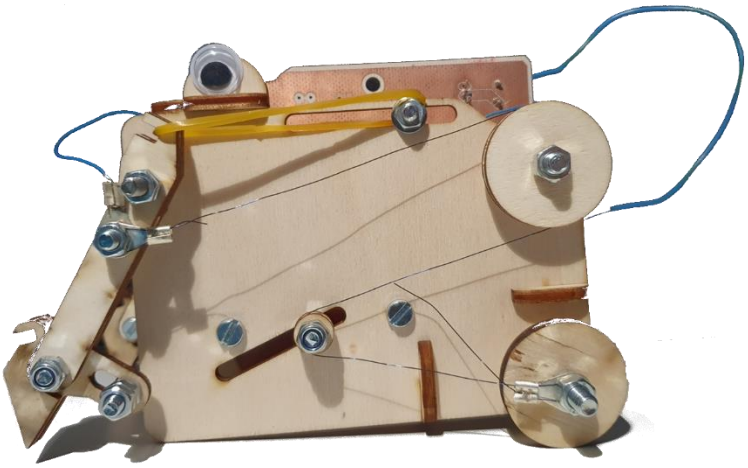
Rapport de

PROJET INGÉNIEUR



Robot rampant actionné par des câbles en nitinol

Jean Baumann

Systèmes Embarqués

2022

Encadrant :

Xavier Redon

Table des matières

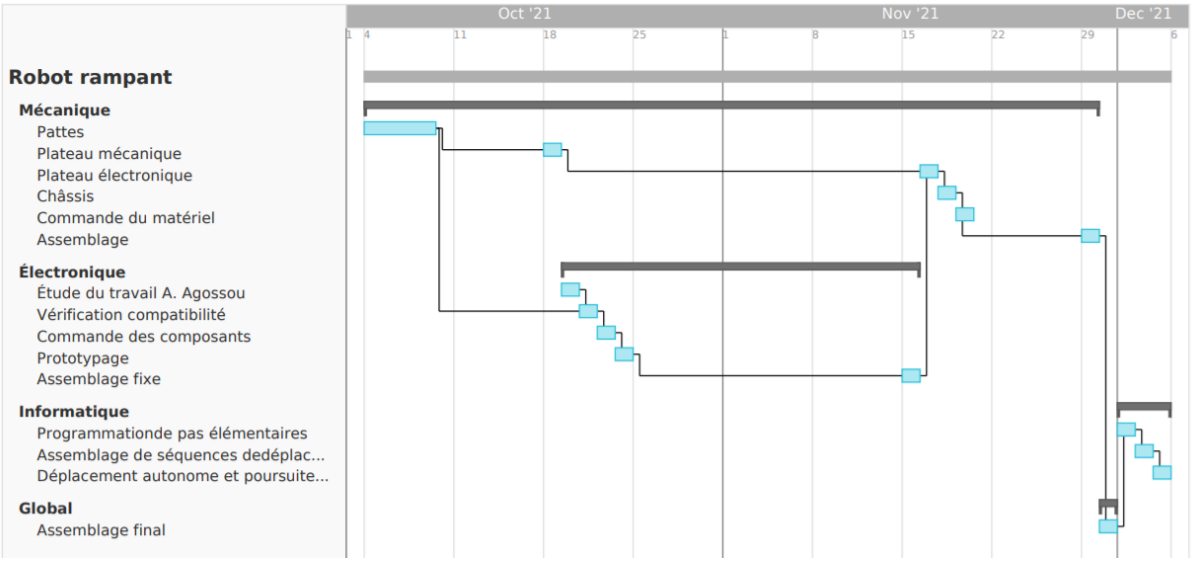
Contexte et objectifs du projet 3
Organisation du travail 3
Structure du projet 4
Partie mécanique 4
Partie électronique 4
Choix techniques 5
Mécaniques 5
Conceptions non retenues 5
Conception retenue 5
Électroniques 5
Architecture 5
Commande des actionneurs 6
Alimentation en puissance 6
Les câbles en nitinol 7
Introduction 7
Utilisation 7
Matériel utilisé 7
Observations faites 7
Résultats 8
Partie mécanique 8
Partie électronique 8
Pistes d'améliorations 9
Conclusion 9
Bibliographie 9
Annexes 11
Problématiques liées à l'usage de câbles en nitinol 11
Conception retenue 11
Schéma du circuit électroniques 12
Placement et routage des composants sur le circuit imprimé 13
Vues du robot 14
Exemplaire unique de chaque pièce 15

Contexte et objectifs du projet

L'objectif de ce projet est d'utiliser des câbles en nitinol, alliage de titane et de nickel à mémoire de forme, pour mouvoir un robot. Cela permet d'appréhender les capacités de tels actionneurs, *i.e.* leurs contraintes, leurs modes de fonctionnement et leurs spécificités.

Organisation du travail

Tout au long du semestre, une semaine sur deux était consacrée au projet, soit un total de huit semaines. Les deux premières furent employées à la rédaction du cahier des charges et du cahier des spécifications, dans lequel se trouve le planning prévisionnel :

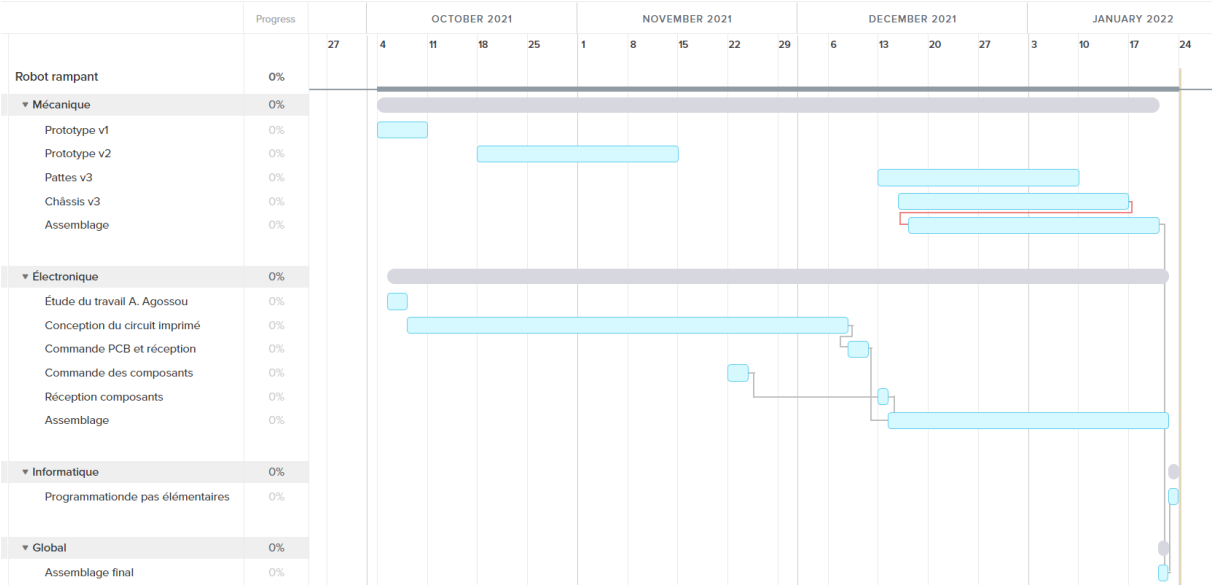


Gantt prévisionnel issu du cahier des spécifications

Optimiste car ne prévoyant qu'un jour par tâche, il a accusé un retard cumulé de presque deux mois. Cela est dû, dans un premier temps, à l'impossibilité d'exploiter le travail préliminaire d'A. Agossou, à des difficultés rencontrées sur Fritzing (prise en main, problèmes de fichiers, problèmes de fichiers Gerber), à un passage à Eagle suites aux trop nombreuses difficultés de Fritzing ; et dans un second temps, à des défauts dans les concepts mécaniques – il aura fallu trois versions complètement différentes. Ce retard a causé l'abandon des sujets suivants :

- Il était prévu que le robot soit alimenté par une batterie, cependant la puissance requise par les câbles est trop forte pour une batterie lithium ion traditionnelle ;
- Il était prévu un système de communication par infrarouge pour interagir avec d'autres robots

Il est cependant possible de continuer le projet pour atteindre ces objectifs.



Gantt réalisé

On peut voir un très long de temps de développement du circuit imprimé. Cela est dû à ma novicité dans le domaine, mais aussi aux embûches que Fritzing glisse çà et là. Je remercie par ailleurs M. Flamen pour ses conseils et ses avertissements quant à l'utilisation de Fritzing. Concernant la partie mécanique, j'ai parfois mis trop de temps à diagnostiquer les défauts et n'ai pas toujours écouter les mises en garde de mon tuteur vis-à-vis de la gigantisation du robot en ce qui concerne le deuxième prototype.

Structure du projet

Ce projet a deux composantes principales : une partie mécanique et une partie électronique

Partie mécanique

D'un point de vue mécanique, le robot est composé des pattes, du châssis et du circuit imprimé.

Les pattes doivent assurer la traction du châssis et le châssis doit soutenir le circuit imprimé, les pattes et être un point d'ancrage des câbles.

Plusieurs itérations du cycle « conception – découpe – assemblage » pour réviser les défauts. Les pièces ont été découpées à la découpeuse LASER du Fabricarium de Polytech Lille.

Partie électronique

Les câbles sont contrôlés par un circuit imprimé. Celui-ci comporte un microcontrôleur, un circuit d'interfaçage USB pour la programmation, des accès aux ports et 6 MOSFETs pour contrôler des périphériques jusqu'à 60W (attention, des dissipateurs pourraient être nécessaires si une telle puissance est demandée). L'alimentation en puissance est séparée de la carte.

Choix techniques

Mécaniques

Conceptions non retenues

Le premier concept mécanique était inspiré du mouvement de rame d'une barque : deux appendices - ou pattes – effectuent un mouvement circulaire. Lorsque l'extrémité touche le sol, le corps est soulevé et propulsé vers l'avant. Ce concept demandait des glissements de pièces les unes contre les autres et donc des roulements à bille, ainsi que des rotules, ce qui aurait beaucoup augmenté la taille du robot.

Le deuxième prévoyait deux jambes composées d'un tibia et d'un fémur. Un servo-moteur permettait de changer le point d'ancrage du câble sur le fémur afin de passer de la marche arrière à la marche avant (et vice-versa). Cependant il fallait transmettre la motorisation du châssis au tibia et cela induisait beaucoup de poulies – cf. Problématiques liées à l'usage de câbles en nitinol (Annexe).

L'achat et l'utilisation de dynamomètres a permis de mieux mesurer et localiser les pertes de forces dans la transmission.

Conception retenue

La conception retenue ne dispose que d'un seul membre actif par côté, complété d'un membre passif qui agit comme une valve : une jambe est prolongée d'un pied capable de se plier dans un sens mais bloqué dans l'autre. Ainsi lorsque l'on tire la jambe avec l'actionneur, elle est d'une longueur $l_{jambe} + l_{pied}$, mais lorsque la jambe revient au repos, elle est d'une longueur l_{jambe}. Le pied, passif, utilise un contrepoids pour revenir en position initiale – cf. Conception retenue (Annexe).

Les plans du robot sont en annexe :

Vues du robot

Exemplaire unique de chaque pièce

Cette simplification résulte de la mise en évidence des problèmes induits par un membre inférieur actif : transmettre un mouvement à un second membre est trop complexe pour les matériaux utilisés. Ça pourrait être envisageable avec des poulies parfaitement ajustées à des axes fixes, le tout monté sur un châssis très rigide.

Électroniques

Architecture

Il existait déjà des fichiers pour réaliser un contrôleur de robot, qui ont servi de base au nouveau circuit. Le circuit de contrôle utilise donc un ATMega328P (ATMEGA168_20PU, n.d.) comme contrôleur, un module d'interfaçage USB/UART [2], et un régulateur de tension

linéaire (LDO) [3]. Comme ces éléments étaient déjà utilisés à Polytech, ils étaient en stock malgré la pénurie.

Commande des actionneurs

Comme il ne faut que faire passer un courant à travers les câbles, il suffit de MOSFETs de puissance contrôlés par MLI (PWM). Les IRF520 sont courant pour une utilisation avec ATMEGA, même si leur plage de tension de seuil est plus petite que celle de la MLI. Il ne reste plus qu'à calculer s'il faut un dissipateur :

Données transistor [4]:

$$R_{ds} = 0{,}20\Omega \qquad R_{\theta JA} = 62K/W \qquad T_{J_{max}} = 175°C$$

Puissance dissipée :

$$P_J = R \cdot I^2 = 0{,}20 \cdot 1 = 0{,}20W$$

Puissance maximale dans le transistor :

$$P_{max} = \frac{T_{J_{max}} - T_{ambient}}{R_{\theta JA}} = \frac{175 - 50}{62} = 2{,}02W$$

Un dissipateur n'est donc pas nécessaire.

Alimentation en puissance

Afin de dimensionner l'alimentation en puissance, il faut calculer la puissance installée :

$$L_{cable-patte} = 30cm \ = \ 0,3m \quad \rho_{cable} = 18{,}5\ \Omega \cdot m^{-1}$$

Soit une résistance totale de :

$$R_{tot} = 2 \cdot \rho_{câble} \cdot L_{câble-patte} = 11{,}1\ \backslash\text{OMega}$$

On peut calculer au passage la somme des tensions :

$$I_{nom} = 1050mA$$
$$U_{tot} = R_{tot} \cdot I_{nom} \ = \ 11{,}655V$$

Soit 5,83V par patte.

Puissance totale :

$$P_{tot} = U_{tot} \ \cdot I_{nom} = 12{,}24\text{W}$$

Avec un courant à 0,65 A (voir plus bas) et une résistance mesurée de totale de $R_{mes-tot} = 13{,}8\Omega$, cette puissance passe à

$$P_{tot_2} = R_{\text{mes-}tot} \cdot I_{\text{reel}}^2 = 5{,}8W$$

Les câbles en nitinol

Introduction

Le nitinol est un alliage de nickel et de titane. Ce métal a la propriété d'être à mémoire de forme (alliage à mémoire de forme, AMF) et permet de fabriquer des câbles qui se rétractent lorsque soumis à une température allant, selon le type de câble, de 70°C à 90°C (resp. basse et haute température). Ainsi, lorsque l'on fait passer un certain courant dans un câble, il chauffe et se rétracte.

Utilisation

Les câbles en nitinol peuvent donc être utilisés comme actionneurs linéaires monodirectionnels : ils ne peuvent fournir de la force qu'en traction et leur position initiale peut être rétablie en utilisant des élastiques ou des ressorts ayant une action opposée au mouvement de traction. La force de réinitialisation est également soustraite à la force de traction ce qui invite à la réduire au maximum.

Ces câbles ne peuvent pas être soudés car la forte chaleur annihile la mémoire. En revanche on peut le nouer ou utiliser n'importe quel moyen de friction : lorsqu'ils se rétractent, les câbles s'épaississent et les prises en friction tiennent davantage [5].

Matériel utilisé

Le tableau suivant récapitule les informations importantes fournies avec le câble :

Données câble	
Diamètre	250µm
Température d'activation	90°C
Résistance linéique	18,5Ω/m
Courant recommandé	1050mA
Force de traction	891g
Déformation	3-5%

C'est en particulier la résistance linéique et le courant nominal qui nous intéressent : ces données nous permettront grâce à la loi d'Ohm de déterminer la tension à appliquer aux extrémités du film (qu'on appellera ultérieurement « bornes »).

Observations faites

Les premières utilisations du nitinol ont été assez décevantes : taux de rétractation très faible, surchauffe malgré le respect des consignes, temps de refroidissement long.

Pour mieux étudier le problème de la rétractation, un banc de test a été réalisé. Une aiguille amplifiant la déformation permet de diminuer l'incertitude. La rétraction mesurée était de 2,5% à 3%, soit en dessous des valeurs annoncées.

- Les problèmes de surchauffe apparaissaient malgré l'utilisation d'une alimentation programmable dont le courant avait été limité à 1A i.e. un peu en dessous des 1,050A recommandés et le temps d'alimentation programmé à 1s comme recommandé [5]. Abaisser le courant à 650mA a permis d'éliminer les problèmes de surchauffe avec un temps de rétraction tout à fait satisfaisant.

Résultats

Partie mécanique

Bien que le principe de ce design semble fonctionner, il reste un peu d'élasticité et de frottements. Ceux-ci viennent de :

- Les axes des liaisons pivots n'ont pas exactement le même diamètre que les perçages. Cela introduit un jeu.
- L'ancrage du câble sur la jambe n'est pas au centre de la jambe et cela induit un moment créant des frottements.

Les pieds patinent sur les surfaces lisses. Comme il est nécessaire que le pied glisse lors de la relaxation, il faudrait patin légèrement rugueux mais pas assez pour empêcher le bon fonctionnement du mécanisme de valve.

Enfin, ce design demande à ce que le câble soit exactement d'une certaine longueur (qu'il faut ajuster grâce aux glissières prévues sur le châssis). Or comme dit dans cet article [6], les actionneurs en AMF dérivent au fil des utilisations. Pour pallier ce problème, il faudrait avoir une plus grande amplitude de mouvement (et donc un plus grand câble).

Partie électronique

Mis à part l'oubli d'une résistance pull up sur la broche de reset de l'ATMega et d'un bouton permettant de déclencher cette même fonction, le circuit n'a pas l'air de présenter d'autres erreurs. Cependant il n'a pas été possible de flasher le microcontrôleur (erreurs lors de la gravure) mais j'ai manqué de temps pour creuser davantage. Il est donc difficile d'aller plus loin dans le diagnostic de la carte.

Les transistors pilotant les actionneurs fonctionnent correctement.

Le circuit imprimé permet également d'ajouter des périphériques au robot.

Par manque de temps, le robot est alimenté sur secteur. Il faudrait chercher du côté de piles au lithium capable de débiter 6W.

Batteries Li-Po : à gauche une puissance maximale de 30W [7]*, à droite 1,36W*[8]

Comme les actionneurs ne fonctionnent que 10% du temps, on peut utiliser des condensateurs pour avoir des pics de puissance bien au-delà de la puissance nominale de la batterie.

Pistes d'améliorations

- Étant donné que le robot ne peut pas tourner, on peut l'allonger à 30cm pour n'avoir aucune poulie et valider le mécanisme des jambes.
- Pour pallier le jeu dans les liaisons pivots, des tiges métalliques pourraient remplacer les vis et des rivets métalliques voir des roulements à bille pourraient être insérés dans les perçages des pièces mobile afin d'assurer une liaison parfaite.
- Pour continuer dans l'idée de valve, une roue à cliquet pourrait être fixée à la place du pied.
- Des traverses reliant les extrémités des vis limiteraient la déformation occasionnée par la contraction des câbles.
- Pour rendre le robot capable de rotation, les pattes devraient être alignées au centre de gravité et une roulette placée en dessous du centre de gravitée permettrait, en actionnant seulement une des pattes, de pivoter le robot sur lui-même.
- Il aurait fallu, sur le PCB, implémenter un dispositif permettant de limiter le courant dans les câbles. En effet, comme les câbles s'épaississent en se rétractant, leur résistance diminue. Il faut donc prévoir une marge.

Conclusion

Au long de ce projet, j'ai pu réaliser un schéma électronique, placer les composants et les router, monter le circuit et apprendre à rectifier une erreur de brasure. J'ai appréhendé les caractéristiques des actionneurs en nitinol.

Pour aller plus loin dans le champ de ces actionneurs, il pourrait être intéressant de réaliser un actionneur linéaire commandable en position.

Bibliographie

1. ATMEGA168_20PU datasheet.

2. FT232R USB UART I.C. datasheet.

3. LM1117 800-mA, Low-Dropout Linear Regulator datasheet (2000). Available at: www.ti.com.

4. IRF520NPbF HEXFET ® Power MOSFET datasheet.

5. F1140rev, J., and Flexinol® NICKEL-TITANIUM ALLOY PHYSICAL PROPERTIES Available at: http://www.dynalloy.com.

6. Daudpoto, J., Memon, A., and Hussain, I. (2012). Actuation Characteristics of 0.15 mm Diameter Flexinol® and Biometal® Wire Actuators for Robotic Applications. Mehran University Research Journal of Engineering & Technology *32*, 147–152.

7. RS Pro Rechargeable Lithium ion iron Phosphate battery (LiFePO 4) ENGLIS.

8. RS Pro3.7V Li-Po Rechargeable Battery, 2000mAh.

Annexes

Problématiques liées à l'usage de câbles en nitinol

CONCEPTION MÉCANIQUE

Problématiques liées à l'usage de câbles en nitinol

Les systèmes câblés requièrent un système très rigide sous peine de beaucoup de pertes en force dans l'élasticité des liaisons:

=> Minimisation du nombre de poulies

La rétractation d'un câble en nitinol est proportionnelle à sa longueur:

=> maximisation de la longueur du câble

Augmenter la longueur du câble sans ajouter de poulie augmente la taille du robot, donc son poids.

JEAN BAUMANN - SYSTÈMES EMBARQUÉS- 2022 10

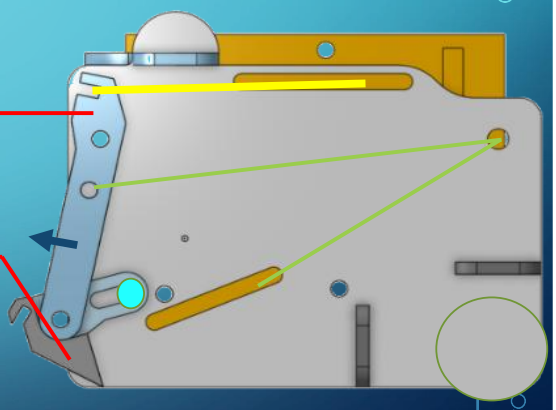
Conception retenue

CONCEPTION MÉCANIQUE

Conception retenue

Une patte par côté, avec un membre actif et un membre passif:

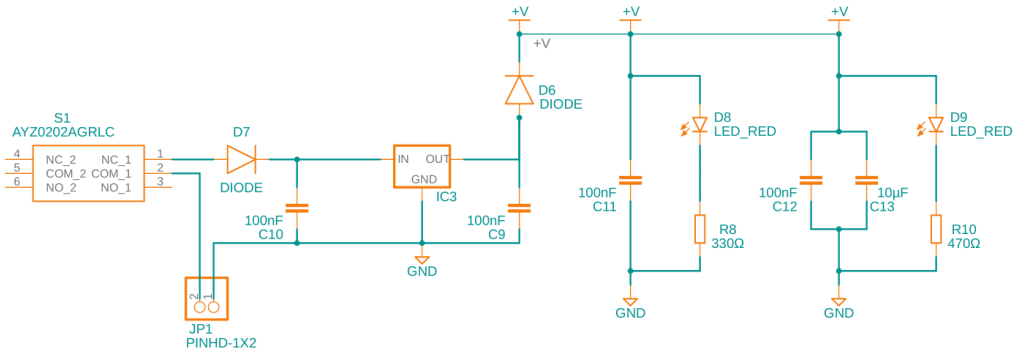
- Le membre supérieur « jambe » est actionné par un câble (en vert). Un élastique (jaune) réinitialise la position de la jambe lorsque le câble est au repos.
- Le membre inférieur « pied » ajoute une longueur à la jambe lorsqu'elle est tractée mais se plie lorsque la jambe revient à la position de départ. Un contrepoids « tend » le pied lorsque la jambe est au repos.



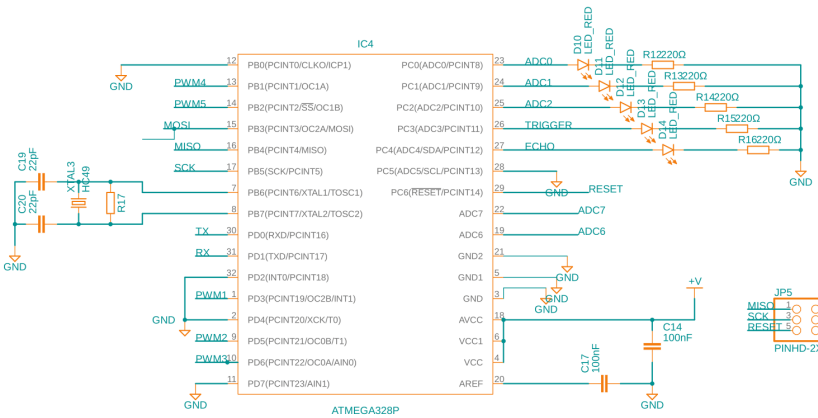
JEAN BAUMANN - SYSTÈMES EMBARQUÉS- 2022 11

Schéma du circuit électroniques

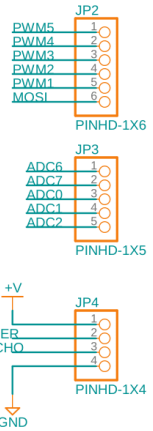
Alimentation



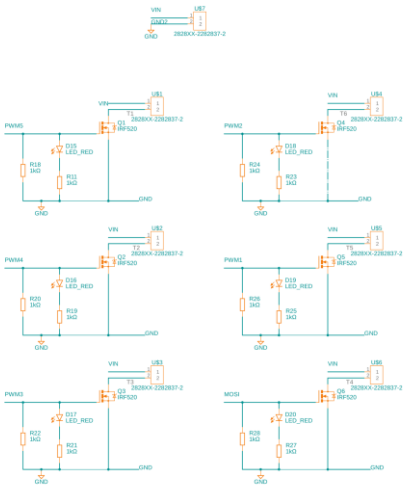
Microcontrôleur



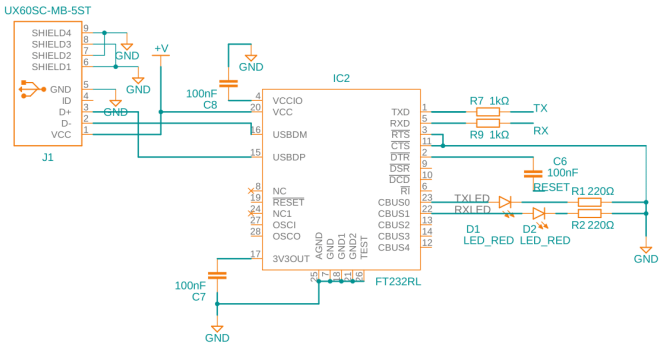
I/O



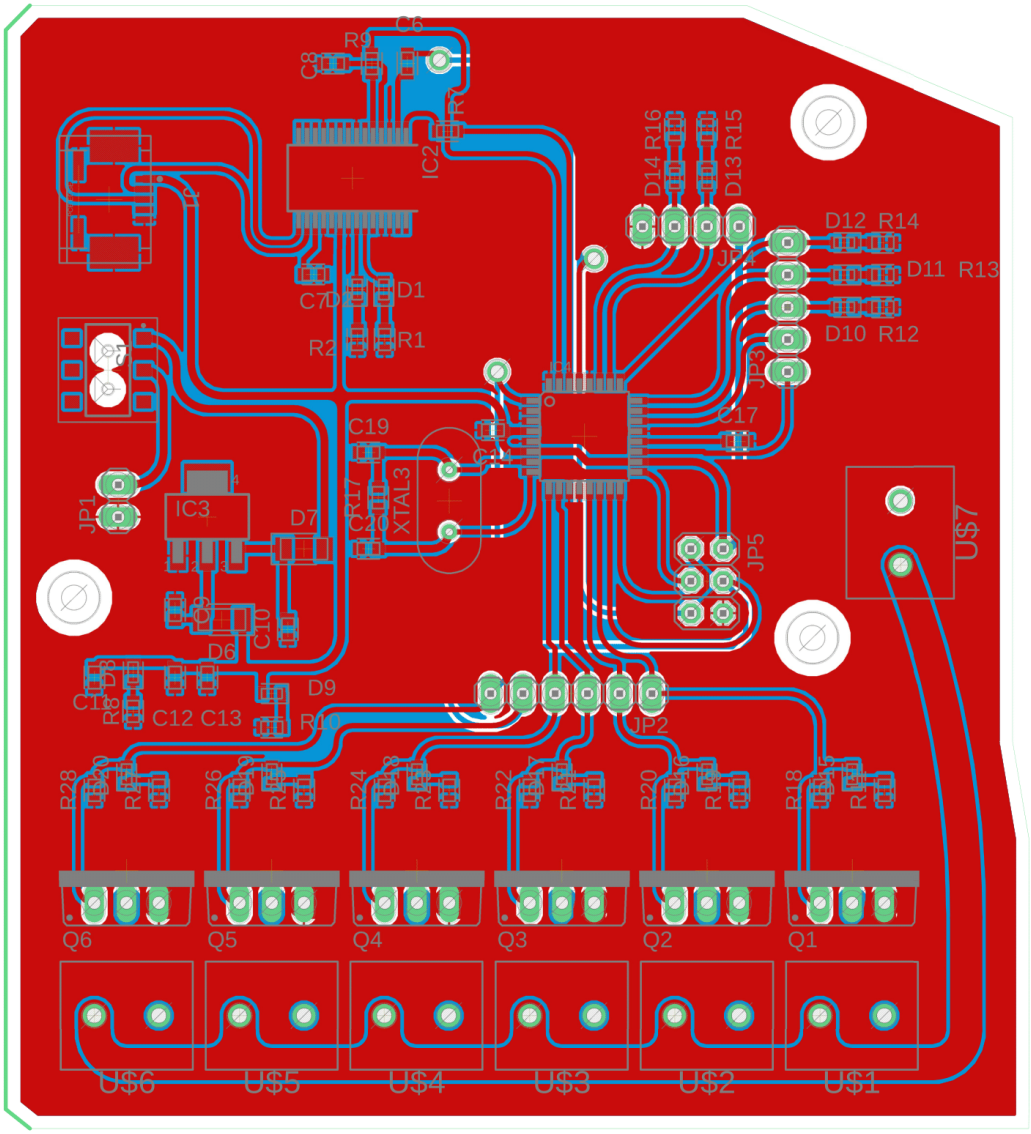
Puissance



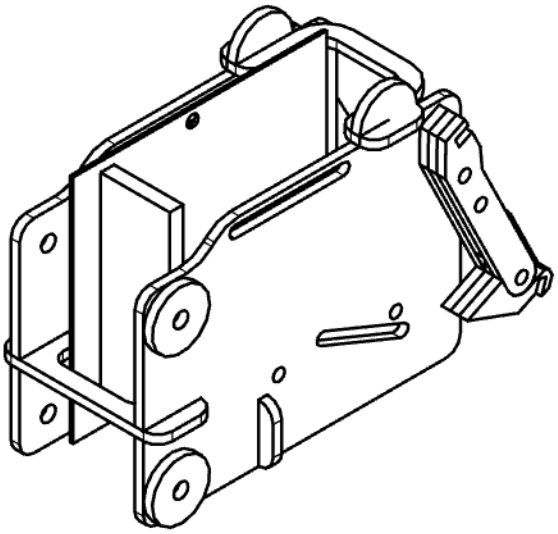
USB/UART

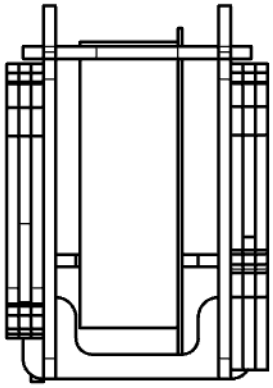


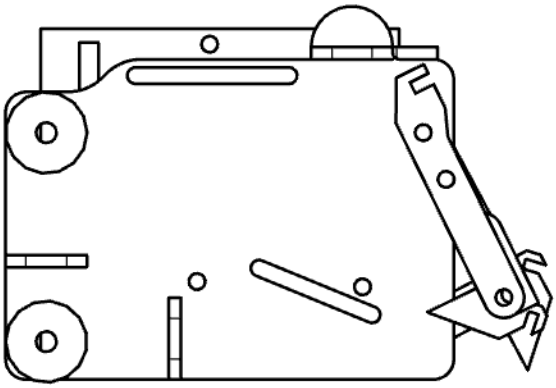
Placement et routage des composants sur le circuit imprimé

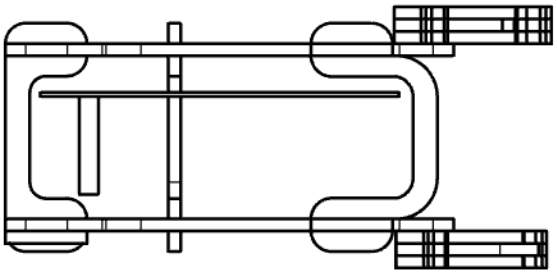
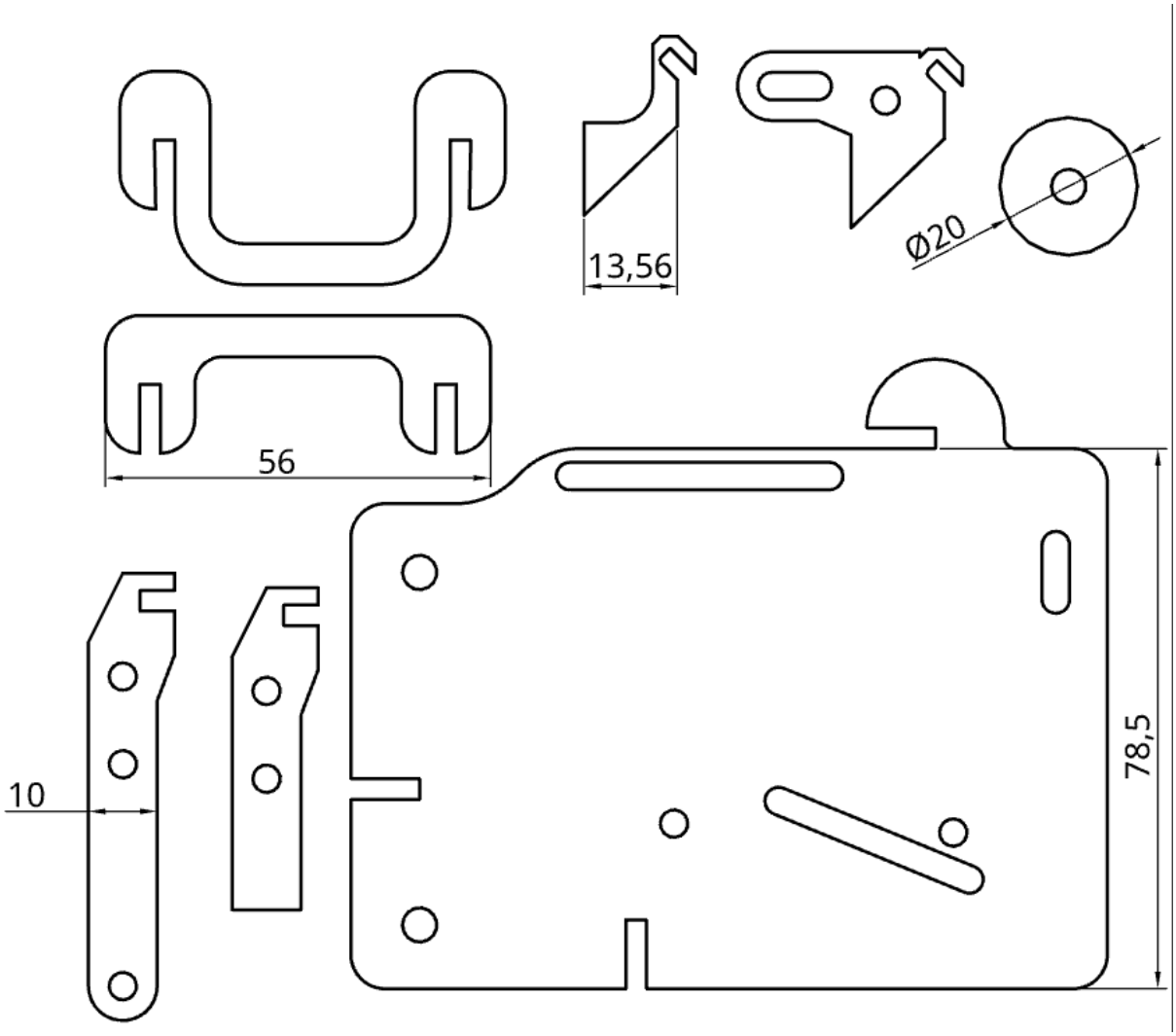


Vues du robot









Exemplaire unique de chaque pièce