

Conception d'un robot sauveteur-déblayeur

Amélioration des méthodes de recherche et de secours de
victimes dans un environnement accidenté

Armand WAYOFF



Introduction

Quelques statistiques



Immeuble effondré à Bordeaux en juin 2021

Introduction

Quelques statistiques



Immeuble effondré à Bordeaux en juin 2021

Entre 2001 et 2015¹ :

- ▶ **38 836** personnes ont **perdu la vie** suite à l'effondrement de diverses structures (bâtiments, ponts, ...)

1. National Crime Records Bureau (agence gouvernementale indienne)

Introduction

Quelques statistiques



Immeuble effondré à Bordeaux en juin 2021

Entre 2001 et 2015¹ :

- ▶ **38 836** personnes ont **perdu la vie** suite à l'effondrement de diverses structures (bâtiments, ponts, ...)
- ▶ **2 500** incidents liés à l'effondrement de structures en moyenne par an

1. National Crime Records Bureau (agence gouvernementale indienne) ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ ↺ ↻

Les immeubles effondrés sont ...

Les immeubles effondrés sont ...

- ▶ ...des environnements
extrêmement complexes

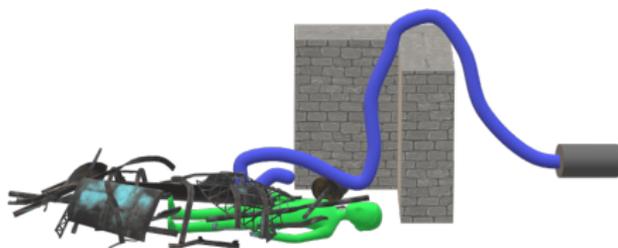
Les immeubles effondrés sont ...

- ▶ ...des environnements **extrêmement complexes**
- ▶ ...quasi **impénétrables**



Objectif du TIPE

Concevoir un robot capable de **s'infiltrer dans les décombres**



Plan

- 1 Conception du robot
- 2 Expériences
- 3 Modélisation de l'extension apicale
- 4 Conclusion
- 5 Annexes

Plan

- 1 Conception du robot
- 2 Expériences
- 3 Modélisation de l'extension apicale
- 4 Conclusion
- 5 Annexes

Principe de fonctionnement du robot²

Bio-inspiration : systèmes à extension apicale

Principe de fonctionnement du robot²

Bio-inspiration : systèmes à extension apicale

L'organisme **pousse** depuis son extrémité.

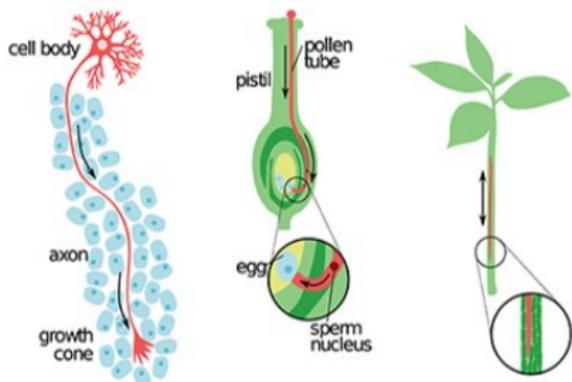
Principe de fonctionnement du robot²

Bio-inspiration : systèmes à extension apicale

L'organisme **pousse** depuis son extrémité.

Les systèmes à **extension apicale** ...

- ▶ ...sont une **alternative** aux formes de mouvement des robots traditionnels
- ▶ ...peuvent **se déplacer efficacement** dans certains environnements qui empêchent la locomotion traditionnelle.



Neurone :
connexion pour
les signaux

Tube pollinique :
conduit pour
la livraison

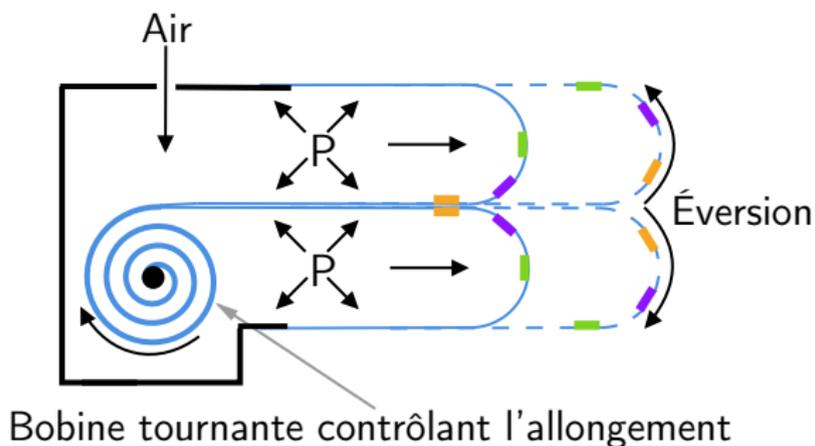
Cellule sclérenchyme :
support de la
croissance verticale

Exemples de systèmes à extension apicale rencontrés dans la nature

Principe de fonctionnement du robot

Principe de fonctionnement du robot

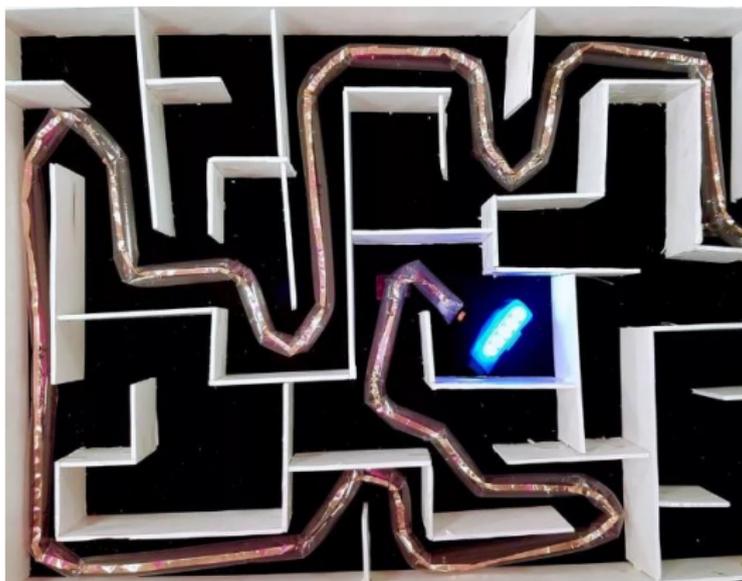
L'extension apicale artificielle a été réalisée à l'aide d'un **flux continu de plastique flexible** à paroi fine, qui est retourné à l'extrémité par une **pression interne**.



Démonstration du potentiel d'un robot à extension apicale

Démonstration du potentiel d'un robot à extension apicale

Le robot est **mou** et ses propriétés mécaniques lui permettent de s'adapter à son environnement.



Propriétés essentielles du robot

Propriétés essentielles du robot

- ▶ Très grande **adaptabilité** à son environnement

Propriétés essentielles du robot

- ▶ Très grande **adaptabilité** à son environnement
- ▶ Longueur théoriquement **infinie**

Propriétés essentielles du robot

- ▶ Très grande **adaptabilité** à son environnement
- ▶ Longueur théoriquement **infinie**
- ▶ La base du robot est fixe et c'est le tube qui **se propage** dans la structure

Propriétés essentielles du robot

- ▶ Très grande **adaptabilité** à son environnement
- ▶ Longueur théoriquement **infinie**
- ▶ La base du robot est fixe et c'est le tube qui **se propage** dans la structure
- ▶ Prix de la matière première **très abordable**

Fabrication

Caractéristiques

Fabrication

Ajout du tube d'extrusion

Fabrication

Bouton d'allumage & Presse-étoupes

Fabrication

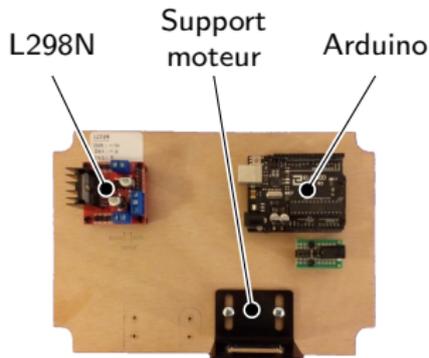
Raccord cannelé pour connecter le compresseur à la boîte

Fabrication

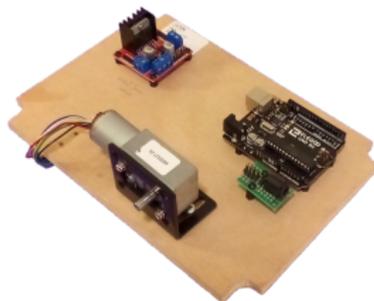
Découpe d'un plateau pour placer les composants

Fabrication

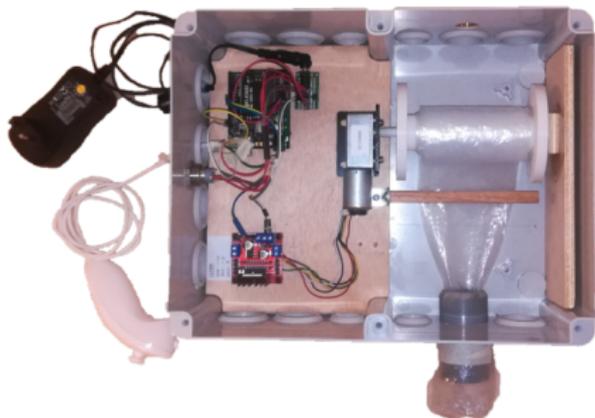
Découpe d'un plateau pour placer les composants



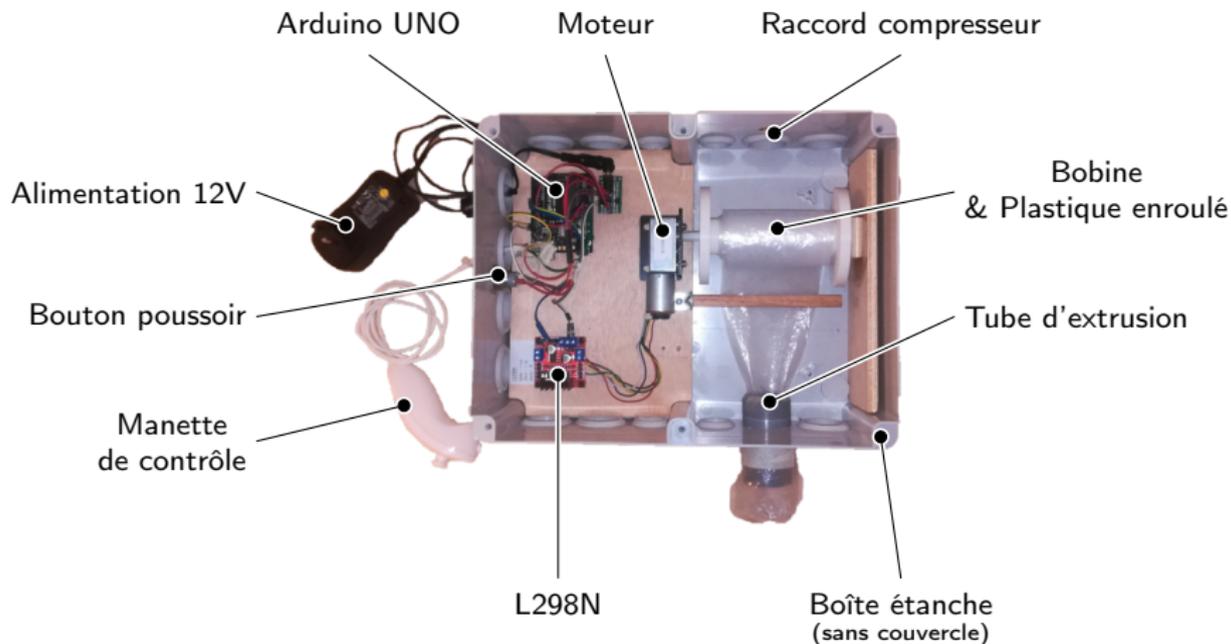
Découpe des coins à la scie sauteuse de manière à ce que le plateau s'adapte à la forme de la boîte.



Résultat



Résultat



Cahier des charges

Cahier des charges

- ▶ **Contrôler le flux d'air** alimentant le robot

Cahier des charges

- ▶ **Contrôler le flux d'air** alimentant le robot
- ▶ **Pouvoir arrêter** l'extrusion du robot à tout moment

Cahier des charges

- ▶ **Contrôler le flux d'air** alimentant le robot
- ▶ **Pouvoir arrêter** l'extrusion du robot à tout moment

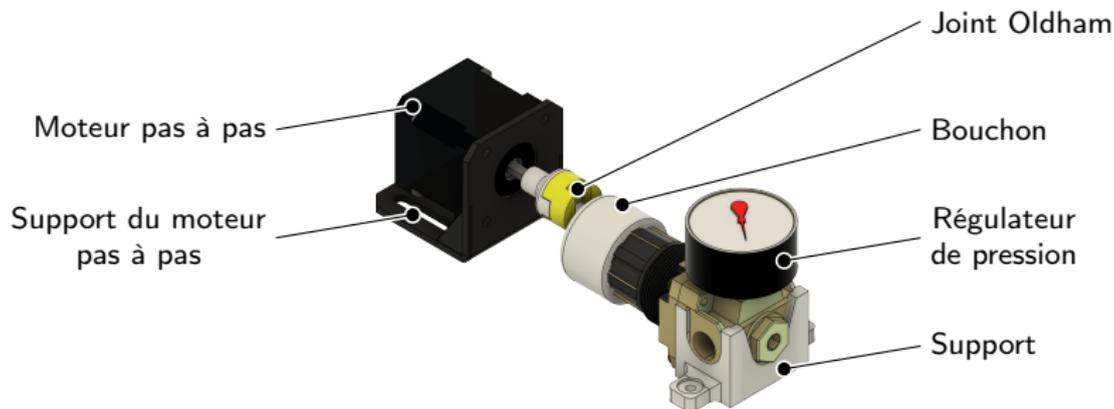
Le robot n'est **pas guidé**. L'idée est de le laisser trouver son propre chemin.

Contrôle du flux d'air alimentant le robot

Système de contrôle du régulateur de pression

Contrôle du flux d'air alimentant le robot

Système de contrôle du régulateur de pression



Les pièces blanches ont été modélisées sur Fusion 360 puis **imprimées en 3D**.

Système permettant l'arrêt de l'extrusion

Électrovannes en parallèle

Système permettant l'arrêt de l'extrusion

Électrovannes en parallèle

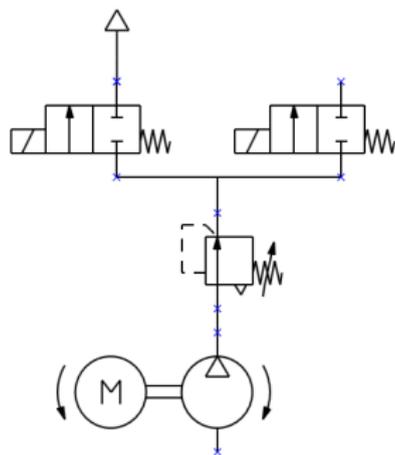
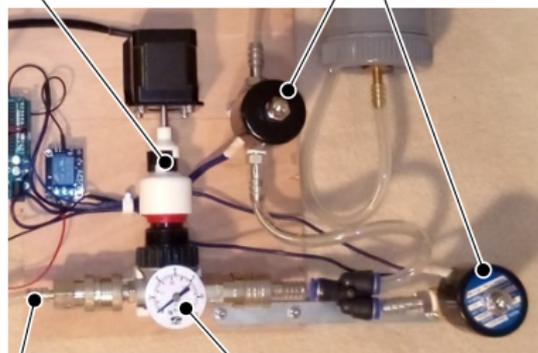


Schéma pneumatique

Joint Oldham

Électrovannes



Entrée d'air

Régulateur de pression

Inconvénients de ce premier robot

Ce robot a été un **échec** ...

Inconvénients de ce premier robot

Ce robot a été un échec ...

- ▶ **Mauvaise herméticité** de la chambre comprimée

Inconvénients de ce premier robot

Ce robot a été un échec ...

- ▶ **Mauvaise herméticité** de la chambre comprimée
- ▶ Mécanisme **trop complexe** et donc difficile à réparer

⇒ Conception d'un nouveau robot.

⇒ **Conception d'un nouveau robot.**

Ce robot doit ...

- ▶ ...résoudre les problèmes du premier robot

⇒ **Conception d'un nouveau robot.**

Ce robot doit ...

- ▶ ...résoudre les problèmes du premier robot
- ▶ ...**permettre le passage d'un câble en son centre** comme

⇒ Conception d'un nouveau robot.

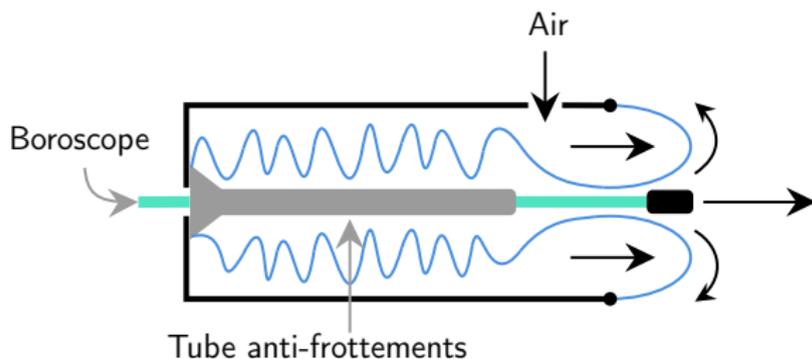
Ce robot doit ...

- ▶ ...résoudre les problèmes du premier robot
- ▶ ...**permettre le passage d'un câble en son centre** comme
 - ★ une **caméra** pour investiguer les décombres
 - ★ un tuyau pour apporter de l'**eau** et de l'**air** aux victimes
 - ★ un système pour **localiser** les victimes

Nouveau robot

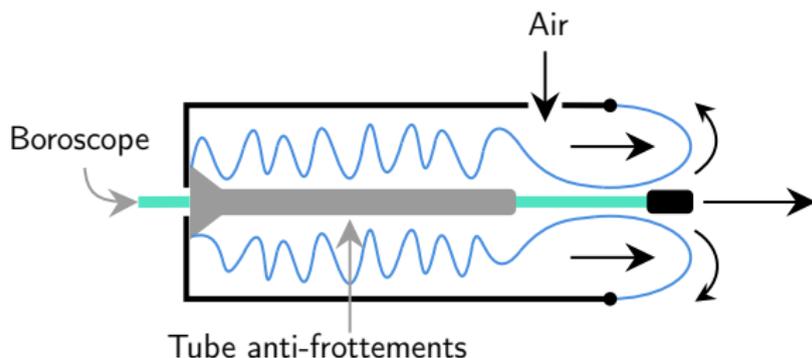
Nouveau robot

Le plastique n'est plus emmagasiné sur une bobine mais l'est «en accordéon» autour d'un tube.



Nouveau robot

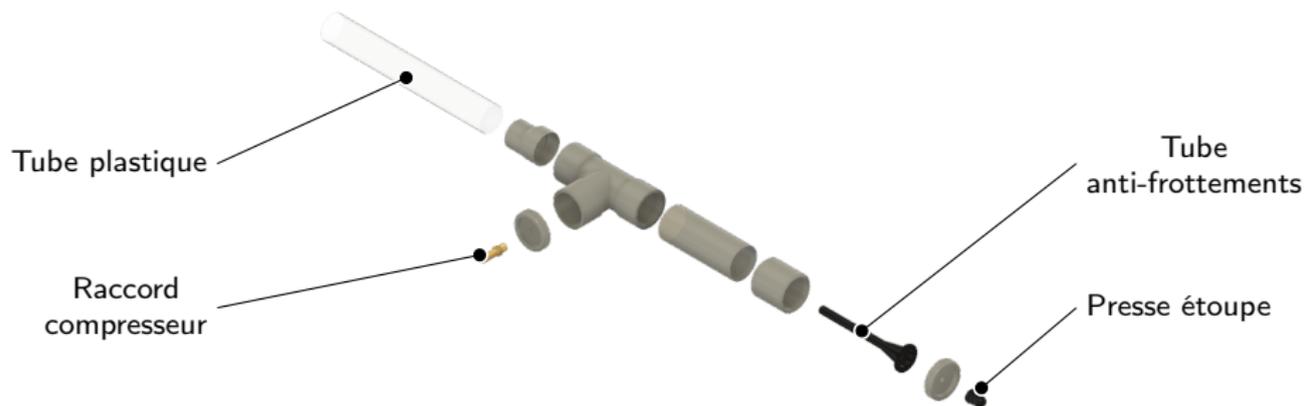
Le plastique n'est plus emmagasiné sur une bobine mais l'est «en accordéon» autour d'un tube.



Avantages :

- ▶ Réduction considérable de la taille de la **chambre comprimée**
- ▶ Peut emmagasiner une quantité de plastique **très importante**
- ▶ Permet de faire **passer un câble** en son centre

Vue éclatée du deuxième robot



L'ensemble de l'électronique et des autres constituants sont **en dehors de la chambre** hermétique (contrairement au premier robot).

Système de tractage du câble du boroscope

Système de tractage du câble du boroscope

Un boroscope est une caméra d'exploration constituée d'un **tube semi-rigide**.

Système de tractage du câble du boroscope

Un boroscope est une caméra d'exploration constituée d'un **tube semi-rigide**.

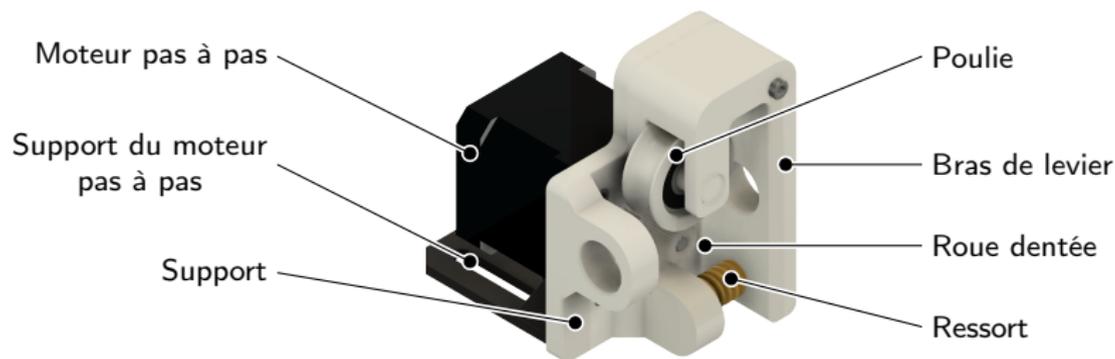
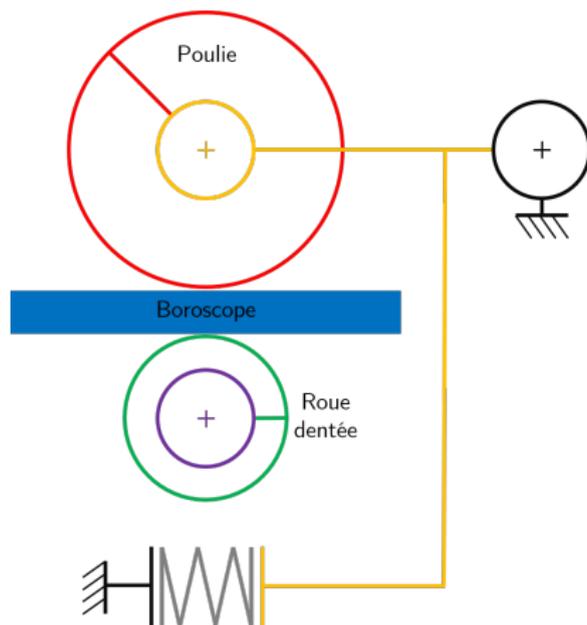
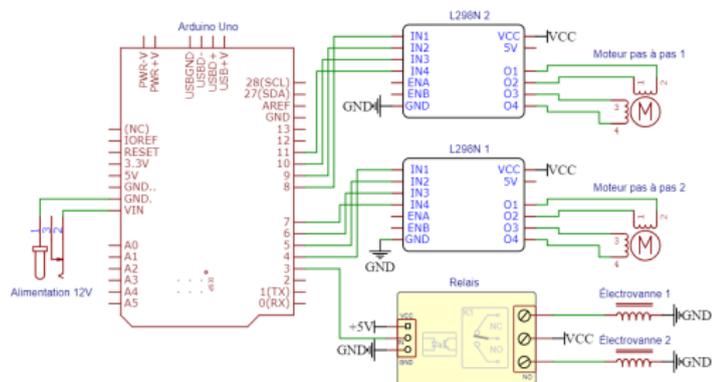


Schéma cinématique du système de tractage du câble



Électronique

- ▶ 1 carte Arduino UNO
- ▶ 2 ponts en H L298N
- ▶ 2 moteurs pas à pas
- ▶ 2 électrovannes
- ▶ 1 relais
- ▶ 1 alimentation 12V



Résultat



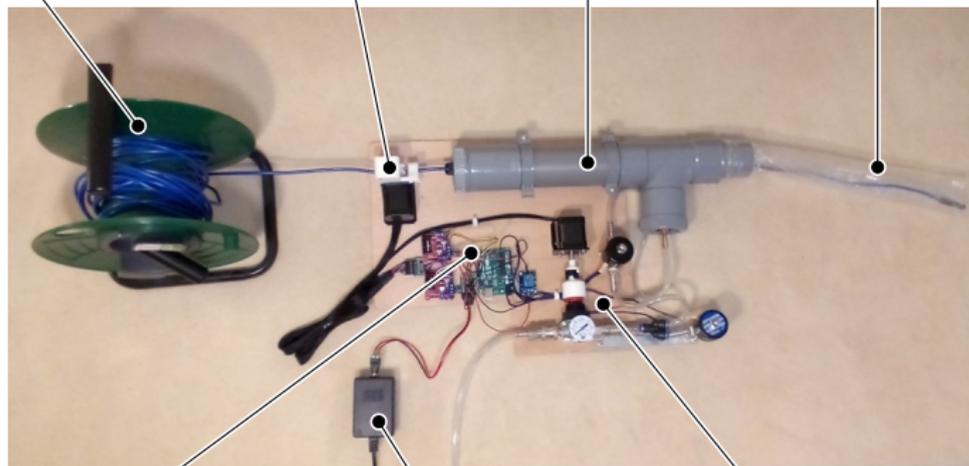
Résultat

Boroscope de 10m
enroulé sur une bobine

Système de
tractage du câble

Chambre
comprimée

Tube plastique
& Boroscope



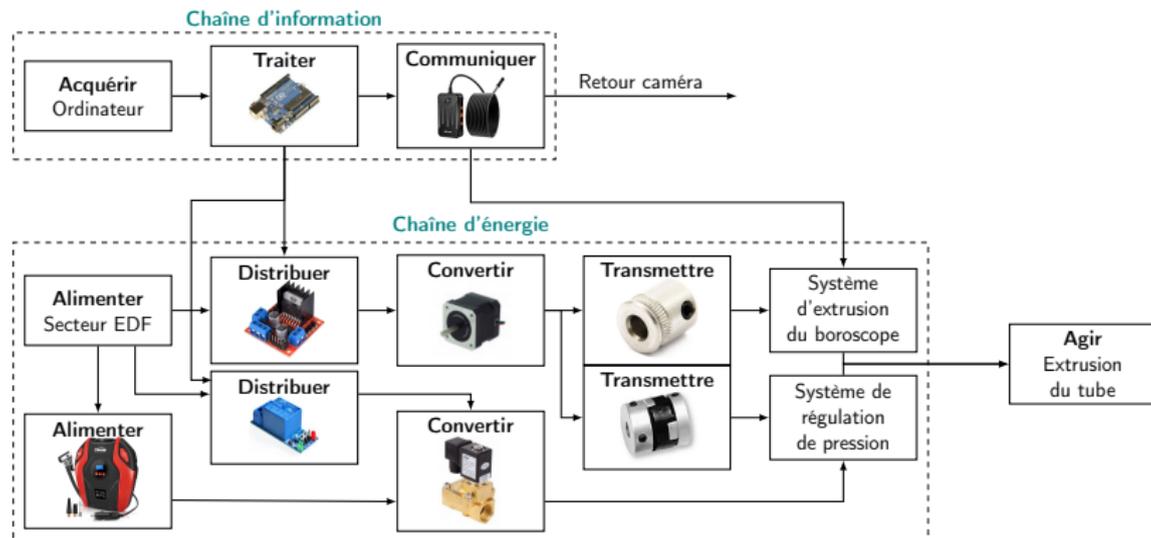
Électronique

Alimentation 12V

Système pneumatique

Chaînes d'information et d'énergie

Chaînes d'information et d'énergie



Plan

- 1 Conception du robot
- 2 Expériences**
- 3 Modélisation de l'extension apicale
- 4 Conclusion
- 5 Annexes

Expériences avec obstacles élémentaires

Expériences en situation réelle (avec le second robot)

Bilan des expériences en situation réelle

Bilan des expériences en situation réelle

Points positifs :

- ▶ Le robot **s'adapte parfaitement** à son environnement

Bilan des expériences en situation réelle

Points positifs :

- ▶ Le robot **s'adapte parfaitement** à son environnement
- ▶ Le nouveau robot **fonctionne** très bien

Bilan des expériences en situation réelle

Points positifs :

- ▶ Le robot **s'adapte parfaitement** à son environnement
- ▶ Le nouveau robot **fonctionne** très bien

Mais après quelques virages, le robot n'avancait plus :

Bilan des expériences en situation réelle

Points positifs :

- ▶ Le robot **s'adapte parfaitement** à son environnement
- ▶ Le nouveau robot **fonctionne** très bien

Mais après quelques virages, le robot **n'avancait plus** :

- ▶ **Perte de pression** le long du tube

Bilan des expériences en situation réelle

Points positifs :

- ▶ Le robot **s'adapte parfaitement** à son environnement
- ▶ Le nouveau robot **fonctionne** très bien

Mais après quelques virages, le robot **n'avancait plus** :

- ▶ **Perte de pression** le long du tube
- ▶ Puissance du compresseur **insuffisante**

Plan

- 1 Conception du robot
- 2 Expériences
- 3 Modélisation de l'extension apicale**
- 4 Conclusion
- 5 Annexes

Modélisation de l'extension apicale

Modélisation de l'extension apicale

⇒ **Élaboration d'un modèle³** :

Modélisation de l'extension apicale

⇒ **Élaboration d'un modèle**³ :

- ▶ Description et prévision des capacités du système

Modélisation de l'extension apicale

⇒ **Élaboration d'un modèle**³ :

- ▶ Description et prévision des capacités du système
- ▶ Prise en compte des facteurs indépendants de la trajectoire

Modélisation de l'extension apicale

⇒ **Élaboration d'un modèle**³ :

- ▶ Description et prévision des capacités du système
- ▶ Prise en compte des facteurs indépendants de la trajectoire
- ▶ Prise en compte des variations géométriques du tube

Plan

- 1 Conception du robot
- 2 Expériences
- 3 Modélisation de l'extension apicale
- 4 Conclusion**
- 5 Annexes

Conclusion

Conclusion

1. Fabrication d'un premier robot :

- ▶ Meilleure compréhension du principe de fonctionnement

Conclusion

1. Fabrication d'un premier robot :

- ▶ Meilleure compréhension du principe de fonctionnement
- ▶ Mais a été un échec (herméticité, mécanisme)

Conclusion

1. **Fabrication d'un premier robot :**
 - ▶ Meilleure compréhension du principe de fonctionnement
 - ▶ Mais a été un échec (herméticité, mécanisme)
2. **Conception et fabrication d'un second robot**

Conclusion

- 1. Fabrication d'un premier robot :**
 - ▶ Meilleure compréhension du principe de fonctionnement
 - ▶ Mais a été un échec (herméticité, mécanisme)
- 2. Conception et fabrication d'un second robot**
 - ▶ Ce robot fonctionne très bien

Conclusion

1. Fabrication d'un premier robot :

- ▶ Meilleure compréhension du principe de fonctionnement
- ▶ Mais a été un échec (herméticité, mécanisme)

2. Conception et fabrication d'un second robot

- ▶ Ce robot fonctionne très bien
- ▶ Permet le passage d'un câble en son centre \Rightarrow recherche et sauvetage des victimes.

Conclusion

1. Fabrication d'un premier robot :

- ▶ Meilleure compréhension du principe de fonctionnement
- ▶ Mais a été un échec (herméticité, mécanisme)

2. Conception et fabrication d'un second robot

- ▶ Ce robot fonctionne très bien
- ▶ Permet le passage d'un câble en son centre \Rightarrow recherche et sauvetage des victimes.
- ▶ Les expériences ont été très concluantes

Conclusion

- 1. Fabrication d'un premier robot :**
 - ▶ Meilleure compréhension du principe de fonctionnement
 - ▶ Mais a été un échec (herméticité, mécanisme)
- 2. Conception et fabrication d'un second robot**
 - ▶ Ce robot fonctionne très bien
 - ▶ Permet le passage d'un câble en son centre \Rightarrow recherche et sauvetage des victimes.
 - ▶ Les expériences ont été très concluantes
- 3. Étude d'un modèle comportemental du robot (non présenté en détail)**

Conclusion

1. **Fabrication d'un premier robot :**
 - ▶ Meilleure compréhension du principe de fonctionnement
 - ▶ Mais a été un échec (herméticité, mécanisme)
2. **Conception et fabrication d'un second robot**
 - ▶ Ce robot fonctionne très bien
 - ▶ Permet le passage d'un câble en son centre \Rightarrow recherche et sauvetage des victimes.
 - ▶ Les expériences ont été très concluantes
3. **Étude d'un modèle comportemental du robot** (non présenté en détail)

Ce TIPE a mené à la conception d'un robot **performant**,
répondant aux cahier des charges.

Merci pour votre attention

Plan

- 1 Conception du robot
- 2 Expériences
- 3 Modélisation de l'extension apicale
- 4 Conclusion
- 5 Annexes**

Partie du modèle indépendant du chemin

Équation de Lockhart-Ortega modifiée

$$r = \varphi(P - P_{\text{inf}})^n \quad (1)$$

où :

r : taux d'extension linéaire

φ : extensibilité

P : pression interne

P_{inf} : pression d'écoulement en dessous de laquelle aucune extension ne se produit

n : exposant proche de l'unité

Partie du modèle indépendant du chemin

Expression de la force à l'extrémité du robot

$$F_{\text{extrémité}}^{\text{regu}} = PS =$$

Partie du modèle indépendant du chemin

Expression de la force à l'extrémité du robot

$$F_{\text{extrémité}}^{\text{regu}} = PS = \underbrace{P_{\text{inf}}}_{\text{force limite d'écoulement}} S$$

Partie du modèle indépendant du chemin

Expression de la force à l'extrémité du robot

$$F_{\text{extrémité}}^{\text{regu}} = PS = \underbrace{P_{\text{inf}}S}_{\substack{\text{force limite} \\ \text{d'écoulement}}} + \underbrace{\left(\frac{v}{\varphi}\right)^{1/n}}_{\substack{\text{terme dépendant} \\ \text{de la vitesse}}} \cdot S \quad (2)$$

où :

S : surface transversale

v : vitesse de l'extrémité (remplace r dans (1))

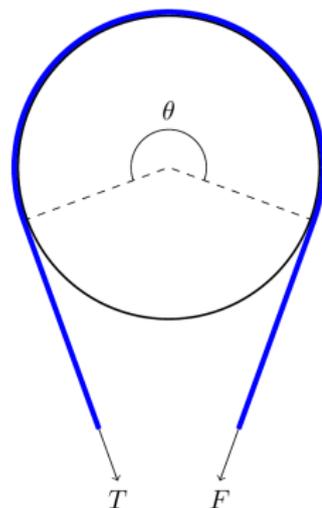
Pertes de charge singulières

Partie du modèle dépendant du chemin

Équation du cabestan modifiée

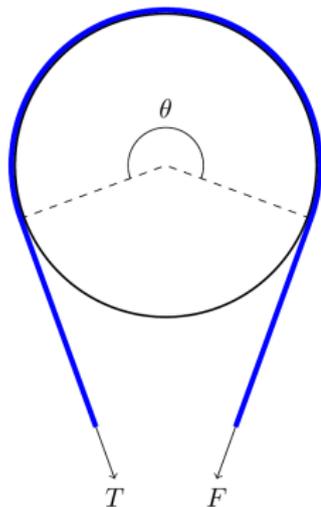
Partie du modèle dépendant du chemin

Équation du cabestan modifiée



Partie du modèle dépendant du chemin

Équation du cabestan modifiée



$$T = Fe^{\mu\theta}$$

$$\downarrow$$

$$T = Fe^{\mu \frac{L}{R}}$$

où :

 T : tension de sortie F : tension d'entrée μ : coefficient de frottement L : longueur de la trajectoire R : rayon de courbure de la trajectoire

Partie du modèle dépendant du chemin

Ajout de forces de frottement dues au maintien du matériau compacté

$$F_{\text{extrémité}}^{\text{singul}} = PS = \underbrace{\mu_s w L}_{\text{facteur de courbure}} + \underbrace{C e^{\mu_c L/R}}_{\text{facteur de force normale dépendant de la longueur}} \quad (3)$$

où :

P : pression nécessaire à l'extrusion

S : surface transversale

μ_s : coefficient de frottement dépendant de la longueur

w : force normale exercée par unité de longueur

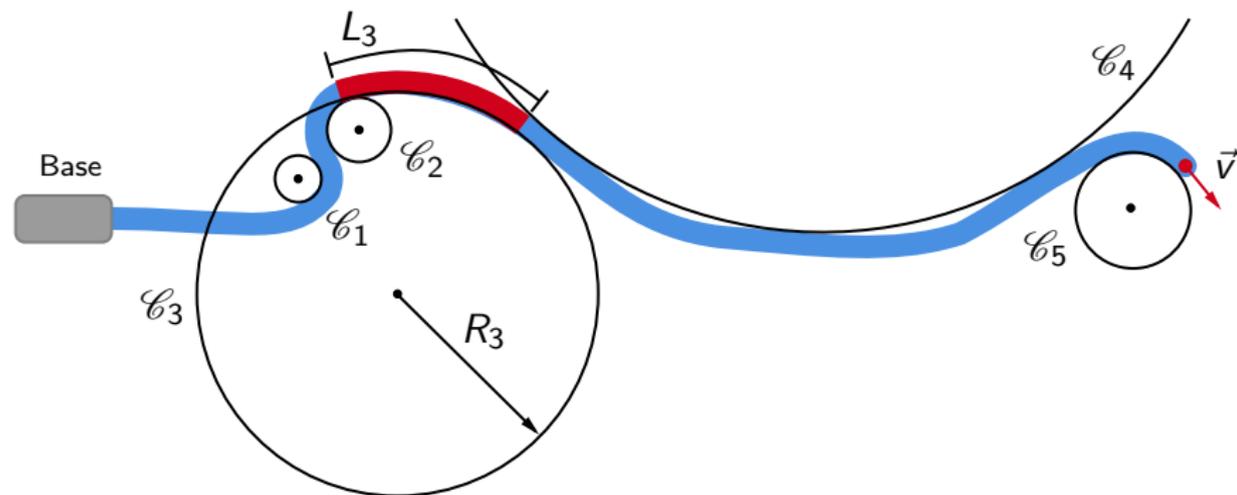
L : longueur de la trajectoire du robot mou

C : coefficient basé sur l'ajustement exponentiel

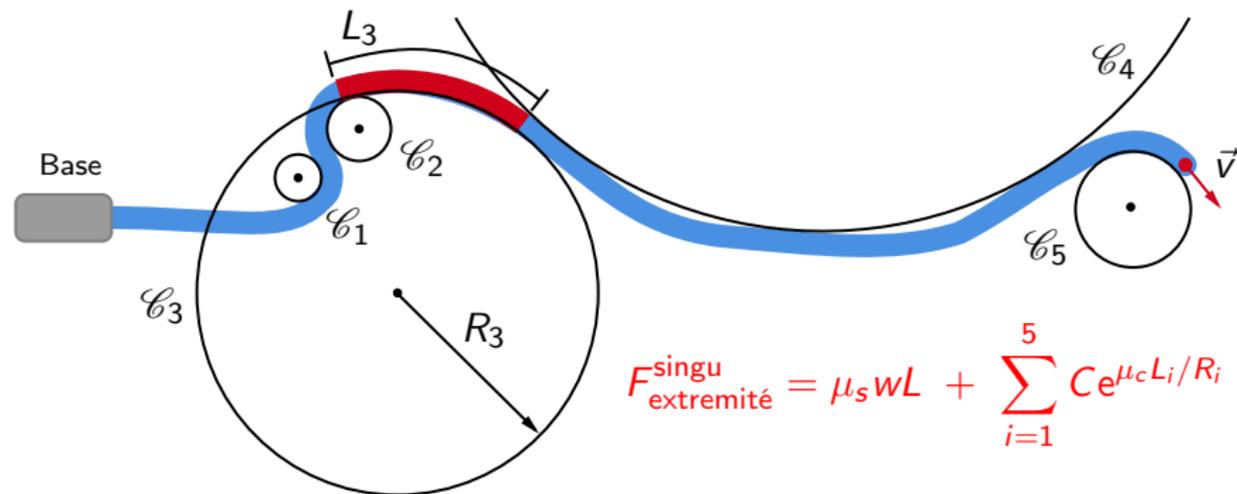
μ_c : coefficient de frottement dû à la courbure

R : rayon de courbure

Approximation de la forme globale du tube par des cercles



Approximation de la forme globale du tube par des cercles



$$F_{\text{extrémité}}^{\text{singu}} = \mu_s w L + \sum_{i=1}^5 C e^{\mu_c L_i / R_i}$$

Modèle final

$$F_{\text{extrémité}} = [\text{Indépendant du Chemin}] + [\text{Dépendant du Chemin}]$$

Modèle final

$$F_{\text{extrémité}} = [\text{Indépendant du Chemin}] + [\text{Dépendant du Chemin}]$$

$$F_{\text{extrémité}} = \left[P_{\text{inf}} S + \left(\frac{v}{\varphi} \right)^{1/n} \cdot S \right] + \left[\mu_s w L + \sum_i C e^{\mu_c L_i / R_i} \right]$$

Code Arduino du premier robot

```
1  #include <Wire.h>
2  #include <Wiichuck.h>
3
4  #define enA 10
5  #define in1 9
6  #define in2 8
7
8  Wiichuck wii;
9
10 int sens_rot = 0;
11 int etat_actuel;
12 int etat_precedent = 0;
13 int dt = 20;
14
15 void setup()
16 {
17   Serial.begin(9600);
18
19   wii.init();
20   wii.calibrate();
21
22   pinMode(enA, OUTPUT);
23   pinMode(in1, OUTPUT);
24   pinMode(in2, OUTPUT);
25   // Sens de rotation initial
26   digitalWrite(in1, LOW);
27   digitalWrite(in2, HIGH);
28 }
```

Code Arduino du premier robot

```
1 void loop()
2 {
3   if (wii.poll())
4   {
5     int valeur_joystick = wii.joyY();
6     int sortie_pwm = map(valeur_joystick, 0, 1023, 0, 255);
7     analogWrite(enA, sortie_pwm);
8
9     etat_actuel = wii.buttonZ();
10    if (etat_actuel == 1 && etat_precedent == 0)
11    {
12      if (sens_rot == 0)
13      {
14        digitalWrite(in1, HIGH);
15        digitalWrite(in2, LOW);
16        sens_rot = 1;
17        delay(dt);
18      }
19      else
20      {
21        digitalWrite(in1, LOW);
22        digitalWrite(in2, HIGH);
23        sens_rot = 0;
24        delay(dt);
25      }
26    }
27    etat_precedent = etat_actuel;
28  }
29 }
```