

# Rapport de conception détaillée du SySM@p

---

# HYPERION

Préparé pour :

**CEA**

Par :

**HYPERION**

Liste de distribution : **CEA et département PRISM de l'IMT MINES ALES**

CE DOCUMENT A ETE VALIDE ELECTRONIQUEMENT PAR :		
Rédacteurs	Vérificateur	Approbateur
JULES ZIMMERMANN ANTOINE CIMMINO MATHYS DERRIEN THOMAS PEACE JULES FAUCHER MATHIS DAMINA ROMAIN CHAILLOU JEREMY THOMAT LUEZHI SUN JEAN-BAPTISTE PODLECKI MATHIS BERTIER LOUIS BRULE	JULES ZIMMERMANN	ANTOINE CIMMINO

AVIS CLIENT	
Nom :	<input type="checkbox"/> VAO (Vu Avec Observation) le ...../...../.....
Signature :	<input type="checkbox"/> VSO (Vu Sans Observation) le ...../...../.....



## Table des matières

<b>1</b>	<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>DOCUMENTS APPLICABLES ET DE REFERENCES .....</b>	<b>5</b>
1.1	Documents de référence propres à l'affaire .....	5
1.2	Documents applicables .....	5
<b>2</b>	<b>TERMINOLOGIE.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>PRESENTATION D'HYPERION .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>PRESENTATION DU PROJET.....</b>	<b>7</b>
4.1	Historique .....	7
4.2	Le rapport de conception .....	7
4.3	Finalité, mission et objectifs du système .....	7
<b>5</b>	<b>METHODOLOGIE DE VALIDATION.....</b>	<b>8</b>
5.1	Description des attendus .....	8
5.2	Rappel du référentiel des exigences .....	8
5.3	Méthodologie .....	8
<b>6</b>	<b>CONCEPTION DETAILLEE .....</b>	<b>9</b>
6.1	Architecture globale du système .....	9
6.2	Intégration aux bases mobiles.....	10
6.3	Bras SCARA .....	11
6.3.1	<i>Plaque de fixation.....</i>	11
6.3.2	<i>Base .....</i>	12
6.3.3	<i>Epaule .....</i>	14
6.3.4	<i>Coude .....</i>	16
6.3.5	<i>Poignet.....</i>	17
6.3.6	<i>Effecteur : Pince 3 doigts.....</i>	19
6.4	Les systèmes de prélèvements .....	20
6.4.1	<i>Prélèvement Solide .....</i>	20
6.4.2	<i>Prélèvement Liquide .....</i>	21
6.4.3	<i>Prélèvement Poussière.....</i>	24
6.4.4	<i>Prélèvement Frottis.....</i>	27
6.4.5	<i>Plaques d'interfaçage boîte électrique .....</i>	30
6.4.6	<i>Stockages .....</i>	30
6.4.7	<i>Aileron.....</i>	35
6.4.8	<i>Réalisation des plans et du prototype.....</i>	36
6.5	Architecture électronique .....	37
6.5.1	<i>Raspberry Pi .....</i>	38
6.5.2	<i>Puissance requise.....</i>	38
6.5.3	<i>Carte de puissance.....</i>	41
6.5.4	<i>Moteur pas à pas.....</i>	42
6.5.5	<i>Contrôle moteur .....</i>	42
6.5.6	<i>Pont en H et leurs moteurs.....</i>	45
6.5.7	<i>Implantation boîte électronique .....</i>	46
6.6	Architecture informatique.....	47
6.6.1	<i>Architecture globale .....</i>	48
6.6.2	<i>Contrôle uStepper.....</i>	48
6.6.3	<i>Diagrammes logiques .....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<b>7</b>	<b>ACTIVITES DE VALIDATION .....</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>DOCUMENTS ANNEXES.....</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>57</b>

Figure 1: Organigramme HYPERION .....	6
Figure 2 : Vue du dessus et de côté de l'ensemble des systèmes .....	9
Figure 3 : Représentation du SySM@p sur la base mobile RICA+ .....	10
Figure 4 Exemple de bras type SCARA .....	11
Figure 5 Représentation 3D de la base .....	13
Figure 6 Représentation de l'ensemble base + épaule .....	13
Figure 7 Mise en avant de la flèche du bras 1ère version .....	15
Figure 8 Avant/après épaule .....	15
Figure 9 Modélisation de la flèche RDM7 .....	16
Figure 10 Vue éclatée du coude .....	16
Figure 11 Représentation 3D du coude .....	17
Figure 12 Représentation 3D du poignet .....	17
Figure 13 : Position vérin rentré et déployé .....	18
Figure 14 Photo de l'effecteur .....	19
Figure 15 Modélisation des déformations de la pince .....	20
Figure 16 Photos de la pince .....	20
Figure 17 : Principe de fonctionnement d'une pompe péristaltique .....	21
Figure 18 : Vue globale pompe & Vue du fond de la coque .....	21
Figure 19 : Tuyau interne santoprène .....	22
Figure 20 : Caractéristiques vitesse vs tension .....	23
Figure 21 : Principe de fonctionnement du système de prélèvement des liquides .....	23
Figure 22 : SySM@p monté pour prélèvements liquide .....	24
Figure 23 : Solution prélèvement poussière .....	24
Figure 24 Partie supérieure et inférieure du châssis solution prélèvement poussière .....	25
Figure 25 : Sol Expert 39887 Motoréducteur G 100M .....	25
Figure 26 : Poignée solution prélèvement poussière .....	26
Figure 27 : Trappe solution prélèvement poussière .....	26
Figure 28 : Ressort de torsion solution prélèvement poussière .....	27
Figure 29 Tampon frottis .....	28
Figure 30 Module frottis complet .....	28
Figure 31 Contraintes liées à la plaque d'interfaçage des modules .....	30
Figure 32 : Vue de détail d'un stockage solide .....	31
Figure 33 : Vue d'ensemble stockage solide .....	31
Figure 34 : Stockage solide, exemple avec prélèvements solide et frottis .....	32
Figure 35 : Animation ouverture cerclage stockage solide .....	32
Figure 36 : Explications extraction Cuve + Capot .....	33
Figure 37 : Explications Montage Cuve + Capot avant intervention .....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 38 : Système d'ouverture de trappe pour stocker la poussière .....	34
Figure 39 : Vue d'ensemble stockage liquide .....	34
Figure 40 : Photos Sous Ensemble Stockage liquide monté .....	35
Figure 41 Photo de l'aile .....	35
Figure 42 Représentation 3D de l'aile .....	35
Figure 43 : Représentation des connexions au niveau de la Raspberry Pi .....	38
Figure 44 : Bilan de puissance du système .....	39
Figure 45 : Batterie de référence B24007 .....	39
Figure 46 : Alimentation à découpage réf 233-6885 .....	40
Figure 47 : Câblage d'un uStepper .....	43
Figure 48 Ensemble UStepper démonté .....	43
Figure 49 Ensemble UStepper monté .....	44
Figure 50 Ensemble UStepper sur moteur .....	44
Figure 51 Boîtier pour ensemble UStepper .....	44
Figure 52 Représentation des connexions au niveau des moteurs des pompes .....	45
Figure 53 : Commande des moteurs .....	45
Figure 54 Boîte électrique vu du dessus .....	46
Figure 55 Passage de câbles .....	46
Figure 56 Emplacement des différents composants dans la boîte .....	46
Figure 57 : Liaison entre le Raspberry Pi et les uStepper .....	48

## 1 AVANT-PROPOS

L'industrie utilise différents systèmes techniques pour réaliser des opérations de transformation, de logistique et d'observation ou de contrôle. Le Système de Manipulation @vancée Planifiée (SySM@p) sera utilisé dans le cadre des activités d'exploitation des Installations Nucléaires de Base (INB). La collaboration entre le CEA et l'IMT Mines d'Alès a pour objectif de mettre en œuvre un système d'intervention téléopéré complet aux travers des différentes promotions de la filière mécatronique. L'étude ci-dessous se concentrera sur la partie permettant le prélèvement d'échantillons.

## 1 DOCUMENTS APPLICABLES ET DE REFERENCES

### 1.1 Documents de référence propres à l'affaire

Les documents de référence propres à l'affaire, outre le présent cahier des charges, sont :

Titre	N° de référence (avec indice)
Conception, réalisation et qualification du prototype du système SySM@p (Système de Manipulation @vancée Planifiée)	CEA/DES/ISEC/DE2D/SEAD/LSTD/2021-00X/Ind. 1
Cahier des charges, Étude, conception, réalisation et qualification d'un système d'identification et de prélèvement d'échantillons pour le robot terrestre : RICA+	DDC/UADG/NT/2018-09/Ind.0
Compte rendu de la réunion entre les chefs de projet de l'IMT Mines d'Alès et M. Jeremy SEYSSAUD représentant le CEA	

### 1.2 Documents applicables

Les références des documents généraux applicables sont :

Titre	N° de référence (avec indice)
Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système – Fiorèse et al. <a href="http://www.sebokwiki.org/1.1.1/">http://www.sebokwiki.org/1.1.1/</a>	Collection AFIS - CEPADUES ed.
ISO/IEC 15288:2008(E) / IEEE Standards 15288.2008 – Systems engineering – System life cycle processes (2 <sup>nd</sup> edition), February 2008	System Engineering Body of Knowledge
	ISO 15528

## 2 TERMINOLOGIE

Nom	Description
APD	<b>Avant-Projet Détaillé</b> : L'APD vient à la suite de l'APS. Il est la deuxième phase APD. De ce fait, sa principale fonction est de confirmer toute ce qui a été indiqué l'avant-projet sommaire.
VECO	<b>Vérification de Conception</b> : Il s'agit de l'étude avant la fabrication, pour s'assurer que le robot exécute toutes les fonctions demandées avant sa fabrication
SySM@p	<b>Système de Manipulation @vancée Planifiée</b>
SOI	<b>System Of Interest</b> : Système d'intérêt
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
IHM	Interface Homme Machine
Shield	Bouclier en français : Les shields sont des cartes électroniques conçues pour se poser sur une carte déjà existante et permettent d'augmenter les fonctionnalités de la carte de base
IPS	Image par seconde
PC	Personnal computer – Ordinateur personnel
ROS	Robot Operating System - logiciel pour la robotique

### 3 PRESENTATION D'HYPERION

Hyperion est une équipe formée en juillet 2023. Composée de 12 apprentis ingénieur issus de la 7<sup>ème</sup> promotion mécatronique de l'IMT Mines Alès. Les membres de l'équipe sont issus de formations diverses, assurant une maîtrise sur tous les domaines abordés au cours de ce projet multidisciplinaire. De ce fait, nous avons développé au sein de notre groupe 5 pôles dont 3 techniques : le pôle mécanique, le pôle électronique et le pôle informatique. Un pôle associé à l'IVTV ainsi qu'un autre pour la communication ont été également définis. Chacun de ces pôles est composé d'un responsable et au moins accompagné par un collaborateur spécialisé dans un sous-domaine.

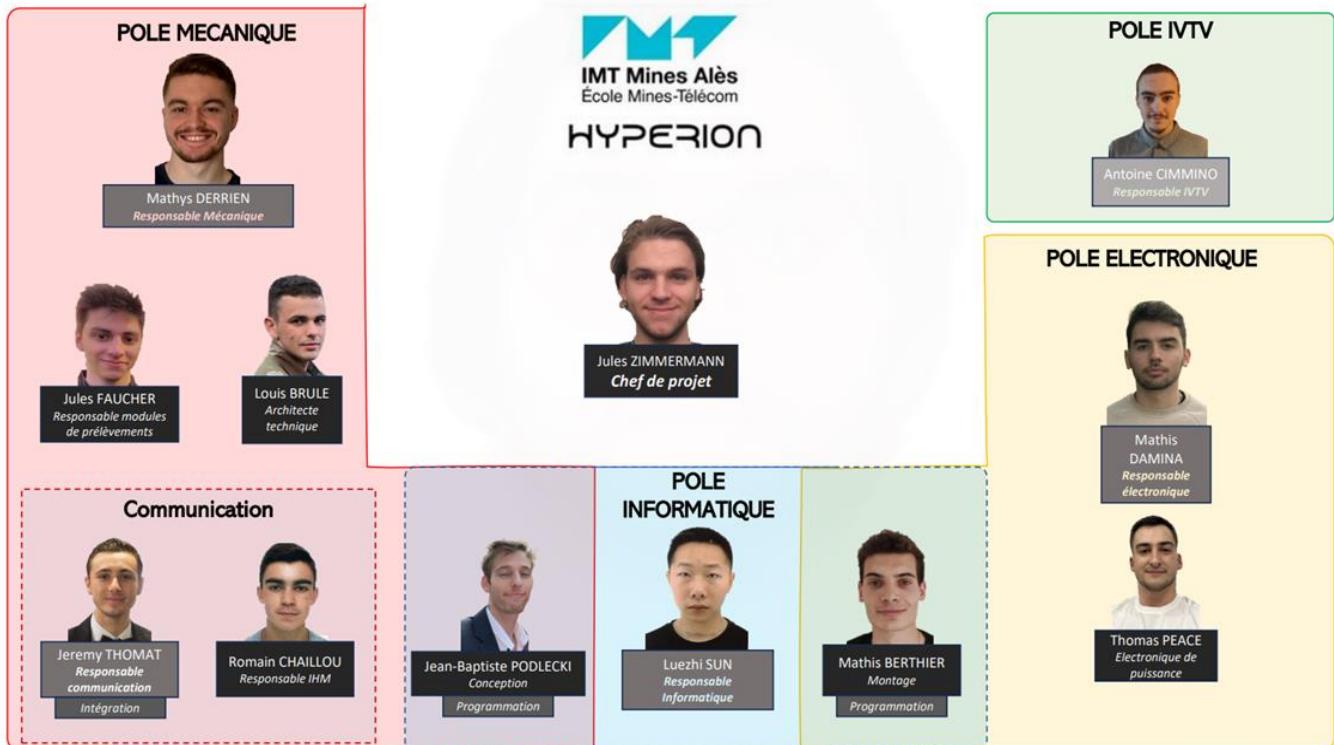


Figure 1: Organigramme HYPERION

## 4 PRESENTATION DU PROJET

### 4.1 Historique

Le projet présenté dans ce rapport est un projet d'ingénierie système sur trois ans. Il se déroule en continuité des précédents projets de l'IMT Mines d'Alès en partenariat avec le CEA et concerne la création d'un SyStème de Manipulation @vancée Planifiée (abrégé en SySM@p).

Le SySM@p se décompose en trois sous-systèmes distincts :

- Un sous-système en charge du contrôle/commande à distance ;
- Un sous-système mobile en charge des prélevements et de leur gestion ;
- Un sous-système assurant la communication entre les deux premiers sous-systèmes.

Le SySM@p est appelé à être exploité dans les installations nucléaires. Il a pour objectif le prélèvement de multiples types d'échantillons en milieu sévère. Ce document regroupe le travail de conception effectué et fait référence à l'avancée de celle-ci pour le client CEA.

### 4.2 Le rapport de conception

Ce rapport de conception présente la solution du SySM@p d'après la vision d'HYPERION après l'étude d'ingénierie système effectuée sur l'année scolaire 2021-2022 et les travaux de conceptions depuis septembre 2022. Il met en avant l'ensemble des choix techniques retenus, leur réalisation et les résultats obtenus. Nous focaliserons notre étude sur le produit final, mais certaines parties seront aussi consacrées à l'explication de l'évolution de la solution.

Ce rapport se veut exhaustif et détaillé dans la réponse qu'il apporte à la demande du client. Les éléments techniques de taille conséquent encombrant la lecture fluide du rapport sont disponibles dans leur entièreté en annexe et dans les documents transmis au client.

### 4.3 Finalité, mission et objectifs du système

#### Finalité :

Prélever dans un milieu spécifique où des risques limitent la présence humaine.

#### Mission :

Prélèvements d'échantillons solides/liquides/poussières/frottis dans un milieu radioactif inaccessible à l'Homme.

#### Objectifs :

- Jusqu'à 3 échantillons de même type peuvent être prélevés et stockés hermétiquement par investigation ;
- Zone de prélèvement accessible par le SySM@p / Positionnement de l'échantillon à prélever ou zone de frottis :
  - Jusqu'à 30 cm d'un des côtés du robot
  - Entre -5 et +10 cm du sol
  - Une zone libre de 20cm sur 180° est présente autour de l'objet à prélever
- Prélèvement d'échantillons solides avec les caractéristiques suivantes :
  - Entre 1 cm et 10 cm de côté ;
  - Entre 10g et 1kg ;
- Prélèvement de liquides :
  - Jusqu'à 250mL ;
- Prélèvement de poussières :
  - Jusqu'à 100gr ;
  - Taille des grains inférieur à 1mm ;

- Le système effectue des frottis :
  - Dans une surface à connaître de maximum 300 cm<sup>2</sup>
- Le système respecte des contraintes de dimension :
  - 20kg maximum ;
  - 40cm de hauteur maximum ;
  - En position replié, le SySM@p ne dépasse pas l'empâtement de la base mobile ;
- Le temps de montage et interfaçage du SYSM@P est inférieur à 30min aux abords du site et à 2h en dehors

## 5 METHODOLOGIE DE VALIDATION

### 5.1 Description des attendus

Le plan de validation applicable en validation opérationnelle est un document essentiel dans le processus d'ingénierie système qui vise à garantir que le système, le SySM@p dans notre cas, répond aux exigences spécifiées et est apte à être déployé et utilisé dans des conditions réelles. Afin de définir clairement ce que l'on cherche à valider et les critères de succès, nous nous appuierons sur le référentiel des exigences établi.

### 5.2 Rappel du référentiel des exigences

Le référentiel des exigences (cf. *Tableau 1 Référentiel des exigences*) est la base sur laquelle le plan de validation est construit. Chaque exigence spécifiée, issue de l'étude préliminaire et soumise à validation du client, dans le référentiel, doit être testée et validée pour s'assurer qu'elle est correctement mise en œuvre dans le système final.

### 5.3 Méthodologie

Tout au long du rapport, nous présenterons, de façon détaillée, les preuves de conception permettant de valider que le système satisfait aux exigences opérationnelles définies, par le biais de procédures, de tests et de critères d'acceptation. Une partie de ces tests sera effectuée lors d'une démonstration avec les parties prenantes, le reste transmis avec la documentation complète du projet.

## 6 CONCEPTION DETAILLEE

### 6.1 Architecture globale du système

Ci-dessous, l'agencement des sous-systèmes sur une interface commune avec toutes les bases mobiles :

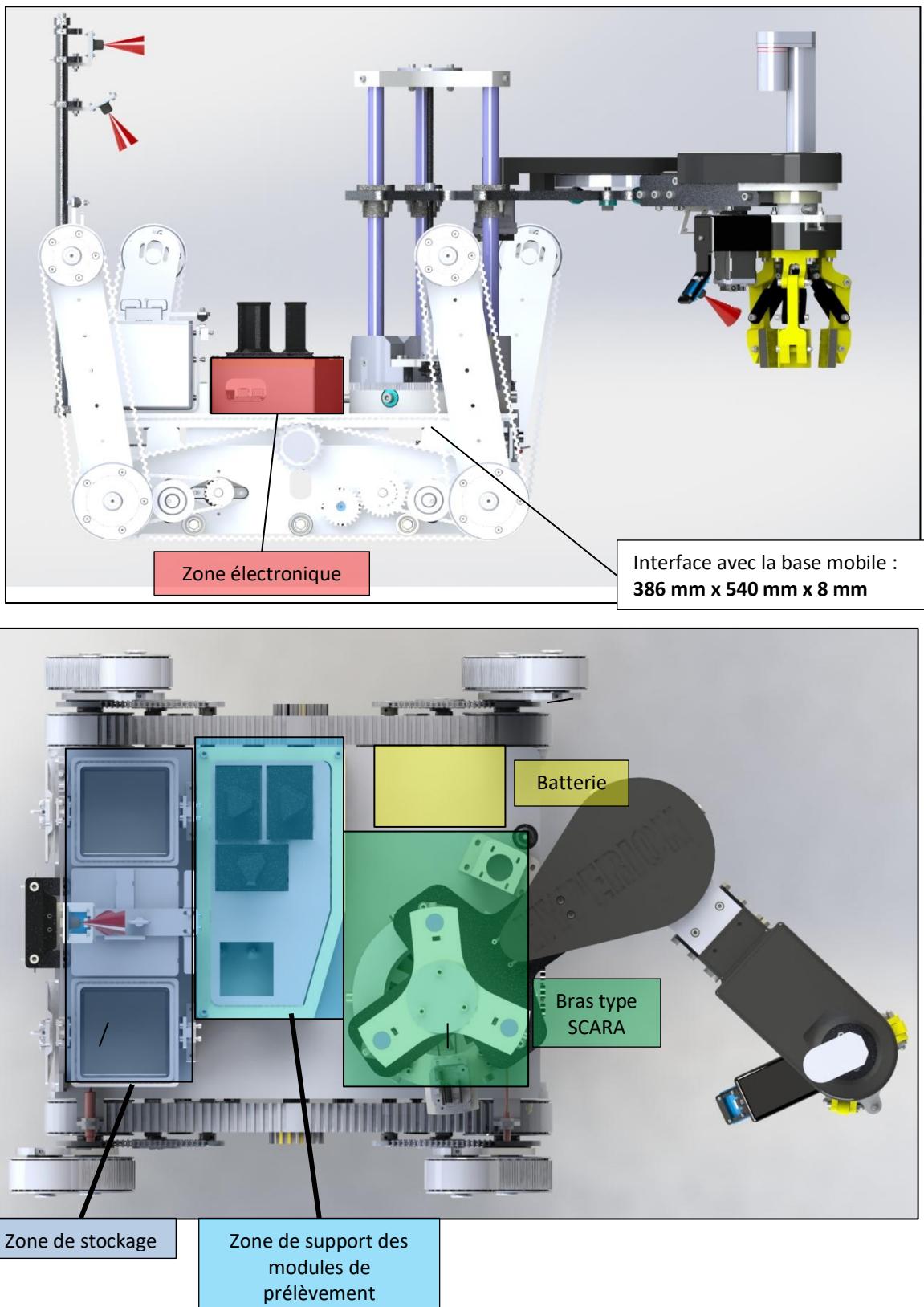


Figure 2 : Vue du dessus et de côté de l'ensemble des systèmes

Nous retrouvons deux types de zones disposés sur la plaque d'interface :

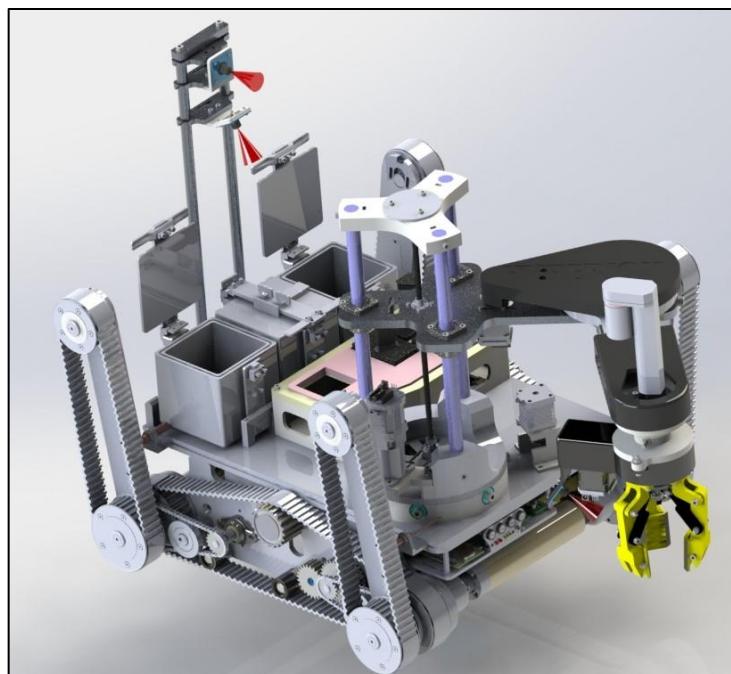
Les **sous-systèmes définis** qui sont fixés sur l'interface pour tout type de prélèvement :

- Zone électronique : boîte de stockage des circuits et composants électroniques (détaillé dans les points [6.7](#)) est un espace définit.
- Batterie : elle apporte la puissance nécessaire pour assurer un fonctionnement autonome du SySM@p indépendamment de la base mobile (détaillé dans la [6.7.6](#))
- Le SySM@p en lui-même

Les **sous-systèmes modulables** qui sont montés sur l'interface selon le type de prélèvement à faire :

- Zone de stockage : disposé à l'arrière de l'interface, est un espace modulable selon le type de prélèvement à effectuer (détaillé dans le point [6.5](#))
- Zone de support des modules : avant chaque intervention, le module est installé sur cet espace, afin d'être récupéré par la pince lors de la mission (cf. [6.4](#))

## 6.2 Intégration aux bases mobiles



*Figure 3 : Représentation du SySM@p sur la base mobile RICA+*

Le SySM@p n'assure pas les déplacements nécessaires pour investiguer le site. Ces déplacements sont réalisés par une base mobile. La conception sur-mesure de ce système de prélèvement permet de l'embarquer sur différentes bases mobiles, utilisées pour différentes configurations de terrain. Les solutions retenues sont radicalement différentes, au nombre de trois : le RICA+ (version IMT Mines d'Alès), le Husky de ClearPathRobotics et le Rover Pro de chez Rover Robotics.

Les spécificités de chacune de ces bases mobiles nous ont été communiquées au travers du cahier des charges initial. Elles présentent des caractéristiques techniques (charge, matériau, dimensions) et des interfaces mécaniques, électriques et numériques uniques à prendre en compte dans l'intégration de notre système.

Après étude comparative des trois solutions, nous sommes arrivés à la conclusion suivante :

- La conception préliminaire du SySM@p répond à tous les besoins énoncés lors de l'intégration sur RICA+
- Le bras est implanté directement sur l'interface mécanique du RICA+ avec des dimensions de (386x540x10mm), positionné à 155mm du sol. Ces mesures ont été utilisées pour évaluer les contraintes d'espace de la base, l'espace de stockage et l'accessibilité des échantillons en hauteur, y compris en-dessous de la base (-5cm).
- Afin d'implémenter le SySM@p sur Rover Pro, il faut redimensionner une interface mécanique plus grande (le « R&D Payload » est un caisson vitré de 270x370mm) qui viendrait se positionner au-dessus de celle existante. Celle-ci n'étant qu'à 24cm du sol, soit 8.5cm de plus que la base du RICA+, il est possible de la surélever en prenant en compte la contrainte de prélèvement à -5cm du sol (cf. dimensionnement du vérin [6.3.4.1](#)). En même temps, il est permis de l'agrandir en respectant

l'empâtement du robot (62 cm x 39 cm) comparable à l'interface mécanique du RICA+ (54 cm x 38.6 cm). Ainsi l'interface utilisée sur le RICA+ est retenu pour être installée sur le Rover Pro.

- Finalement, la base mobile qui a demandé le plus d'étude est la plus massive, Husky, l'interface mécanique étant situé à 47 cm du sol, il apparaît impossible de respecter en même temps les besoins 11 (prélèvement à -5 cm du sol) et 21 (côte la plus importante inférieure à 40 cm système replié) donnés dans le cahier des charges. Pour gérer l'accessibilité aux échantillons, un vérin adapté est utilisé, mais il est préférable d'éviter une taille excessive de celui-ci. De ce fait, afin de ne pas se retrouver avec un vérin de 60 cm, une autre solution pour implémenter le SySM@p sur le Husky est retenu : le CEA a formulé la possibilité d'utiliser un chariot accroché à la base mobile sur laquelle on installerait le SySM@p. Ceci est possible car notre système est indépendant de sa base mobile en puissance.  
En avançant ces arguments, nous mettons en avant le respect de l'exigence **E13** *Le SySM@p est compatible avec les différentes bases mobiles.*

### 6.3 Bras SCARA

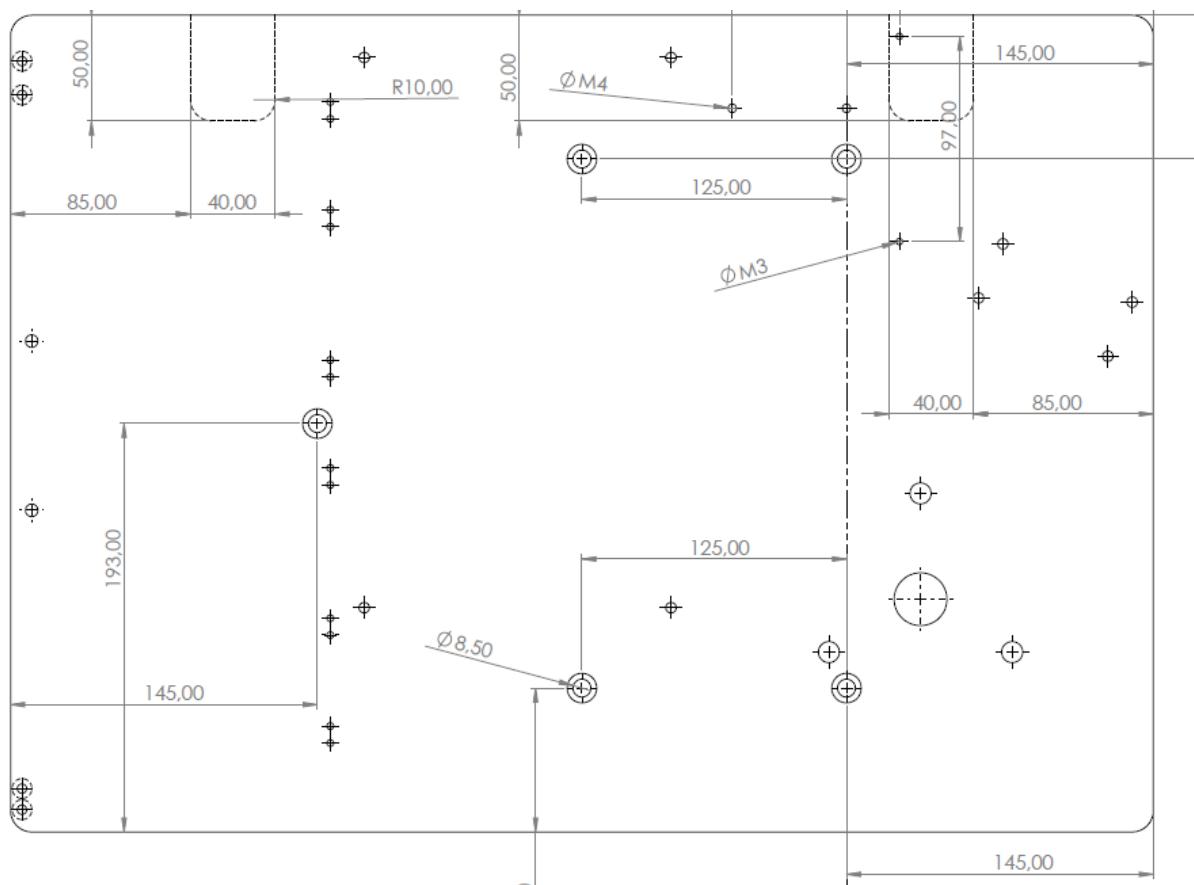
Un bras robotique SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) est un type de robot industriel utilisé pour les applications d'assemblage et de manipulation. Il se caractérise par sa structure à quatre degrés de liberté, avec deux degrés de mobilité pour l'épaule et le coude. Les robots SCARA sont conçus pour offrir des mouvements rapides et précis. Leur cinématique spécifique leur permet d'effectuer des mouvements de translation horizontale, de rotation et de mouvement vertical avec une grande précision. Ce modèle a été adapté en y ajoutant, en outre, une translation sur l'épaule permettant une plus grande liberté de mouvement.



Figure 4 Exemple de bras type SCARA

#### 6.3.1 Plaque de fixation

Pour fixer notre Sysm@p sur les différentes bases mobiles, nous avons conçu une plaque de fixation qui s'interface entre le Sysm@p et les bases mobiles. Nous avons pris en compte les dimensions des différentes bases pour une modularité la plus importante possible. Afin de minimiser le poids de la plaque et maximiser la résistance des fixations, nous avons opté pour une plaque d'aluminium de 10mm d'épaisseur. Pour ce qui est de l'adaptabilité sur les bases mobiles, nous avons fait usiner des évidements pour laisser de la place pour les charnières présentes par exemple sur la base RICCA+.



Sur cette plaque de fixation, nous retrouvons l'intégralité des perçages nécessaires à la fixation des modules du SySM@p : que ce soit le SCARA, les espaces de stockage, l'alimentation électrique. On retrouve aussi des perçages pour fixer les supports des moteurs ou encore la boîte électrique sans oublier les trous pour fixer la plaque à la base mobile.

### 6.3.2 Base

La base d'un bras robotique SCARA offre une mobilité essentielle en termes de rotation autour de l'axe z. Ce degré de liberté permet au robot de s'orienter avec précision dans l'espace tridimensionnel.

La solution adoptée pour réaliser la rotation de la base autour de l'axe est celle d'une poulie/courroie crantée pour éviter les potentielles imprécisions de mouvement dû à des glissements de la courroie sur la poulie. Cette solution s'adapte très bien aux basses comme aux hautes vitesses de rotation et nous assure une précision infaillible lors de nos prélevements.

Une butée mécanique stoppant la rotation entre la base fixe et la partie mobile permet de pouvoir à l'aide du programme, créer notre origine pour la rotation de la base. Cette butée mécanique ayant cassé, nous avons fait le choix de remplacer la butée en plastique par un montage d'un insert et d'y visser une vis M3 sans tête.

Cette base est directement fixée sur notre plaque de support à l'aide de trois vis M10.

La hauteur entre la plaque d'interfaçage et le haut de la base, la côte la plus contraignante système replié, mesure 44cm, ce qui dégrade légèrement l'exigence **E23** *Le SySM@p doit être peu encombrant, la côte la plus importante est inférieure à 40cm, système replié.*

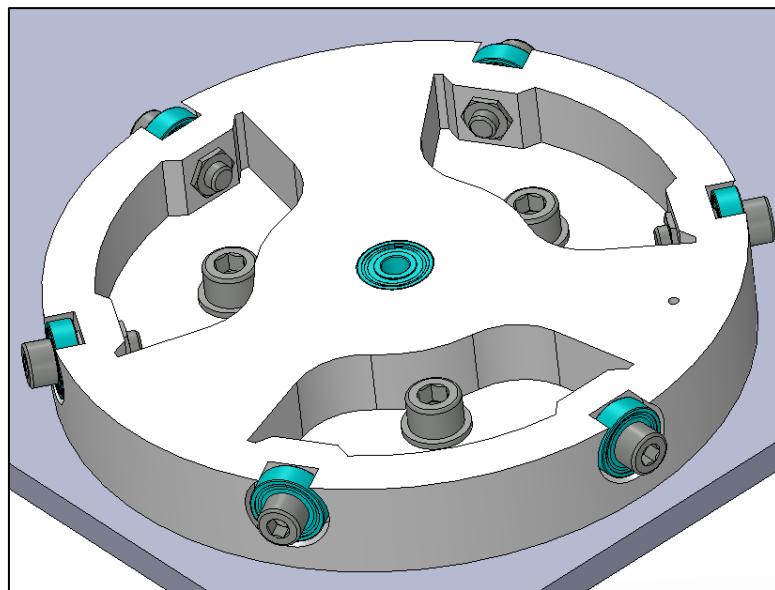


Figure 5 Représentation 3D de la base

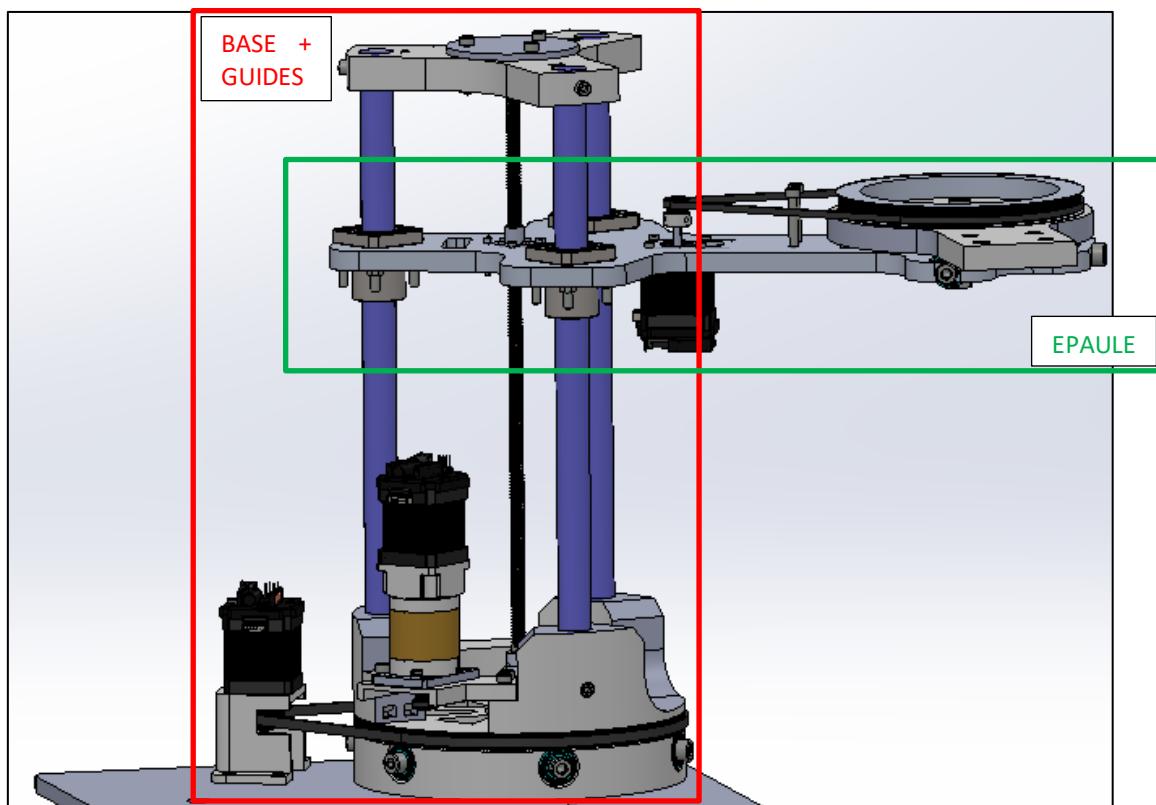


Figure 6 Représentation de l'ensemble base + épaule

### **6.3.3 Epaule**

#### **6.3.3.1 Mouvement de translation en z**

La base offre une première translation à l'épaule le long de l'axe z. Cette capacité permet au robot de se déplacer verticalement. Le fonctionnement mécanique de l'épaule repose sur un système ingénieux, utilisant notamment un système de vis et une roue sans fin pour permettre cette translation sur l'axe z.

Le système mécanique de l'épaule est conçu de manière à convertir la rotation d'un moteur en un mouvement linéaire le long de l'axe z. Il utilise une vis sans fin qui est reliée à un moteur et la rotation de ce dernier fait tourner la vis, ce qui entraîne un mouvement de translation de l'épaule le long de l'axe z.

Il faut dimensionner le moteur permettant de faire tourner la masse complète du système.

Tout d'abord, SolidWorks nous a permis d'obtenir la masse totale de l'ensemble que va devoir actionner le moteur. Ce total est d'environ 8kg, ce qui donne en utilisant la formule du calcul de la force :

$$8 * 9.81 = 78.48 \text{ N}$$

Dans le but de respecter cette contrainte au maximum et l'arc-boutement engendré par la masse qui est déportée, un coefficient de sécurité de 4 a été appliqué. Ensuite, la vis trapézoïdale permettant la translation de la masse possède un pas de 2mm et un diamètre de 8mm.

Le couple nécessaire devient donc :  $78.48 * 4 = 313.92 \text{ N}$

$$Cf = \frac{F * p}{2 * \pi} = \frac{313.92 * 2}{2 * \pi} = 99.92 \text{ N.mm}$$

Ainsi, le couple nécessaire au déplacement de la masse imposé est de 9,367 N.cm.

En général, les moteurs pas à pas NEMA17 offrent une combinaison de taille compacte, de précision, et de puissance adéquate en plus d'un coût abordable. Ceci en fait un choix évident, mais il faut sélectionner une référence proposant cette valeur de couple. Il existe une référence chez Go Tronic le 17HS19-2004S qui propose un couple de maintien de 59 N.cm, celui-ci convient dans ce cas, mais il est préférable d'y associer un réducteur qui permet d'avoir de la sécurité pour prendre en compte les pertes induites par les frottements dans les transmissions, au niveau de la courroie ou bien de la vis trapézoïdale et son écrou.

La vitesse est également à prendre en compte car une translation trop lente sera rédhibitoire de même que pour une translation trop rapide. On se doit donc de calculer le temps nécessaire pour translater l'épaule complétement pour se faire une idée.

La vitesse nominale de notre NEMA 17 étant de 200 tours/min :

$$V = p * N * r = 2 * 200 * \frac{1}{20} = 20 \text{ mm/s}$$

Ainsi la vitesse de translation est de 20 mm/s, sachant que la course est de 300mm, il faut 15 secondes pour réaliser entièrement une translation. Cela ne posera pas un problème car la translation s'effectue que deux fois par prélèvement donc 6 fois au total ce qui correspond à 1m30 d'attente au total.

#### **6.3.3.2 Efforts de flexion**

L'épaule est la partie du bras qui va subir les efforts de flexion dû à son propre poids, aux poids des pièces situés en aval par rapport à la base ainsi qu'au poids des échantillon à prélever. Le bras de levier étant important sur cette pièce, il est primordial de bien la dimensionner pour éviter une flèche qui viendrait fausser la position de l'effecteur.

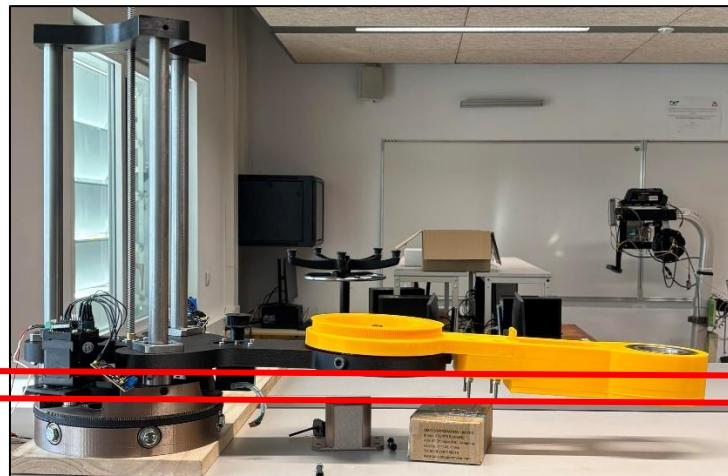


Figure 7 Mise en avant de la flèche du bras 1ère version

Après une première tentative d'impression 3D de la pièce en polymère haute performance, la flèche au bout du bras était bien trop importante. Nous avons donc refait une simulation des forces grâce à RDM7. En simulant, nous nous sommes rendu compte que la manière la plus efficace pour réduire la flèche sans avoir à changer complètement le design de la pièce était de changer de matériau. Grâce à sa masse volumique relativement faible ainsi que son module d'Young plutôt élevé, l'aluminium s'est trouvé être le meilleur candidat pour résoudre notre problème.

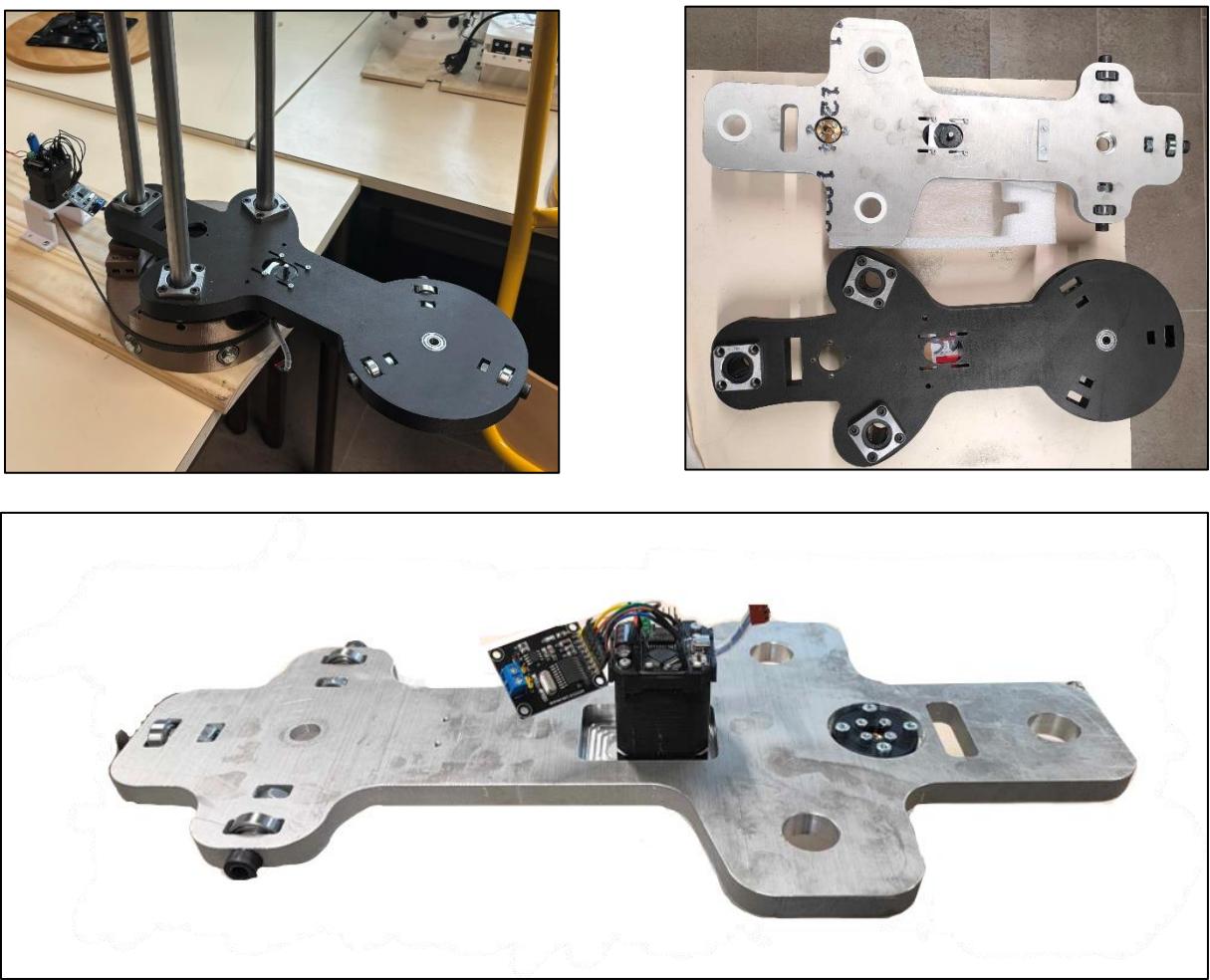


Figure 8 Avant/après épaule

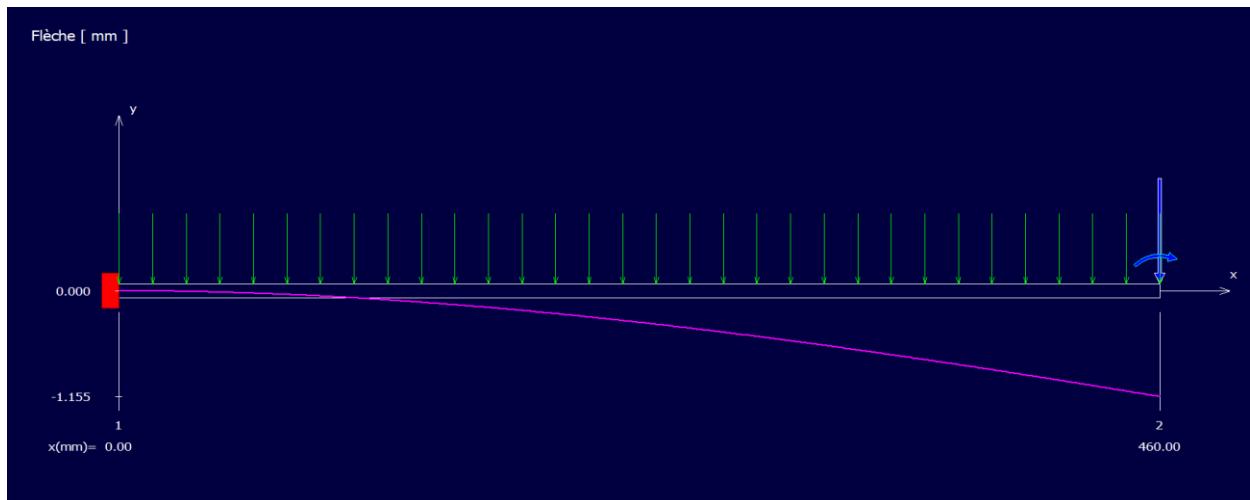


Figure 9 Modélisation de la flèche RDM7

En refaisant la modélisation, il apparaît que pour une épaisseur de 10mm (2 fois moins importante qu'avec le matériau précédent), la flèche n'est que de 1.1mm même en prenant les paramètres les plus défavorables pour la pièce.

Lors de la conception de la pièce nous avons pris en compte aussi l'emplacement des différents éléments électriques tels que le moteur, nous avons donc fait en sorte de conserver la possibilité de réglage de ce-dernier. Avec cette nouvelle épaule, nous avons considérablement réduit la flèche en bout de bras et finalement, le poids ne s'est pas considérablement augmenté parce que le volume de la pièce a été divisé par 2.

#### 6.3.4 Coude

La géométrie du coude a été modifiée suite à des ajustements sur l'épaule. Passant d'une pièce unique en impression 3D à deux pièces maintenues par des plaques en aluminium, cette modification a permis une réduction de poids significative grâce à une utilisation moindre de matière, pour continuer à limiter la flèche. La rigidité globale a été améliorée avec l'ajout de deux plaques d'aluminium. De plus, le support de la caméra a été adapté pour élargir son champ de vision.

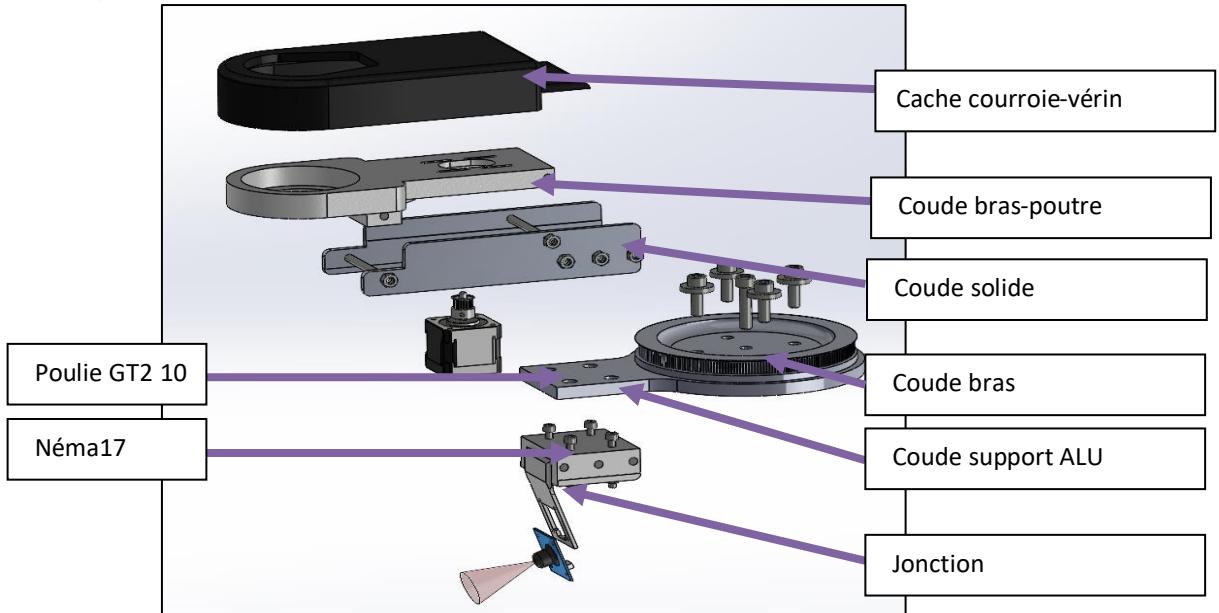


Figure 10 Vue éclatée du coude

La pièce reliant le coude à l'épaule a aussi subi des changements pour éviter de faire face à un phénomène de flexion trop important. Nous sommes passés d'une pièce unique en impression 3D à un assemblage d'une pièce en aluminium ainsi qu'une pièce imprimée. La pièce en aluminium sert de support à celle en impression et garantie la rigidité tandis que la pièce en impression permet de conserver le design de poulie que nous avions initialement. Ainsi nous améliorons les caractéristiques mécaniques de la liaison tout en conservant la précision.

En outre, les caches courroies ont été redessinés afin de garantir le bon fonctionnement du système, notamment en évitant que les opérateurs ne se coincent les doigts dans les courroies ou en limitant l'entrée d'objets dans les zones critiques. En parallèle nous avons aussi pris en compte le passage des câbles.

Ce coude offre une extension suffisante pour répondre aux exigences de distance établies dans le cahier des charges. En effet, avec la fonctionnalité de Rviz (ROS) nous pouvons voir que notre préhenseur peut atteindre une distance de 60cm du côté d'un SySM@p ce qui valide l'exigence **E12** *Le système doit prélever un échantillon se situant jusqu'à 30cm d'un des côtés de la base mobile*. Il permet la fixation d'une caméra, de la pince ainsi que du vérin mais aussi la création d'axes supplémentaire pour notre SCARA.

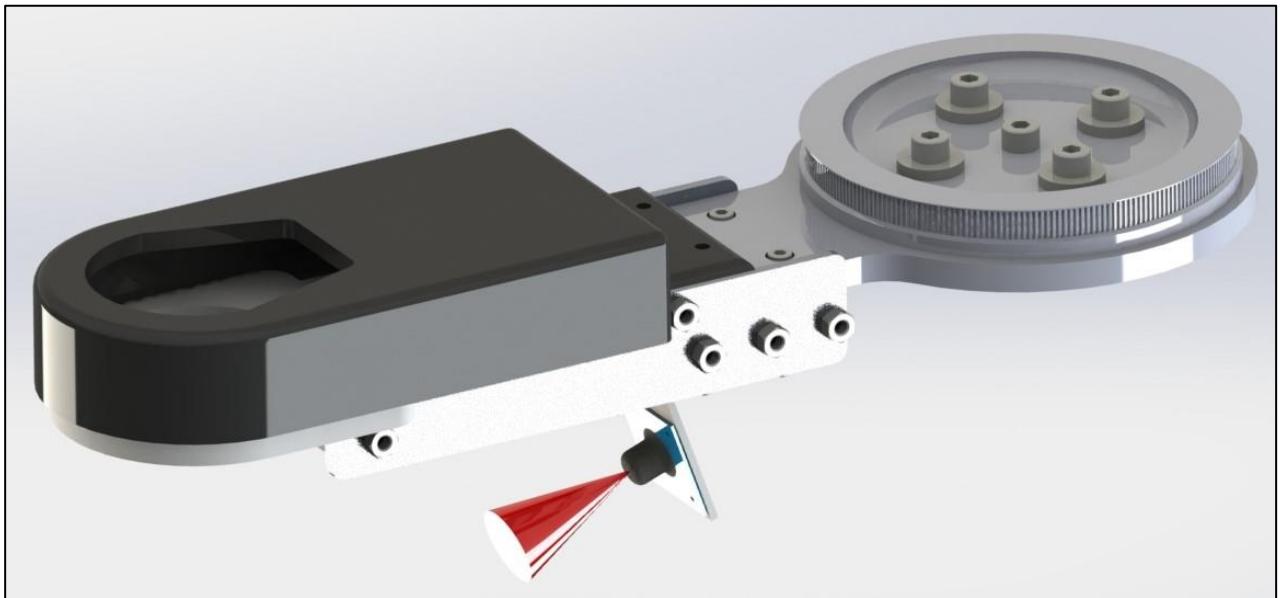


Figure 11 Représentation 3D du coude

### 6.3.5 Poignet

Le poignet de notre SySM@p offre une combinaison de deux types de mouvements : une rotation autour de l'axe z et une translation le long de cet axe. Ces fonctionnalités permettent de positionner l'effecteur (la pince) dans l'espace. Son mécanisme repose sur un système de poulies-courroie pour la rotation et un vérin pour la translation suivant l'axe z, facilitant ainsi le prélèvement à différentes hauteurs dans la zone d'accès.

Nous avons aussi conçu un cache courroie pour éviter de potentiels accidents avec les opérateurs mais aussi pour éviter que des débris ou autres objets ne viennent se loger dans les différents mécanismes. Ce cache courroie prévoit aussi le passage des câbles pour alimenter les éléments électriques situés sur la pince.

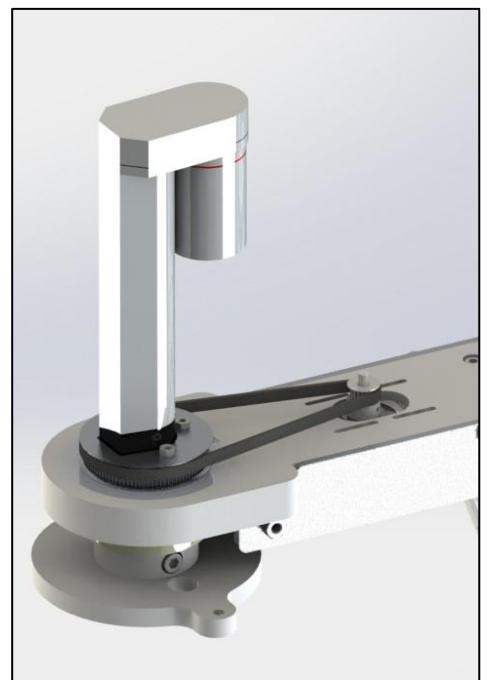


Figure 12 Représentation 3D du poignet

## 6.3.5.1 Dimensionnement vérin

Ce dernier est donc dimensionné de telle sorte à pouvoir supporter la charge {pince + échantillon + électronique} et récupérer des échantillons à -50 mm (**E11**) du sol. Avec un vérin de longueur 150 mm il vient :

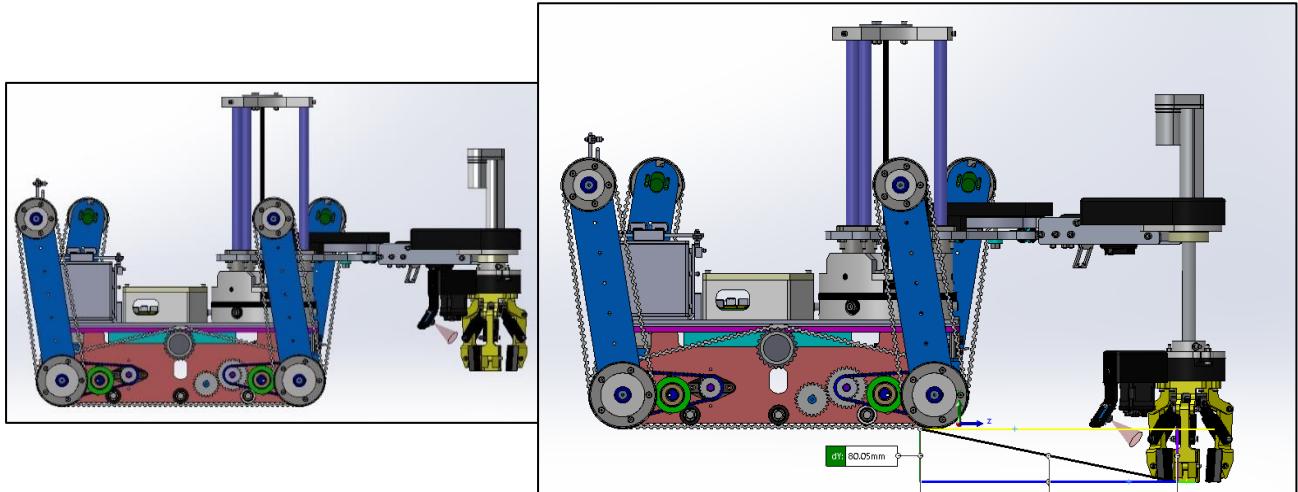


Figure 13 : Position vérin rentré et déployé

Avec le bras en position basse et vérin déployé, le bout de la pince est à 80 mm du sol. La référence MR103-150 de chez GoTronic propose une charge maximale de 50kg porté par le vérin, ce qui est largement suffisant dans notre cas.

## 6.3.5.2 Dimensionnement moteur

Pour dimensionner le moteur approprié à la rotation de la pince, il est nécessaire de prendre en compte certains paramètres.

Premièrement, le couple requis au niveau de la poulie menée, pour faire tourner la pince est obtenu par la formule  $C_D = I \times \alpha$ . De la même façon que pour le dimensionnement moteur du coude, l'ensemble {pince + électronique + échantillon} peut être assimilé à un cylindre plein de rayon  $r=30\text{mm}$ . Dans le cas d'une masse maximale  $m=3\text{ kg}$  de l'ensemble en opération. On détermine également une accélération en fonctionnement  $\alpha = \frac{\pi}{0.9} \text{ rad/s}^2$  (la pince met 0.3 secondes à atteindre la vitesse de  $\frac{\pi}{3} \text{ rad/s}$ ) et il vient :

$$C_D = I \times \alpha = \frac{1}{2} \times m \times k \times r^2 \times \alpha = \frac{1}{2} \times 3 \times 3 \times 0.30^2 \times \frac{\pi}{0.9} = 1.41 \text{ N.m}$$

avec un coefficient de sécurité  $k=3$

Ensuite, il faut tenir compte du rapport de réduction  $r = \frac{z_d}{z_D} = \frac{C_d}{C_D}$  entre les poulies telle que le couple requis au niveau du moteur  $C_d = C_D \times r$

Dans l'idée d'utiliser la même référence de moteur proposant un couple de maintien de 59 N.cm il faut prendre des poulies tel que  $r = \frac{z_d}{z_D}$  avec  $C_d = r \times C_D \leq 59 \text{ N.cm} \Rightarrow r \leq \frac{59}{141} = 0.418$

Le choix se porte donc sur une poulie menante de 10 dents et une poulie menée de 95 dents

$$\Rightarrow r = \frac{10}{95} = 0.105 \leq 0.418 \text{ assurant par la même occasion un coefficient de sécurité de 4}$$

Finalement le même moteur NEMA17 17HS19-2004S de Go Tronic est retenu pour assurer la rotation du poignet.

## 6.3.6 Effecteur : Pince 3 doigts

Pour déterminer un système de prélèvement solide, une veille technologique a été réalisée afin de se familiariser avec diverses solutions existantes pour la récupération d'objets solides de dimensions inférieures à un cube de 10 cm d'arête (**E1**) et pesant au maximum 1 kg (**E2**). Deux exigences sont très contraignantes pour la forme de la pince : pouvoir attraper un solide de toutes formes et pouvoir l'attraper sur un plan de 180° horizontal avec 20 cm de libre (c'est à dire pouvoir attraper un solide contre un mur). La pince 3 doigts permet de répondre à ces deux exigences : une meilleure tenue, et au-delà de 3 doigts cela aurait été contraignant pour les solides contre un mur. Il a donc été décidé d'utiliser une pince 3 mors personnalisée afin de répondre de manière optimale à nos besoins tout en restant adaptable en cas de modifications nécessaires. La pince présentée ci-dessous répond aux critères requis pour le prélèvement d'échantillons solides, car elle permet notamment de saisir un cube de 140 mm de côté.



Figure 14 Photo de l'effecteur

Cette pince est munie de patins en TPU qui peuvent se déformer pour une meilleure adhérence aux objets. Pour une prise optimale sur différentes surfaces, des revêtements en caoutchouc ont été intégrés. Ces patins peuvent être aisément retirés pour un nettoyage et un remplacement rapide.

Les mors de la pince peuvent s'ouvrir et se refermer grâce à un moteur NEMA\_17 relié avec une courroie à un assemblage de pièces en liaison avec une vis sans fin. Le moteur a été déporté afin de pouvoir réduire la hauteur totale de pince, ce qui permet une manipulation de l'ensemble du robot plus ergonomique.

Finalement, un cache a été créé afin de protéger la courroie de l'environnement en opération.

Ensuite, afin de bien dimensionner la pince pour un maintien permanent de la pièce, il a fallu calculer la force de serrage exercée par celle-ci :

**E1** Le choix d'une pince 3 doigts, d'ouverture 150mm de diamètre, permet d'attraper des solides présentant une arête de 100mm.

**E2** Poids de 1 kg dans le cadre d'une forme de dimension maximale (10cm d'arête) :

- Calcul de la force de préhension en statique  $F_g = M_{\text{pièce}} \times g \times S / (\mu \cdot n)$   
Avec un coefficient de sécurité  $S=2$  ; la  $M_{\text{pièce}} = 1.1 \text{ kg}$  ; le coefficient entre le caoutchouc et l'acier  $\mu = 0.5$  ; la pesanteur  $g = 10 \text{ N.m}^{-2}$  ; et le nombre de mors  $n=3$  ;

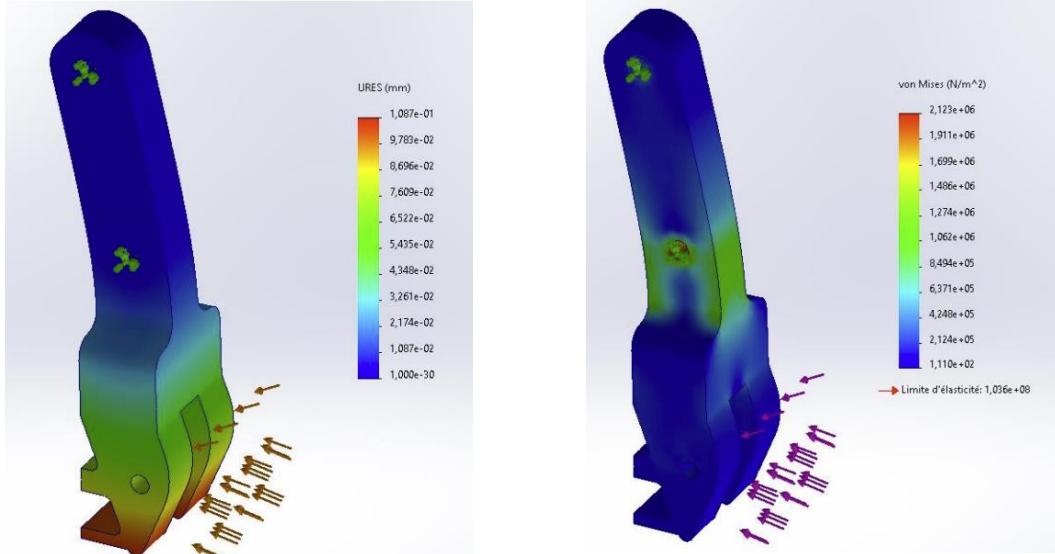
Il vient avec ce calcul que :  $F_g = 1.1 \times 10 \times 2 / (0.5 \times 3) = 14.7 \text{ N}$

- Le couple de maintien du moteur ( $C_m$ ) nécessaire pour maintenir la force de préhension dépend de la distance ( $r$ ) entre le centre de rotation du moteur et le point d'application de la force de préhension :  
$$C_m = F \times r = 14.7 \times 50 = 735 \text{ N.mm}$$
- Le couple de sortie du moteur ( $C_s$ ) dépend du rapport de transmission ( $i$ ) du système poulies-courroie, ainsi que du couple requis de maintien ( $C_m$ ) :

$$C_s = C_m \times i = C_m \times \frac{D_{\text{menante}}}{D_{\text{menée}}} = 735 \times \frac{50}{100} = 367.5 \text{ N.mm}$$

La documentation technique du NEMA17 17HS19-2004S de Go Tronic nous donne un couple de maintien de **4000 N.mm** il est donc retenu pour assurer l'ouverture/fermeture de la pince.

De plus, le matériau de la pince est choisi pour qu'elle puisse résister à la force de préhension de 14.7 N appliquée à chaque mors. Le matériau de la simulation est du plastique PA type 6.



Le déplacement maximum est de  $1,087\text{e-}01$  mm  
La pièce se déforme très légèrement.

Ici est représenté le stress subit par la pièce qui est 100 fois inférieur à la limite d'élasticité du matériau.

Figure 15 Modélisation des déformations de la pince

Grâce à cette étude, il est cohérent de déduire que notre pièce pourra être réalisé en impression 3D. Ce qui rend les pièces facilement remplaçables.

## 6.4 Les systèmes de prélèvements

### 6.4.1 Prélèvement Solide

Le prélèvement solide est effectué par l'effecteur installé sur notre bras robotique. Cette pince à trois doigts offre une capacité de préhension adaptée aux objets pesant plus d'1 kilogramme et mesurant jusqu'à 140 mm de chaque côté, répondant ainsi aux spécifications définies dans le cahier des charges. Des essais ont été effectués avant l'intégration sur le bras complet, permettant ainsi de confirmer la validité de cette solution de préhension.



Figure 16 Photos de la pince

## 6.4.2 Prélèvement Liquide

L'étude du choix de la solution liquide comme présenté lors du rapport de conception préliminaire nous a mené à choisir comme solution technique l'utilisation de 3 pompes péristaltiques.

Ces trois pompes seront utilisées pour effectuer 3 prélèvements distincts sans contamination, en accord avec l'exigence **E9** *Le système doit collecter 3 échantillons du même type par investigation.* La pompe est composée de 4 ensembles : la coque, le porte-galet et ses galets, le tuyau flexible avec ses connecteurs et le capot. Le schéma de principe de fonctionnement est détaillé plus bas.

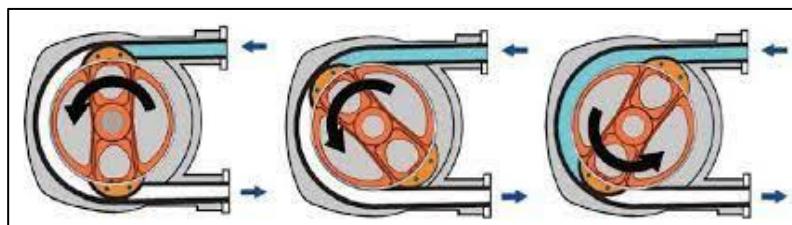


Figure 17 : Principe de fonctionnement d'une pompe péristaltique

Le tuyau flexible santoprène est un tuyau déjà référencé dans l'utilisation de pompes péristaltiques, les 3 autres éléments sont imprimés en ABS.

### 6.4.2.1 Modèle 3D Pompe péristaltique :

Etant donné que la coque et le porte galet sont imprimés en 3D, il est possible d'ajuster leurs dimensions à notre guise afin de permettre une meilleure intégration mais aussi moins de frottements.

Le porte galet qui vient comprimer le tube a donc été dessiné afin de réduire et répartir au maximum des contraintes de cisaillement lors du mouvement (courbures, lignes tangentes) de plus, ces galets sont un assemblage de deux roulements à bille superposés. La dimension de la coque a été définie à partir de la dimension du tuyau flexible interne. Le tuyau doit être au maximum contraint par le galet et la forme de la coque pour effectuer un phénomène de compression-décompression optimal, c'est donc pour cela que le design de la coque a été repris au long du projet et a été ajusté en fonction des résultats obtenus.

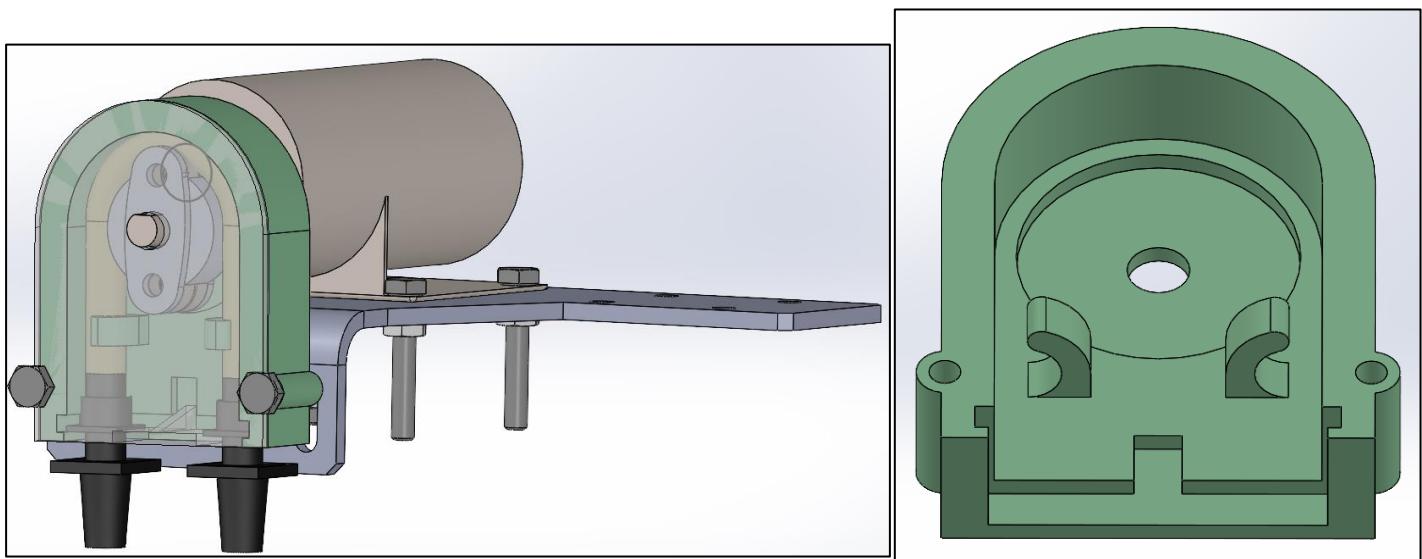


Figure 18 : Vue globale pompe & Vue du fond de la coque

### 6.4.2.2 Les tuyaux :

Tuyau interne avec connectique santoprène :



Figure 19 : Tuyau interne santoprène

Le dimensionnement de la coque des galets et porte-galets s'est fait par rapport au choix du tuyau. Ici un tuyau de pompe péristaltique en santoprène a été choisi puisqu'il est déjà spécialisé pour les pompes péristaltiques.

Le santoprène est utilisé puisqu'il présente une bonne résistance à l'abrasion et aux produits chimiques. De plus le tube est suffisamment épais pour bien résister aux contraintes mécaniques. Voici une référence choisie avec ses caractéristiques associées : Tube santoprène avec raccord Microdos pour pompe MP1 Astralpool et Stérilor RR.005.001

Diamètre interne : 4 mm

Diamètre externe : 7mm

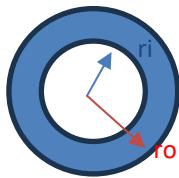
Longueur sans connecteur : 95 mm

Longueur avec connecteur : 155 mm

#### Tuyau externe PE :

Le tuyau externe à la pompe est un tuyau flexible PE de dimensions 6x4 mm qui est la dimension adaptée pour la sortie du connecteur. Le tuyau utilisé sera en PE puisqu'il présente une grande inertie chimique. C'est pourquoi il est couramment utilisé dans l'industrie chimique. Ce matériau est aussi robuste et inaltérable.

### 6.4.2.3 Calcul théorique du couple moteur nécessaire



Plusieurs hypothèses sont choisies pour connaître le couple moteur nécessaire. Dû à ces approximations nous prenons un coefficient de sécurité de 3 ( $s=3$ ).

Tout d'abord nous considérons que le matériau du tuyau interne santoprène comme un milieu élastique linéaire. De plus grâce aux roulements qui limitent grandement les contraintes de cisaillement nous considérons uniquement une contrainte normale au rayon du tuyau.

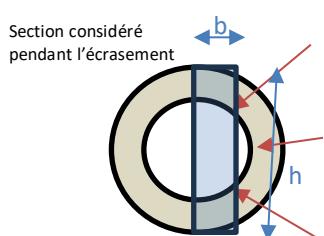
Nous pouvons donc utiliser la formule du comportement élastique uniquement sur une contrainte normale au rayon (équation de Lamé) :

$$\sigma_{rr} = \lambda\epsilon_{rr} + 2\mu\epsilon_{rr} = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)} * \frac{r_i}{r_o} + \frac{E}{(1+v)} * \frac{r_i}{r_o} = 122 \text{ MPa}$$

avec  $E$ : module d'Young et  $v$  : coefficient de Poisson

Nous considérons le santoprène comme étant équivalent au caoutchouc, nous choisissons donc  $E = 50 \text{ MPa}$  et  $v = 0.4$

Nous considérons que cette contrainte minimale pour appliquer la déformation  $\epsilon_{rr}$  est une contrainte en flexion du tuyau. Nous utilisons donc la formule de contrainte en flexion :



$$\sigma_f = \frac{M_f}{Z} \text{ avec } Z = \frac{I}{z} = \frac{bh^2}{6} \quad M_f = 12.25 * 122 = 1494.5 \text{ N.mm} = 1.5 \text{ N.cm}$$

Avec le coeff de sécurité de 3 on trouve  $M_f = 4.5 \text{ N.cm}$

### 6.4.2.4 Caractéristiques des moteurs des pompes péristaltiques (Motoréducteurs) :

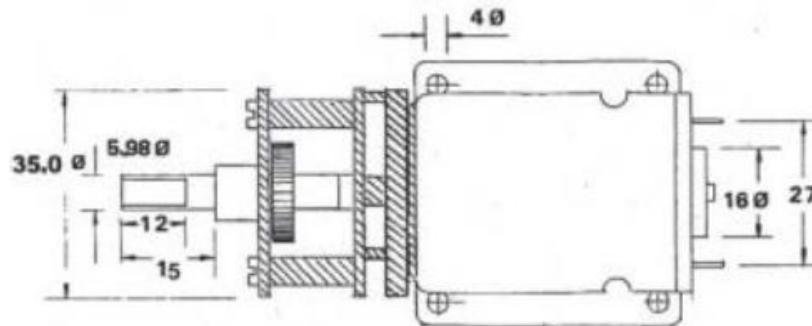
Le choix du motoréducteur s'est fait sur 2 caractéristiques : la tension d'alimentation de 6 ou 12V et la vitesse en sortie aux alentours de 100 RPM (sans charge). Le motoréducteur est donc une solution pour obtenir une vitesse de sortie suffisamment faible et avec assez de couple grâce à sa réduction. Ainsi si les frottements sont élevés le moteur sera capable d'endurer le pic de courant.

Le choix final s'est porté vers un motoréducteur de chez RS Pro présentant les caractéristiques suivantes :

12 V cc., 59 N.cm,

Moteur à engrenages cc.

Brossé, vitesse de sortie 98 rpm



Reduction Table RPM SUPPLY VOLTAGE	4.5v	6v	9v	12v	15v
238-9670	37	49	74	98	123

Note: Motor speeds may vary by (+) or (-) 12.5%

Figure 20 : Caractéristiques vitesse vs tension

**E3** La pompe péristaltique permet de pomper en continu jusqu'à l'arrêt du moteur, ce qui en théorie nous laisse la possibilité de prélever jusqu'à 250 ml. En pratique, avec la configuration choisie, et le moteur présenté ci-dessus, il nous faut entre 5 et 6 min pour prélever cette quantité.

### 6.4.2.5 Module liquide adapté à la pince

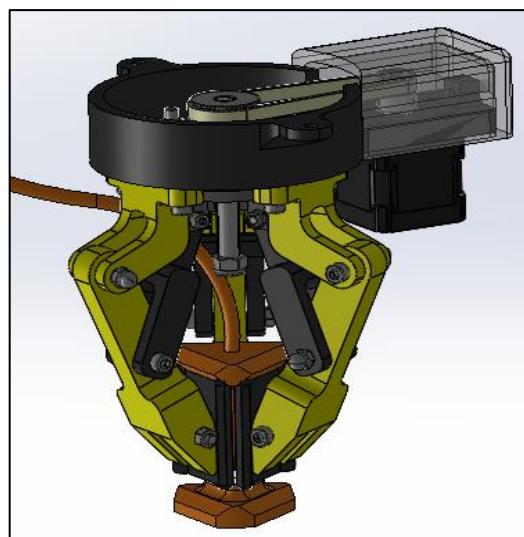


Figure 21 : Principe de fonctionnement du système de prélèvement de liquides

Il existe donc 3 modules embarqué sur le SySM@p. Les modules sont récupérés successivement par le robot afin d'effectuer les prélèvements requis. Les prélèvements peuvent être réalisés en contrôlant la position de la pince. Le liquide est ensuite stocké dans des bouteilles spécialement conçues à cet effet (voir section Stockage Liquide [6.5.2](#)). Une fois un prélèvement effectué, le module utilisé peut être remis en place dans sa zone d'origine.

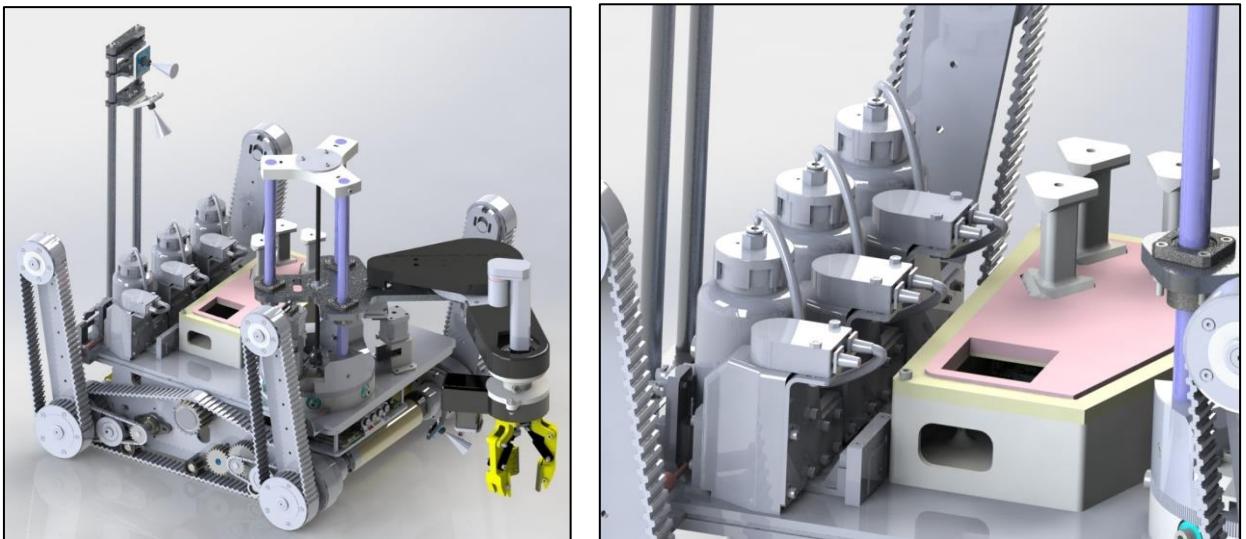


Figure 22 : SySM@p monté pour prélevements liquide

### 6.4.3 Prélèvement Poussière

Notre solution de prélèvement poussiére, basée sur le principe des camions de nettoyage de rue, comporte une seule brosse de trois branches avec un moteur qui entraîne sa rotation. L'ergonomie de la solution poussiére, imprimée en 3D, a été pensée pour permettre sa mise en mouvement par la pince et une meilleure conservation de la poussière pendant le prélèvement. Equipée de quatre roues, celles-ci permettront un déplacement plus fluide et feront éviter au châssis du système prélèvement de poussière de frotter et de s'abîmer sur le sol.

*E5 Le système présenté ci-dessous permet de récupérer des grains de sable ainsi que de fines poussières à l'aide des fines brosses composants le balai*

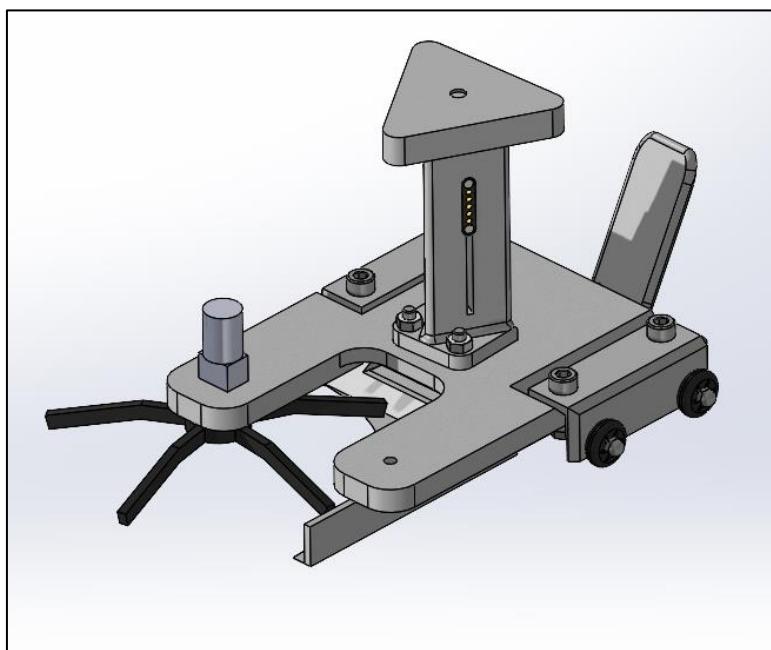


Figure 23 : Solution prélèvement poussière

### 6.4.3.1 Conception du module de prélèvement poussiére

Le module est composé de trois grandes parties :

- La trappe
- La poignée
- Le châssis

#### Le châssis

Le châssis est le corps principal qui permet de lier toutes les autres pièces pour former le module de prélèvement poussiére. C'est lui qui accueille les supports pour les roues, la trappe et la poignée. Toutes ces pièces sont maintenues par des vis et des écrous.

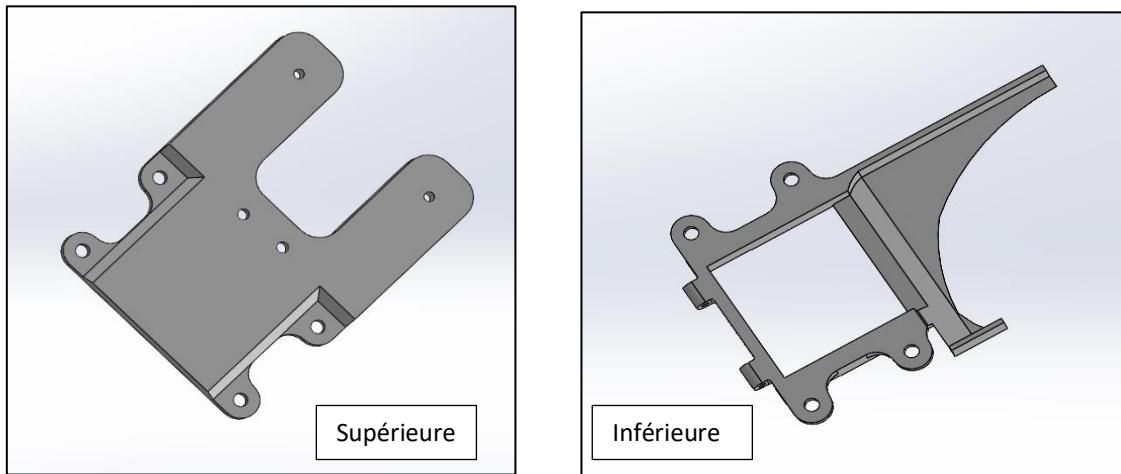


Figure 24 Partie supérieure et inférieure du châssis solution prélèvement poussiére

La balayeuse en bout de pièce est entraînée par un moteur similaire à ceux des robots aspirateurs d'intérieur. Ce moteur équipé d'une tige filetée et d'un système d'engrenage permet d'entrainer la brosse. Caractérisé par un rapport de réduction 1 :53, le moteur permet la rotation de notre brosse avec un couple suffisant et une vitesse adaptée pour un prélèvement de qualité.

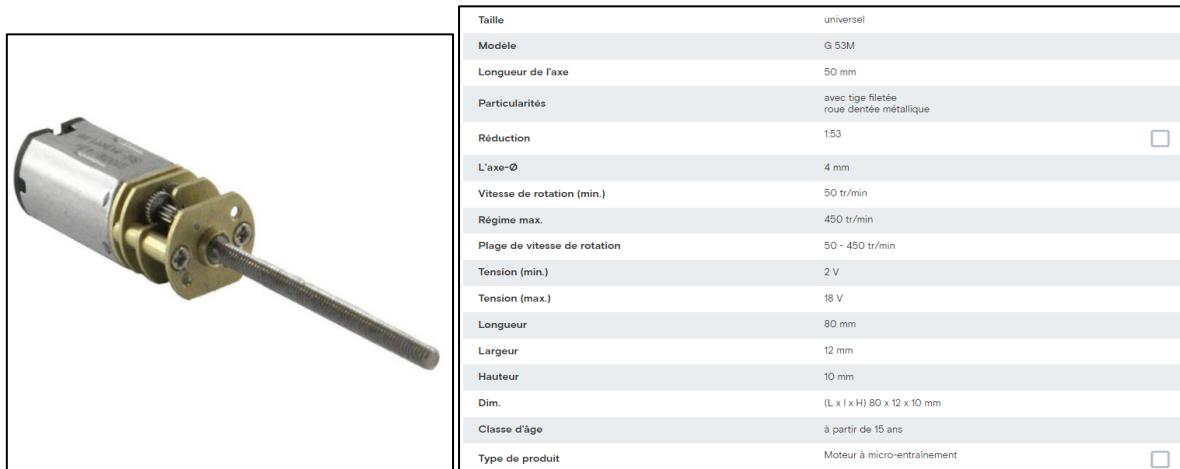
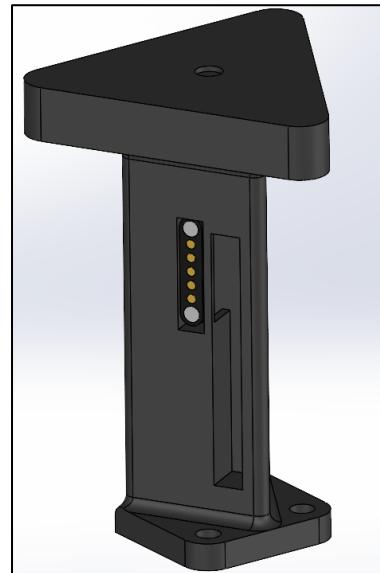


Figure 25: Sol Expert 39887 Motorréducteur G 100M

## La poignée

La poignée, adaptée aux trois doigts de la pince, est composée de pins magnétiques qui permettront l'alimentation du moteur et par conséquent la rotation de la brosse. Ils assureront aussi le maintien de la poignée par la pince.

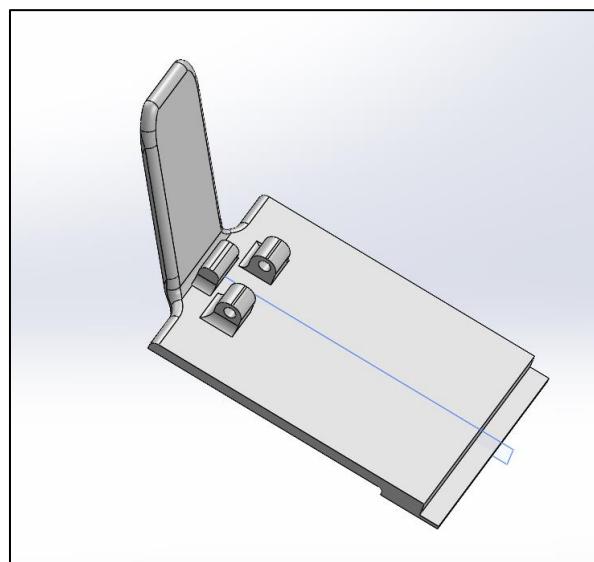


*Figure 26: Poignée solution prélèvement poussière*

Les pins magnétiques qui sont fixés sur la poignée, sont reliés au moteur qui entraîne la rotation de la brosse. C'est par effet magnétique entre la pince et le pin qu'un courant se « crée » et alimente le moteur.

## La trappe

La trappe, en liaison pivot avec le châssis par une tige filetée, servira à réceptionner la poussière pendant le prélèvement. Maintenue fermée par un ressort de torsion, la trappe ne desservira la poussière dans les systèmes de stockage que par l'action d'une pression sur la partie supérieure la trappe.



*Figure 27 : Trappe solution prélèvement poussière*

Cette action permettra à l'échantillon de tomber dans le système de stockage. La pression exercée sur la partie supérieure de la trappe entraînera une compression du ressort qui ouvrira la trappe. Ce ressort de torsion de

chez VANEL possédant une constante de raideur  $K = 10.51 \text{ N.mm}$  a été dimensionner pour mouvoir la trappe dont la masse est de 43g.

$$m = \left( \frac{K}{g * d} \right) = \frac{10.51}{9.81 * 4.5} = 0,233 \text{ Kg}$$

$g$  : pesanteur terrestre  $9.81 \text{ N.Kg}^{-1}$

$d$  : bras de levier de la tige du ressort : 4.5 mm

$K$  : raideur du ressort 10.51 N.mm

$m$  : masse que peut déplacer le ressort en Kg.

Nous venons de montrer qu'avec ce ressort nous pouvons déplacer une masse de 0,233 Kg qui est supérieur aux 0,043 Kg de la trappe.



## DÉTAILS

- Nom du produit : G.032.040.0975
- Diamètre du fil. (mm): 0,4
- Diamètre interne (mm): 2,4
- Poste Diam. (mm): 3,2
- Libérez Len. (mm): 4,3
- Longueur de jambe (mm): 12,8
- Arbre (mm): 2
- Couple maximal (N·mm) : 10,51
- Nb de bobines : 9,75
- Position des jambes (°) : 270
- Alphan Max (°) : 270,1
- Taux de ressort (daN/mm) : 0,0389
- Force maximale (daN) : 0,821094
- matériel: acier inoxydable
- Poids (g) : 0,110359
- Endurance : 1 000 000
- Rotation : 1

Figure 28: Ressort de torsion solution prélevement poussière

## 6.4.4 Prélèvement Frottis

Comme énoncé dans le cahier des charges, il doit être possible avec le SySM@p de réaliser des frottis. C'est-à-dire, faire un prélevement de matière sur une surface, et de pouvoir mener des études à postériori de l'intervention.

La solution retenue est de venir frotter un tampon, en contact direct avec la zone définie, et puis de le stocker dans les boîtes de stockage. Il nous faut donc dimensionner un tampon et définir le matériau à utiliser pour respecter au mieux le besoin client.

### 6.4.4.1 Outil de prélevement

Afin de garder une solution simple et modulable, nous décidons encore une fois de mettre en place un outil récupérable avec la pince.



Figure 29 Tampon frottis

Comme présenté ci-dessus, l'outil prend la forme d'un tampon de dimensions 76x46 mm donc de surface de 35cm<sup>2</sup> avec le sol. Sur la surface inférieure, il faut mettre en place une « bande de frottement » dont le matériau reste encore à déterminer à cette étape. Cette bande est fixée à l'outil par le biais d'un élastique qui vient se loger dans la gorge et maintenu à l'aide de six petits clous. De la même façon que pour le prélèvement liquide, 3 modules distincts sont embarqués lors d'une opération (pour valider l'exigence **E9** *Le système doit collecter 3 échantillons du même type par investigation*, pour les frottis). Ce système de prélèvement sera aussi stocké sur la boîte permettant de ranger l'électronique de notre SySM@p. Une plaque d'interface unique aux frottis en plexiglass, rend le changement de configuration rapide et facile. Les 3 modules seront donc accessibles par notre pince afin qu'elle puisse les prendre et réaliser les différents frottis.

#### 6.4.4.2 Choix du matériau

Finalement, il nous faut choisir le matériau utilisé pour être en contact avec le sol : résistant aux frottements, mais assez souple pour pouvoir être récolté. Il nous est apparu 2 matériaux évidents : le coton (application de frottis sur la peau) et les lingettes électrostatiques (utilisées dans le nettoyage de sol poussiéreux). Après avoir mené des tests sur différentes surfaces et matières à frotter (craie, feutre, peinture, dépôt de charbon...) nous nous sommes orientés vers l'utilisation des lingettes électrostatiques : une utilisation adaptée, grande disponibilité et plus facile à monter avec notre tampon.

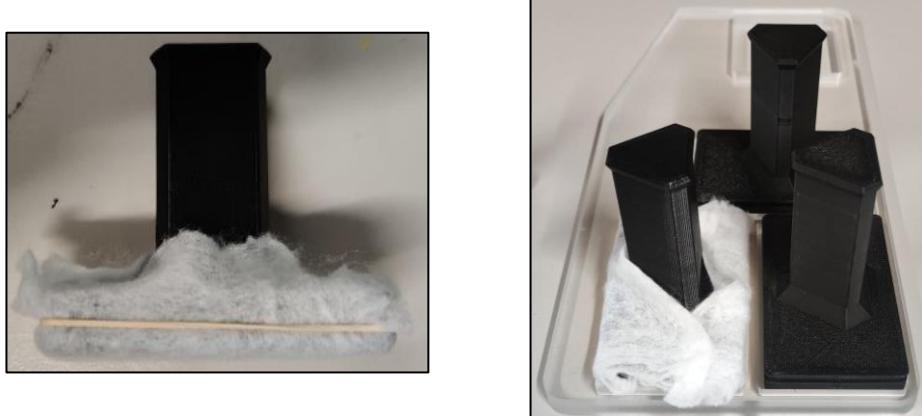
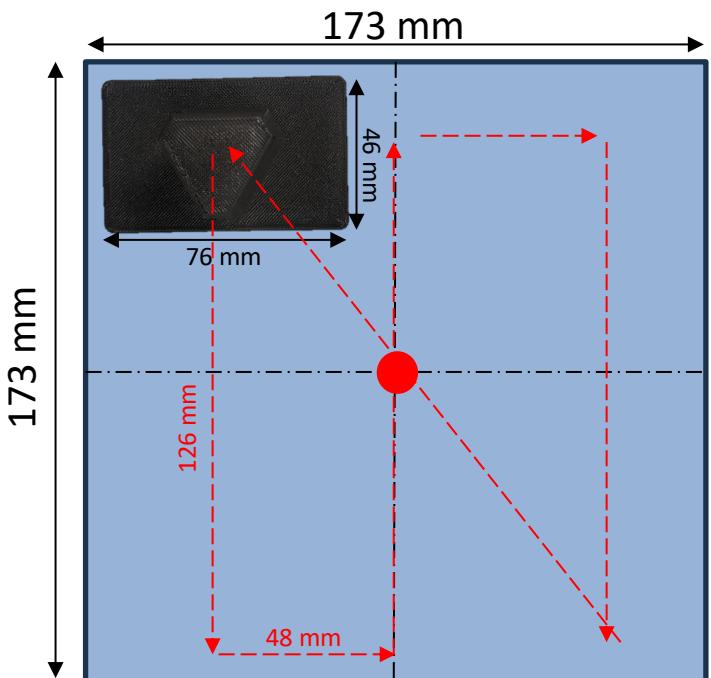


Figure 30 Module frottis complet

### 6.4.4.3 Tracé en opération

Afin de respecter les exigences liées aux frottis **E7** (Le SySM@p doit réaliser un frottis jusqu'à 300cm<sup>2</sup>) et **E8** (Le système doit connaître les dimensions du frottis réalisé) nous choisissons de définir en amont une macro permettant de tracer une zone de 300 cm<sup>2</sup>.

Cela permet d'être sûr de frotter sur la bonne surface en ayant une bonne accessibilité et ne se contraignant pas.



### 6.4.5 Plaques d'interfaçage boîte électrique

Comme vu précédemment, afin de rendre le changement de configuration simple et rapide, nous nous efforçons de mettre en place une solution modulable à tous les niveaux. Cela passe notamment par la mise en place de plaques nous permettant de disposer les modules de prélèvements pour chaque type de mission. Cette plaque, située au-dessus de la boîte électrique, possède des contraintes dimensionnelles et d'isolation (électrique, thermique et imperméabilité). Pour rappel, il existe avec notre solution, 3 types de modules (liquides, poussière et frottis) de formes différentes, il nous faut donc développer 3 plaques uniques. Chaque plaque possède le même contour, suivant la forme de la boîte électrique, mais différents emplacements, donnés par la contrainte d'accès du bras (rayon de 23.88 cm du centre de rotation de la base inaccessible) et par la forme des modules posés.

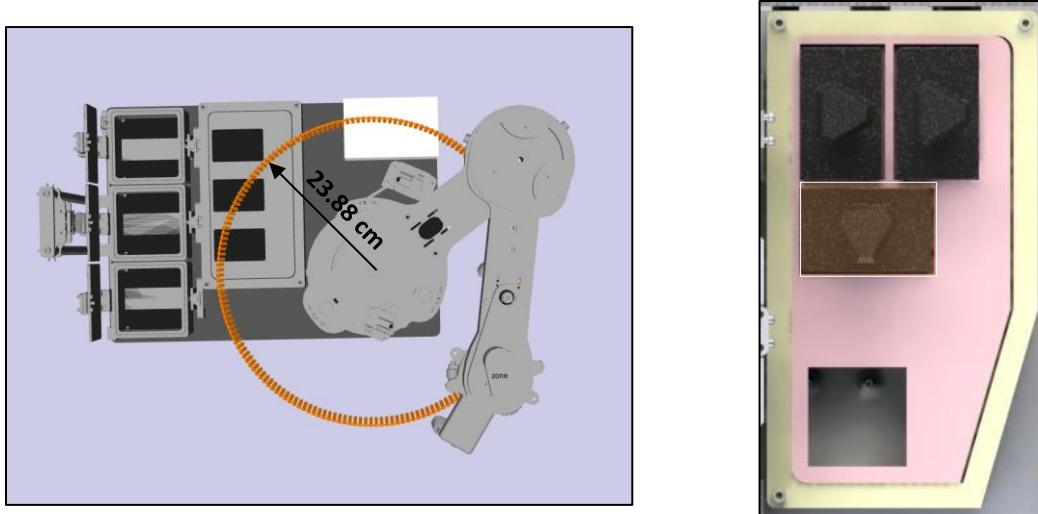


Figure 31 Contraintes liées à la plaque d'interfaçage des modules

Pour des questions d'accessibilité, de facilité de façonnage mais aussi d'esthétique, nous utilisons du PMMA coulé (dans notre cas le Plexiglas®) pour ces plaques.

### 6.4.6 Stockages

Considérant le cadre d'intervention du SySM@p, en milieu radioactif, il nous est primordial de prendre des précautions quant au stockage des prélèvements. En effet, cela se traduit par le respect de l'exigence E10 *Le système doit collecter les échantillons dans des emballages fermés*. Nous allons voir dans cette partie les deux solutions mises en œuvre pour satisfaire les différents types de prélèvements.

#### 6.4.6.1 Solide/Poussière/Frottis

Le système de stockage solide est composé de trois cellules modulaires. Chaque cellule de stockage (100 x 100 mm) est indépendante et permet le stockage de formes de 10cm de côté (E1 et E9). Aucune connexion électrique n'est nécessaire afin de faciliter la modularité et le pilotage. La mobilité des sous -éléments s'actionne uniquement par effort mécanique.

Un sous-ensemble est composé de :

- Une cuve qui réceptionne les prélèvements solides, poussière ou frottis. Cette cuve possède une rainure sur la face supérieure afin d'accueillir un joint d'étanchéité de type boudin (exigence E10)
- Un capot qui pivote autour de la cuve. Le capot est fixé sur une tôle avec une charnière à ressort intégré. Une bride permet de le fixer sur sa tôle, son fonctionnement est expliqué en Figure 28.
- Un verrou à basculement, il permet de maintenir le capot en position fermé. Il fonctionne par appui, un appui pour le verrouiller et un autre appui pour le déverrouiller.

- Une tôle pliée qui permet le guidage de la cuve et maintenir l'ensemble fermée

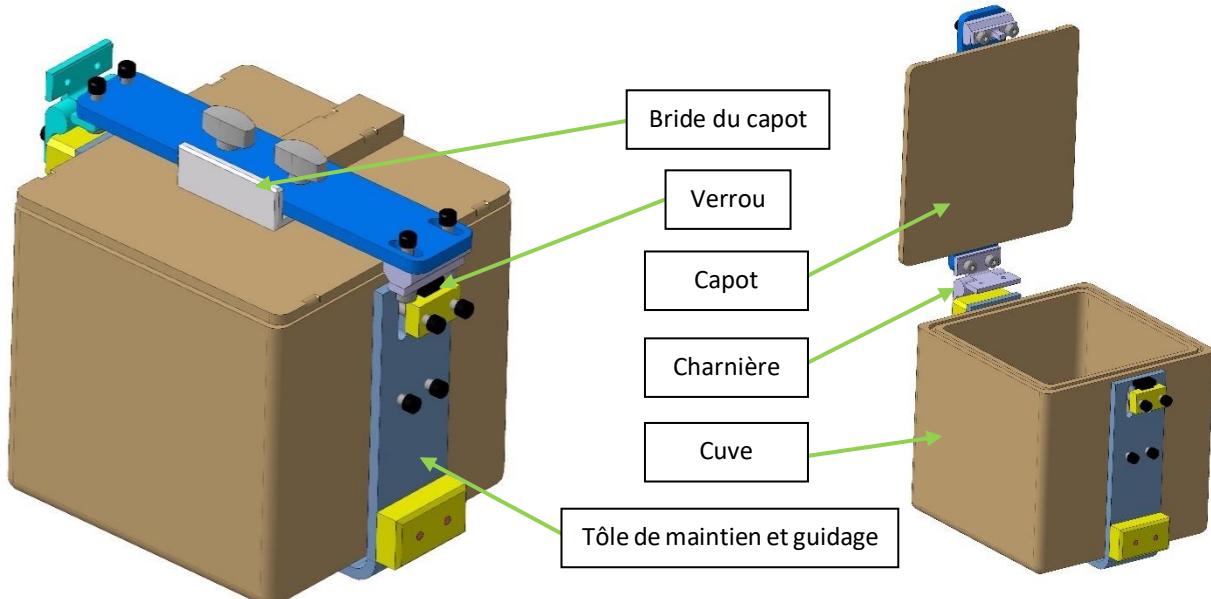


Figure 32 : Vue de détail d'un stockage solide

Ce système permet au SySM@p d'entrer dans la zone d'intervention avec l'ensemble fermé et étanche. La pince vient ensuite ouvrir un capot en appuyant dessus avant de commencer un prélèvement. Elle le referme après avoir déposé un prélèvement.

Ce système de stockage est utilisé pour les prélèvements frottis, puisqu'ils sont effectués sur une surface de 70 x 70 mm et qu'ils sont de ce fait stockables dans les cellules de stockage.

L'ensemble est fixé à la plaque d'interfaçage de la base mobile à l'aide d'un centrage sur la partie avant et d'une barre de maintien sur la partie arrière. Cet ensemble est facilement démontable grâce à un doigt d'indexage en T.

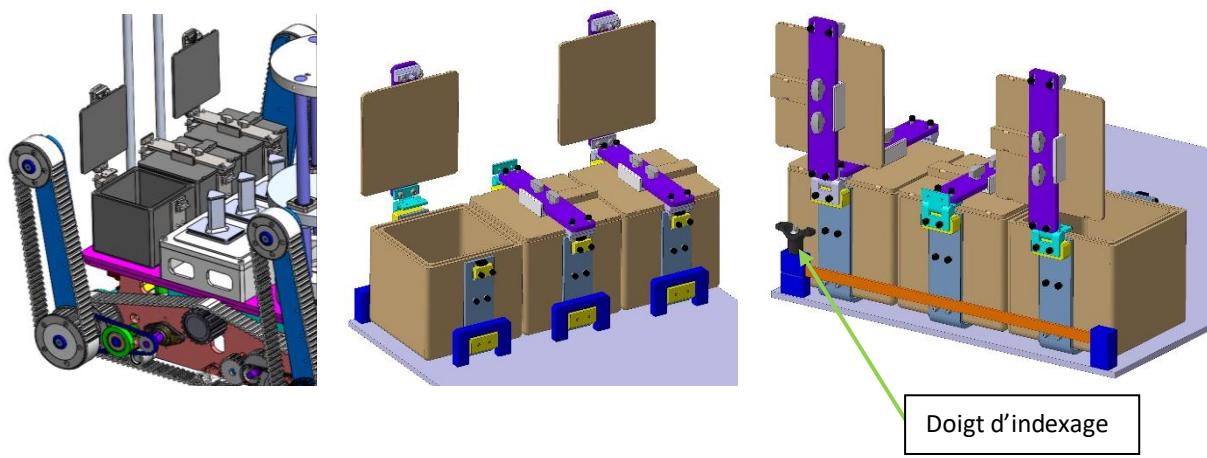


Figure 33 : Vue d'ensemble stockage solide

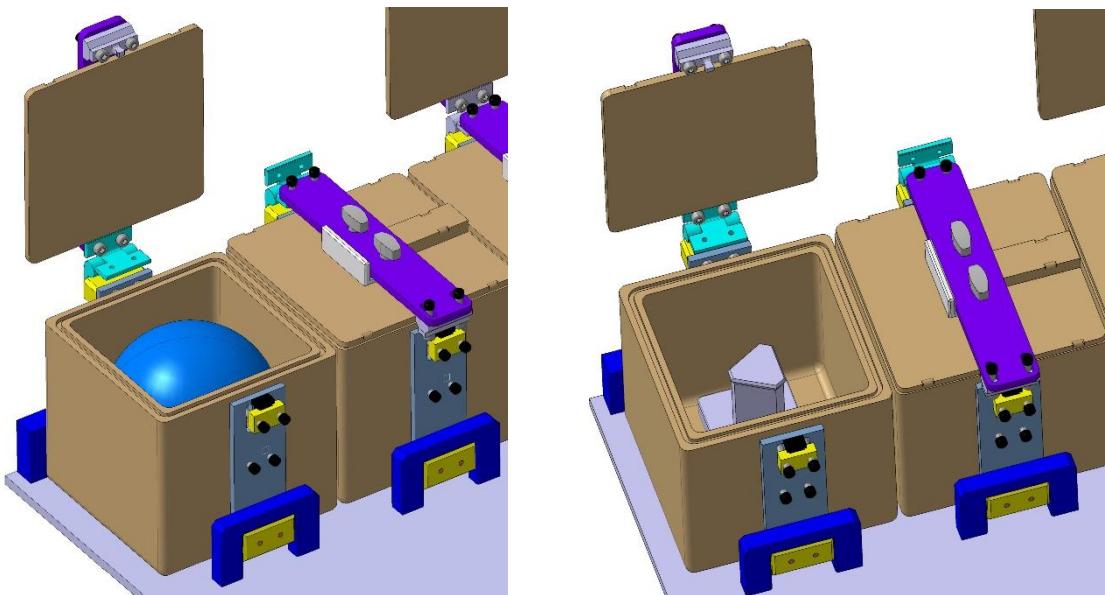


Figure 34 : Stockage solide, exemple avec prélevements solide et frottis

Le stockage a été conçu de manière que la cuve et le capot soient à usage unique. Le cerclage autour est réutilisé pour chaque opération. Le capot est maintenu en place grâce à une bride fixée sur la barre supérieure à l'aide de deux vis à tête papillon.

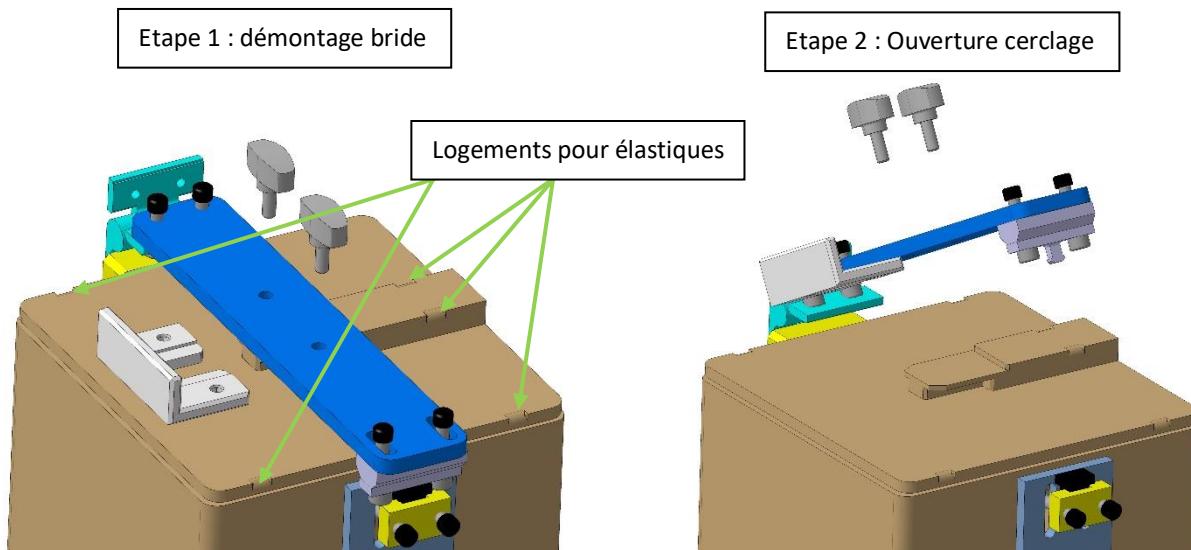


Figure 35 : Animation ouverture cerclage stockage solide

Ce montage permet lorsque le prélevement est effectué d'ouvrir le cerclage sans ouvrir la boîte. La boîte est ensuite directement expédiée au laboratoire et le cerclage réutilisable de suite pour d'autres prélevement. La boîte est entourée de deux élastiques pour garder l'étanchéité.

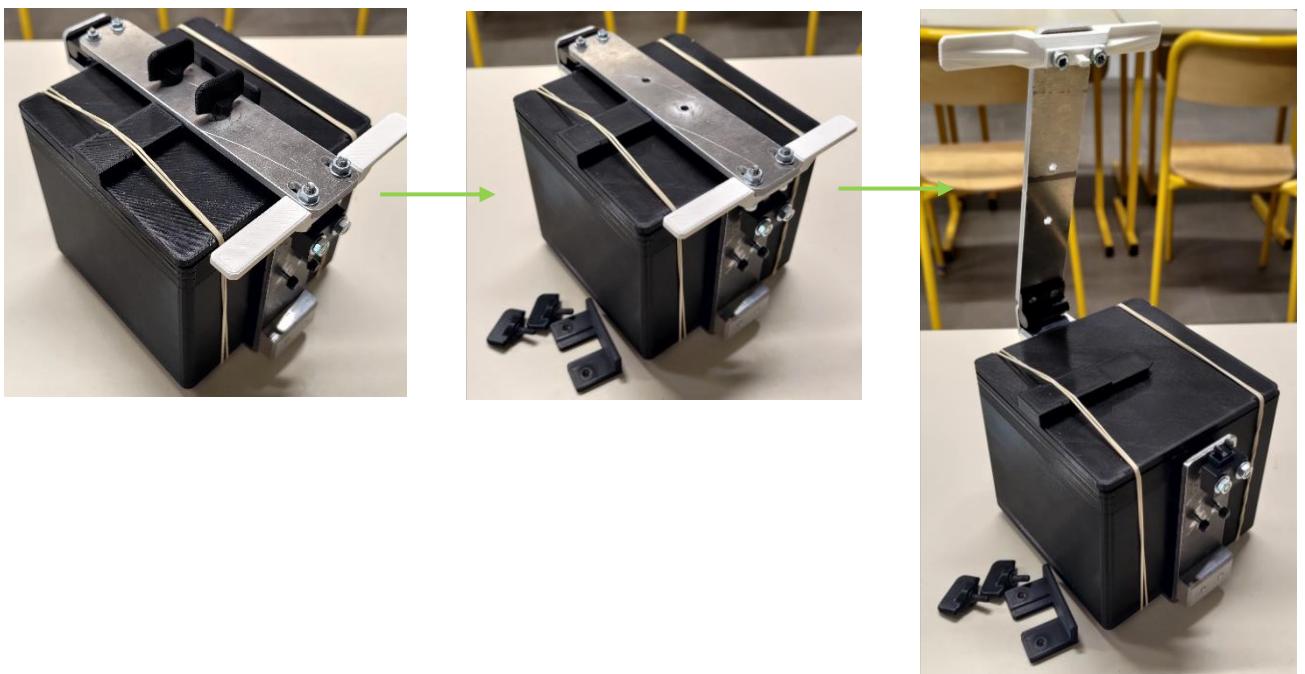


Figure 37 : Explications extraction Cuve + Capot



Figure 36 : Explications Montage Cuve + Capot avant intervention

Pour stocker la poussière, le couvercle des stockages est utilisé pour déclencher le sous-ensemble permettant l'ouverture de la trappe du système de prélèvement de poussière.

**E6** Le SySM@p doit stocker 100g de poussière : les boîtes de 1000 cm<sup>3</sup> utilisées pour le stockage des poussières permettront de largement stocker la quantité voulue pour chaque opération

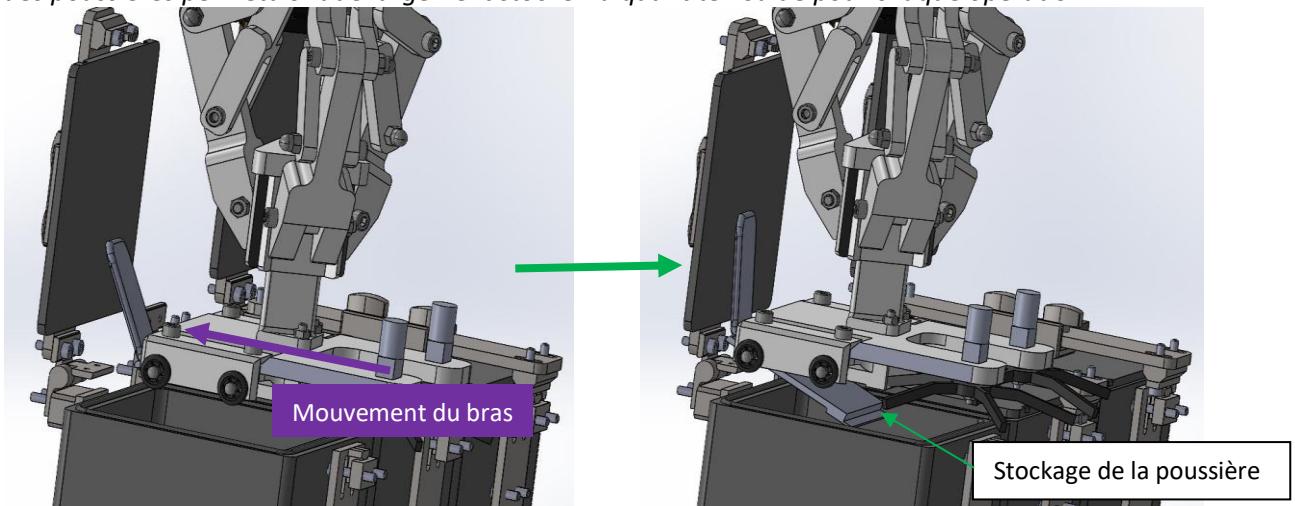


Figure 38 : Système d'ouverture de trappe pour stocker la poussière

### 6.4.6.2 Liquide

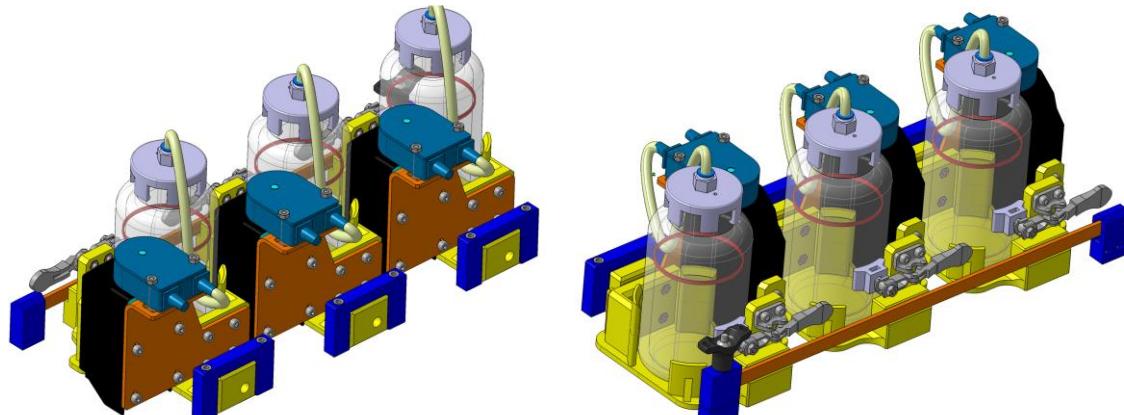


Figure 39 : Vue d'ensemble stockage liquide

Les éléments à usinages uniques sont : les bouteilles, les bouchons, les raccords et les tuyaux.

Les bouteilles sont à positionner dans l'emplacement prévu avec leur bouchon. Le bouchon est clipsable sur la bouteille et le raccord est à visser au centre du bouchon. La bouteille est maintenue sur le support grâce à l'appui d'une sauterelle fixée à l'arrière de du stockage. Il y a ensuite la connexion électrique à faire pour alimenter le moteur en électricité.

L'ensemble est fixé sur la plaque d'interface avec les mêmes fixations que pour le stockage solide. Un centreur à l'avant et une barre de plaquage à l'arrière.

Les bouteilles liquides cylindriques ont une capacité de 250 ml afin de correspondre à l'exigence suivante :  
**E4** Le SySM@p doit stocker 250ml de liquide

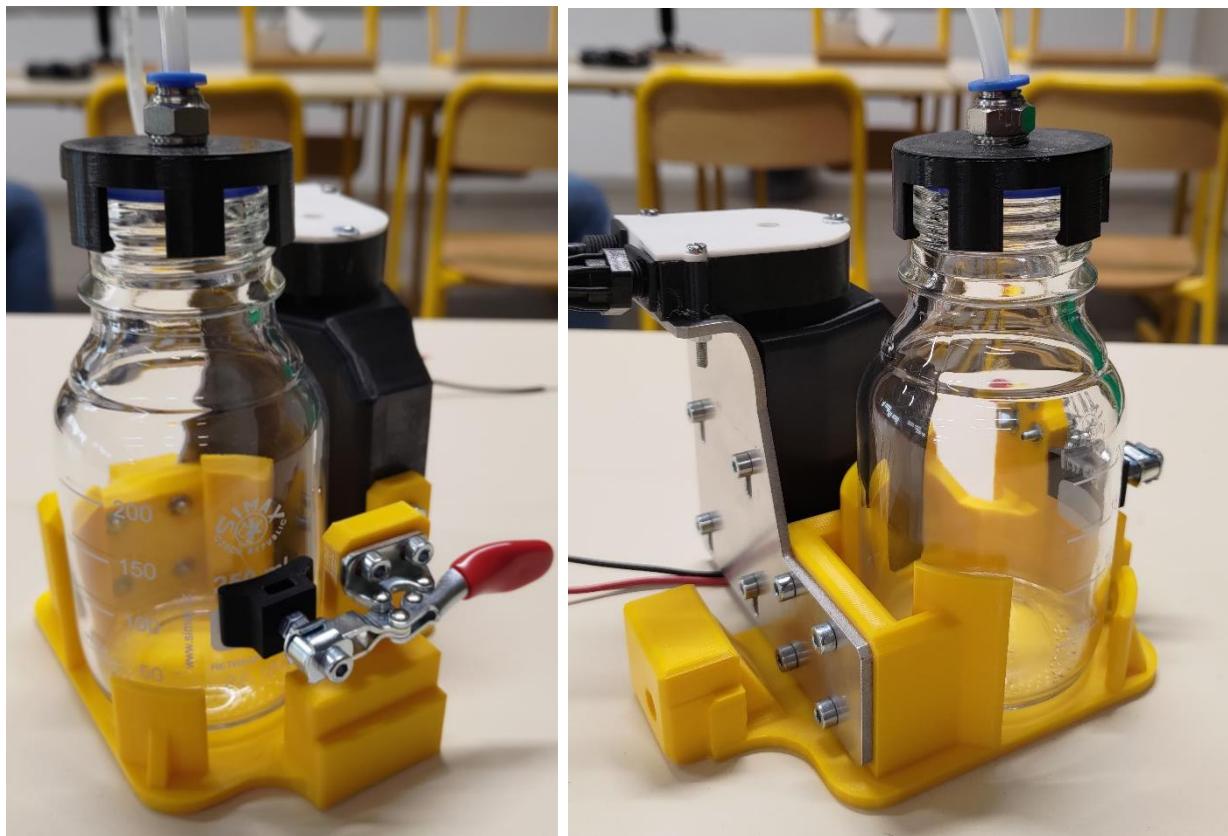


Figure 40 : Photos Sous Ensemble Stockage liquide monté

### 6.4.7 Aileron

L'aileron est le sous-ensemble servant de support aux 2 caméras arrière du SySM@p et au spot LED. Afin de permettre un bon éclairage et une vision des caméras sur l'ensemble du SySM@p, l'aileron situé à l'arrière de la plaque d'interface, juste derrière les stockages d'échantillons, surplombe le système. Il est possible de régler la hauteur des caméras ainsi que du spot LED.



Figure 41 Photo de l'aileron

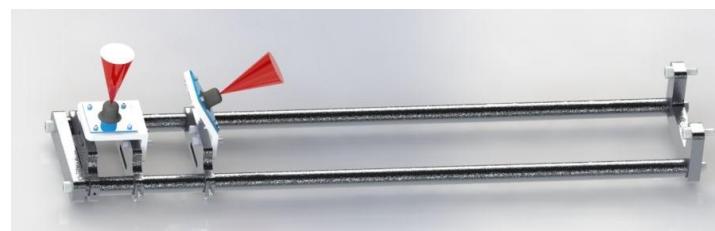
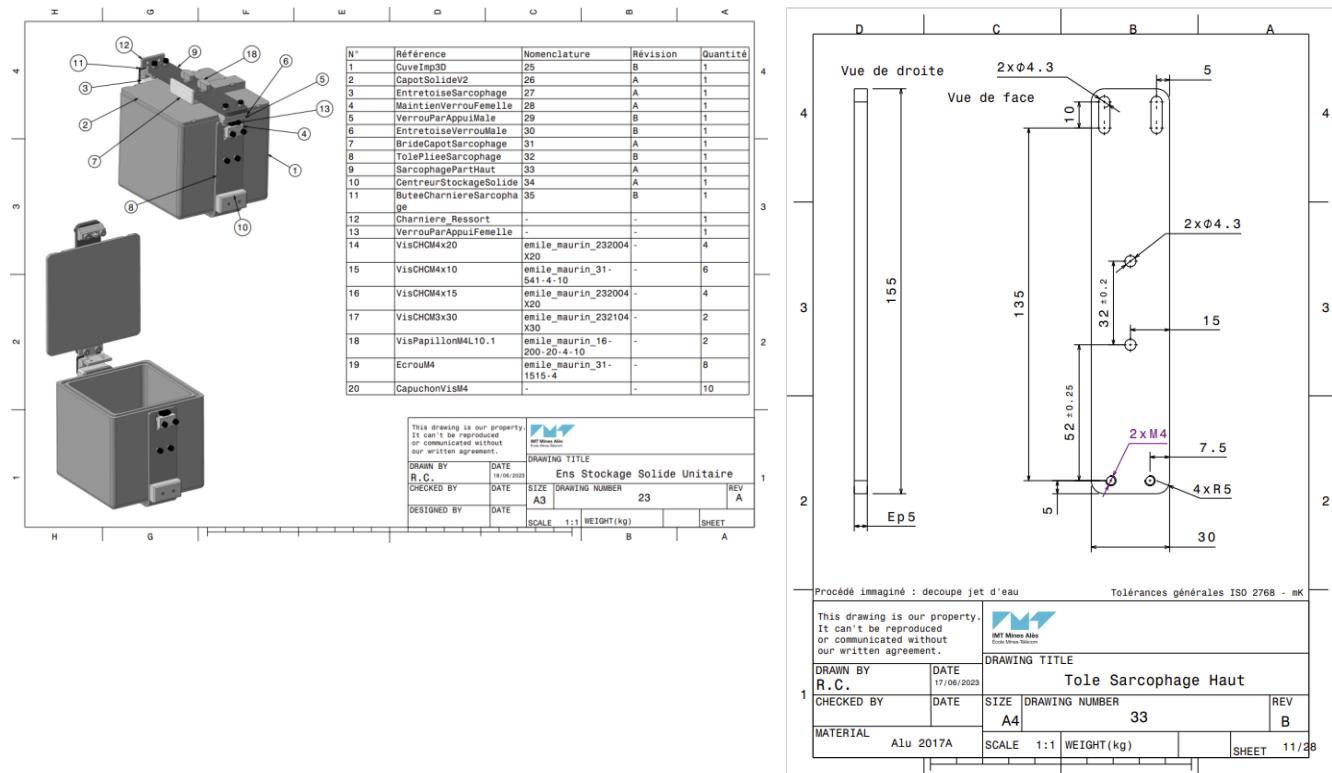


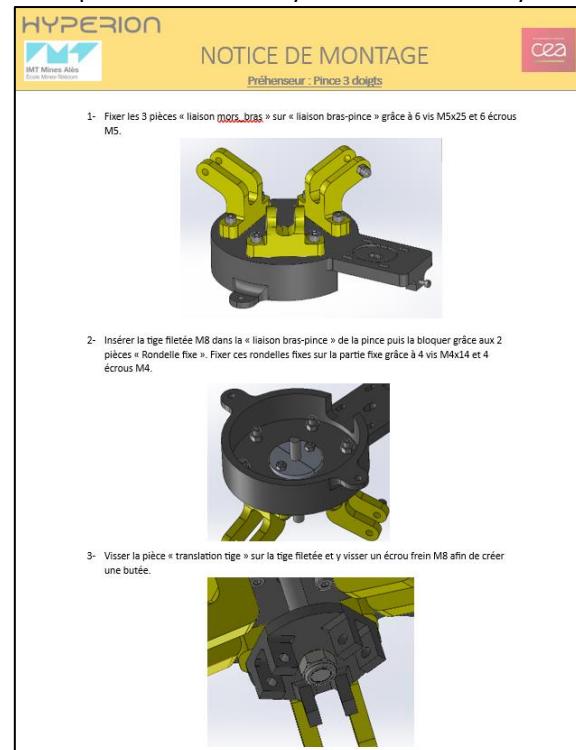
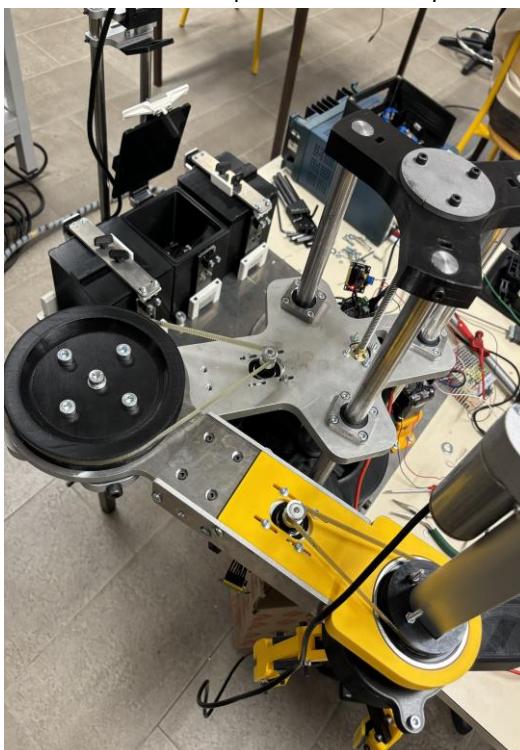
Figure 42 Représentation 3D de l'aileron

## 6.4.8 Réalisation des plans et du prototype.

Chaque pièce doit être fabriquée selon des spécifications précises, des ajustements spécifiques et des matériaux déterminés. Dans cette optique, les plans ont été créés afin de pouvoir réaliser le Sysm@p.



Après avoir apporté les ajustements nécessaires, nous avons entrepris la fabrication du prototype. Cette démarche nous a permis de d'abord assembler la mécanique du Sysm@p avant de passer à l'intégration de la partie électronique. Une fois le montage effectué, nous avons élaboré toutes les instructions de montage pour faciliter la réalisation et l'assemblage rapides du SySM@p. Ces instructions incluent également un guide de maintenance avec des pièces détachées que nous pourrons remplacer au cours du cycle de vie de notre système.



## 6.5 Architecture électronique

L'architecture électronique du SySM@p permet d'alimenter tous nos actionneurs comme nos moteurs, lumières et le vérin mais aussi de recevoir des informations de nos différents capteurs. Au sein de cette architecture nous retrouvons le « cerveau » de notre SySM@p, un micro-ordinateur Raspberry Pi4. Une autre partie importante de notre architecture est notre carte puissance qui va permettre d'alimenter avec une tension adaptée tous nos composants. Notre carte reçoit du 24V d'une alimentation à découpage. En sortie de notre carte puissance on retrouve les tensions suivantes :

-24V qui va alimenter nos moteurs NEMA17 aux différents endroits du bras.

-12V qui notamment servir à alimenter nos 2 ponts en H qui servent à piloter nos 3 moteurs de prélèvements liquide et notre vérin. Le 12V sert également à alimenter le moteur de notre outil poussière. Enfin il permet d'alimenter notre projecteur.

-5V qui sert à alimenter notre carte Raspberry pi et nos cartes SPI vers CAN.

Pour réaliser la communication entre notre Raspberry Pi et nos différents moteurs nous utilisons un bus CAN. Ce bus prend place tout le long de notre bras avec une carte SPI->CAN en sortie de la Raspberry et une carte CAN->SPI avant chaque p̄stepper. Le grand avantage de ce bus est de limiter le nombre de câble le long du bras.

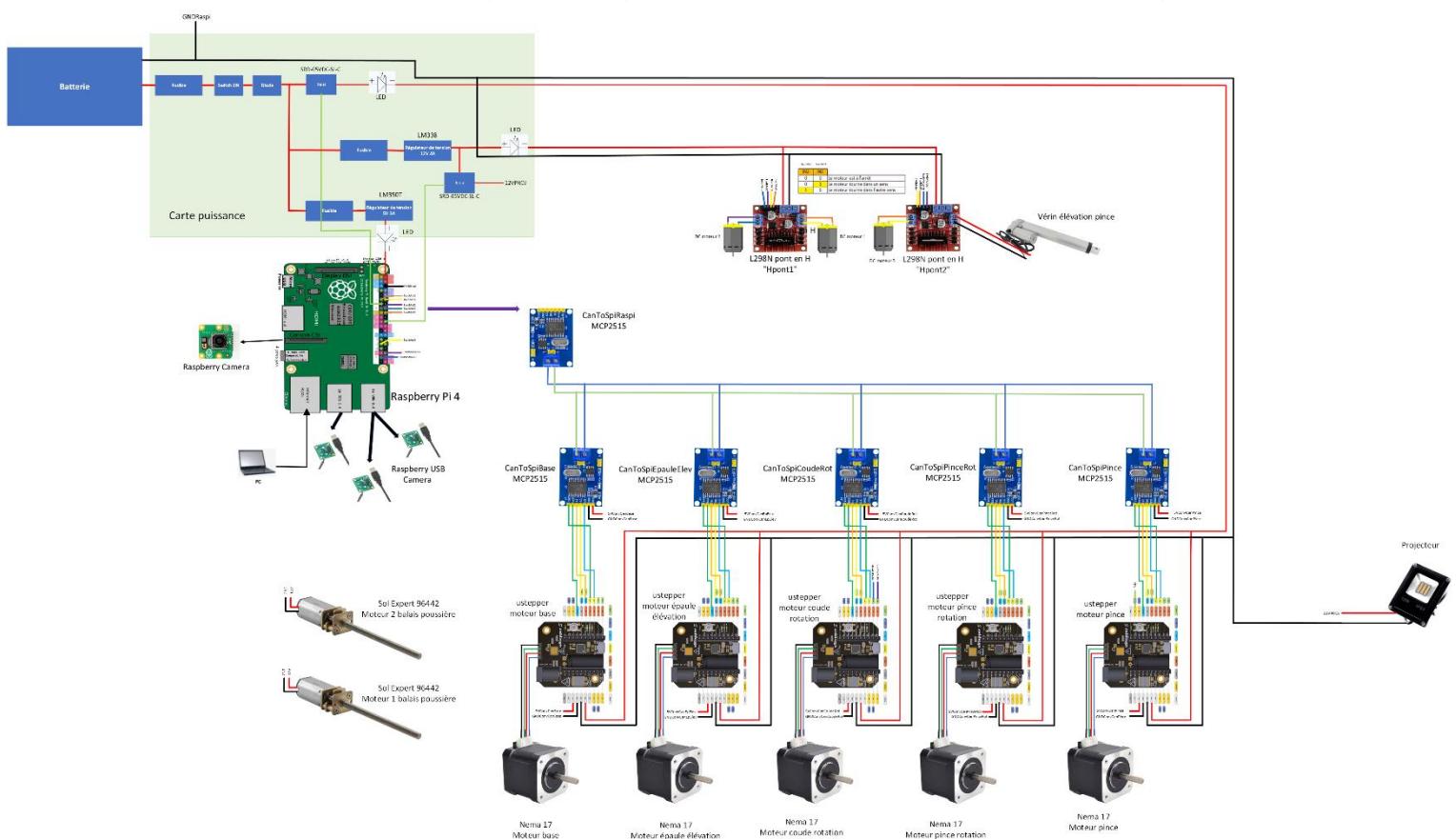


Figure 43 : architecture électronique détaillée

## 6.5.1 Raspberry Pi

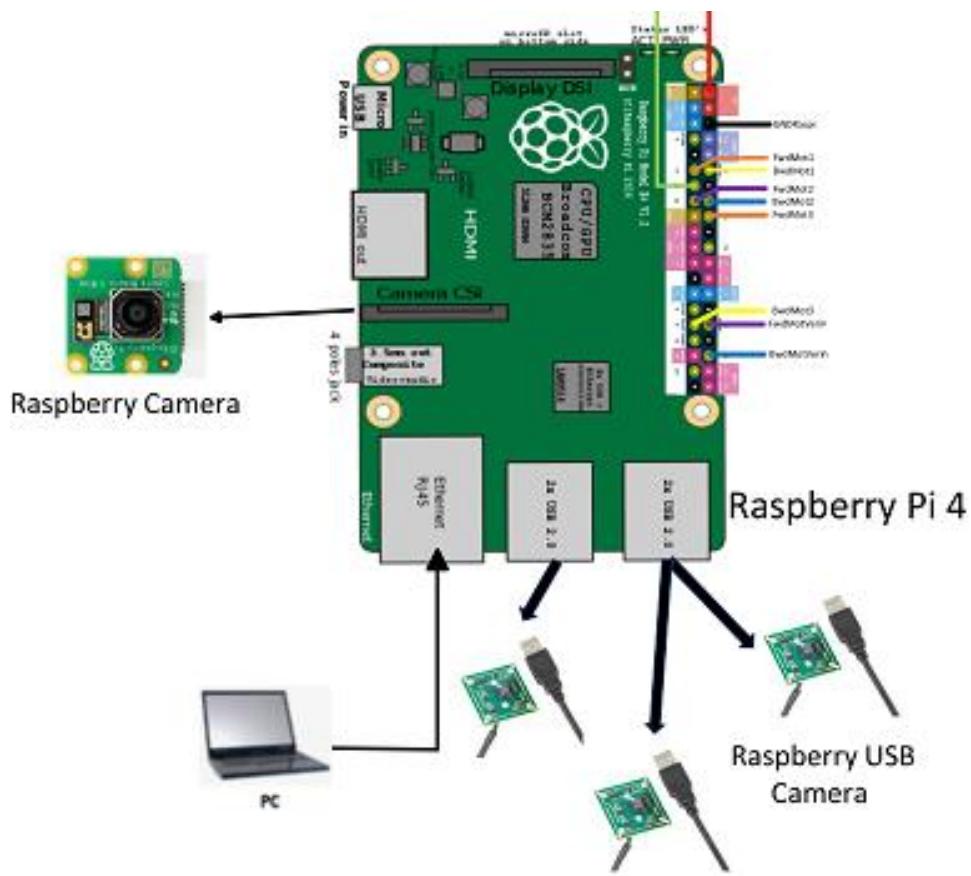


Figure 44 : Représentation des connexions au niveau de la Raspberry Pi

Le Raspberry Pi est le composant central de l'architecture électronique du système, il reçoit via son port Ethernet ou par WIFI les commandes du poste d'affichage et traite ses commandes en pilotant les différents éléments de Sysm@p. C'est également par lui que les retours d'informations des différents modules transitent. Son rôle consiste à commander les moteurs pas à pas via les uStepper, ainsi qu'un vérin et le projecteur également via les uStepper. Elle communique avec les uStepper en utilisant le bus CAN.

De plus, la Raspberry Pi gère les 3 caméras et assure la commande des 3 moteurs pour le prélèvement liquide. Elle pilote aussi un relai pour activer ou désactiver l'alimentation des moteurs. Pour les besoins de Sysm@p, un Raspberry Pi 4, performante, a été choisi.

La gestion du flux vidéo du Sysm@p est prise en charge par la Raspberry Pi 4. Elle est flashée d'un OS Ubuntu Linux en version 20.04 afin de pouvoir accueillir une version stable de ROS Noetic.

Cette carte gère 3 caméras via ses ports USB. Pour éviter une surcharge de la carte, les vidéos des 3 caméras ne sont pas affichées simultanément. La qualité de la vidéo est limitée à 720p et 16 ips.

L'ensemble des données sont communiquées vers le PC IHM via une connexion Ethernet ou en wifi le cas échéant.

## 6.5.2 Puissance requise

Afin de déterminer la puissance requise pour alimenter tout le système, un bilan de puissance a été réalisé. Il permet de répertorier les composants critiques pour l'alimentation et ainsi de calculer les besoins de chacun d'eux. Ainsi il est possible de calculer la puissance totale dont le Sysm@p aura besoin.

Bilan de puissance Sysm@p HYPERION						
Composant	Scénario	Tension (V)	Courant (A)	Puissance (W)	Qté	
Actionneur linéaire	Tous	2,8	3,36	25	1	
Moteur du bras	Tous	2,8	4	25	4	
Projecteur	Tous	12	0,83	9,96	1	
Vérin	Tous	12	3	36	1	
Raspberry pi4	Tous	5	3	15	1	
Moteur aspirateur	Poussière	12	0,1	1,2	2	
Moteur pompe péristaltique	Liquide	12	2,75	20	3	
					Consommation max instantanée 206,96	
Batterie choisie	<a href="https://www.masolise.com/industriel/56-b24007.html">https://www.masolise.com/industriel/56-b24007.html</a>					
Tension	24V					
24V	7Ah	168Wh		Courant max de décharge	20A	Puissance max instantanée 480W
Alim choisie	<a href="https://fr.rs-online.com/web/p/alimentations-a-decoupage/2336885">https://fr.rs-online.com/web/p/alimentations-a-decoupage/2336885</a>					
	24V	225W				

Figure 45 : Bilan de puissance du système

Le bilan de puissance a donc été fait en considérant les composants consommant le plus d'énergie. Malgré le fait que la puissance mécanique des moteurs est de l'ordre de 10W, la puissance qui a été retenue lors du calcul est de 25W, en effet, il est préférable de se placer dans le cas le plus défavorable où tous les moteurs accélèrent en même temps pour atteindre rapidement une position. La consommation d'un moteur dans ce cas peut atteindre jusqu'à 25W.

La consommation liée au prélèvement liquide est utilisée pour réaliser ce calcul car c'est dans ce scénario que la consommation est la plus élevée à cause des moteurs pour les pompes péristaltiques. Un seul de ces moteurs est actif à la fois.

Ainsi en faisant l'addition des puissances nécessaires, nous déterminons que la consommation maximum instantanée est de **206W**.

C'est cette consommation qui permet de dimensionner la batterie.

Les principales contraintes liées au dimensionnement de la batterie sont :

- La capacité en W qui doit être suffisante
- Le courant de décharge de la batterie qui ne doit pas être dépassé
- La taille de la batterie car la place liée à la batterie sur Sysm@p est limitée
- La technologie de la batterie doit être adaptée à l'environnement dans lequel le système évolue.

Après études, voici la batterie choisie :



Figure 46 : Batterie de référence B24007

La batterie choisie est donc une 24V 7Ah. Elle permet donc de délivrer 168W durant une heure. La mission du Sysm@p étant de seulement 30 minutes, la batterie convient parfaitement aux besoins (validant l'**E21** *Le SySM@p doit être capable d'effectuer 3 prélèvements avant recharge des batteries*). Pour faire cette déduction il est important de vérifier le courant de décharge de la batterie, il est ici de 20A. Il est donc possible en théorie de consommer jusqu'à 480W en instantanée.

Enfin, les dimensions de la batterie sont les suivantes : 150(L)mm x 98(l)mm x 95(h)mm, elles permettent une intégration parfaite à notre système.

La technologie de batterie LiFePO4 sont plus résistantes aux milieux sévères que les autres types de batterie. Dans le cas où l'alimentation par la batterie ne serait pas suffisante, il est possible de réduire largement la puissance nécessaire de notre système en faisant tourner les moteurs individuellement. En effet, grâce à notre robot de type SCARA, les moteurs consomment peu d'énergie lorsqu'ils ne sont pas utilisés, cette consommation est seulement liée au couple de maintien nécessaire pour empêcher l'arbre du moteur de tourner de manière indésirable.

Le système pourra également être alimenté par une alimentation à découpage lorsqu'une mise sur secteur sera disponible. Pour cela, une alimentation à découpage intégrée de 225W en 24V a été choisie. Elle se branche sur la carte puissance sur le même connecteur que la batterie et bénéficie du même circuit de protection. L'implantation de cette alimentation se fait au même emplacement que celui dédié à la batterie. Le changement de type d'alimentation de batterie à alimentation fiche ne nécessite donc aucun changement.

L'alimentation du système sera donc faite en respectant toutes les contraintes qui ont été définies.



Figure 47 : Alimentation à découpage réf 233-6885

**A l'issu des tests que nous avons réalisé sur le bras, la consommation maximum instantanée est inférieure à 206W. En effet, grâce à notre architecture mécanique de type SCARA, les moteurs n'utilisent pas leur puissance maximum ce qui permet de faire largement baisser la consommation. Également, le vérin consomme très peu d'énergie car il lève au maximum 1kg plus la masse de la pince alors qu'il est capable de soulever 150kg. L'alimentation du robot a donc été surdimensionnée par sécurité et permet de délivrer la puissance supplémentaire aux 50W de la base mobile ([E20](#)), mais en réalité la consommation du robot en condition réelle est assez modérée (environ 130W).**

## 6.5.3 Carte de puissance

La fonction principale de la carte de puissance est de réguler la tension de la batterie vers les tensions nécessaires pour alimenter notre système. Elle comporte également deux relais : le premier pour allumer/éteindre le projecteur, le second pour alimenter les moteurs une fois que la Raspberry a démarré et a la capacité de les piloter (ceci nous permet d'éviter tout mouvement non voulu des moteurs).

Un circuit de protection a également été mis en place comprenant plusieurs éléments. Tout d'abord, un fusible général est installé pour assurer la protection de l'ensemble du système. De plus, nous avons prévu un fusible avant chaque convertisseur afin de mieux protéger le circuit en aval de ces régulateurs. Également, une protection contre les inversions de polarité est mise en place avec une diode précédant le fusible général.

Pour fournir les tensions nécessaires à notre système, nous avons 2 régulateurs :

- Un de 5V 3A pour alimenter la Raspberry Pi.
- Un de 12V 4A pour alimenter le vérin, le projecteur, le moteur de la solution poussière et les moteurs continus des pompes. Les régulateurs supportent une large plage de tension d'entrée pour prendre en compte le fait que la tension de la batterie ne sera pas exactement de 24V.

D'autres composants sur la carte puissance sont trois LEDs. Une pour s'assurer que la carte est alimenté et les autres sont à la suite des relais pour montrer lorsque ceux-ci sont en fonctionnement.

Enfin, un pont diviseur de rapport de division 5 est utilisé pour lire la tension batterie. La tension est renvoyée sur une broche analogique de la Raspberry qui peut lire la valeur grâce au convertisseur analogique numérique dans la carte.

### 6.5.3.1 Problème avec la carte puissance

Lors de la conception de la carte, nous avons opté pour des régulateurs de tension linéaires, ce qui s'est avéré être une erreur de notre part. Ces composants ne sont pas conçus pour fournir une puissance élevée, en raison du courant que nous leur demandions en parallèle de la conversion de tension. Le composant avait trop de puissance à dissiper sous forme de chaleur et entrait en mode de protection.

Pour remédier à ce problème, nous avions modifié la carte puissance pour remplacer les régulateurs par deux modules tracopower. Seulement, ces composants arrivant la semaine de la soutenance il nous fallait une solution fonctionnelle dans l'éventualité où la carte ne pourrait pas être remplacé à temps.

Un des membres du groupe a fourni une carte 5V 3A que nous avons câblé au-dessus de la carte puissance, et pour le 12V M. Alexandre MEIMOUNI nous a aidé à concevoir un montage constitué d'un régulateur linéaire 15V relié à la base de deux transistors en parallèles équipés de dissipateurs auront le rôle de dissiper la puissance à la place du régulateur de tension.

Ce montage nous délivre du 14V en sortie (aussi ok pour notre système) et nous permet d'avoir une solution fonctionnelle pour tester le reste du système en attendant l'arrivée de la commande des tracopower s'ils arrivent à temps.

## 6.5.4 Moteur pas à pas

Les mouvements du bras sont pilotés à l'aide de moteurs pas à pas, qui sont simples d'utilisation, précis et offrent une grande répétabilité dans leurs mouvements.

Ces moteurs pas à pas sont particulièrement précis, avec une précision de 3 à 5 % pour un pas, et cette erreur n'est pas cumulative d'un pas à l'autre. Cette précision est d'une importance capitale pour nos besoins, car elle permet d'éviter l'accumulation d'erreurs lors des déplacements ou changements de direction du SySM@p.

Comme vu précédemment, le choix final s'est porté vers des NEMA17 (cf. Dimensionnement des moteurs en [6.3](#)), un moteur de 42x42mm offrant un excellent rapport qualité-prix sans compromettre la qualité. Sa taille compacte et sa légèreté sont essentielles pour notre solution compte tenu des contraintes d'espace. De plus, ce moteur est compatible avec les uStepper, ils permettront notamment de l'asservir en position pour gagner grandement en précision. Leur alimentation est faite via les uStepper en 24V.

Ces moteurs sont spécialement conçus pour fournir un couple élevé tout en minimisant les vibrations et le bruit audible. Les faibles vibrations contribuent à la précision de notre robot.

## 6.5.5 Contrôle moteur

L'uStepper est un microcontrôleur, driveur de moteur pas à pas, encodeur avec un régulateur de tension dans un design compact, fonctionnant sous Arduino. L'inconvénient principal des moteurs pas à pas est qu'il n'est pas possible de savoir s'ils se déplacent réellement vers la position d'instruction. Par exemple, si vous essayez de bloquer physiquement le moteur pendant son fonctionnement, il ne corrigera pas sa position et perdra des pas. L'uStepper permet de corriger ce problème en surveillant en permanence la position du moteur et le bon respect de l'instruction de commande. L'uStepper possède à la fois la capacité de piloter le moteur pas à pas, de surveiller la position et dispose d'un microcontrôleur programmable intégré (architecture de type Arduino) avec une large gamme d'entrées et de sorties. Tout cela emballé dans une très petite carte de circuit imprimé qui se fixe directement à l'arrière des moteurs pas à pas (Nema 17) sélectionnés à la suite de notre dimensionnement. Dans cette architecture, les uStepper communiquent avec la Raspberry Pi via un bus CAN et pilotent ainsi les moteurs pas à pas. Les uStepper choisis pour Sysm@p sont les uStepper S. Ils permettent de répartir les calculs et les commandes du système. Ces composants sont également utilisés pour venir mesurer la fin de course et les positions 0 de nos moteurs grâce à la mesure de courant. Lorsque les moteurs arrivent en butée, la résistance mécanique engendrée par la butée fait un appel de courant qui est mesurable.

Les uStepper sont donc des composants entièrement programmables qui vont également permettre de faire un asservissement en position des moteurs et ainsi délivrer une précision accrue. Leur régulateur 5V permet d'alimenter les cartes de conversion CAN vers SPI ce qui permet une nouvelle fois de réduire le nombre de câbles courants le long du bras. Les uStepper sont alimentés directement en 24V, ainsi ils peuvent alimenter les moteurs NEMA 17 en 24V et les piloter en courant. C'est de cette manière que sont pilotés les moteurs pour les imprimantes 3D. Les uStepper reçoivent les informations du bus CAN grâce au convertisseur CAN vers SPI. Le fusible visible est un fusible de protection qui est présent pour chaque alimentation de moteurs. Grâce à une librairie existante, le pilotage des moteurs est déjà en partie réalisé, les fonctions qui permettent aux moteurs de tourner sont réalisés et il suffit de choisir les arguments pour que la fonction exécute parfaitement la commande. Les commandes envoyées sur le bus CAN par la Raspberry Pi seront donc les arguments des fonctions des uStepper.

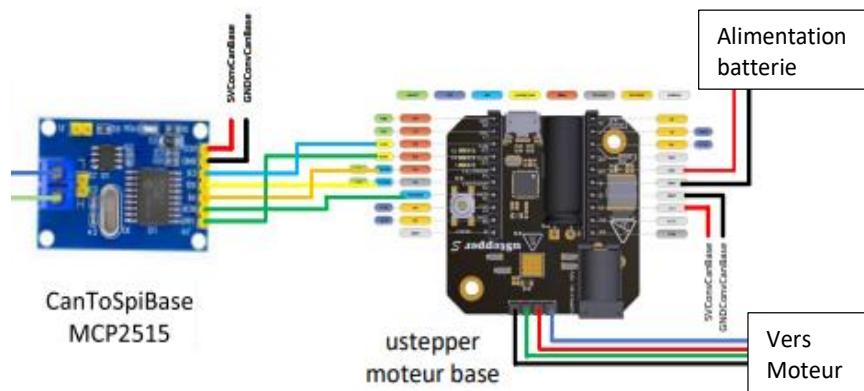


Figure 48 : Câblage d'un uStepper

Pour le montage de notre ensemble moteur,  $\mu$ stepper et carte de conversion CAN vers SPI nous avons choisis de réaliser un shield. A savoir un PCB qui fera la liaison entre le  $\mu$ stepper monté sur l'arrière du moteur Nema 17 et la carte de conversion. Ce shield permettra notamment de réduire les possibles erreurs de câblage mais surtout de fiabiliser la connexion entre les modules et également de faciliter la connexion entre les différents uStepper.

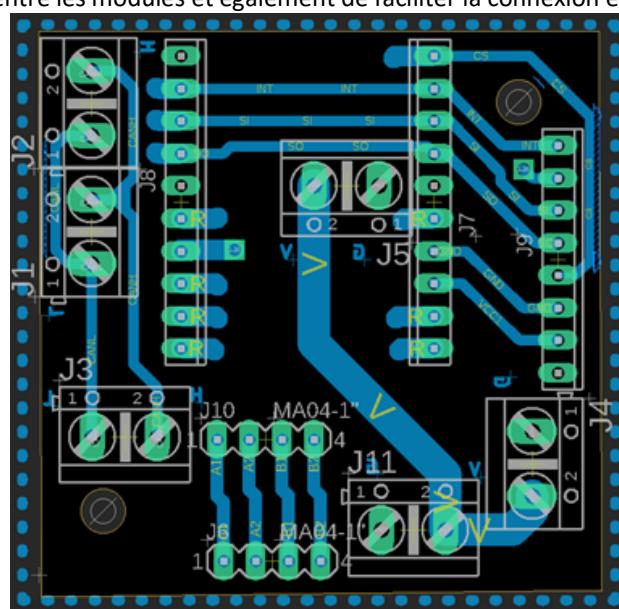


Figure 49 Board shield Ustepper

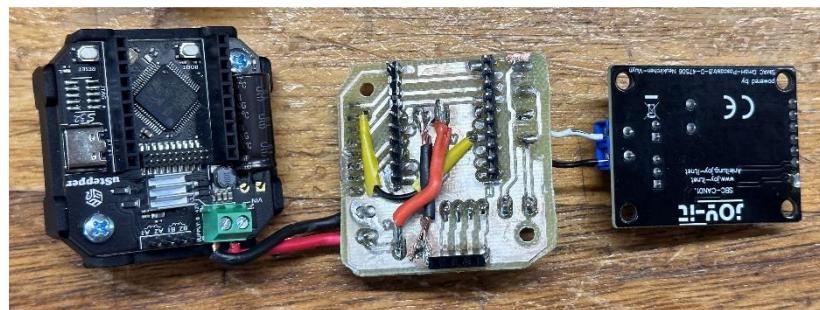


Figure 50 Ensemble UStepper démonté

Nous pouvons voir ci-dessus l'ensemble Ustepper et convertisseur CAN, les pistes transportant la puissance sur le shield ont été doublées par sécurité afin de s'assurer qu'elles seront capables de faire passer le courant maximum.



Figure 51 Ensemble UStepper monté

Nous pouvons voir ci-dessus qu'une fois monté, l'ensemble Ustepper devient compact et intégré.



Figure 52 Ensemble UStepper sur moteur

Dans le but de cacher l'électronique sur le bras, nous avons désigné un boîtier pour l'ensemble Ustepper. Il permettra également de maintenir le Ustepper en place contre le moteur grâce à deux vis de blocage.



Figure 53 Boîtier pour ensemble Ustepper

Ce boîtier permettra également de protéger l'électronique de projections de liquide ainsi que de l'arrachement des câbles.

L'ensemble des solutions mises en œuvre pour intégrer les uStepper nous a donc permis de nous rapprocher d'une conception « industrielle » et durable.

## 6.5.6 Pont en H et leurs moteurs

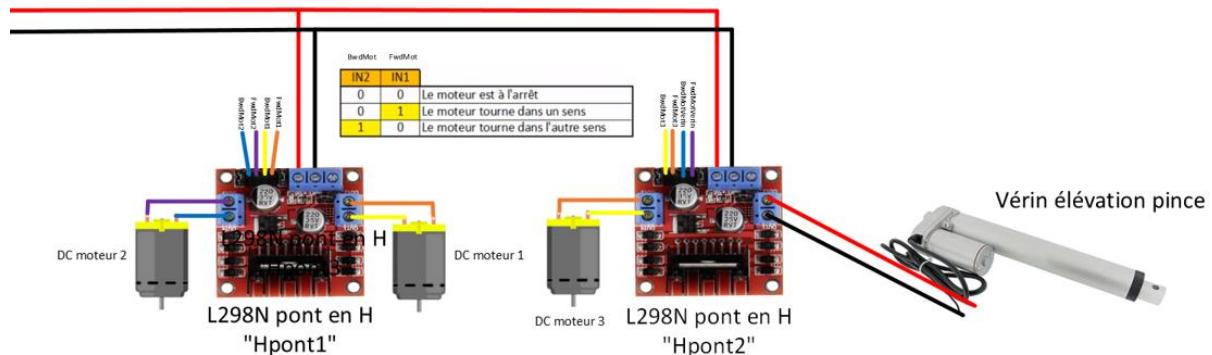


Figure 54 Représentation des connexions au niveau des moteurs des pompes

Pour piloter les moteurs DC, l'utilisation d'une carte pont en H est courante. Cette carte offre la possibilité de contrôler jusqu'à deux moteurs dans les deux sens, ce qui facilite l'aspiration ou l'évacuation du liquide en cas d'erreur ou de problème.

Dans ce contexte, deux cartes sont utilisées pour piloter les trois moteurs des pompes péristaltiques, avec un moteur attribué à chaque pompe. Le pont en H reçoit une alimentation de 12V provenant de la carte de puissance et dispose de deux broches par moteur (soit un total de quatre broches sur chaque carte) pour contrôler la direction des moteurs (voir tableau ci-contre). Ces broches sont directement connectées à la Raspberry, ce qui permet d'arrêter les moteurs grâce à la carte. Le vérin est également piloté par un pont en H, nous le branchons sur le pont en H qui alimente qu'une seule pompe.

IN2	IN1	État du moteur
0	0	Le moteur est à l'arrêt
0	1	Le moteur tourne dans un sens
1	0	Le moteur tourne dans l'autre sens

Figure 55 : Commande des moteurs

## 6.5.7 Implantation boite électronique

Sur la plaque de support de notre SySm@p nous avons prévu un endroit qui va servir à la fois à maintenir à l'abris tout le système électrique et de support pour les pièces qui vont servir pour les frottis ou les prélèvements liquide. Cette boîte contient des ouvertures passe câbles sur le cotés ainsi qu'une ouverture sur le dessus pour mettre un ventilateur. Ainsi on permet une aération maximale au sein de celle-ci.

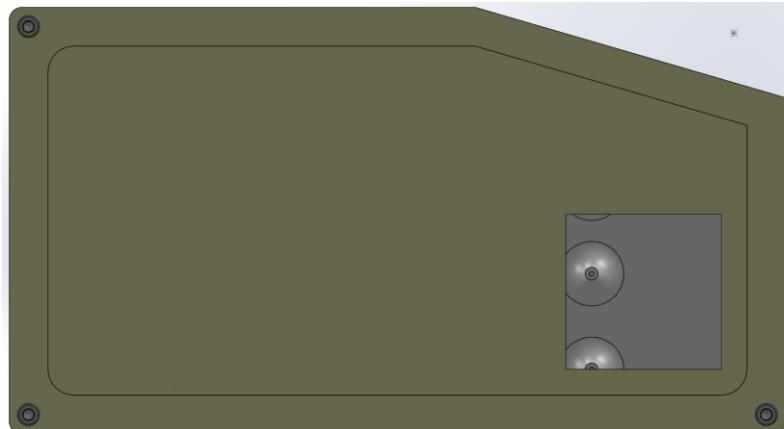


Figure 56 Boîte électrique vu du dessus



Figure 57 Passage de câbles

Au sein de cette boîte chaque composant à sa place et est maintenu grâce à une système de vis. Les différentes positions des composants ont été pensées pour que le câblage soit le plus efficace possible.

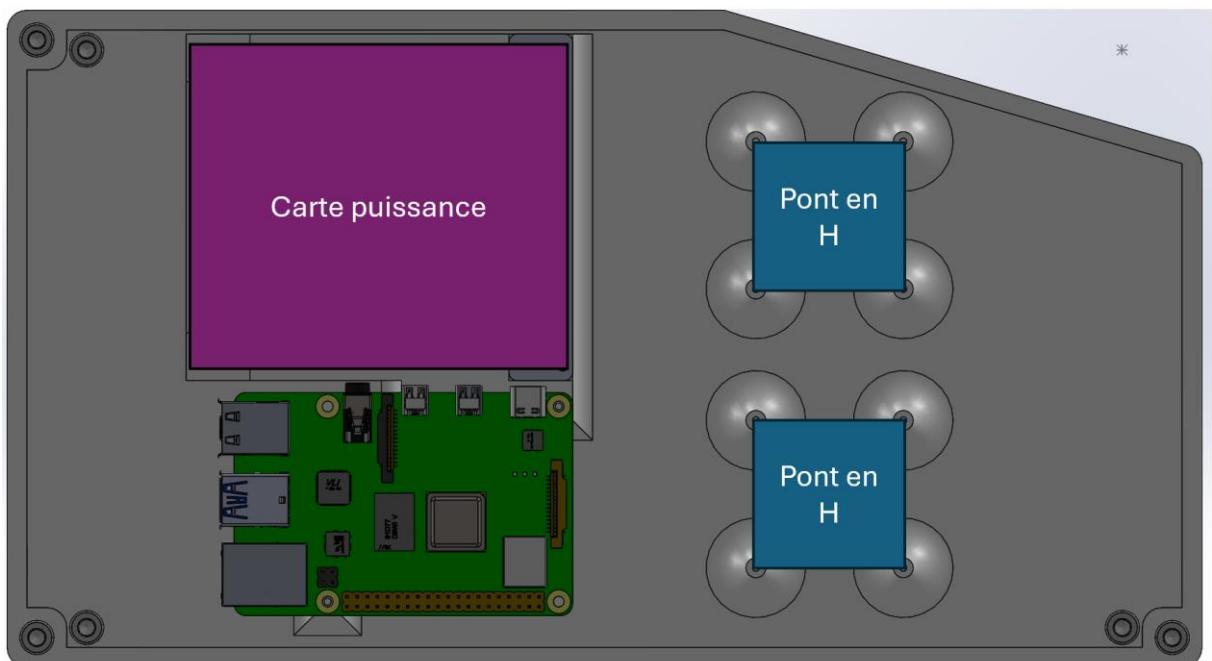


Figure 58 Emplacement des différents composants dans la boîte

Sur le couvercle de notre boîte nous ajoutons une plaque en plexiglass avec à l'intérieur les emplacements pour mettre les différents outils pour réaliser les prélèvements. Nous avons donc 3 plaques à changer selon la mission : une plaque frottis, une plaque liquide et une plaque poussière. Voir chapitre **6.4.5**.

## 6.6 Architecture informatique

Le système informatique est composé de deux parties pour répondre au besoin du pilotage en distance.

L'une qui tourne sur le Raspberry Pi pour contrôler les caméras, les uStepper, le vérin, les pompes péristaltiques, les relais de l'alimentation et de l'éclairage.

L'autre qui tourne sur la poste de pilotage pour récupérer les commandes d'utilisateur à travers un joystick, et ainsi de faire un retour des états du Sysm@p à travers l'IHM principal, un retour des caméras, et un retour sur la géométrie du robot en temps réel.

ROS (Robot Operating System) est utilisé pour permettre la communication de ces deux parties précédentes.

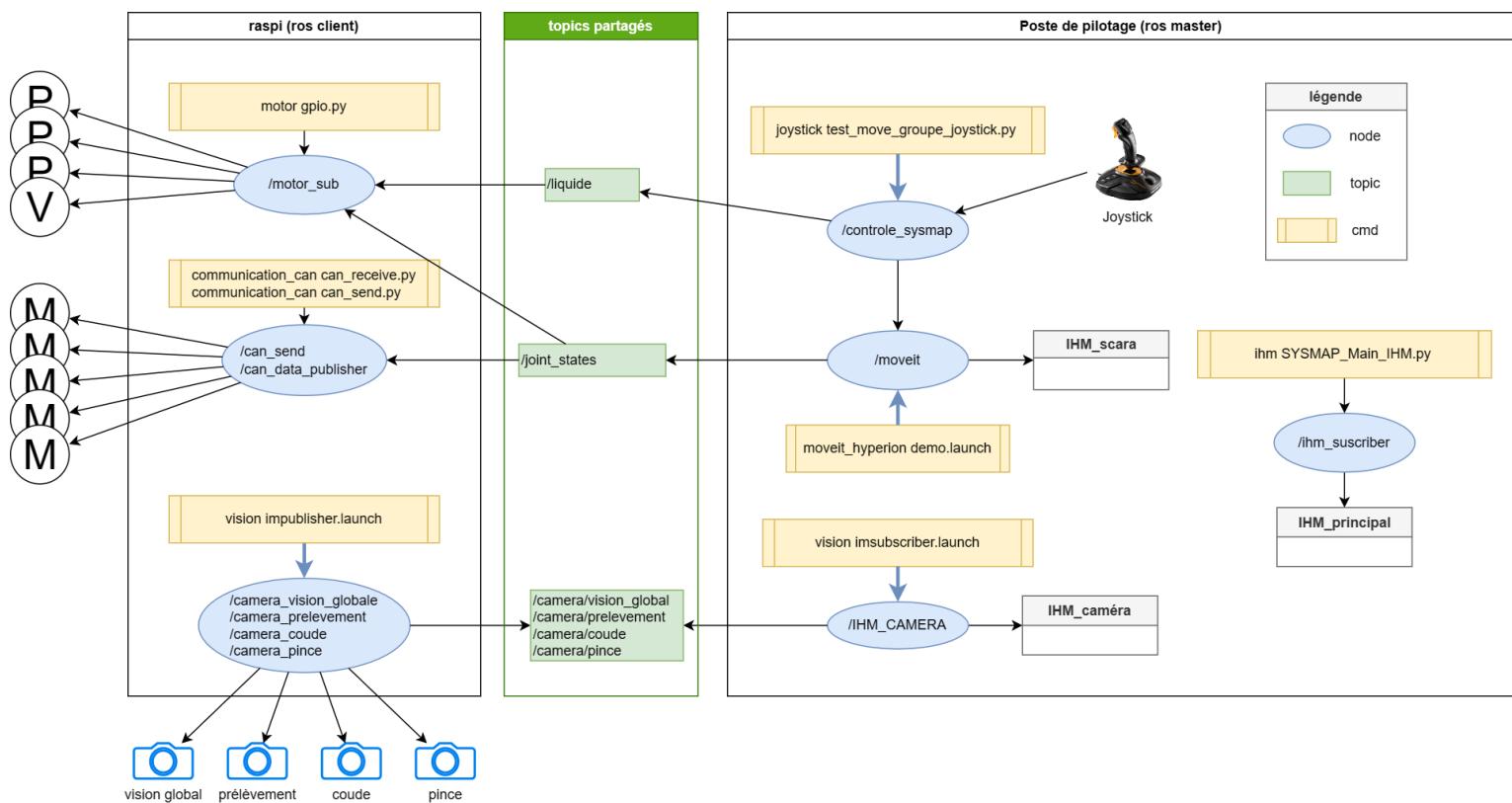


Figure 6.6-1 : Architecture ROS Simplifié

Brève explication.

Les nodes ce sont des programmes, les topics sont des données, les nodes échangent des données à travers les topics.

Les encadrés en orange ce sont les lignes de commande utilisées pour lancer leur(s) node(s) concernés. Il faut les utiliser avec `roslaunch` pour les fichiers `.launch` et `rosrun` pour les fichiers python `.py`.

Au fil de la présentation de cette architecture informatique, nous mettrons en avant les exigences **E14 – E15 – E16 – E29 – E30 – E31**

## 6.6.1 Contrôle GPIO

Le contrôle des GPIO du Raspberry Pi se font avec la librairie python **RPi.GPIO**.

Le programme écoute en permanence le topic `/liquide` qui a 0, 1, 2, 3 comme valeurs possibles, il démarre la pompe concernée lors qu'il reçoit 1, 2 ou 3 et arrête la pompe précédemment démarrée lorsqu'il reçoit 0.

Le programme écoute aussi en permanence le topic `/joint_states` (état des articulations), plus spécifiquement la 8eme valeur des articulations, le vérin. Cette valeur varie du 0 à -0.15 qui correspond à l'état du déploiement du vérin avec 15cm sa course totale.

En réalité, le vérin se trouvera seulement en 2 états, complètement déployé (-0.15) et complètement rétracté (0), car le vérin ne possède pas de retour pour savoir sa position actuelle, on décide donc de l'utiliser en tout ou rien (TOR).

Par conséquence, sa logique de contrôle est de regarder si le vérin est supérieur ou inférieur à -0.075.

Tous les GPIO sont configurés en sortie TOR, en-dessous la table des vérités

	Numéro GPIO	Démarrer	Arrêter
Pompe 1	17,18	0,1	0,0
Pompe 2	22,23	0,1	0,0
Pompe 3	24,6	0,1	0,0
	Numéro GPIO	Déployer	Rétracter
Vérin	16,26	1,0	0,1
		Arrêter	

Voir partie 6.5.6 pour le câblage des GPIO aux ponts-H.

Le programme écoute aussi un topic `/elairage` pour contrôler le GPIO qui est relié au relai de l'éclairage.

Le programme active le relai de l'alimentation 12V et le relai du 24V à son démarrage, et les éteint à son extinction.

## 6.6.2 Contrôle uStepper

Les uStepper permettent le contrôle en boucle fermée de nos moteurs, ils gardent en mémoire l'angle demandé par ROS via les bus CAN. Cette architecture nous permet de diminuer le nombre de câble passant à travers le robot, pour contrôler les 5 axes de notre bras, seuls 4 fils sont nécessaires, deux servant au CAN et deux autres permettant l'alimentation des uStepper.

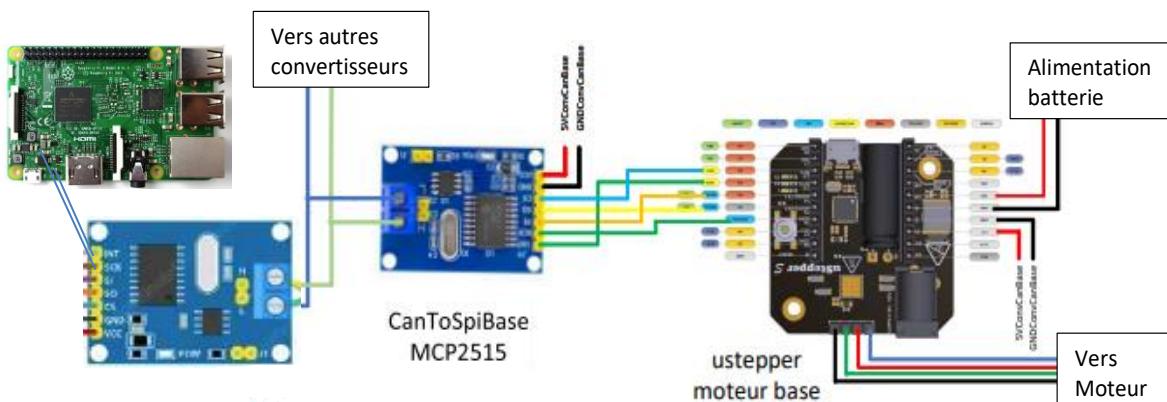


Figure 6.6.2-1 : Liaison entre le Raspberry Pi et les uStepper

Chaque uStepper est programmé pour recevoir une trame CAN venant du Raspberry Pi indiquant l'angle désirée indépendamment pour chaque axe.

### 6.6.3 Contrôle et réception des caméras

On dispose 4 caméras USB (la caméra Pi est remplacé par une caméra USB).

Le programme de contrôle des caméras utilise **OpenCV** pour récupérer l'image de la caméra, et **CvBridge** pour convertir l'image en un format acceptable par ROS, une fois convertie, un topic sera alimenté par la vidéo (flux d'image) de la caméra.

Le programme prend comme paramètre le numéro du port USB, le nombre d'image par seconde, le nom du topic, et degré de rotation de l'image (à rentrer après la fixation des caméras). Pour chaque caméra, il suffit d'appeler le même programme avec différents paramètres.

Voici les paramètres de chaque caméra :

Numéro USB	topic	Image par seconde	Rotation °
1	prelevement	9	A déterminer
2	coude	8	A déterminer
3	pince	7	A déterminer
4	Vision_global	10	180

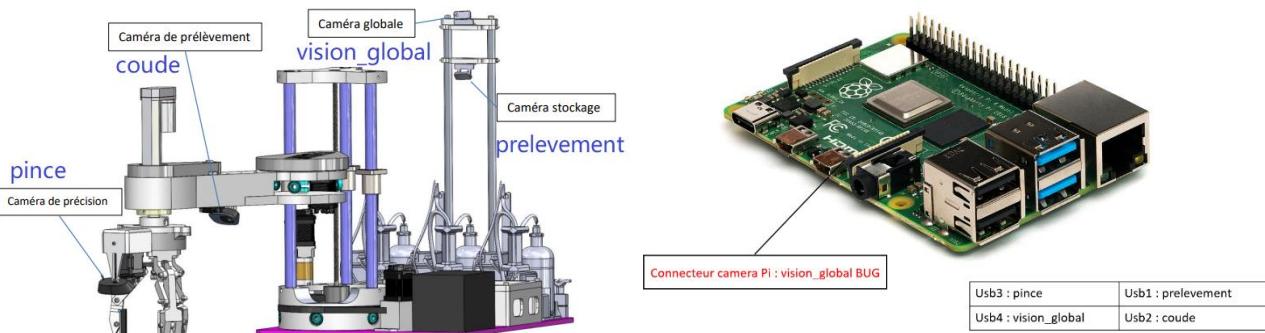


Figure 6.6.3-1 : Position et Branchement des caméras

Du côté de la réception des flux caméras, on utilise RVIZ qui est une interface homme machine du ROS possédant la fonctionnalité d'interpréter différents types de topics et de les visualiser, ici les topics du type Image.

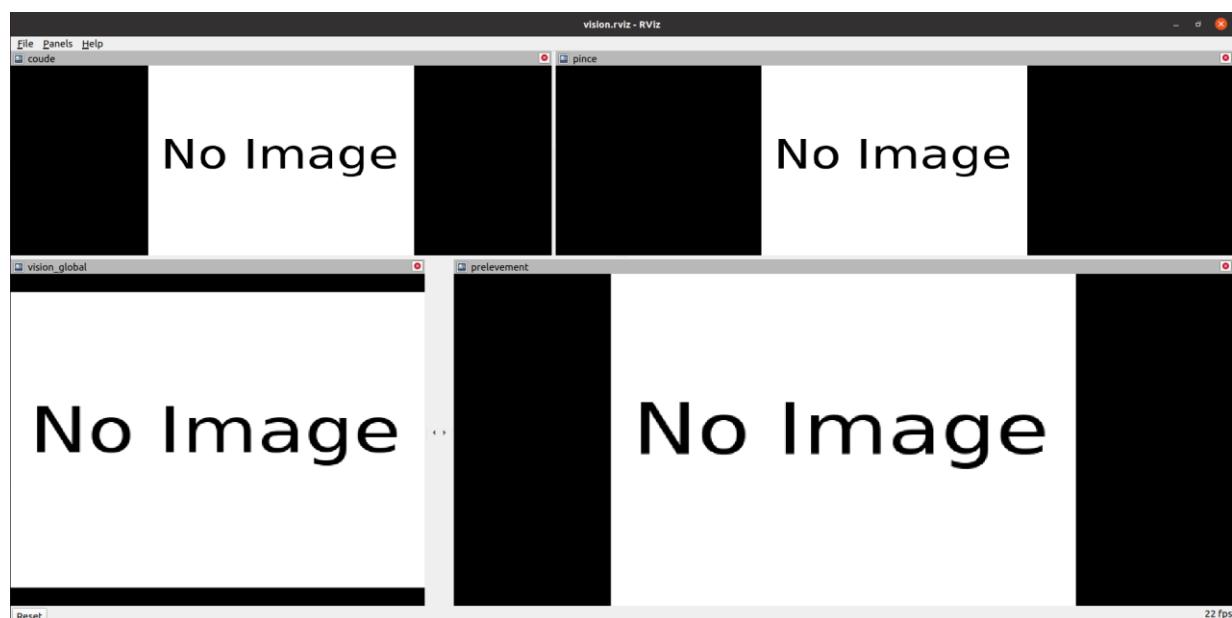


Figure 6.6.3-2 : IHM caméra

## 6.6.4 IHM principal

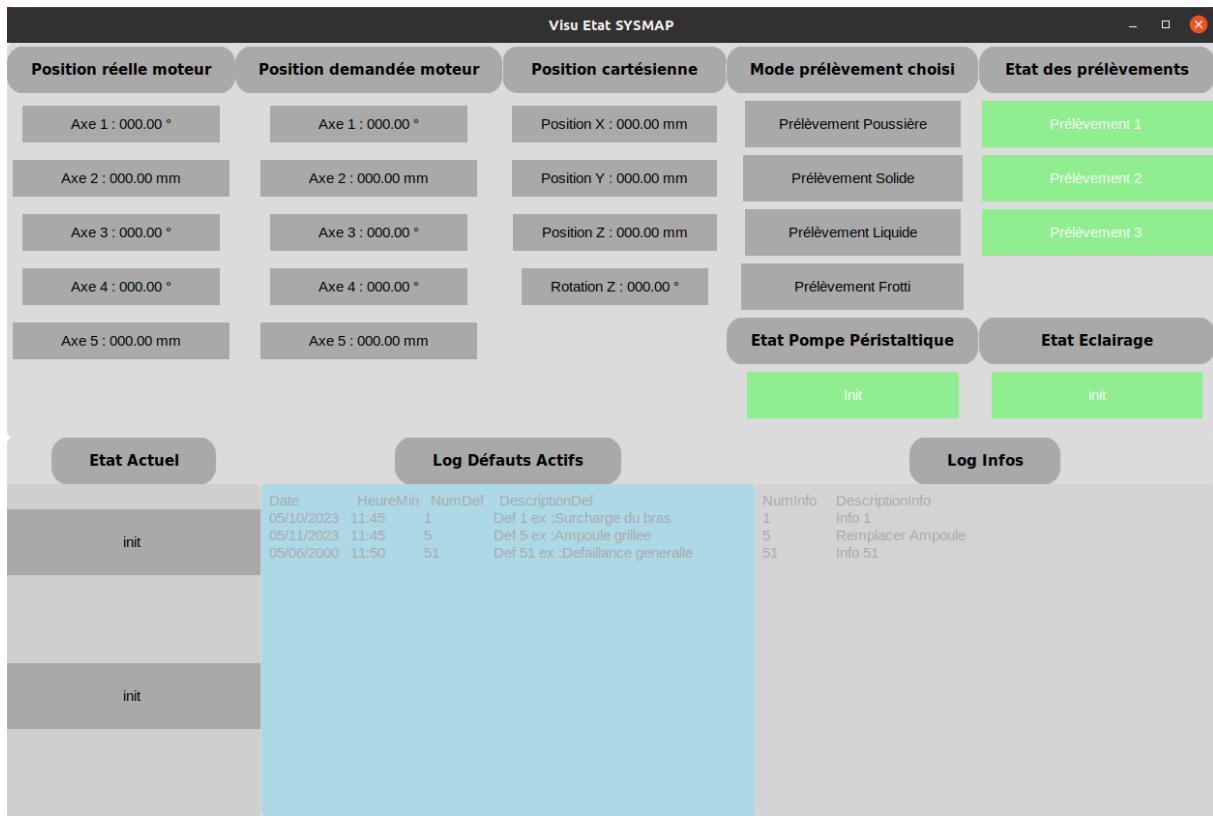


Figure 6.6.4-1 : IHM principal

On affiche la position réelle des 5 moteurs, la position des moteurs virtuelles, la position du centre bas de la pince (Tool center point : TCP) par rapport au centre bas de la base du robot, le mode de prélèvement, l'état des prélèvements, l'état des pompes péristaltiques, l'état de l'éclairage et les log défaut et d'info.  
L'interface visuelle est créée avec **customtkinter** et les données proviennent de nombreux topics.

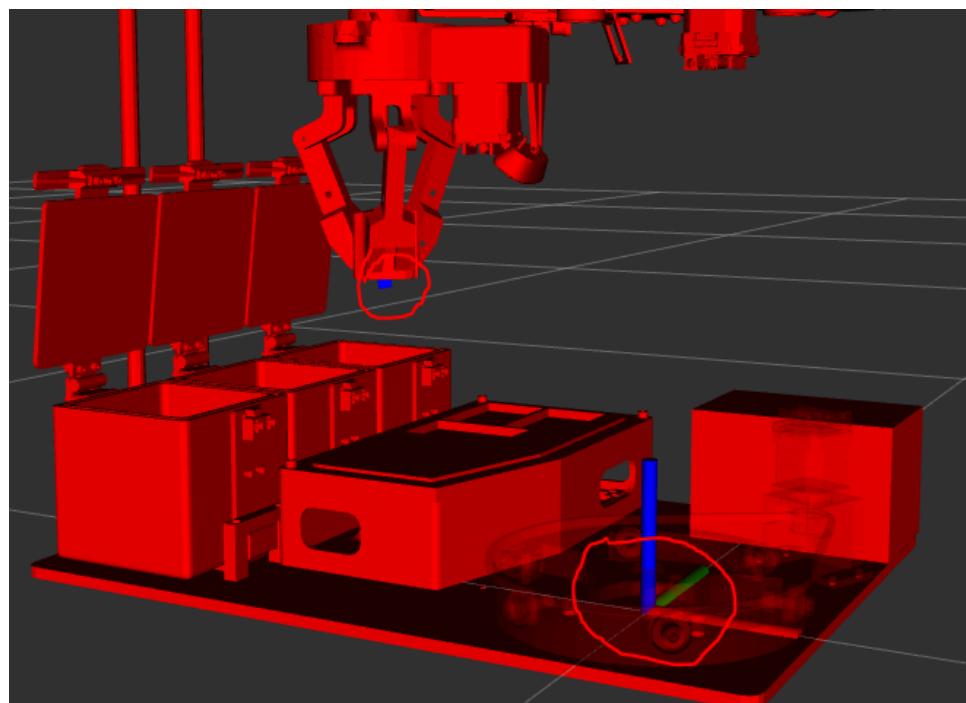


Figure 6.6.4-2 : TCP et origine du robot

## 6.6.5 Robot virtuel

Pour modéliser notre SySM@p, on a construit l'URDF (Unified Robot Description Format) de cette manière.

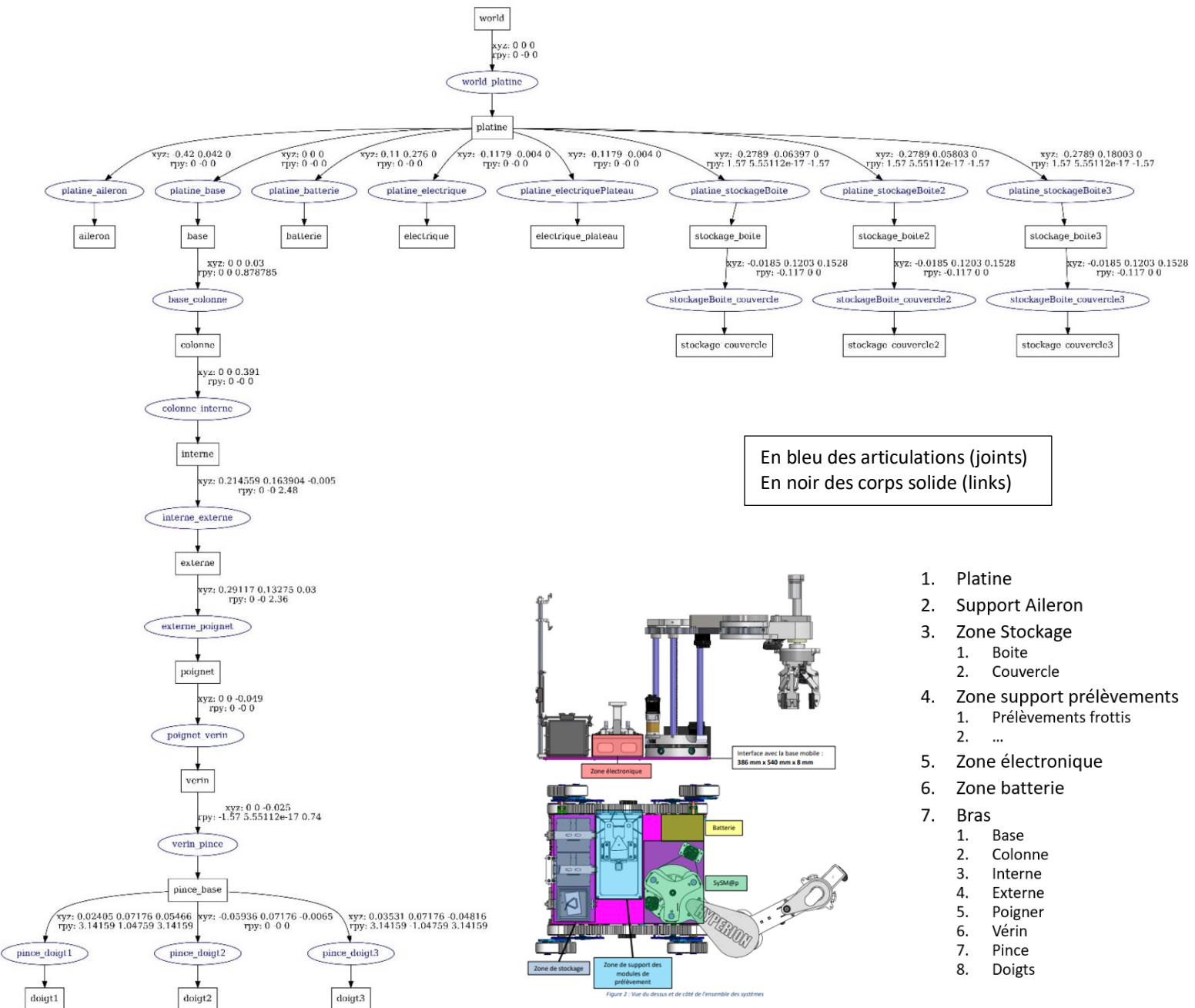


Figure 6.6.5-1 : URDF du SySM@p

Les corps solides sont obtenus à partir des fichiers CAO, on les convertit en format stl, et ensuite on les simplifie avec les fonctionnalités du logiciel **MeshLab** comme :

- meshing\_remove\_duplicate\_faces
- meshing\_remove\_null\_faces
- meshing\_remove\_duplicate\_vertices
- meshing\_remove\_unreferenced\_vertices
- meshing\_decimation\_quadratic\_edgeCollapse
- meshing\_merge\_close\_vertices

Pour le modèle collisionnel, on utilise la fonction generate\_convex\_hull du MeshLab, le test des collisions est très gourmand en ressource computationnelle, il est donc bien d'avoir un modèle 3D le plus simple possible.

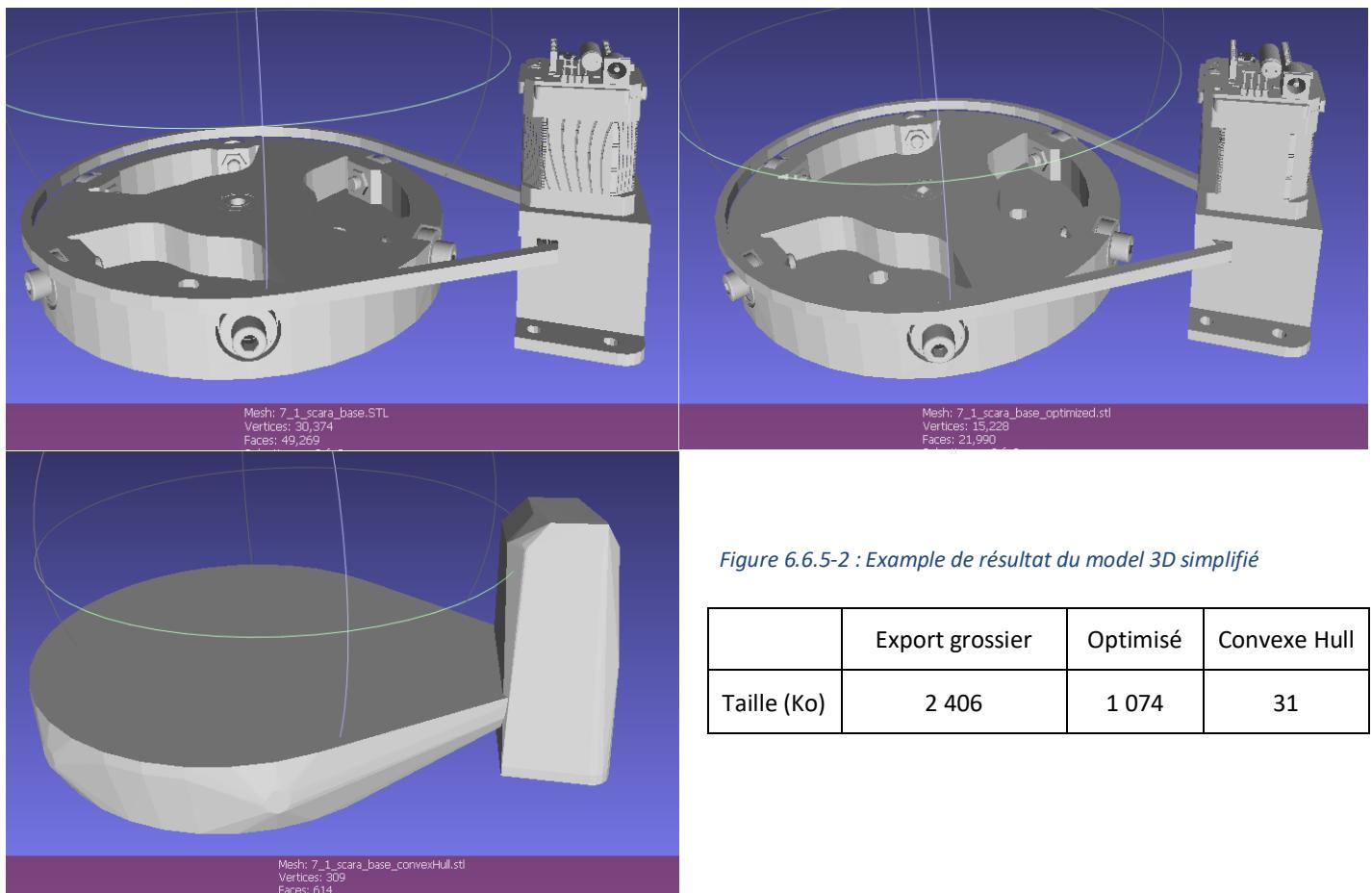


Figure 6.6.5-2 : Exemple de résultat du modèle 3D simplifié

	Export grossier	Optimisé	Convexe Hull
Taille (Ko)	2 406	1 074	31

Une description du robot ne suffit pas, on fournit cette description à ROS, et on lance Moveit, ce dernier nous permet de faire de la cinématique inverse (Grossièrement traduit de l'Inverse Kinematics) et de la planification des trajectoires robotiques tout en évitant la collision avec l'environnement (aileron, stockage...).

Cinématique inverse est l'ensemble des algorithmes qui permettent de calculer les positions et rotations du bras robotique pour répondre à une position du TCP désirée.

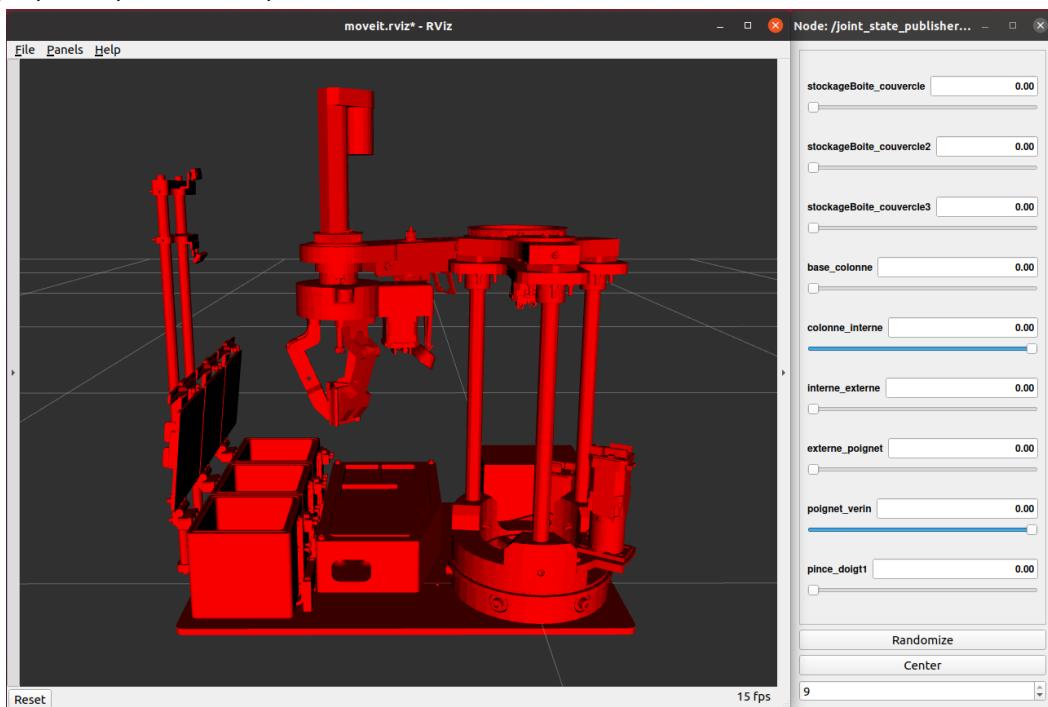
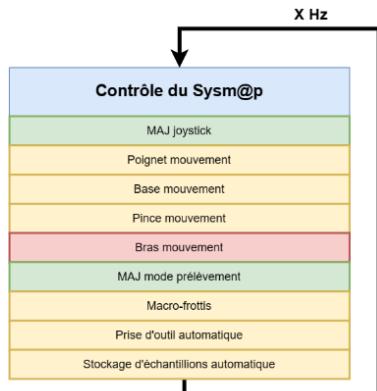


Figure 6.6.5-3 : IHM Scara

## 6.6.6 Contrôle Sysm@p



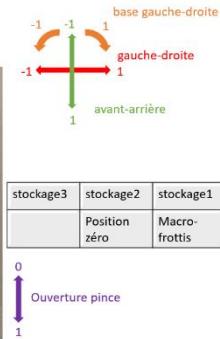
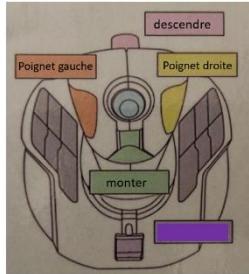
Le contrôle du Sysm@p se fait dans une boucle avec une fréquence de 10 Hz, à chaque cycle il va regarder s'il y a une action joystick, et en fonction des actions, il va exécuter des tâches différentes.

### 6.6.6.1 MAJ Joystick

La récupération des données du Joystick Thrustmaster T-16000M se fait avec la librairie python **pygame**. Chaque bouton, chaque mouvement du joystick et la position du bouton poussoir sont associé à une consigne.

CONFIG GAUCHE

outil1	outil2	outil3
éclairage		Mode prélevement



CONFIG DROITE

outil3	outil2	outil1
Mode prélevement		éclairage

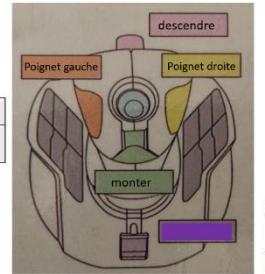


Figure 6.6.6.1-1 : Notice joystick configuration droite et gauche

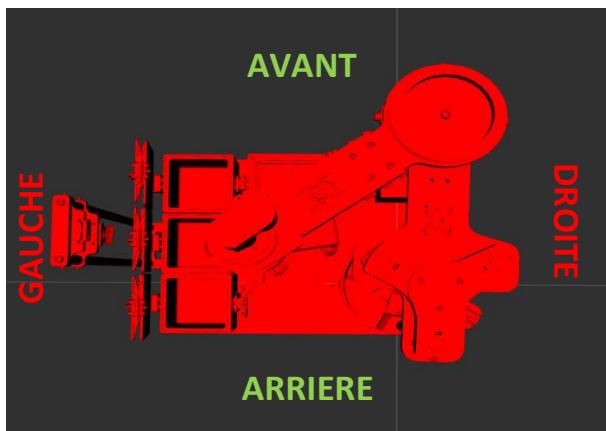


Figure 6.6.6.1-2 : avant-arrière, gauche-droite du Sysm@p

Des seuils d'activation ont été mis sur les mouvements du joystick, par exemple, il faut bouger l'axe **avant-arrière** ou **gauche-droite** au moins de 0.15 pour être considéré comme action demandée, cette valeur est de 0.4 pour l'axe **base gauche-droite** parce qu'il est plus sensible.

Pour les boutons « descendre », « monter », « poignet gauche » et « poignet droite », une constante est envoyée à leur appui, 0.05 pour « descendre » et « monter », 1 pour « poignet gauche » et « poignet droite ». Tous les autres boutons sont en TOR.

### 6.6.6.2 Les mouvements du Sysm@p

Les consignes de mouvement venant du joystick varient de 0 à 1, ils représentent le pourcentage de déplacement ou de rotation, on les multiplie par un facteur qui représente le déplacement ou rotation maximale autorisée par cycle.

Facteur de déplacement = 0.1.

Facteur de rotation = 0.1.

	min	max
Déplacement avant-arrière et gauche-droite	$0.15 * 0.1 = 15\text{mm}$	$1 * 0.1 = 100\text{mm}$
Rotation base gauche-droite	$0.4 * 0.1 = 0.04\text{rad} = 2.3^\circ$	$1 * 0.1 = 0.1\text{rad} = 5.7^\circ$
	<b>constant</b>	
Déplacement Monter-descendre	$0.05 * 0.1 = 5\text{mm}$	
Rotation poignet gauche-droite	$1 * 0.1 = 0.1\text{rad} = 5.7^\circ$	

Ce facteur vaut 0.8346 pour la pince, il correspond à l'angle d'ouverture maximal de la pince en radian, il est associé à la donnée du bouton poussoir.

Le mouvement du poignet, de la base et de la pince sont bloquants, c'est-à-dire qu'il faut que le mouvement soit fini pour passer à l'instruction suivante.

Le mouvement du bras s'effectue en accouplant les déplacements avant-arrière, gauche-droite et monter-descendre pour former un déplacement XYZ. Ce mouvement n'est pas bloquant, le mouvement du prochain cycle va donc l'interrompre, ça permet d'avoir un contrôle en temps réel. C'est ici qu'intervient le cinématique inverse.

Lorsque le bras est tout en bas, le vérin est rétracté, et qu'on veut descendre encore plus bas, le vérin va se déployer.

Lorsque le bras est tout en haut, le vérin est déployé, et qu'on veut monter encore plus haut, le vérin va se rétracter.

Ce sont les seulement moyens d'interagir avec le vérin, on utilise principalement la colonne pour monter et descendre.

Les mouvements sont réalisés avec la librairie **moveit\_commander** du Moveit.

### 6.6.6.3 Les macros

Toutes les macros se lancent dans un autre thread (processus), cela permet de mettre à jour les données du joystick et en même temps d'exécuter de la macro, la macro s'interrompt lorsque le bouton appuyé est relâché.

La macro-frottis va balayer 2 fois une surface de 300 cm<sup>2</sup> pendant 40 secondes, elle est activable seulement en mode de prélèvement frottis. Voir partie 6.4.4.3 pour le chemin de balayage.

La macro prise d'outil va prendre l'outil de prélèvement frottis, liquide ou poussière selon le bouton appuyé et le mode de prélèvement actuel.

La macro de stockage va faire le stockage de l'outil ou d'échantillon, ou activer la pompe selon le bouton appuyé et le mode de prélèvement actuel. Une image est prise au début de la macro ainsi qu'un enregistrement de la position et de l'heure associée. Cela permet le traçage de l'échantillon.

## 6.6.7 Installation

Sur la Raspberry Pi on a un Ubuntu server 20.04 (plus performant), sur la poste de pilotage on a un Ubuntu desktop 20.04, cette version est nécessaire pour installer ROS noetic.

Installation ros noetic :

```
sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu $(lsb_release -sc) main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'
sudo apt install curl
curl -s https://raw.githubusercontent.com/ros/rosdistro/master/ros.asc | sudo apt-key add -
sudo apt update
sudo apt install ros-noetic-desktop-full
echo "source /opt/ros/noetic/setup.bash" >> ~/.bashrc
source ~/.bashrc
sudo apt install python3-rosdep python3-rosinstall python3-rosinstall-generator python3-wstool build-essential
sudo rosdep init
rosdep update
```

Création d'espace de travail :

```
mkdir -p ~/catkin_ws/src
cd ~/catkin_ws/
catkin_make
echo "source ~/catkin_ws/devel/setup.bash" >> ~/.bashrc
```

Installation moveit :

```
sudo apt install ros-noetic-moveit
wstool init .
wstool merge -t . https://raw.githubusercontent.com/ros-planning/moveit/master/moveit.rosinstall
wstool remove moveit_tutorials
wstool update -t .
cd ~/catkin_ws/src
git clone https://github.com/ros-planning/moveit_tutorials.git -b master
git clone https://github.com/ros-planning/panda_moveit_config.git -b noetic-devel
cd ~/catkin_ws/src
rosdep install -y --from-paths . --ignore-src --rosdistro noetic
sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros-testing/ubuntu $(lsb_release -sc) main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'
sudo apt update
```

Installation des dépendances du projet :

```
sudo apt install ros-noetic-cv-bridge
sudo pip install can customtkinter pygame RPi.GPIO opencv-python
```

Mise en place du projet :

```
cd ~/catkin_ws/src
git clone https://github.com/luewh/hyperion\_repo.git

Raspberry Pi seulement


rm -r ihm joystick klamp moveit_hyperion
cd ~/catkin_ws/
catkin_make
source ~/.bashrc
```

## 6.6.8 Démarrage

Configure la poste de pilotage comme ROS master et le Raspberry Pi le ROS client. Commencer démarrage de la poste de pilotage d'abord en entrant les commandes dans l'ordre, puis ceux du Raspberry Pi.

Raspberry Pi	Poste de pilotage
rosrun motor gpio.py rosrun communication_can can_receive.py rosrun communication_can can_send.py roslaunch vision impublisher.launch	roslaunch moveit_hyperion demo.launch rosrun joystick test_move_groupe_joystick.py rosrun ihm SYSMAP_Main_IHM.py

Un fichier launch pour regrouper tous les rosrun est envisageable.

## 7 ACTIVITES DE VALIDATION

Le 7 mars 2024 aura lieu un moment, partagé par des représentants des parties prenantes, nous laissant 1 heure de démonstration. Ce moment sera l'occasion pour nous de montrer les activités, du plan de validation applicable en validation opérationnelle, validant les exigences avec le plus de poids, conformément aux besoins clients, mais aussi celles qui n'ont pas été développées dans ce document (comme les exigences liées au montage/démontage E17 – E18 – E19 – E24). Il faut ainsi considérer ces activités comme un complément aux preuves de conception avancées.

[ACT-VAL-1 : Activité de validation 1 - Montage et prélèvement liquide](#)

[ACT-VAL-2 : Activité de validation 2 - Changement de configuration et vidéo prélèvement poussiére](#)

[ACT-VAL-3 : Activité de validation 3 - Frottis](#)

[ACT-VAL-4 : Activité de validation 4 - Prélèvements solides](#)

[ACT-VAL-5 : Activité de validation 5 - Revues et démontage](#)

## 8 CONCLUSION

En résumé, la planification détaillée du projet a fourni une base solide pour la réalisation du système. Grâce à une analyse minutieuse, chaque aspect du projet a été examiné en détail, ce qui a abouti à une solution optimisée et efficace. Les différents composants du système ont été soigneusement étudiés pour identifier les sous-ensembles requis, pour la mécanique, l'électronique et l'informatique du SySM@p. Ce rapport de conception et les documents qui lui sont associés permettent de réaliser le système dans son intégralité afin de respecter le besoin client. Grâce à cette approche rigoureuse, nous sommes confiants dans l'utilisation de notre SySM@p, nous permettant d'atteindre les objectifs du cahier des charges préalablement établis.

## 9 DOCUMENTS ANNEXES

Dans le dossier de conception final rendu au client seront compris les documents suivants :

L'ensemble des notices de montage :

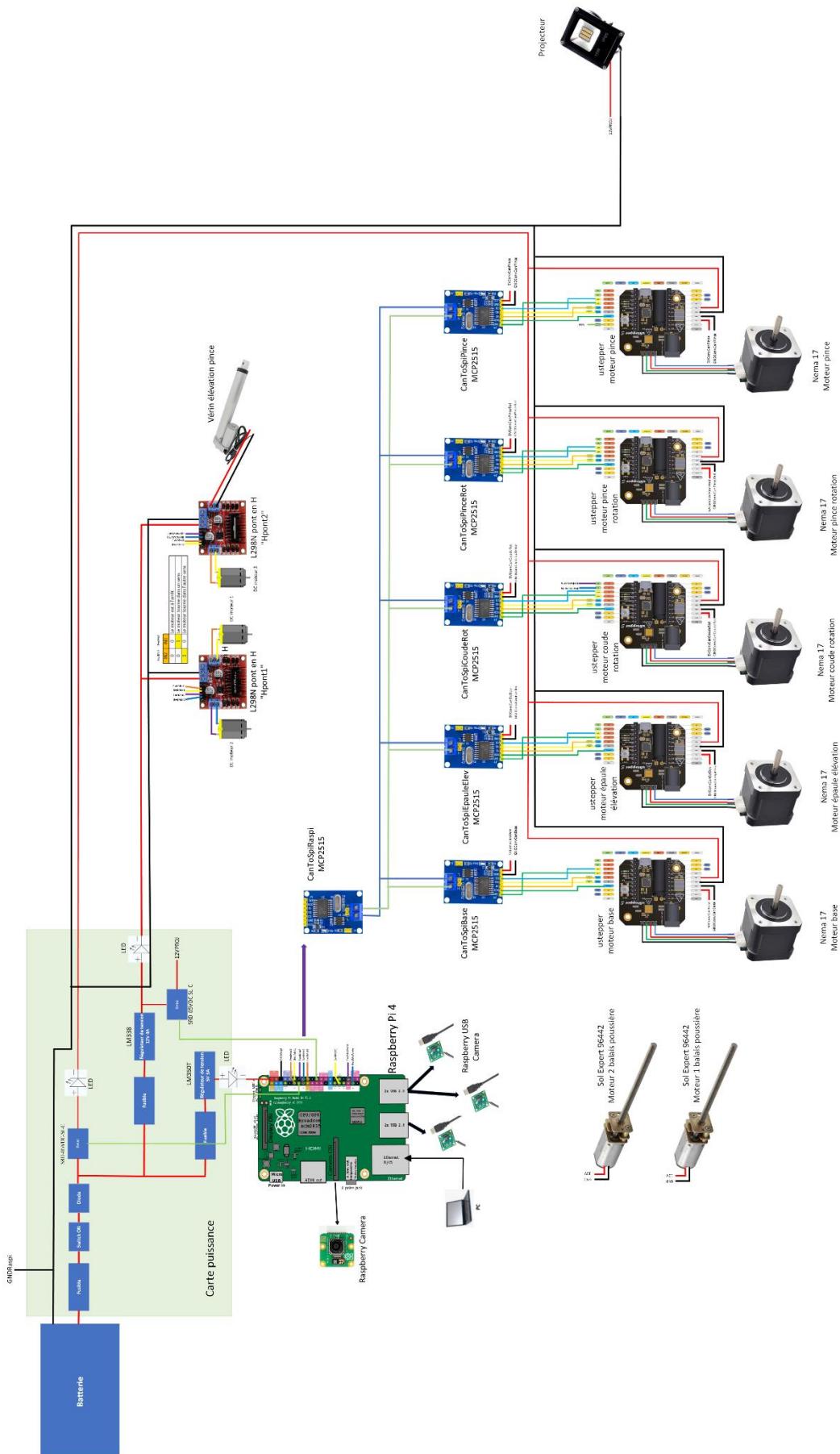
- Notice de montage stockage liquide
- Notice de montage stockage solide
- Notice de montage – base + épaule
- Notice de montage aileron
- Notice de montage coude
- Notice de montage liquide
- Notice de montage pince
- Notice de montage poussiére
- Notice de montage vérin
- Notice d'utilisation de l'IHM

La notice de maintenance

## 10 ANNEXES

<b>Référence</b>	<b>Définition</b>	<b>Type</b>	
1	E1	Le SySM@p doit prélever un échantillon solide cubique de 10 cm de coté	Fonctionnelle
2	E2	Le SySM@p doit prélever un échantillon solide de 1kg toutes formes et tous matériaux	Fonctionnelle
3	E3	Le SySM@p doit prélever un échantillon liquide de 250ml	Fonctionnelle
4	E4	Le SySM@p doit stocker 250ml de liquide	Fonctionnelle
5	E5	Le SySM@p doit prélever un échantillon poussière	Fonctionnelle
6	E6	Le SySM@p doit stocker 100gr de poussière	Fonctionnelle
7	E7	Le SySM@p doit réaliser un frottis jusqu'à 300cm <sup>2</sup>	Fonctionnelle
8	E8	Le système doit connaitre les dimensions du frottis réalisé	Fonctionnelle
9	E9	Le système doit collecter 3 échantillons du même type par investigation	Fonctionnelle
10	E10	Le système doit collecter les échantillons dans des emballages fermés	Fonctionnelle
11	E11	Le système doit prélever entre-5 et 10 cm du sol	Fonctionnelle
12	E12	Le système doit prélever un échantillon se situant jusqu'à 30cm d'un des côtés de la base mobile	Fonctionnelle
13	E13	Le SySM@p est compatible avec les différentes bases mobiles	Contrainte
14	E14	Le SySM@p doit être interfacé avec le contrôle commande de la base mobile	Contrainte
15	E15	Le SySM@p doit s'intégrer à l'architecture ROS	Contrainte
16	E16	L'IHM de Le SySM@p doit être installée sur le poste de pilotage de la base mobile	Contrainte
17	E17	Le temps de montage de Le SySM@p doit être inférieur à 2H en zone de repli et de 30 min au contact de la base mobile	Contrainte
18	E18	Le SySM@p doit être packageable par un opérateur	Contrainte
19	E19	Le SySM@p doit être transportable par un opérateur	Contrainte
20	E20	Le SySM@p doit être alimenté par 50W fourni par la base mobile. En cas d'énergie supplémentaire nécessaire, elle devra être embarquée.	Contrainte
21	E21	Le SySM@p doit être capable d'effectuer 3 prélèvements avant recharge des batteries	Contrainte
22	E22	Le SySM@p doit peser moins de 20kilos	Contrainte
23	E23	Le SySM@p doit être peu encombrant, la cote la plus importante est inférieure à 40cm, système replié	Contrainte
24	E24	Le SYSM@P doit être montable avec des gants	Contrainte
25	E25	Les pièces de rechanges sont faciles d'accès (non uniques)	Contrainte
26	E26	Le risque que le système prenne feu est faible : protection et matériaux	Contrainte
27	E27	Le système respecte les normes électriques	Contrainte
28	E28	Le SySM@p est en matériaux recyclable (contraintes ANDRA)	Contrainte
29	E29	Le SySM@p enregistre des séquences automatiques de prélèvements d'échantillons	Fonctionnelle
30	E30	Le SYSM@P joue les séquences automatiques de prélèvement échantillons enregistrées	Fonctionnelle
31	E31	Le système référence les données des échantillons prélevés	Fonctionnelle

Tableau 1 Référentiel des exigences



Annexe 1 : architecture électronique détaillée