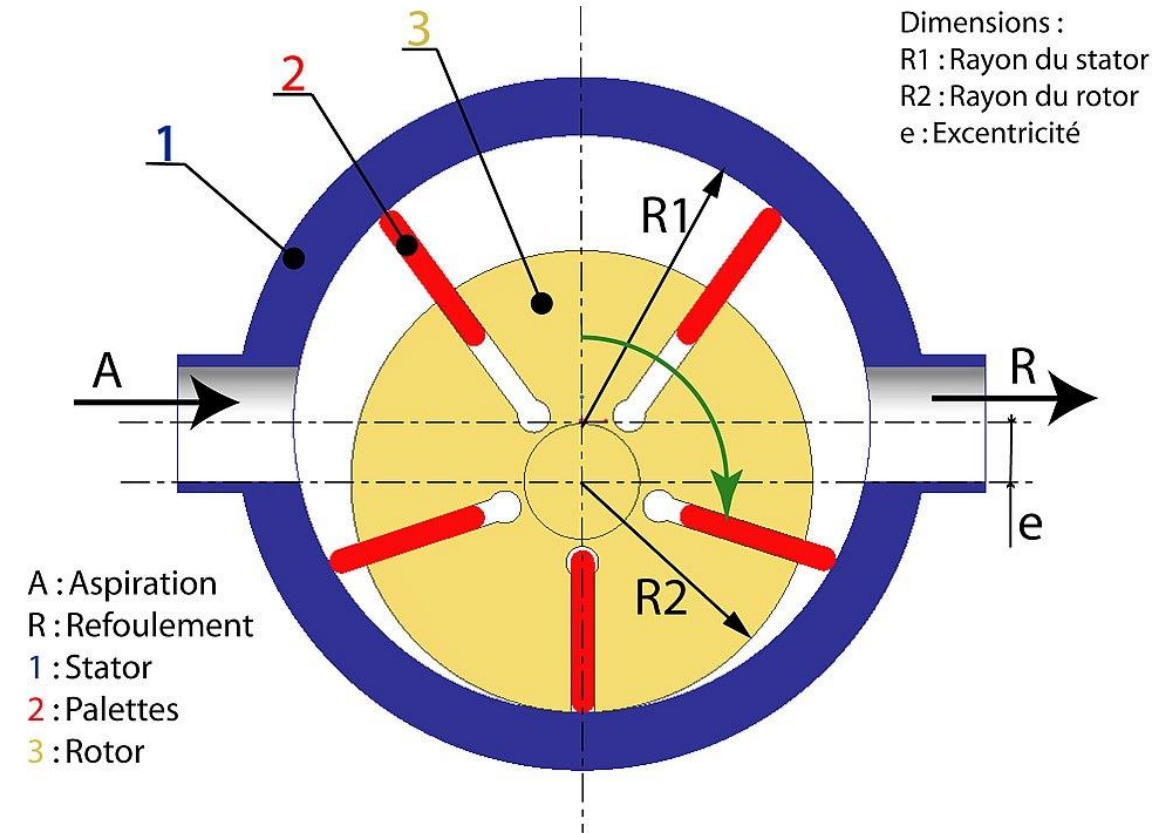


Choix de la pompe à vide

b) Pompe à palettes rotatives :

Principe de fonctionnement :

La pompe à palettes rotatives utilise un rotor muni de palettes mobiles qui compriment l'air dans un carter(chambre contenant palettes et rotor) afin de créer la dépression.



Choix de la pompe à vide

Conclusion:

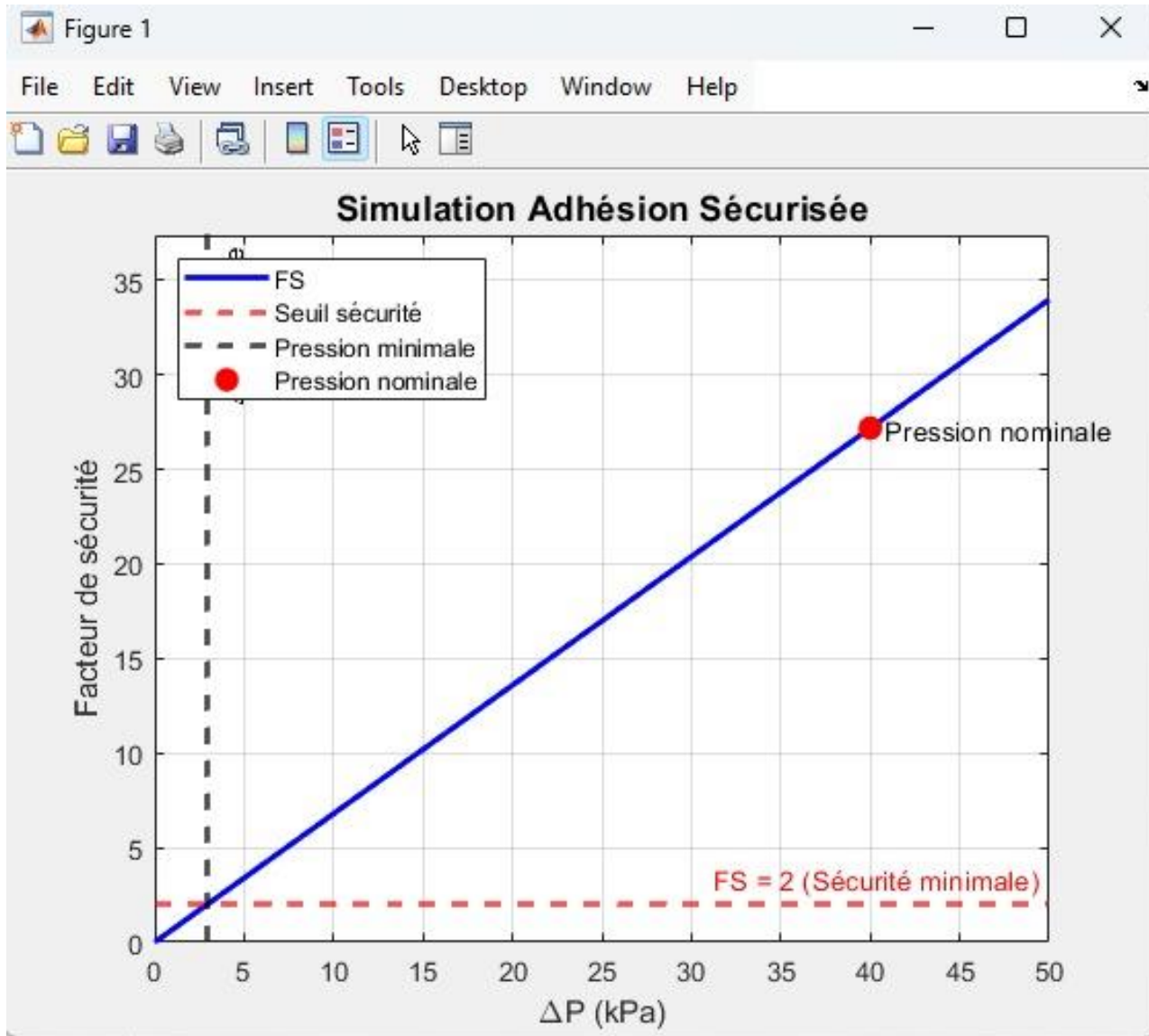
La pompe à membrane, compacte et sans huile, est idéale pour un robot lave-vitres autonome grâce à sa simplicité et sa fiabilité, tandis que la pompe à palettes rotatives, plus puissante et stable, constitue une alternative industrielle robuste lorsque des exigences plus élevées en débit et en dépression sont nécessaires.

Fiche technique : Pompe à membrane

Voltage	<i>12/24V</i>
Max Flow	<i>4.6L/min</i>
Max Vacuum	<i>-72 kPa</i>
Max Pressure	<i>1~1.5Bar</i>
Motor	<i>DC brushed motor</i>
Max Power	<i>5 W</i>
Weight	<i>195g</i>



Source: bodenpump.com/product/miniature-diaphragm-pump-bd-05t0546l/



Interprétation du graphique

- **Courbe FS** : Évolution linéaire du facteur de sécurité:

$$FS = \frac{\Delta P \times S}{m \times g}$$

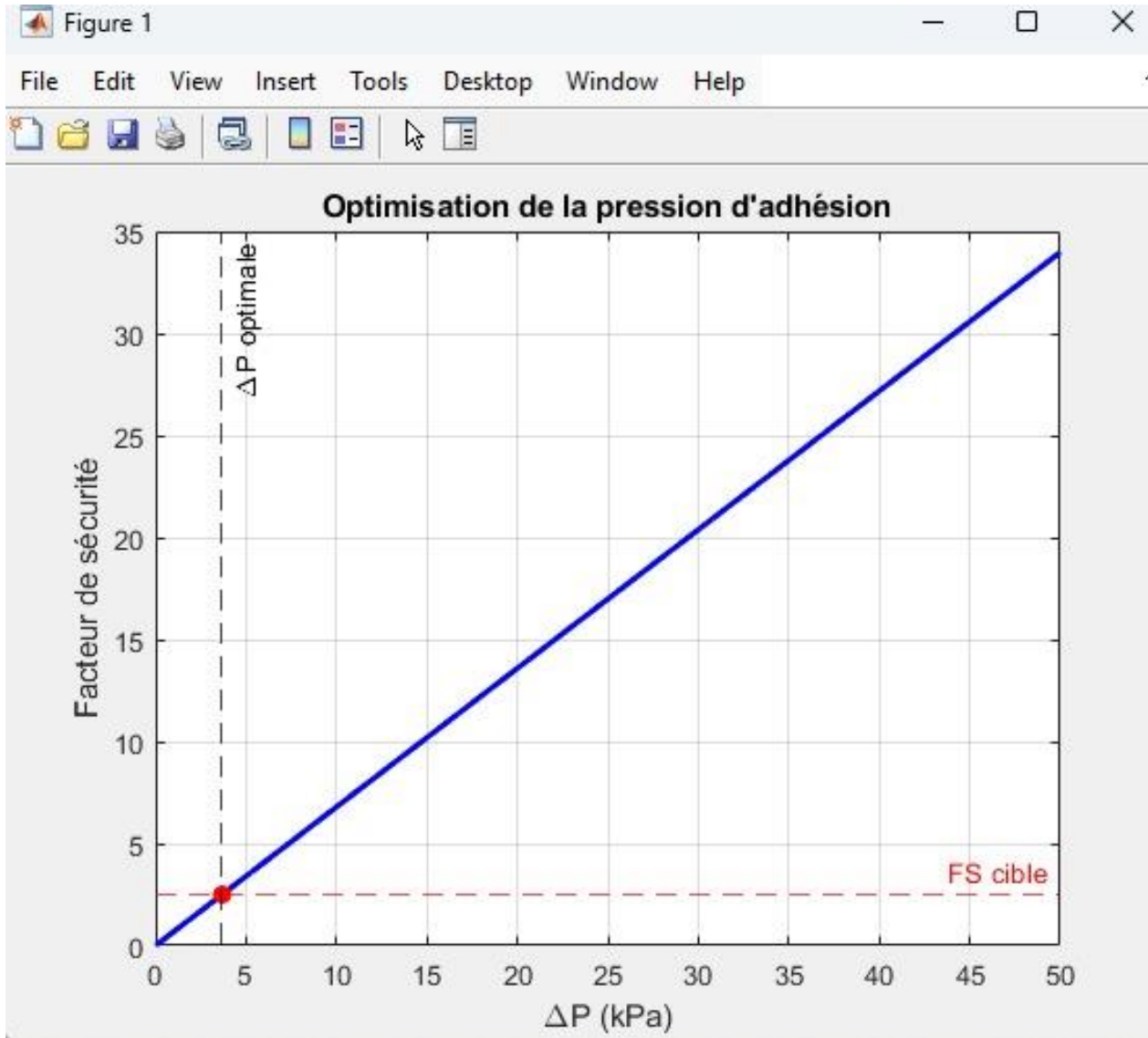
- **Seuil sécurité** : FS = 2 : facteur minimal pour garantir l'adhésion du robot
- **Pression minimale** : $\Delta P \approx 2.94$ kPa : pression minimale pour $FS \geq 2$
- **Point nominal (40 kPa)** : FS = 27.18 → grande marge de sécurité pour conditions difficiles

Résultats de la simulation:

Pression minimale requise: 2.94 kPa

Facteur de sécurité à 40 kPa: 27.18

- La force d'adhésion est 27 fois supérieure au poids (Le système est fortement surdimensionné)



Interprétation du graphique

- **FS cible :**
FS = 2,5 → niveau de sécurité choisi pour garantir une marge suffisante.
- **Pression optimale :**
- intersection entre la droite bleue et la ligne FS = 2,5

$$\Delta P \approx 3,68 \text{ kPa}$$

- Pression minimale pour atteindre le FS cible.
- **Point optimal (3,68 kPa) :**
FS = 2,5 → fonctionnement sécurisé avec marge contrôlée.

Résultats de l'optimisation:

- **Pression optimale:** 3.68 kPa
- **Facteur de sécurité obtenu:** 2.50
- ** conomie d'énergie:** ≈90% par rapport pression nominale (40 kPa)

OBJECTIF 3

03

Fonctionnement totalement autonome

Schéma de contrôle global:

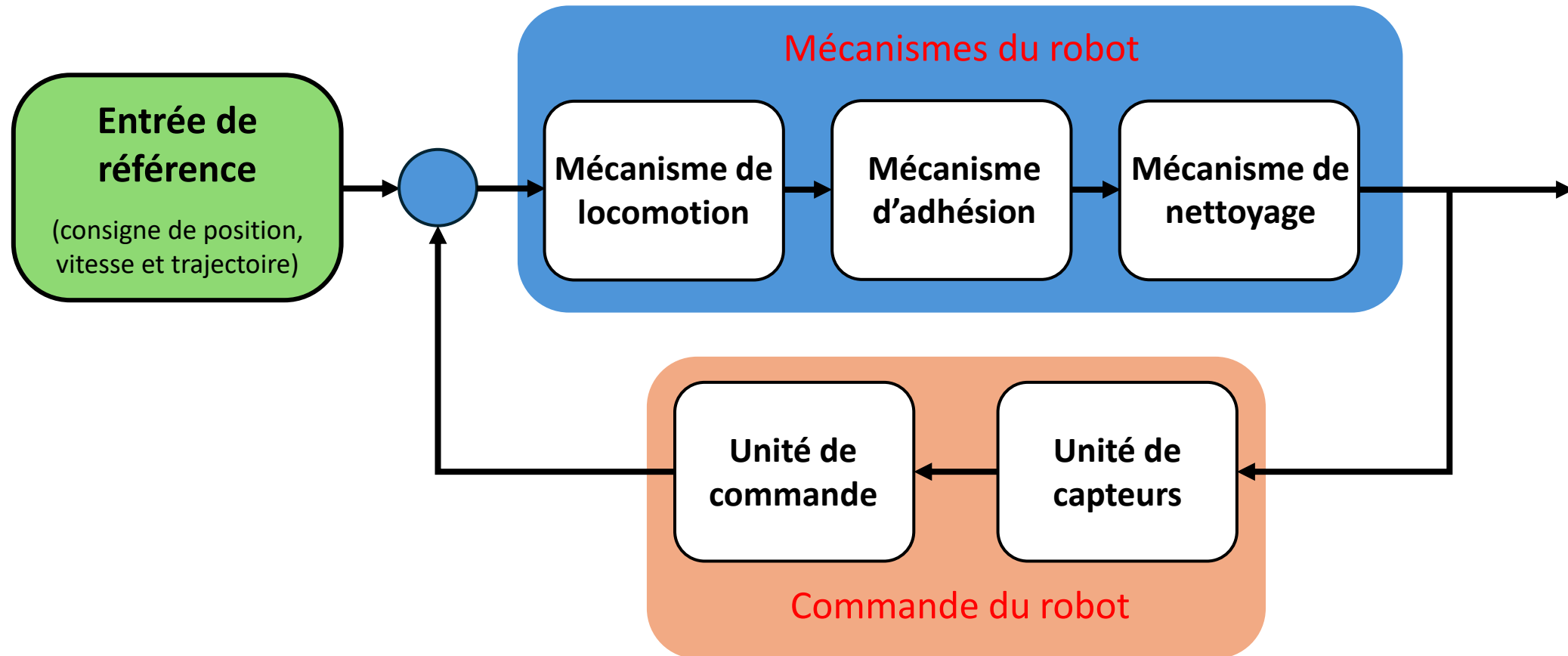
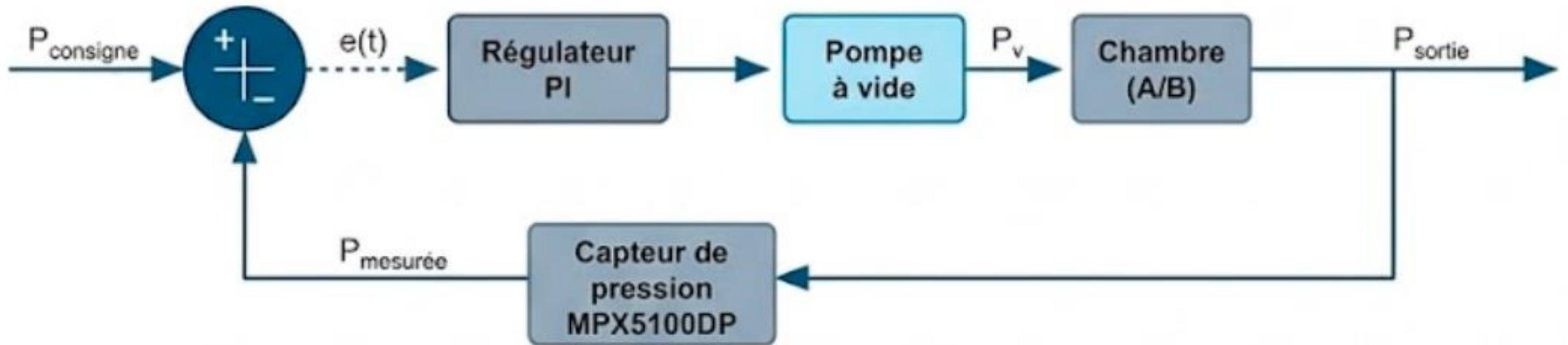


Schéma bloc de la régulation:



Modélisation mathématique

Fonctions de transfert des blocs :

Régulateur PI

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Pompe à vide

$$G_{pompe}(s) = \frac{K_p}{1 + \tau_p s}$$

Chambre de dépression

$$G_{ch}(s) = \frac{1}{V_{ch} s}$$

Capteur

$$H(s) = K_c$$

Fonction de transfert en boucle ouverte et fermée

Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO)

$$\text{FTBO}(s) = C(s) \cdot G_{\text{pompe}}(s) \cdot G_{ch}(s) \cdot H(s)$$

$$= \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \cdot \frac{K_p}{1 + \tau_p p} \cdot \frac{1}{V_{ch} p} \cdot K_c$$

$$= \frac{K_c K_p}{V_{ch}} \cdot \frac{K_p p + K_i}{p^2 (1 + \tau_p p)}$$

Fonction de Transfert en Boucle Fermée (FTBF)

$$\text{FTBF}(s) = \frac{\text{FTBO}(s)}{1 + \text{FTBO}(s)}$$

Système d'ordre 3 avec un intégrateur → erreur statique nulle en régime permanent

Analyse de stabilité et performances

Critères de stabilité

Marge de phase

$$\phi_m > 45^\circ$$

Recommandé pour éviter les oscillations

Marge de gain

$$G_m > 6 \text{ dB}$$

Robustesse vis-à-vis des incertitudes

Erreur statique

$$\varepsilon = 0$$

Grâce à l'intégrateur du PI

Temps de réponse

$$t_r < 1 \text{ s}$$

Réaction rapide aux fuites

Performances attendues

$$< 10\%$$

Dépassement

Pas d'oscillation excessive

$$\approx 0.3 \text{ s}$$

Temps de montée

Établissement rapide du vide

$$< 1 \text{ s}$$

Temps de réponse à 5%

Stabilisation rapide

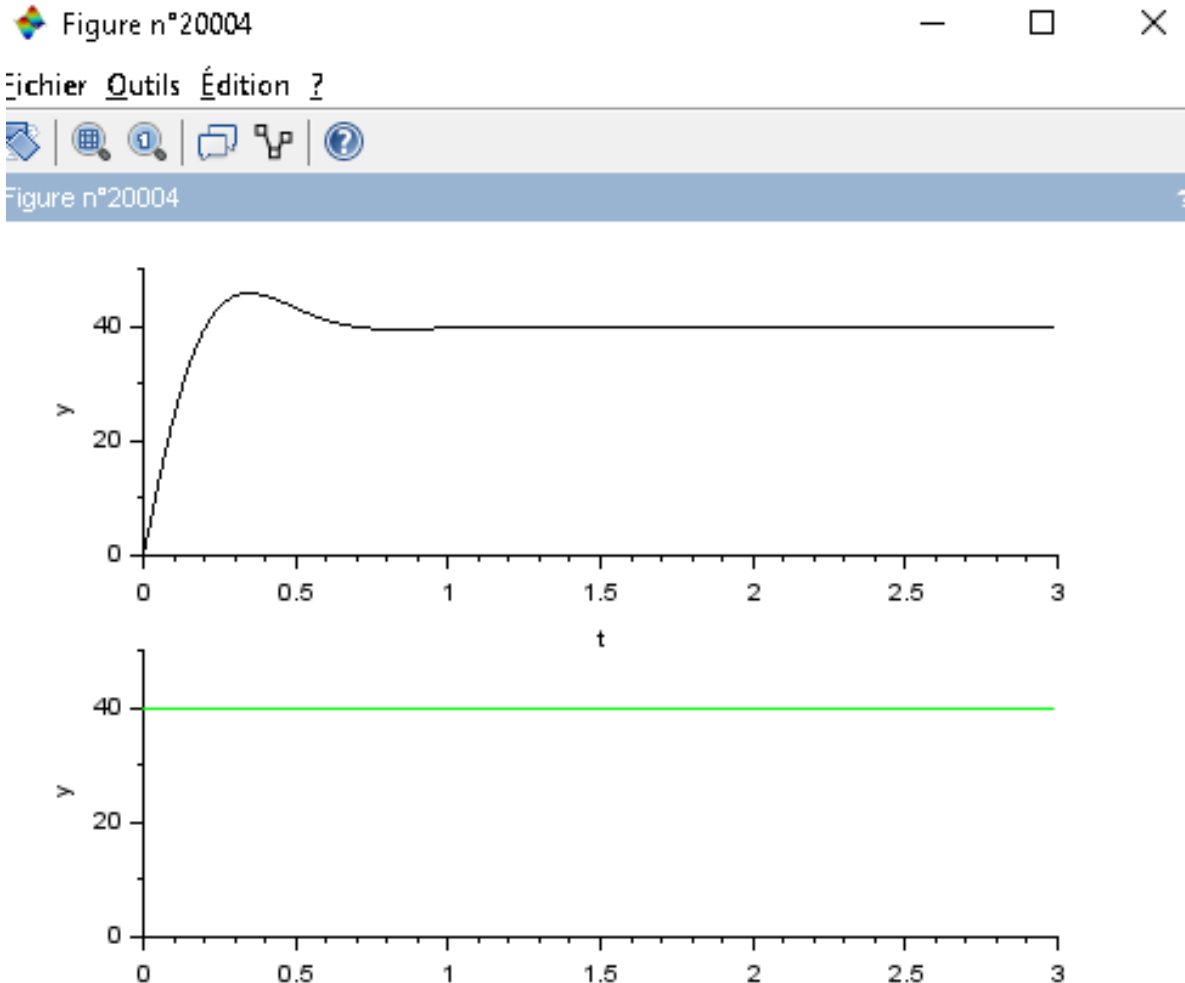
$$0 \text{ kPa}$$

Erreur en régime permanent

Intégrateur annule l'erreur

Réponse indicielle du système régulé

Comportement attendu de la pression dans la chambre suite à un échelon de consigne :



Phase transitoire

Montée rapide grâce au terme proportionnel K_p

Léger dépassement

< 10% grâce au réglage K_p/K_i optimisé

Convergence

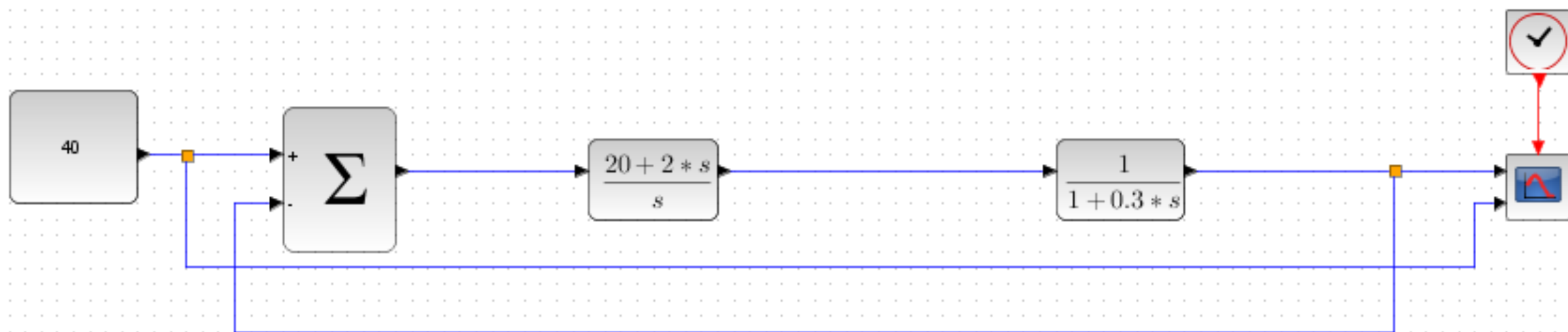
Erreur statique $\rightarrow 0$
grâce à l'intégrateur K_i

*Sans titre - 10-38-17 (C:\Users\y\OneDrive\Desktop\Sans titre - 10-38-17.zcos) - Xcos

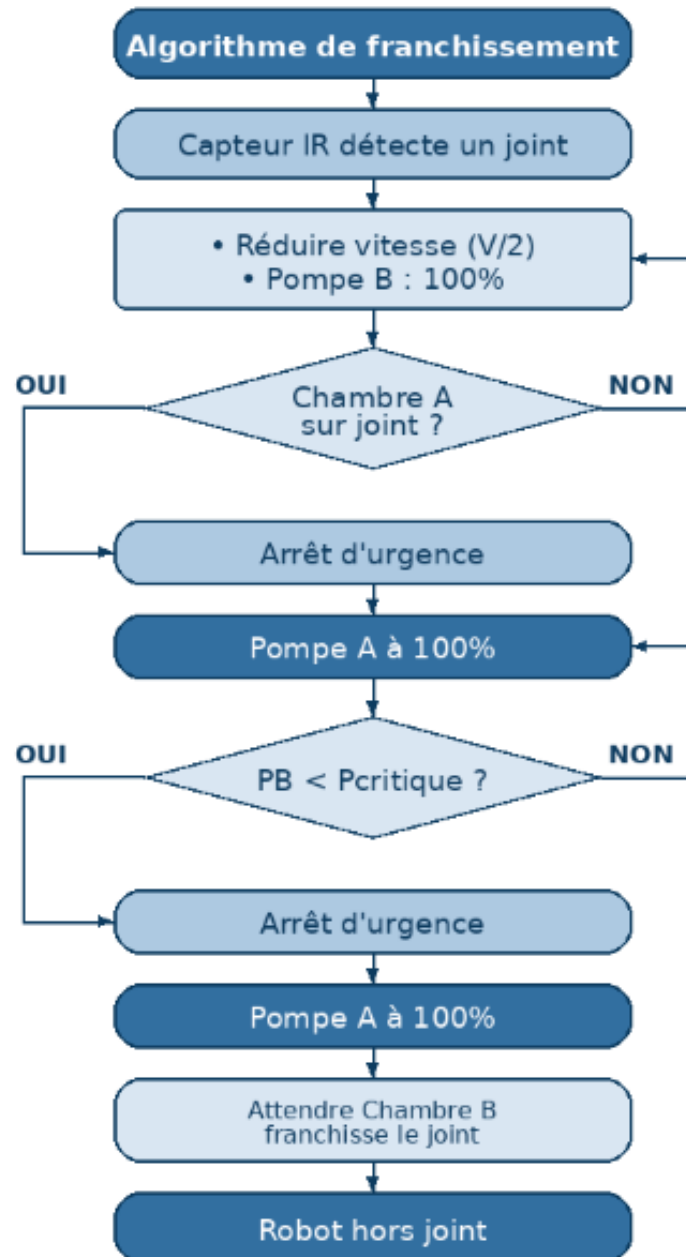
Fichier Édition Vue Simulation Format Outils ?



*Sans titre - 10-38-17 (C:\Users\y\OneDrive\Desktop\Sans titre - 10-38-17.zcos) - Xcos



Algorithme de franchissement :

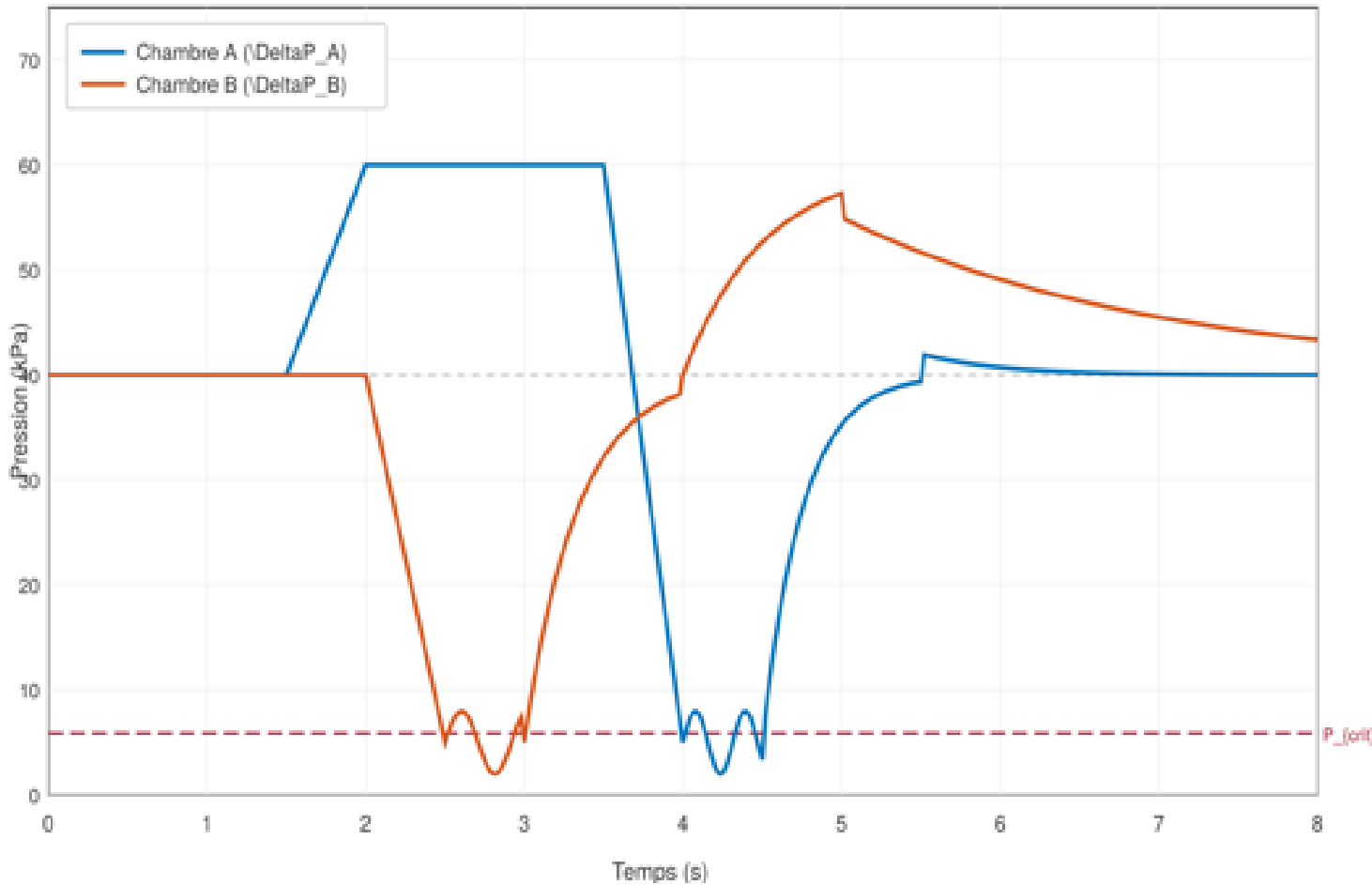


DÉBUT Boucle_Franchissement

```

TANT QUE robot en mouvement FAIRE
  SI capteur_joint = DÉTECTÉ ALORS
     $v \leftarrow v / 2$ 
    pompe_B  $\leftarrow$  100 %
    TANT QUE chambre_A sur joint FAIRE
      SI  $P_B < P_{critique}$  ALORS
        ARRÊT_URGENCE()
      FIN SI
    FIN TANT QUE
    pompe_A  $\leftarrow$  100 %
    ATTENDRE chambre_B franchit
    vitesse  $\leftarrow$  V
  FIN SI
FIN TANT QUE
FIN
  
```

Simulation : Franchissement de Joint — Double Chambre



Interprétation du graphique

Phase critique ($t \approx 2-4.5s$) :

Quand une chambre traverse le joint, sa pression chute brutalement vers 5 kPa (perte d'étanchéité).

Sécurité maintenue :

L'autre chambre compense avec un boost à 60 kPa. La pression globale ne descend jamais sous $P_{crit} = 5.88$ kPa.

Séquence alternée :

B franchit d'abord ($t \approx 2-3s$) pendant que A tient. Puis A franchit ($t \approx 3.5-4.5s$) pendant que B est récupérée → jamais de perte simultanée.

Récupération rapide :

Retour à 40 kPa en $< 1s$ grâce à la boucle PI. Le robot peut enchaîner les joints sans interruption.

04

OBJECTIF 4

Intégration des capteurs

Cartographie des capteurs

Capteurs internes

Pression vacuum

Rôle : Mesure de la dépression dans les chambres

Encodeur rotatif

Rôle : Position & vitesse des moteurs

Accéléromètre

Rôle : Inclinaison & vibrations

Capteurs externes

Capteur IR (bords)

Rôle : Détection des bordures et joints

Anémomètre

Rôle : Mesure de la vitesse du vent

Capteur de contact

Rôle : Détection d'obstacles & chocs

Capteur de pression vacuum — NXP MPX5100DP

Formule de conversion:

$$P_{kPa} = \frac{V_{out} - 0.2}{0.045}$$

- ❑ Le terme 0.045 correspond à l'offset du capteur (tension non nulle à pression nulle)

Paramètre	Valeur	Unité
Type	Différentiel	-
Plage de mesure	0 à 100	kPa
Pression max	400	kPa
Tension d'alimentation	4.75 à 5.25	V DC
Tension de sortie	0.2 à 4.7	V
Sensibilité	45	mV/kPa
Précision	±2.5	%
Temps de réponse	1	ms
Température de fonctionnement	-40 à +125	°C



Capteur IR (bords) — Sharp GP2Y0A21YK0F

Fonctions

- Détecter les bordures de la vitre.
- Éviter les chutes hors de la surface.
- Détecter les joints inter-panneaux.

$$V_{out}(d) = A / (d + B) + C$$

Paramètre	Valeur	Unité
Type	Infrarouge analogique	-
Plage de détection	10 à 80	cm
Tension de sortie	0.4 à 3.1	V
Fréquence de rafraîchissement	25	Hz
Temps de réponse	38	ms
Tension d'alimentation	4.5 à 5.5	V DC
Courant moyen	30	mA
Angle de détection	> 40	°
Température de fonctionnement	-40 à +85	°C



Encodeur rotatif – US Digital E3

Formule de calcul de vitesse:

$$\omega = \frac{f \times 60}{CPR \times 4}$$

- f : fréquence des impulsions (Hz)
- CPR : nombre d'impulsions par tour
- $\times 4$: décodage quadrature (A et B, fronts montants et descendants)

➤ Plus la fréquence augmente, plus la vitesse du moteur est élevée.



Paramètre	Valeur	Unité
Type	Optique incrémental	-
Résolution	64 à 2048	(pulses /tour)
Résolution typique	256	(pulses /tour)
Tension d'alimentation	4.5 à 5.5	V DC
Courant	16	mA
Fréquence max	100	kHz
Vitesse max	10000	RPM
Diamètre arbre	2 à 8	mm
Température de fonctionnement	-40 à +100	°C

Accéléromètre — NXP MPX5100DP

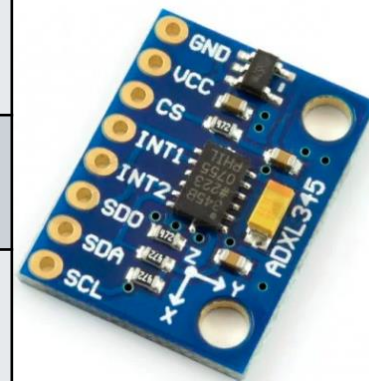
Formule de calcul d'inclinaison:

$$\theta = \arctan \left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right)$$

Cette formule exploite le fait que, à faible vitesse, l'accélération mesurée correspond essentiellement à la gravité.

- A_x, A_y, A_z : composantes de l'accélération
- θ : angle d'inclinaison

Paramètre	Valeur	Unité
Type	MEMS 3 axes	-
Plage de mesure	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$	g
Résolution	13	bits
Sensibilité	3.9 (à $\pm 16g$)	Mg /LSB
Résolution angulaire	< 1.0	°
Tension d'alimentation	2.0 à 3.6	V
Courant (mesure)	23 à 140	μA
Bande passante	0.1 à 3200	Hz
Température de fonctionnement	-40 à +85	°C



Anémomètre — DFRobot SENo170

Formule de conversion:

$$V_{vent} = \frac{V_{out} \times 30}{5}$$

Relation linéaire entre :

- la tension de sortie
- la vitesse du vent (m/s)
- 5 V correspond à la vitesse maximale (30 m/s).

Paramètre	Valeur	Unité
Type	Anémomètre 3 coupelles	-
Précision	±3	%
Tension de sortie	0 à 5	V
Résolution	0.1	m/s
Temps de réponse	38	ms
Tension d'alimentation	9 à 24	V DC
Courant	< 10	mA
Temps de réponse	< 1	s
Température de fonctionnement	-40 à +80	°C



Microcontrôleur — Arduino Mega 2560

Justification du choix

Nombre de broches suffisant

54 I/O numériques + 16 entrées analogiques pour piloter tous les composants.

15 sorties PWM

Contrôle fin de la vitesse des moteurs via régulation PID.

6 interruptions externes

Lecture haute fréquence des encodeurs (décodage quadrature).

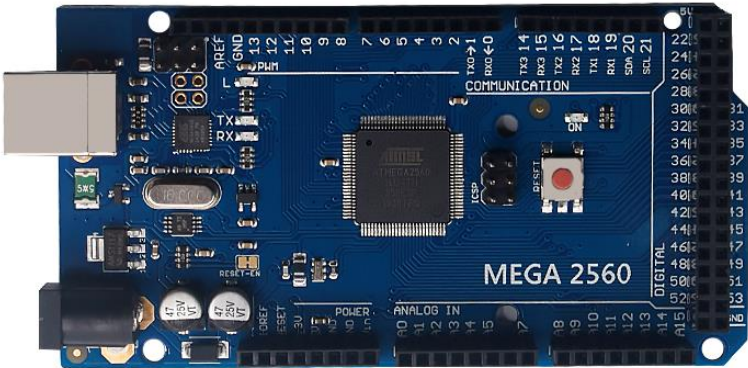
8 Ko de SRAM

Stockage des variables d'algorithme et tables de trajectoire.

Écosystème Arduino

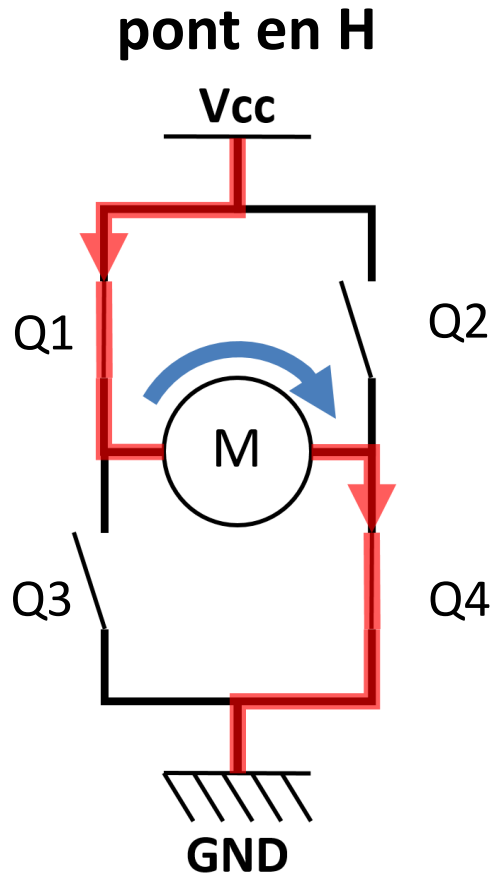
Documentation large, bibliothèques éprouvées (PID, Encoder, Wire I2C).

Paramètre	Valeur
Processeur	ATmega2560 (8-bit)
Fréquence	16 MHz
Tension de fonct.	5 V
Broches I/O num.	54 (dont 15 PWM)
Entrées analogiques	16
Mémoire Flash	256 Ko
SRAM	8 Ko
EEPROM	4 Ko
Interruptions externes	6
Courant max / broche	20 mA



4ème objectif : Fonctionnement autonome

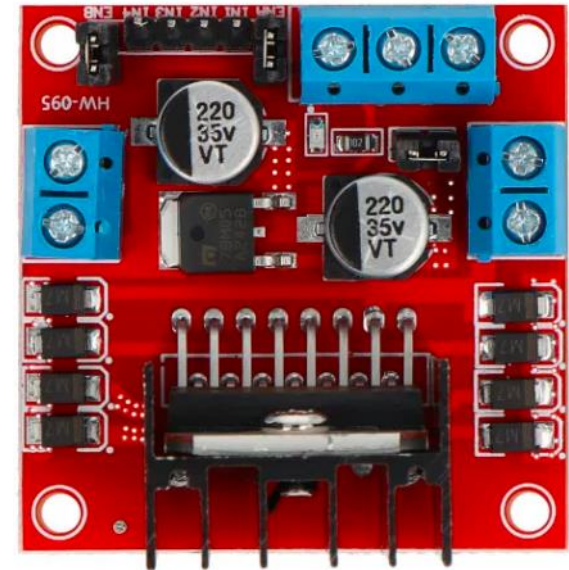
Module de Puissance L298N :



Rôle dans le système:

- Le microcontrôleur délivre des signaux logiques de faible puissance (5 V, 20 mA max par broche).
- Il existe donc une incompatibilité directe entre les sorties du microcontrôleur et les besoins des moteurs.
- Le pont en H L298N joue le rôle d'interface de puissance entre le microcontrôleur et les moteurs.
- Il amplifie les signaux de commande issus du microcontrôleur.
- Il fournit la tension et le courant nécessaires au bon fonctionnement des moteurs.

L298N



05

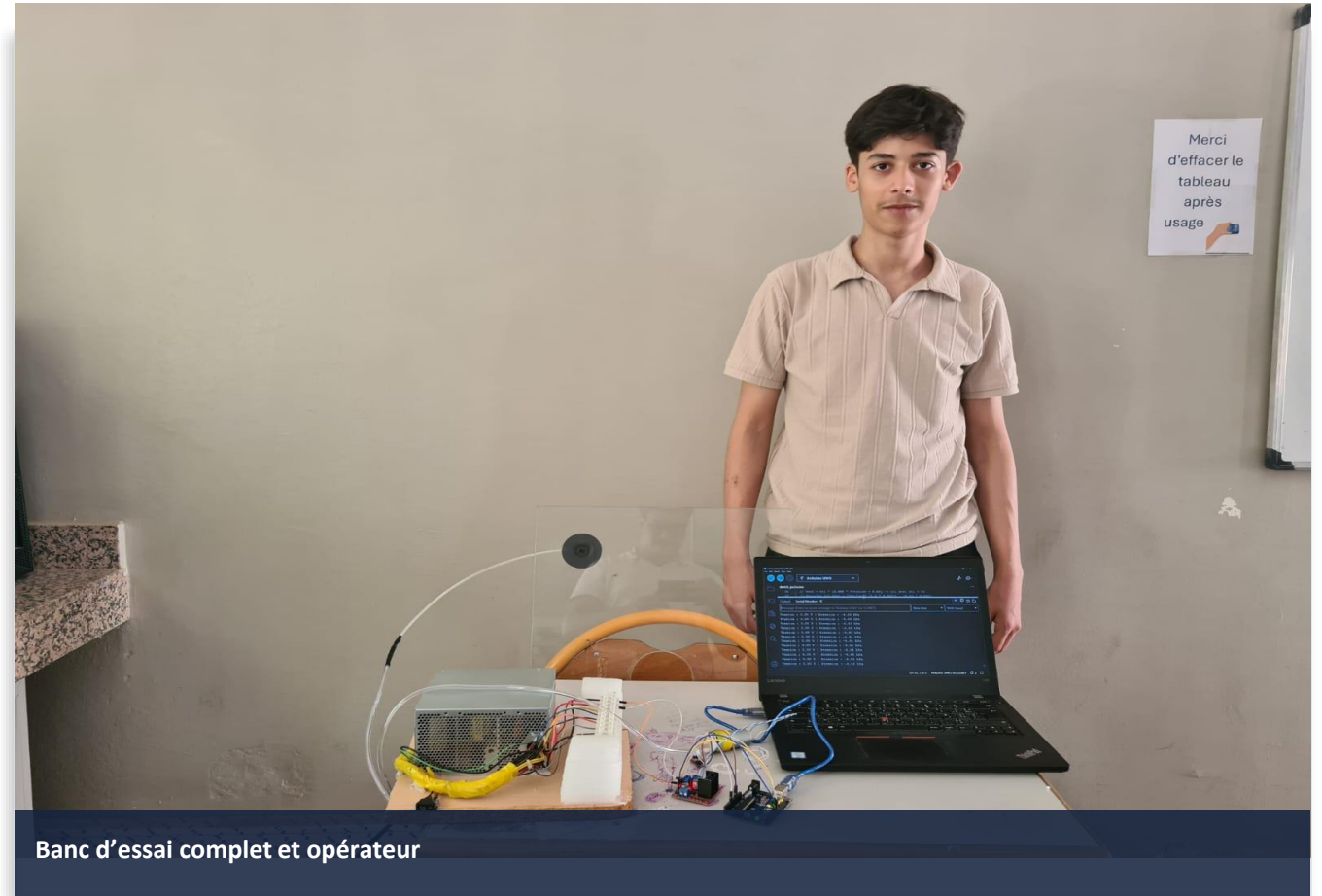
OBJECTIF 5

Validation expérimentale

Prototype réalisé — Vue d'ensemble

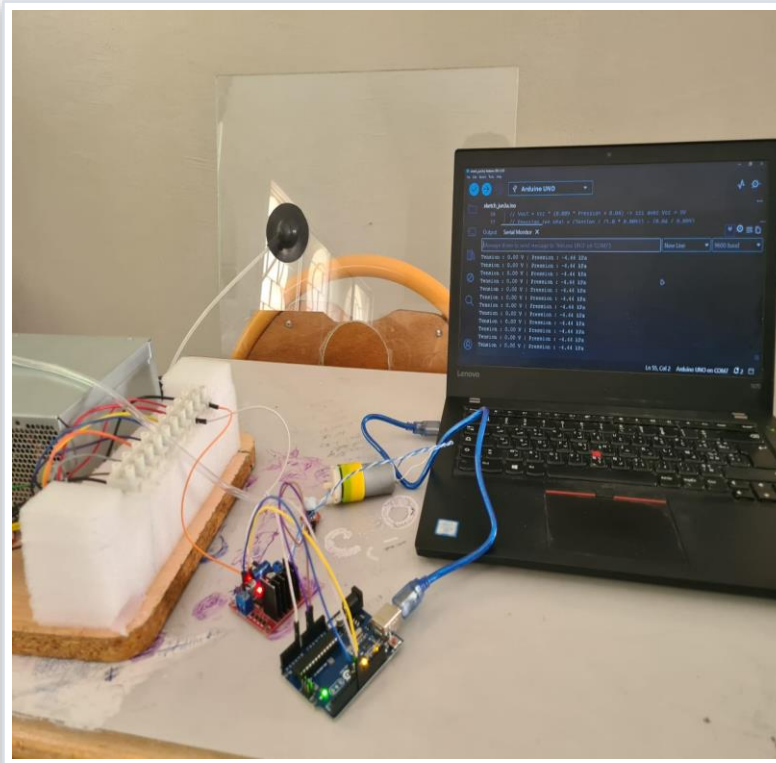
Un prototype fonctionnel a été assemblé pour valider expérimentalement la chaîne d'adhésion par dépression et sa régulation.

- Pompe à vide DC + ventouse sur vitre verticale
- Capteur de pression différentielle (type MPX5100DP)
- Arduino UNO + pont en H L298N (commande PWM de la pompe)
- Source d'Alimentation 12 V



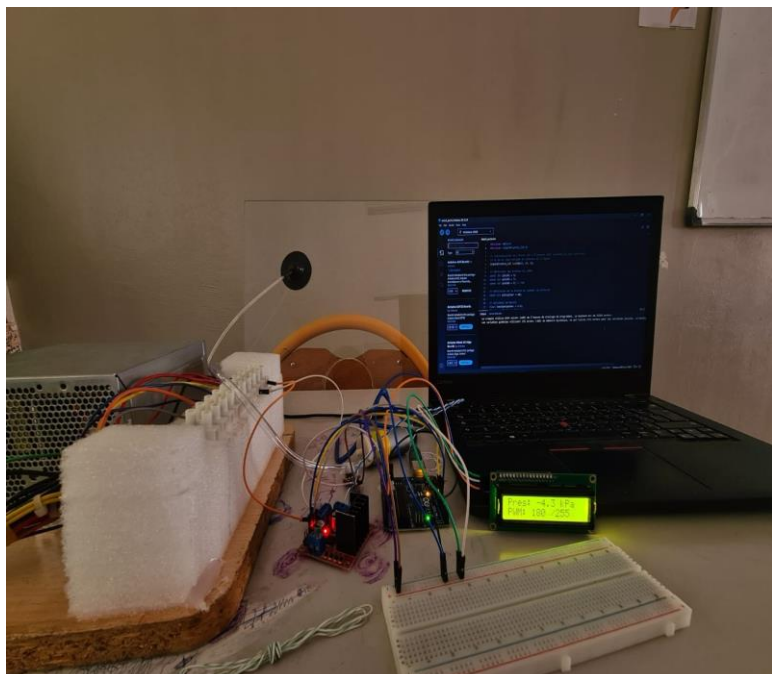
Système d'adhésion par ventouse

Validation du 1er objectif : une ventouse fixe alimentée par la pompe crée une dépression permanente qui plaque l'ensemble contre la vitre.

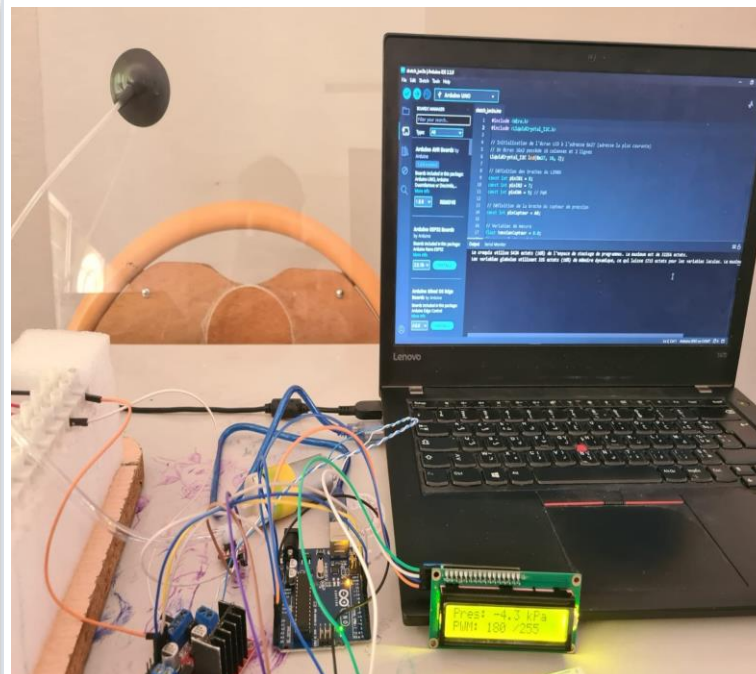


Capteur de pression & régulation PI → PWM

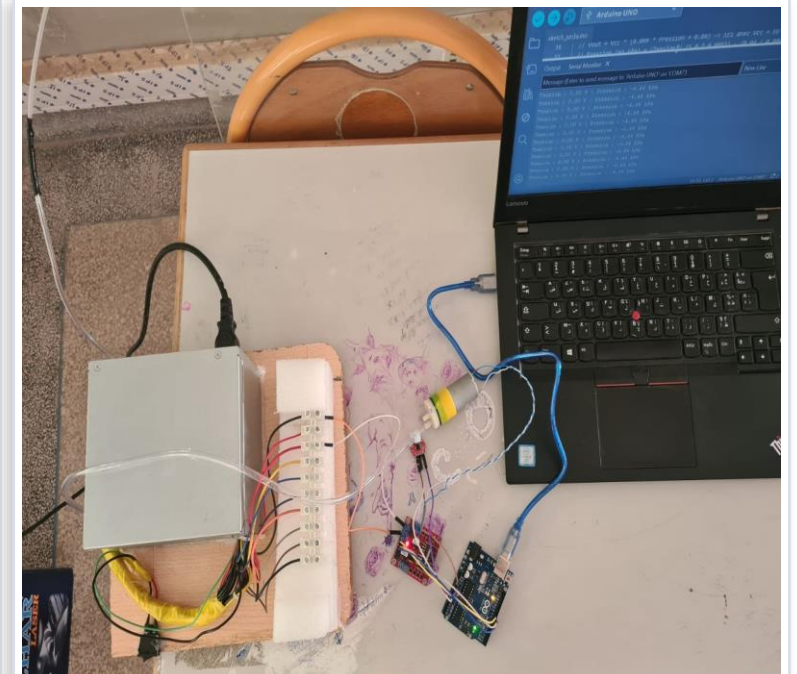
Mise en œuvre réelle de la boucle de régulation (3^e objectif) : le capteur mesure la dépression, le correcteur ajuste le rapport PWM transmis au L298N qui pilote la pompe.



LCD : Pres ≈ -4.3 kPa | PWM 180/255



Pont en H L298N + capteur



Vue du circuit complet

Conclusion & perspectives

Acquis du projet

- Étude comparative complète des solutions d'adhésion (ventouses fixes/mobiles).
- Dimensionnement validé du système de dépression (FS ≥ 2 garanti).
- Architecture autonome avec boucle de régulation PI et algorithme de franchissement.
- Intégration cohérente de 5 types de capteurs (internes & externes).
- Validation par simulation MATLAB et tests prototype.

Perspectives

01**Caméra & vision**

Détection des zones sales et planification adaptative.

02**Communication sans fil**

Supervision à distance, télémétrie en temps réel.

03**AI / Machine learning**

Optimisation des trajectoires selon le type de façade.

04**Système anti-chute**

Filin de sécurité actif en cas de défaillance double.

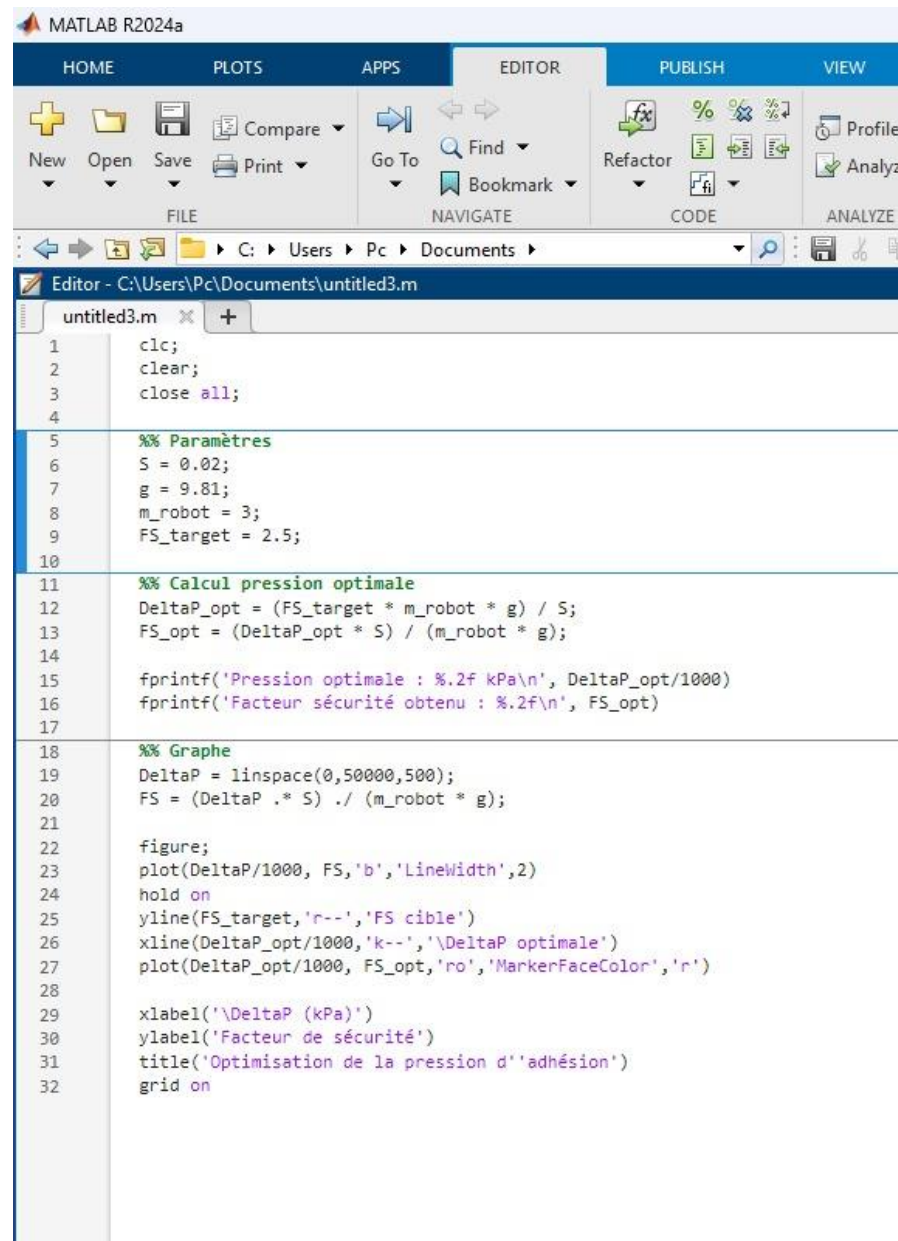
Merci Pour Votre
Attention

ANNEXE : Code MATLAB - Simulation Adhésion Sécurisée

```
untitled3.m  +
1  clc;
2  clear;
3  close all;
4
5  %% =====
6  % SIMULATION ADHESION SECURISEE
7  % =====
8
9  % ----- Paramètres -----
10 S = 0.02;           % Surface d'adhésion (m^2)
11 g = 9.81;           % Gravité (m/s^2)
12 m_robot = 3;        % Masse robot (kg)
13 FS_min = 2;          % Seuil sécurité exigé
14 DeltaP_nom = 40000;  % Pression nominale (Pa)
15
16 % ----- Plage pression -----
17 DeltaP = linspace(0,50000,500); % 0 → 50 kPa
18
19 % ----- Calculs -----
20 FS = (DeltaP .* S) ./ (m_robot * g);
21
22 % Pression minimale analytique
23 DeltaP_min = (FS_min * m_robot * g) / S;
24
25 % Valeur FS nominale
26 FS_nom = (DeltaP_nom * S) / (m_robot * g);
27
28 %% =====
29 % AFFICHAGE NUMERIQUE
30 % =====
31
32 fprintf('==== RESULTATS ==== \n')
33 fprintf('Pression minimale requise : %.2f kPa \n', DeltaP_min/1000)
34 fprintf('Facteur sécurité à 40 kPa : %.2f \n', FS_nom)
```

```
untitled3.m  +
29 % AFFICHAGE NUMERIQUE
30 % =====
31
32 fprintf('==== RESULTATS ==== \n')
33 fprintf('Pression minimale requise : %.2f kPa \n', DeltaP_min/1000)
34 fprintf('Facteur sécurité à 40 kPa : %.2f \n', FS_nom)
35
36 %% =====
37 % Le Graphe:
38 % =====
39
40 figure;
41 plot(DeltaP/1000, FS, 'b', 'LineWidth', 2)
42 hold on
43
44 % Ligne seuil sécurité
45 yline(FS_min, 'r--', 'FS = 2 (Sécurité minimale)', 'LineWidth', 2)
46
47 % Ligne pression minimale
48 xline(DeltaP_min/1000, 'k--', '\DeltaP minimale', 'LineWidth', 2)
49
50 % Point pression nominale
51 plot(DeltaP_nom/1000, FS_nom, 'ro', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', 'r')
52 text(DeltaP_nom/1000, FS_nom, ' Pression nominale', 'FontSize', 10)
53
54 xlabel('\DeltaP (kPa)', 'FontSize', 11)
55 ylabel('Facteur de sécurité', 'FontSize', 11)
56 title('Simulation Adhésion Sécurisée', 'FontSize', 13)
57 grid on
58 legend('FS', 'Seuil sécurité', 'Pression minimale', 'Pression nominale', 'Location', 'northwest')
59 xlim([0 50])
60 ylim([0 max(FS)*1.1])
```

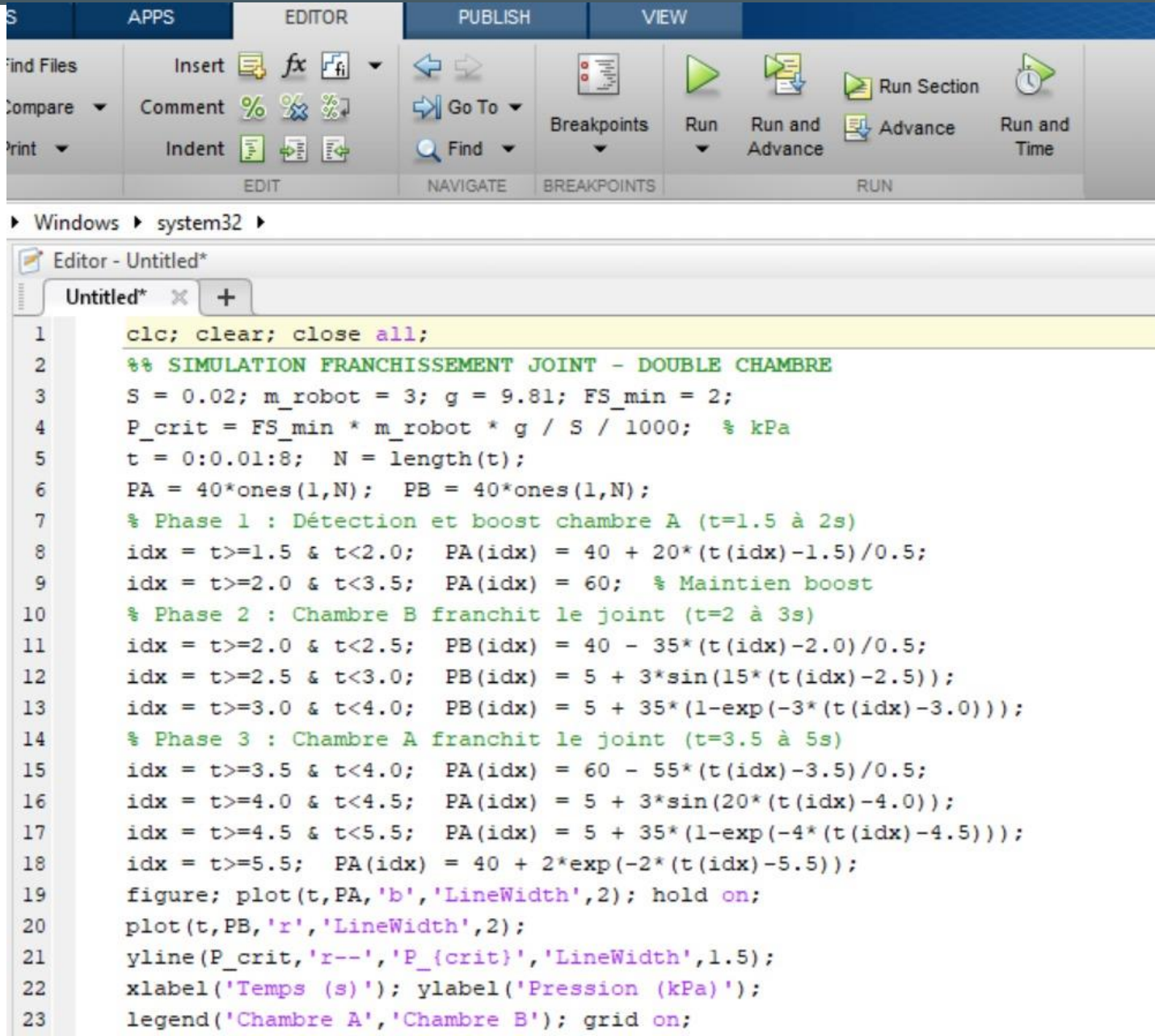
ANNEXE : Code MATLAB - Optimisation Pression d'Adhésion



The image shows the MATLAB R2024a Editor window with a script named 'untitled3.m'. The script is organized into sections with comments. The first section initializes the environment. The second section defines parameters: $S = 0.02$, $g = 9.81$, $m_{\text{robot}} = 3$, and $FS_{\text{target}} = 2.5$. The third section calculates the optimal pressure ΔP_{opt} and safety factor FS_{opt} using the formulas $\Delta P_{\text{opt}} = (FS_{\text{target}} \cdot m_{\text{robot}} \cdot g) / S$ and $FS_{\text{opt}} = (\Delta P_{\text{opt}} \cdot S) / (m_{\text{robot}} \cdot g)$. The fourth section generates a plot of FS versus ΔP for ΔP values from 0 to 5000. The plot includes a blue line for FS , a red dashed horizontal line for FS_{cible} , a black dashed vertical line for $\Delta P_{\text{optimale}}$, and a red circle marker for the optimal point. The plot is titled 'Optimisation de la pression d'adhésion' and has axes labeled '\Delta P (kPa)' and 'Facteur de sécurité'.

```
1  clc;
2  clear;
3  close all;
4
5  %% Paramètres
6  S = 0.02;
7  g = 9.81;
8  m_robot = 3;
9  FS_target = 2.5;
10
11 %% Calcul pression optimale
12 DeltaP_opt = (FS_target * m_robot * g) / S;
13 FS_opt = (DeltaP_opt * S) / (m_robot * g);
14
15 fprintf('Pression optimale : %.2f kPa\n', DeltaP_opt/1000)
16 fprintf('Facteur sécurité obtenu : %.2f\n', FS_opt)
17
18 %% Graphe
19 DeltaP = linspace(0,5000,500);
20 FS = (DeltaP .* S) ./ (m_robot * g);
21
22 figure;
23 plot(DeltaP/1000, FS, 'b', 'LineWidth', 2)
24 hold on
25 yline(FS_target, 'r--', 'FS cible')
26 xline(DeltaP_opt/1000, 'k--', '\DeltaP optimale')
27 plot(DeltaP_opt/1000, FS_opt, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'r')
28
29 xlabel('\DeltaP (kPa)')
30 ylabel('Facteur de sécurité')
31 title('Optimisation de la pression d''adhésion')
32 grid on
```

ANNEXE : Code MATLAB - Optimisation Pression d'Adhésion



The image shows the MATLAB Editor interface. The top toolbar includes tabs for APPS, EDITOR, PUBLISH, and VIEW. The EDITOR tab is active, showing various editing and navigation tools. Below the toolbar, the 'Windows' pane shows a single window titled 'system32'. The main editor area displays a script titled 'Untitled*' with the following MATLAB code:

```
1 clc; clear; close all;
2 %% SIMULATION FRANCHISSEMENT JOINT - DOUBLE CHAMBRE
3 S = 0.02; m_robot = 3; g = 9.81; FS_min = 2;
4 P_crit = FS_min * m_robot * g / S / 1000; % kPa
5 t = 0:0.01:8; N = length(t);
6 PA = 40*ones(1,N); PB = 40*ones(1,N);
7 % Phase 1 : Détection et boost chambre A (t=1.5 à 2s)
8 idx = t>=1.5 & t<2.0; PA(idx) = 40 + 20*(t(idx)-1.5)/0.5;
9 idx = t>=2.0 & t<3.5; PA(idx) = 60; % Maintien boost
10 % Phase 2 : Chambre B franchit le joint (t=2 à 3s)
11 idx = t>=2.0 & t<2.5; PB(idx) = 40 - 35*(t(idx)-2.0)/0.5;
12 idx = t>=2.5 & t<3.0; PB(idx) = 5 + 3*sin(15*(t(idx)-2.5));
13 idx = t>=3.0 & t<4.0; PB(idx) = 5 + 35*(1-exp(-3*(t(idx)-3.0)));
14 % Phase 3 : Chambre A franchit le joint (t=3.5 à 5s)
15 idx = t>=3.5 & t<4.0; PA(idx) = 60 - 55*(t(idx)-3.5)/0.5;
16 idx = t>=4.0 & t<4.5; PA(idx) = 5 + 3*sin(20*(t(idx)-4.0));
17 idx = t>=4.5 & t<5.5; PA(idx) = 5 + 35*(1-exp(-4*(t(idx)-4.5)));
18 idx = t>=5.5; PA(idx) = 40 + 2*exp(-2*(t(idx)-5.5));
19 figure; plot(t,PA,'b','LineWidth',2); hold on;
20 plot(t,PB,'r','LineWidth',2);
21 yline(P_crit,'r--','P_{crit}','LineWidth',1.5);
22 xlabel('Temps (s)'); ylabel('Pression (kPa)');
23 legend('Chambre A','Chambre B'); grid on;
```