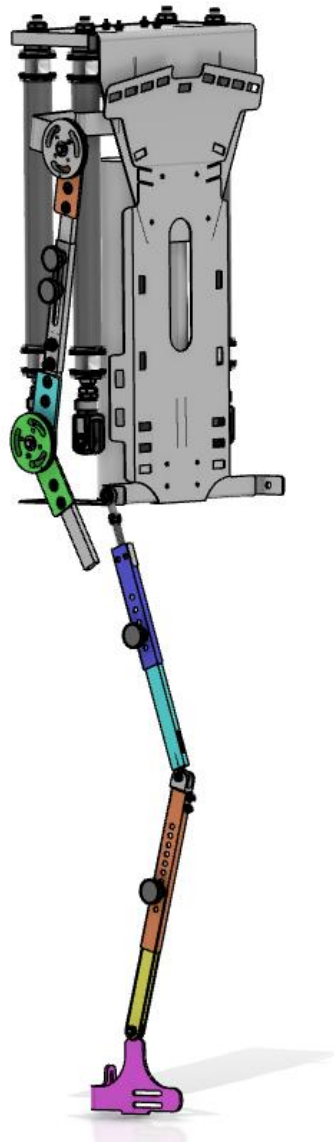


Rapport de projet BUT GMP troisième année

Étude et conception d'un prototype d'exosquelette pour le coulage du béton



Tuteur académique : Jean-Marc LINARES

Tuteur industriel : Bruno BADOUX

Sommaire

Sommaire.....	2
Introduction.....	3
A-Présentation de l'entreprise	3
B-L'enjeu du projet	3
C-Problématique	4
I. Avant-projet.....	4
A. Veille technologique.....	4
B. Cahier des charges	4
C. Etude cinématique et dimensionnement	7
D. Modélisation et calcul dynamique	8
Introduction et Problématique du Dimensionnement.....	8
Hypothèses de Modélisation du Système	8
Démarche de Résolution par le PFD.....	9
Interprétations des Résultats	12
E. Planning	13
II. Actionneurs.....	14
A. Organigramme.....	14
B. Partie pneumatique.....	15
C. Partie commande	17
III. Conception.....	18
A. Partie dos.....	18
B. Partie bras	22
C. Partie jambes.....	24
IV. Résultats.....	30
Conclusion	31
Annexes.....	32

Introduction

A-Présentation de l'entreprise

Cemex, alias Cementos Mexicanos, entreprise du domaine des matériaux de construction à été fondée en 1906 au Mexique. En France, près de 1800 collaborateurs interviennent sur les sites de l'entreprise, répartis en trois principales activités : la production de granulats, la gestion des déchets du BTP et la production de bétons prêts à l'emploi.

B-L'enjeu du projet

Pour améliorer les conditions de travail de ses salarié, Cemex a créé une commission santé et sécurité au seins de ses équipes. Leur objectif est de trouver des solutions aux problèmes liés à la pénibilité au travail notamment les troubles musculo squelettiques qui sont un fléau dans ces métiers de la manutention.

A ce jour, la commission santé sécurité à mis en place une formation gestes et postures destinée à toutes ses collaborateurs amenés à manipuler des charges lourdes dans leur travail. Cela consiste en une explication détaillée de la manière de réaliser les mouvements effectués lors du port de charge lourdes pour ne pas se blesser.

Cemex a fait appel à l'IUT d'Aix en Provence, dans le cadre du projet CISAM+, afin créer un exosquelette pour aider les opérateurs à la manutention des tuyaux de coulée de béton. Ce système viendra en complément à la formation gestes et postures.

L'objectif de ce projet est de créer à terme un produit TRL4 (échelle de niveau de maturité d'un projet), c'est-à-dire un prototype d'essai en laboratoire.

Il sera découpé en trois jalons afin de définir des objectifs précis à atteindre.

Jalon 1 : preuve de concept : Analyse du besoin + Cahier des charges finalisé + CAO complète version 1 + Banc d'essai sur mécanisme des actionneurs -> niveau TRL3.

Jalon 2 : CAO complète version finale + Fabrication premier prototype + essai en laboratoire -> niveau TRL4.

Jalon 3 : consistera à faire le test en conditions réelles.

Notre objectif pour cette année sera d'atteindre le premier jalon. La suite du projet sera assurée par un ingénieur de l'ISM à l'IUT.

C-Problématique

Les opérateurs chargés du coulage du béton sont quotidiennement confrontés à des tâches de manutention exigeantes, notamment lors de l'utilisation d'une pompe à béton. Ils doivent manipuler et déplacer des tuyaux de refoulement dont le poids avoisine 30 kg, et réaliser ponctuellement des efforts beaucoup plus critiques, comme le soulèvement de tuyaux pouvant atteindre près de 100 kg lorsqu'ils sont remplis de béton. Ces opérations répétitives et pénibles exposent fortement les travailleurs à des risques de troubles musculosquelettiques (TMS), principalement au niveau du dos, des épaules et des membres supérieurs.

Ainsi, la question centrale à laquelle doit répondre ce projet est la suivante :

Comment concevoir un exosquelette hybride (actif et passif) capable de réduire de manière significative l'effort physique lié à la manutention des tuyaux de béton, de prévenir les TMS, et de rester suffisamment robuste, autonome et ergonomique pour être utilisé efficacement sur un chantier ?

I. Avant-projet

A. Veille technologique

Il existe à ce jour 3 grandes applications de l'exosquelette sur le marché qui sont le médical, le militaire et Les travaux publics.

Chacun de ces types d'exosquelette a ses propres spécificités. L'exosquelette médical est adapté à la rééducation de patients, il est donc conçu pour guider l'articulation dans une direction souhaitée. Il ne permet donc aucune liberté de mouvement dans son fonctionnement, ce qui ne convient pas à notre application.

L'exosquelette militaire, quant à lui, a une grande capacité de charge, autour de 40 Kg en moyenne, couplé à une grande autonomie. Ce sont des caractéristiques très intéressantes pour notre projet. Il a cependant pour défaut d'être très encombrant, ce qui peut limiter la maniabilité de l'opérateur sur le chantier.

Pour finir, L'exosquelette BTP est conçu pour aider un opérateur à manipuler de gros outils électroportatifs. Il nous a grandement inspiré par le fait que ses articulations sont actionnées par des câbles reliés à un moteur électrique situé dans le dos.

Pour conclure, il n'existe pas d'exosquelette sur le marché capable de répondre aux besoins de Cemex.

Notre mission est donc de nous inspirer de ces recherches pour réaliser l'exosquelette idéal.

B. Cahier des charges

Pour donner suite aux exigences et aux besoins de Cemex il a été possible de lister les contraintes générales appliquées au projet.

Contrainte	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
Limiter le coût de production de l'exosquelette	Budget alloué au prototype	A définir après la pré-étude	0%	Comptabilité
Respecter les normes	Normes CE, ISO, code du travail	Tout le produit	Aucune	Qualité / sécurité
Délai de réalisation du prototype	Délai	A définir		Logistique
Ne pas dépasser un certain poids	Poids	L'exosquelette ne doit pas dépasser 30kg	20%	Masse
Ne pas présenter de risque pour l'opérateur lors de son utilisation	Sécurité	Tout le produit	Aucune	Sécurité

A la suite de cela, il a fallu réaliser l'analyse fonctionnelle de l'exosquelette. Pour cela l'utilisation d'un diagramme pieuvre a permis de mettre en avant le besoin auquel le produit doit répondre et envers qui. L'exosquelette agit donc pour l'opérateur de coulée sur la manutention des tuyaux dans le but d'assister l'opérateur dans son travail.

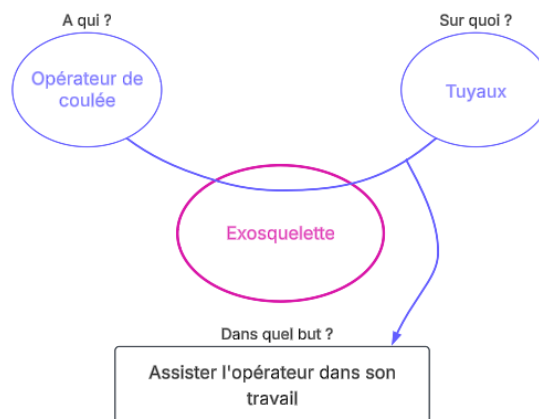


Figure 1 : Diagramme bête à corne

En complément, l'utilisation du diagramme des milieux extérieurs a permis de visualiser et classer tous les éléments extérieurs qui interagissent avec le système et qui créent des contraintes. Pour l'exosquelette 2 fonctions principales ont été trouvées ainsi que 8 fonctions contraintes auxquels le système doit pouvoir répondre. (Détails annexe 1)

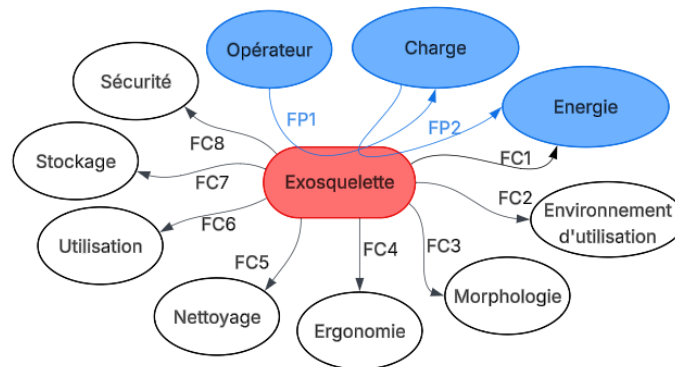


Figure 2 Diagramme des milieux extérieurs

Ces informations ont été détaillées dans un tableau des caractéristiques des fonctions avec pour chacune des critères, des exigences et un critère de flexibilité associé (Annexe 2).

De plus l'exosquelette doit respecter des normes précises étant exposés à des certaines conditions d'utilisation. Il est prévu que l'exosquelette respecte la norme IK08 pour sa résistance aux chocs, à la norme IP65 pour sa résistance à l'eau et aux normes en vigueur liés aux exosquelette (annexe 3 et 4).

Pour finir, l'usage d'un simogramme a permis d'avoir une visualisation de la séquence détaillée des actions réalisées par les opérateurs et ainsi déterminer quel mouvement l'exosquelette doit assister (Annexe 5). Ainsi nous avons pu déterminer que seul l'assistance du haut du corps est requise.

Cette phase d'avant-projet a permis d'avoir une vision claire et précise sur les attentes de Cemex vis-à-vis du système et sur les étapes à réaliser pour arriver à la conception de l'exosquelette.

C. Etude cinématique et dimensionnement

Avant toute conception volumique, nous avons modélisé le comportement mécanique de l'exosquelette par un schéma cinématique. Ce modèle permet de définir les degrés de liberté nécessaires pour accompagner le mouvement du corps humain.

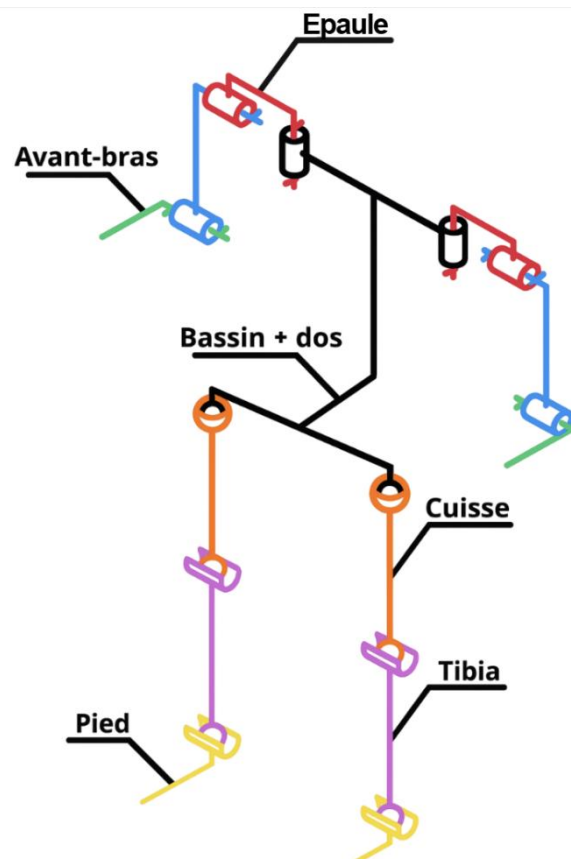


Figure 3 Schéma cinématique

Nous avons d'abord cherché à définir les dimensions critiques de l'exosquelette. Nous avons utilisé le module *Ergonomic Evaluation de 3DExperience* pour récupérer les données anthropométriques d'un homme nécessaires telles que la longueur de l'humérus ou encore la largeur d'épaule. Ces données ont servi de contraintes dimensionnelles pour garantir l'ergonomie de l'exosquelette et l'alignement des centres des liaisons avec les centres des articulations.

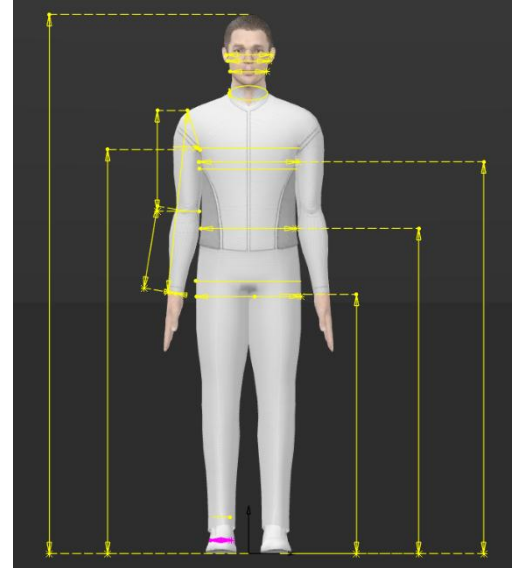


Figure 4 Module Ergonomic Evaluation

D. Modélisation et calcul dynamique

Introduction et Problématique du Dimensionnement

L'objectif de cette section est de déterminer avec précision les sollicitations mécaniques subies par les articulations du coude et de l'épaule lors d'une phase critique d'utilisation : l'épaulé-jeté d'une charge de 300 N. Pour garantir la fiabilité de la structure et le choix optimal des actionneurs pneumatiques, nous avons développé un modèle mathématique complet simulant le comportement dynamique du système.

Une analyse statique simple ne saurait suffire à dimensionner correctement les actionneurs pneumatiques, car elle ignorerait les effets d'inertie prédominants lors des phases d'accélération rapide. Cette section détaille donc le passage d'un système physique à un modèle mathématique résolu numériquement, permettant d'extraire les courbes de couple nécessaires à la conception de la transmission de puissance.

Hypothèses de Modélisation du Système

Pour modéliser le bras humain, nous avons opté pour une structure à deux degrés de liberté agissant dans le plan sagittal. Afin de garantir la solvabilité des équations tout en conservant une précision acceptable pour l'ingénierie, les hypothèses suivantes sont formulées :

- Segments Rigides : Les deux segments (bras et avant-bras) sont modélisés comme des barres indéformables de longueurs l_1 et l_2 .
- Répartition Homogène des Masses : Les centres de masse G_1 et G_2 sont supposés être situés au milieu de chaque segment.

- Inerties Simplifiées : Les moments d'inertie sont calculés sur la base de tiges minces, soit $I_G = \frac{1}{12} ml^2$.
- Frottements Négligés : Les pertes par frottement visqueux ou sec aux articulations (épaule et coude) sont considérées comme négligeables devant les couples de charge et d'inertie.
- Charge externe de 300 N considérée purement verticale
- Le mouvement d'épaulé jetée est réalisé en $t_2 = 3s$ avec $t_1 = 1,5s$ pour seulement l'épaulé.
- Les masses et longueurs des segment (bras et avant-bras) sont tirés des données anthropométriques.

Démarche de Résolution par le PFD.

Contrairement à une approche globale par les théorèmes de l'énergie cinétique, nous avons privilégié une résolution par le Principe Fondamental de la Dynamique. Cette méthode offre l'avantage de visualiser la transmission des efforts à travers chaque articulation via des Schémas de Corps.

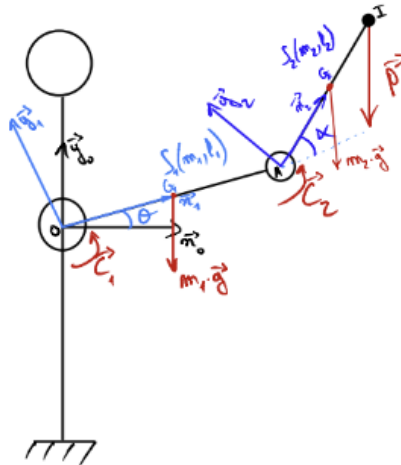


Figure 5: Schéma paramétré

La démarche se structure selon trois axes majeurs :

1. Étude Dynamique Inverse : Application du PFD successivement sur l'avant-bras (Segment 2), puis sur l'ensemble du système pour isoler les couples moteurs C_2 (coude) et C_1 (épaule). Cette étape intègre les termes de couplage inertiel, les effets centrifuges et de Coriolis, ainsi que le moment de la force externe P.
2. Étude Cinématique : Définition des lois de mouvement $\theta(t)$ et $\alpha(t)$ par des polynômes de degrés élevés (6 et 7). Ce choix est dicté par la nécessité d'annuler les accélérations aux bornes du mouvement pour éviter les chocs mécaniques et garantir le confort de l'utilisateur

mais aussi dans le but d'avoir des vitesses et accélération angulaire en fonction du mouvement pour l'expression de nos couples.

3. Analyse Numérique : Implémentation des équations littérales sous Python afin de simuler l'évolution temporelle des couples requis et d'identifier les valeurs de crête pour le dimensionnement des vérins pneumatiques.

Méthodologie et Établissement des Équations

La résolution a été menée en deux étapes distinctes :

- Isolation de l'avant-bras (Segment 2) : L'application du théorème du moment dynamique au point A (coude) a permis d'extraire l'expression de C_2 . Ce calcul intègre le moment d'inertie propre du segment, l'effet de la charge externe de 300N et les accélérations induites par le mouvement de l'épaule.
- Isolation de l'ensemble du système : En appliquant le PFD, et en particulier le théorème du moment dynamique au point O (épaule) pour l'ensemble {Segment 1 + Segment 2}, nous avons identifié le couple C_1 . Cette équation est plus complexe car elle inclut les termes de couplage inertiel, où le mouvement du coude influence directement l'effort nécessaire à l'épaule, ainsi que les effets centrifuges et de Coriolis générés par les vitesses angulaires combinées.

Ainsi, nous avons obtenu les expressions des couples C_1 et C_2 :

$$C_1 = \left[\left(\frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 \left(l_1^2 + \frac{1}{3} l_2^2 + l_1 l_2 \cos \alpha \right) \right) \ddot{\theta} \right] + \left[\left(\frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \alpha \right) \ddot{\alpha} \right] + \left[\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin \alpha \left(2\dot{\theta} \dot{\alpha} + \dot{\alpha}^2 \right) \right]$$

$$+ \left[\frac{1}{2} m_1 g l_1 \cos \theta + m_2 g \left(l_1 \cos \theta + \frac{l_2}{2} \cos(\theta + \alpha) \right) \right] + [P_y (l_1 \cos \theta + l_2 \cos(\theta + \alpha)) - P_x (l_1 \sin \theta + l_2 \sin(\theta + \alpha))]$$

Figure 6 : Expression du couple C_1

$$C_2 = \left[\left(\frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \alpha \right) \ddot{\theta} \right] + \left[\frac{1}{3} m_2 l_2^2 \ddot{\alpha} \right] + \left[\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin \alpha \dot{\theta}^2 \right] + \left[m_2 g \frac{l_2}{2} \cos(\theta + \alpha) \right] + [P_y (l_2 \cos(\theta + \alpha)) - P_x (l_2 \sin(\theta + \alpha))]$$

Figure 7 : Expression du couple C_2

Synthèse de Trajectoire par Interpolation Polynomiale :

La détermination des couples dynamiques nécessite de connaître à chaque instant la position, la vitesse et l'accélération des articulations. Pour transformer les positions de départ et d'arrivée en un mouvement fluide et continu, nous avons utilisé une interpolation polynomiale de haut degré.

Le choix de polynômes de degré supérieur n'est pas arbitraire. Dans un mouvement d'assistance pilotée, il est impératif d'éviter les discontinuités d'accélération qui provoqueraient des "coups de bélier" mécaniques et des secousses inconfortables pour l'opérateur, ce qui nous permet d'obtenir des courbes lisses.

Nous avons utilisé un polynôme de degrés 6 pour $\theta(t)$ et un polynôme de degrés 7 pour $\alpha(t)$. Les polynômes de degrés 6 et 7 viennent du fait que nous avons établis 7 conditions pour $\theta(t)$ et 8 conditions pour $\alpha(t)$:

Conditions aux limites : Pour chaque articulation, nous avons imposé six conditions : la position initiale/finale, une vitesse nulle aux bornes, et surtout une accélération nulle au démarrage et à l'arrêt plus des conditions en milieu de mouvement, c'est-à-dire en $t_1 = 1,5s$.

Cela assure que le vérin pneumatique pourra suivre la consigne sans subir de pics de pression brutaux.

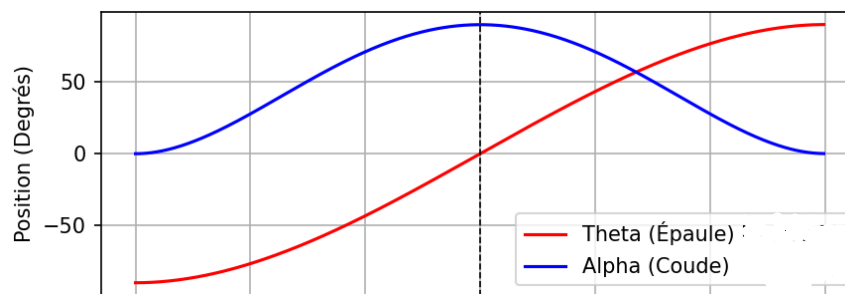


Figure 8 : Evolution des angles pendant le mouvement

L'implémentation de ces polynômes a permis d'obtenir des courbes de mouvement parfaitement lisses sur la durée totale du cycle de 3 secondes :

Cette maîtrise de la cinématique est le préalable indispensable au calcul dynamique : sans des accélérations finies et continues, les couples demandés aux moteurs seraient physiquement impossibles à réaliser.

Résolution numérique :

Une fois les équations littérales du mouvement établies par le PFD et les trajectoires définies par les polynômes, nous avons procédé à leur implémentation sous Python pour une résolution numérique. Cette étape de simulation numérique est cruciale pour discrétiser le mouvement et calculer les couples instantanés sur l'ensemble du cycle de 3 secondes.

Structure de l'algorithme

Le code développé repose sur une architecture séquentielle :

- Génération temporelle : Le mouvement est découpé en pas de temps très fins ($dt = 0,005s$) pour garantir la précision des calculs dynamiques.
- Évaluation cinématique : Pour chaque instant t , le script calcule les positions (θ, α), les vitesses et les accélérations en évaluant les polynômes de degrés 6 et 7.
- Calcul du Modèle Dynamique : Les expressions analytiques des couples C_1 et C_2 sont résolues à chaque pas de temps.

Exploitation des résultats graphiques

L'utilisation de la bibliothèque matplotlib a permis de générer les courbes de couples moteurs. Cette visualisation est fondamentale pour valider la physique du problème :

Elle permet de vérifier visuellement la cohérence des signes et la continuité des efforts.

Elle identifie précisément les pics de puissance nécessaires, indispensables pour dimensionner le débit d'air et la section des vérins pneumatiques dans la suite du projet.

Cette approche numérique offre une flexibilité totale : elle permet de tester instantanément l'impact d'un changement de masse des segments ou d'une modification de la charge soulevée sur le comportement des actionneurs.

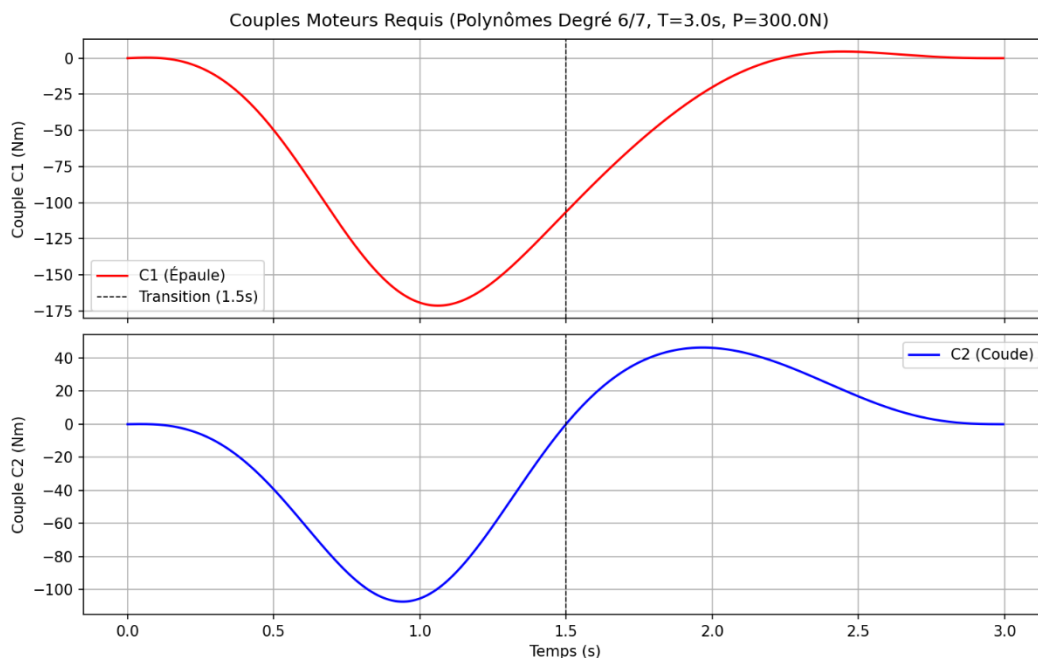


Figure 9 : Courbes des couples pendant le mouvement

```
Le couple maximal atteint par l'épaule (C1) est de : 171.23 Nm
Le couple maximal atteint par le coude (C2) est de : 107.42 Nm
```

Figure 10 : Couple maximum pendant le mouvement

Interprétations des Résultats

L'allure des courbes représente bien la physique de notre mouvement, nous pouvons ke remarquer notamment sur plusieurs phases :

- Démarrage et Arrêt à Zéro : Les courbes de C_1 et C_2 partent de 0 Nm et reviennent à 0 Nm à $t = 3s$. C'est la preuve directe que l'interpolation fonctionne pour annuler les accélérations aux bornes. Il n'y a aucun choc au démarrage ou à l'arrêt.

- La Phase d'Accélération (0s - 1s) : On observe une plongée des couples vers leurs valeurs négatives minimales. C'est le moment où les actionneurs doivent vaincre à la fois la gravité et l'inertie pour arracher la charge de 300 N du sol.
- Pics de couples (1s) : Les pics de couple (environ -171 Nm pour l'épaule et -107 Nm pour le coude) arrivent juste avant la transition de 1,5s qui est la phase d'épaulé. C'est la zone de "puissance maximale" du mouvement, où les articulations subissent le plus gros bras de levier de tout le mouvement.
- La Phase de Jeté (1.5s - 3s) : Le couple remonte et le coude (C_2) passe même en positif (pic à +45 Nm). Cela signifie que l'actionneur doit "freiner" ou soutenir le bras pour stabiliser l'extension finale vers le haut.

E. Planning

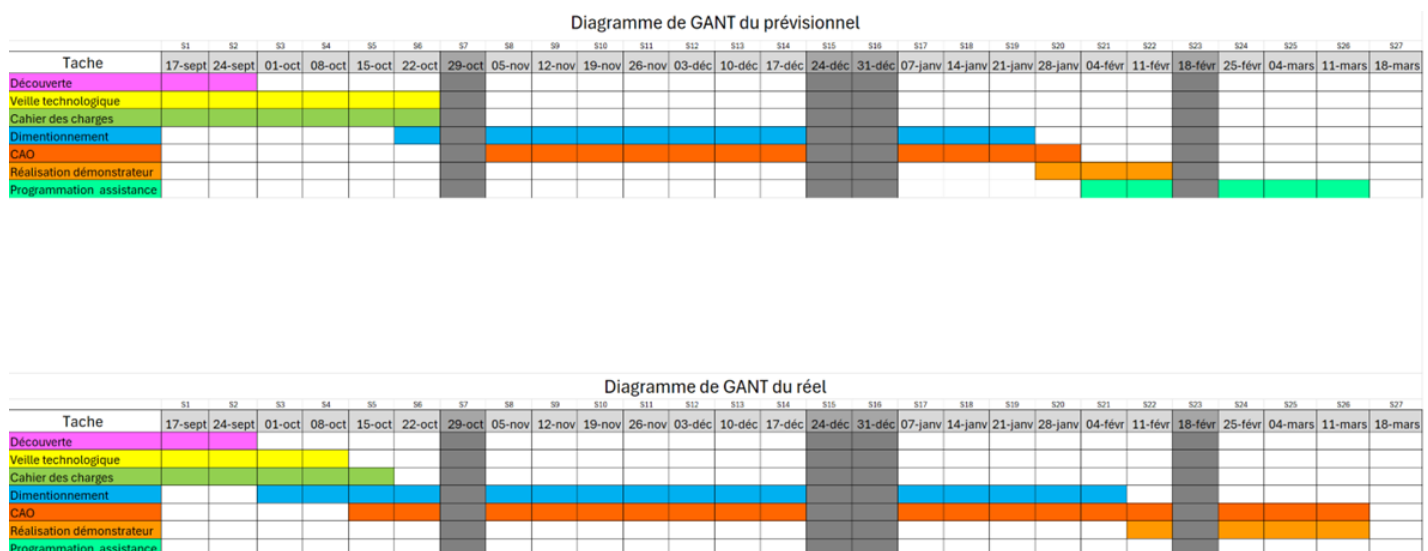


Figure 11 : Diagramme de GANT

Les jalons de la première phase (découverte, veille et cahier des charges ont globalement été respecté. En revanche celles du dimensionnement/CAO ont été sous-estimé. De plus, des retards de livraison (toujours pas reçu à ce jour) des modules actionneurs nous ont mis dans l'impossibilité de programmer l'assistance.

II. Actionneurs

A. Organigramme

Pour commencer, nous avons rédigé un organigramme permettant commander le fonctionnement de la partie puissance, en fonction du mouvement que l'utilisateur a besoin de faire :

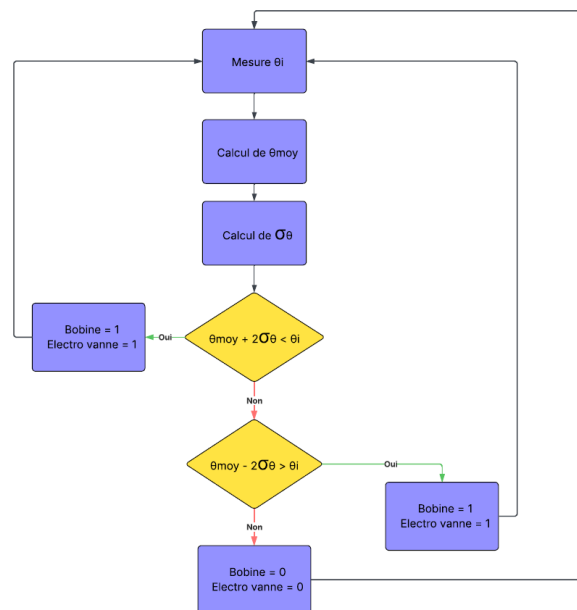


Figure 12 Organigramme

Le programme commence par prendre la position de plusieurs points θ_i . Il en calcule ensuite la moyenne puis l'écart type.

Si la somme de la moyenne des points précédent et de deux fois l'écart type est inférieure à la valeur du point mesuré, le système comprend que l'utilisateur souhaite lever le bras et actionne le distributeur. L'air est alors envoyé dans le muscle.

Dans le cas contraire, si la différence de la moyenne des points précédents et de deux fois l'écart type est supérieure à la valeur du point mesuré, le système comprend alors que l'utilisateur souhaite descendre le bras. Le distributeur alors cesse d'être alimenté et l'air s'échappe par l'échappement.

S'il ne s'agit d'aucun des deux cas précédents, cela veut dire que l'utilisateur ne souhaite pas bouger ou veut s'arrêter en cours de descente ou de montée. L'électrovanne est alors fermée pour bloquer le muscle dans la position souhaitée.

L'objectif de passer par un calcul de moyenne est d'empêcher le système de se déclencher sans besoin. La résolution du potentiomètre étant très faible, il ne faut pas qu'il déclenche l'assistance pour un mouvement parasite.

B. Partie pneumatique

Les principales contraintes du cahier des charges pour le choix de la technologie de l'actionneur sont la source d'énergie, la course, la force à exercer et enfin la compacité. Notre choix s'est donc porté sur un vérin pneumatique. Les calculs statiques et dynamiques ont montré que l'effort que doit générer le vérin doit être de 400 N.m, et doit avoir une course de 100 mm. Il est nécessaire d'en avoir un par articulation du haut du corps, soit 4.

Pour satisfaire les contraintes de compacité, de légèreté ainsi que la force à soulever, nous avons choisis la technologie de vérin à membrane McKibben. Il s'agit d'un « muscle » pneumatique sous la forme d'une membrane en caoutchouc tressée.

Sous l'effet de la pression, le diamètre du vérin augmente en même temps que sa longueur diminue. Il est alors capable d'exercer un effort de traction qui est fonction de son diamètre nominal et de son taux de rétrécissement.

Festo est actuellement la référence de la production d'équipement pneumatique. Il est à ce jour le seul fabricant de vérin à membrane en grande série du marché sous la référence DMPS.

Nous avons sélectionné le modèle DSMP-40-400N-RM-CM présentant les caractéristiques ci-dessous.

Données de base	
Taille	40 40 mm
N - Longueur nominale en mm	400 mm
Premier accouplement	RM Radial, filetage
Deuxième accouplement	CM fermé, filetage

Figure 13 : Caractéristiques du Vérin Festo DSMP-40-400N-RM-CM



Figure 14 Vérin à membrane Festo DMSP

Force/displacement graph
DMSP-40-400N-...

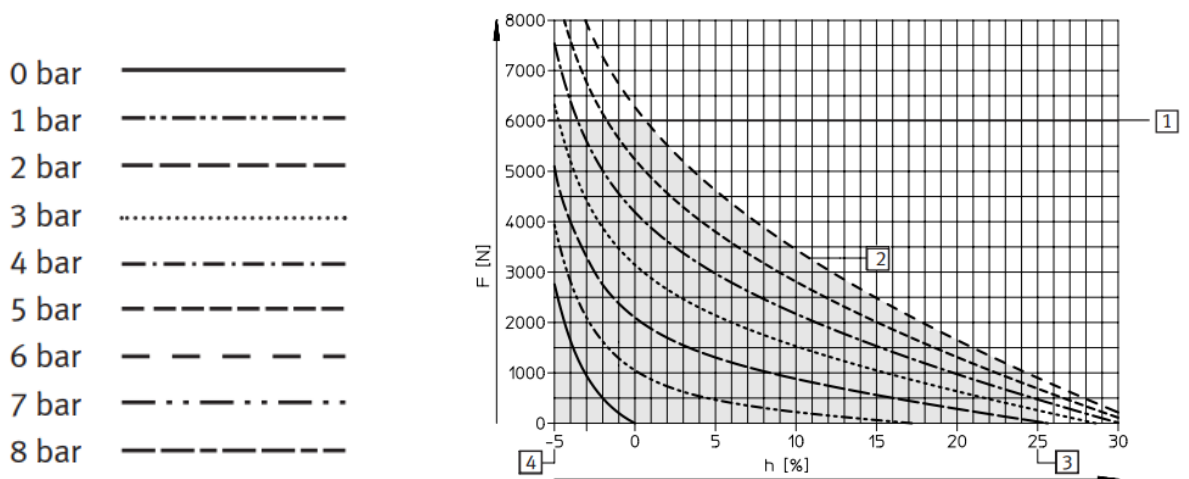


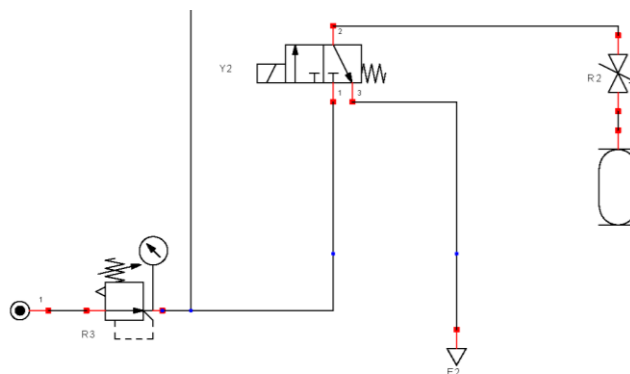
Figure 155 : Diagramme de la force exercée par le vérin en fonction de son pourcentage de contraction.

On constate que pour une pression nominale de 6 Bars, le vérin sera capable d'exercer un effort allant de 6000N à 5% de sa contraction jusqu'à 1000N à 25 % de sa course. La contrainte de force minimale exigée est validée.

Il est également indiqué sur les données du constructeur, que la course maximale du vérin vaut 25% de sa longueur initiale au repos. Ici, $400\text{mm} \cdot 0.25 = 100\text{mm}$. La contrainte de course est aussi validée

Il a donc une course largement suffisante pour répondre à notre besoin.

Afin d'alimenter le vérin en air, Nous avons imaginé le circuit pneumatique suivant :



Diamètre flexibles : 8mm
Pression nominale : 6 bars

Figure 16 6 : extrait du schéma pneumatique

L'alimentation en air se fait par une bouteille reliée à un détendeur puis à un limiteur de pression commun aux quatre distributeurs. Il s'agit de distributeur de type 3*2 à commande électrique monostables de la marque française Kaecia. Leur rôle est de diriger l'air soit vers le muscle pour le gonfler (et ainsi lever le bras), soit vers l'échappement pour le dégonfler (et baisser le bras) Entre le distributeur et le vérin est montée une électro vanne additionnelle permettant de fermer le circuit pour bloquer la position du bras de l'exosquelette en cas de volonté de l'utilisateur d'interrompre son mouvement.

C. Partie commande

Dans le but de récupérer l'information du désir de l'utilisateur de réaliser un mouvement, nous allons utiliser un capteur qui va nous permettre de connaître la position en temps réel du bras, avec un incrément de $0,36^\circ$, mais aussi le sens dans lequel le bras de l'utilisateur tourne.

Ce capteur sera lié à l'articulation de l'utilisateur par le biais d'une liaison engrenage dont on connaîtra le rapport de réduction.

Nous avons conçu un système de commande piloté par un microcontrôleur type Arduino :

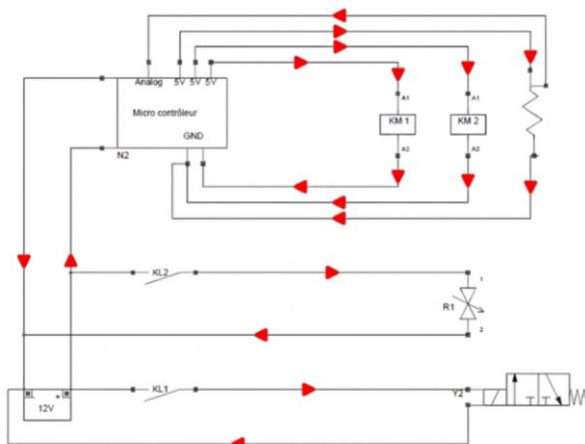


Figure 17 7 schéma de la partie commande

La carte reçoit des informations venant du potentiomètre et pilote par le biais des relais 12V KM1 et KM2 l'ouverture et la fermeture du distributeur et de l'électrovanne. Le tout est alimenté par une batterie 12V sous la forme d'accumulateurs.

III. Conception

A. Partie dos

Afin de simplifier la conception du dos, il a été décidé de se baser sur un harnais déjà existant.

Dans un souci de praticité pour fixer les différents éléments de l'exosquelette notre choix s'est porté sur le harnais Ripagreen qui comporte une plaque en aluminium dans le dos.

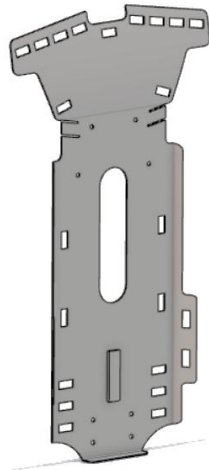


Figure 18 8 3D plaque du
harnais



Figure 19 9 harnais Ripagreen

Afin de pouvoir fixer les éléments de la conception il a d'abord fallu recréer en 3D la plaque du harnais (plan en annexe).

A la suite de cela nous avons pu chercher une solution pour fixer les actionneurs dans le dos. Plusieurs choix se sont présentés : placer les muscles pneumatiques inclinés pour gagner de la place en hauteur



Figure 20 11 Assemblage des actionneurs

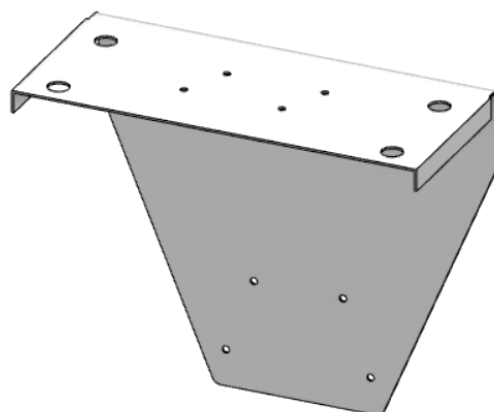


Figure 21 10 Plaque de fixation

ou les placer droit mais rajouter une rallonge en haut de la plaque. Cependant le fait d'avoir une bouteille d'air comprimé dans le dos ne permet pas de placer les actionneurs inclinés. Les actionneurs sont donc fixés sur une plaque en L en acier qui est riveté par 4 rivets à la plaque du harnais. Afin de rigidifier la structure des renforts ont été rajoutés. (Plan en annexe)

Les rivets choisis sont des rivets pop à tête large pour un serrage plus efficace. Ils feront au minimum 6mm de diamètre et 11mm de longueur.

De plus, afin de modéliser au mieux les volumes de la partie du dos de l'exosquelette nous sommes venus modéliser la bouteille d'air comprimé de taille standard. Cette bouteille sera en appui sur le rebord en bas de la plaque et elle sera fixée au moyen de 2 sangles qui passeront dans les ouvertures de la plaque du dos.

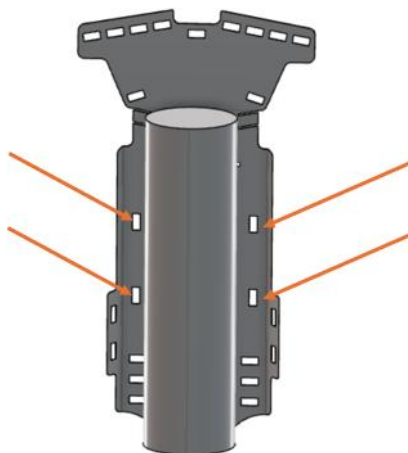


Figure 22 12 Encombrement de la bouteille dans le dos

La transmission de l'effort fourni par les muscles pneumatique est transmise par câble. Ces câbles seront dans une gaine afin de les maintenir et de les guider jusqu'aux poulies. Le câble choisi est un câble de 3 mm de diamètre souple en acier galvanisé.

Il a fallu également rajouter une plaque en bas du dos pour venir bloquer dessous la gaine (plan en annexe). Cette plaque est rivetée par 4 rivets pop à la plaque du dos. Le câble sera fixé en bas du muscle pneumatique sur l'embout ainsi que sur les poulies des bras.

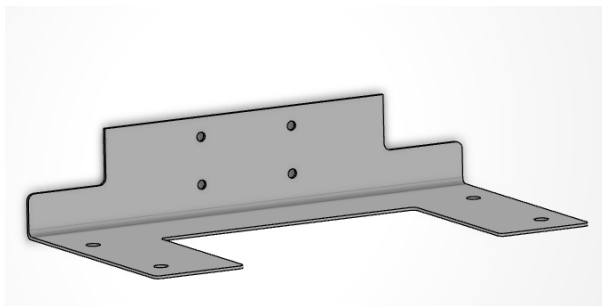


Figure 23 13 Plaque de blocage



Figure 24 14 Fixation du câble aux muscles pneumatiques

Afin de commander les actionneurs il est nécessaire de placer des distributeurs. Ils se placent entre les muscles pneumatiques et la bouteille d'air comprimé. Du fait du peu de place dans le dos et de l'obligation de placer les distributeurs avec l'orifice d'entrée orienté vers les muscles

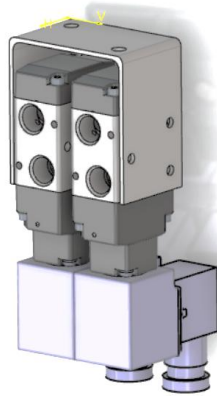


Figure 25 16 Assemblage de 2 distributeurs

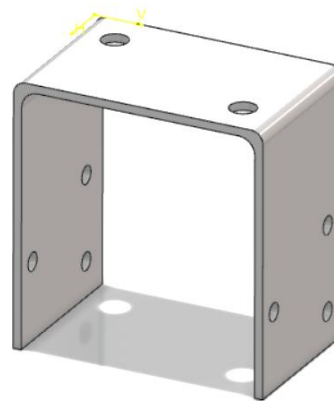


Figure 26 15 pièce de fixation

il a été nécessaire de réfléchir à une solution répondant au 2 contraintes. Pour cela nous avons choisi de les fixer 2 par 2 sur des supports qui viendront se visser sur la plaque en L (plan en annexe).

Après l'assemblage des pièces on obtient la partie du dos de l'exosquelette sur lequel les parties des bras et des jambes viendront se fixer.

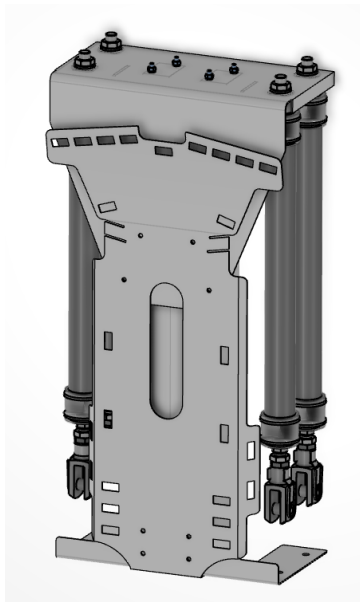


Figure 27 17 Vue de face de l'assemblage



Figure 28 18 Vue de dos de l'assemblage

B. Partie bras

Pour la conception du bras, nous avons fait le choix stratégique de ne pas placer les actionneurs directement sur les articulations. L'objectif est double : limiter l'encombrement autour du membre de l'utilisateur et réduire au maximum le poids porté par le bras pour maximiser le ROI (Return on Investment) de l'exosquelette.

Ce déport des actionneurs vers le dos a naturellement imposé le choix d'une transmission par câbles pour acheminer la puissance vers les articulations. Ce choix a nécessité l'intégration de poulies sur chaque articulation (épaule et coude), rendues solidaires des parties mobiles. Toutefois, pour garantir un couple suffisant, nous avons privilégié des poulies de grand diamètre. Afin de réduire les masses embarquées, ces poulies ont été ajourées.

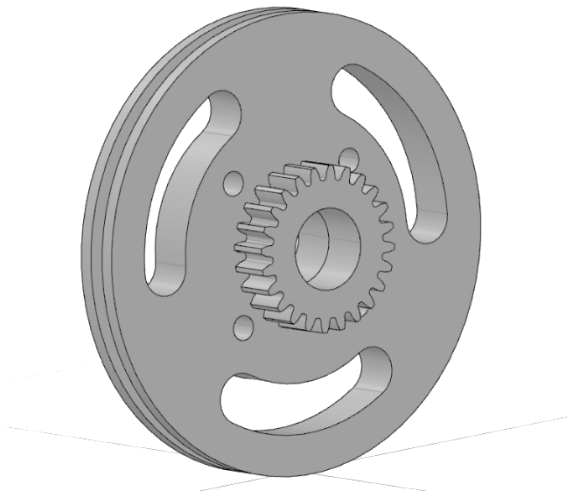


Figure 2920 Vue isométrique de la poulie



Figure 30 19 Vue de côté poulie

En parallèle de la puissance, il a fallu gérer la commande. Nous avons donc intégré un potentiomètre engrené directement sur la poulie de l'épaule. Ce capteur permet de détecter en temps réel la rotation du bras de l'utilisateur. L'information ainsi récupérée sert de consigne au microcontrôleur.

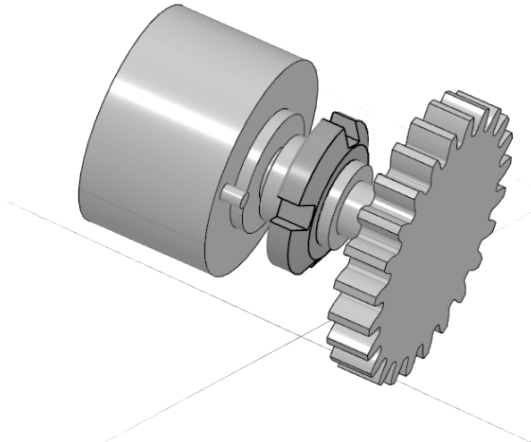


Figure 3121 Vue isométrique potentiomètre

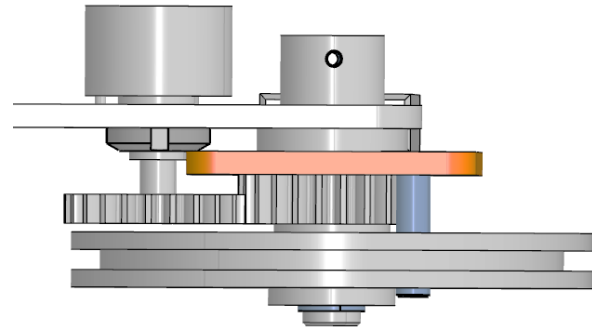


Figure 32 22 Vue du dessus assemblage
épaule

Concernant le guidage, les liaisons pivots de l'épaule et du coude ont été réalisées avec des coussinets à collerette tandis que la liaison rotule entre le dos et l'épaule a été réalisée par un embout à rotule.

Pour que l'exosquelette puisse s'adapter aux différentes longueurs de bras mesurées lors de notre étude anthropométrique, nous avons intégré un système de réglage coulissant. Pour ce faire, la liaison entre les segments du bras est assurée par un trou oblong. Ce choix permet de faire varier la longueur du bras manuellement sans outils, grâce à l'utilisation de vis moletées. Ce système garantit que les axes de rotation des liaisons de l'exosquelette coïncident parfaitement avec ceux de l'utilisateur, quelle que soit sa taille.

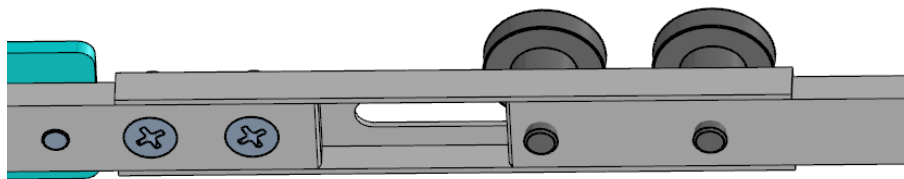


Figure 33 23 Réglage du
bras

Enfin, pour finaliser l'assemblage, nous avons privilégié des vis à tête fraisée sur l'ensemble du bras. L'idée est d'éviter qu'une saillie ne puisse blesser l'utilisateur ou accrocher un vêtement, tout en donnant au bras une finition plus soignée.

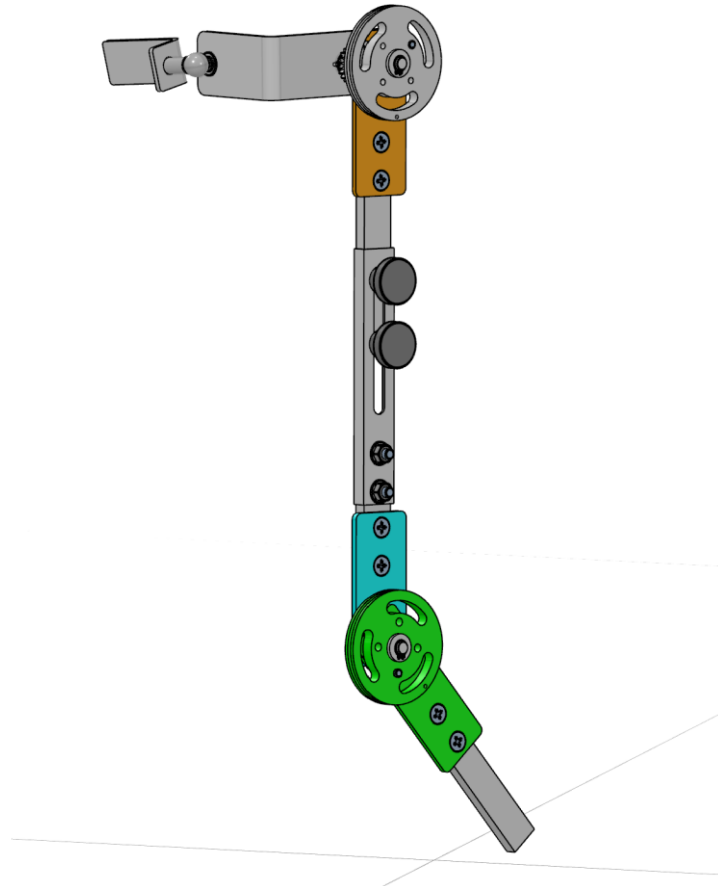


Figure 24 34 Assemblage complet du bras

C. Partie jambes

Pour la conception de la partie jambes, la première étape a été de lier le haut de la jambe à la partie dos. En effet, pour maximiser le confort d'utilisation, une descente de charge est prévue, ainsi le poids

n'est pas supporté par l'utilisateur mais va directement au sol. La charge descend sur la partie basse de l'exosquelette depuis l'embout à rotule.

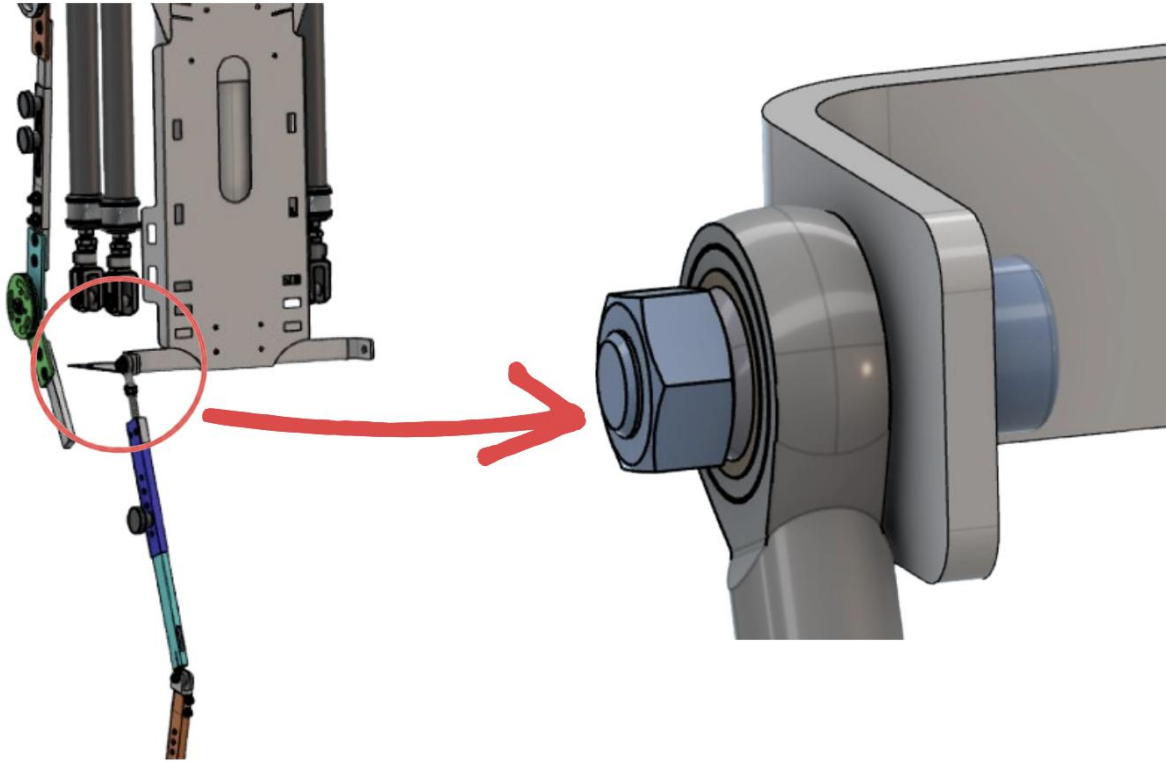


Figure 35 25 : Passage de descente de charge

Elle doit ensuite théoriquement passer le ressort de deux manières :

- Ressort comprimé ($L=L_0$), la charge passe comme par un appui simple à la pièce suivant.
- Ressort partiellement comprimé, c'est plus compliqué, il y a un balancement entre la force qui passe par le ressort, et l'autre qui est soutenue par l'utilisateur, difficile à quantifier. La solution est de précharger le ressort. Ainsi il prendra plus de charge sur sa plage d'utilisation.

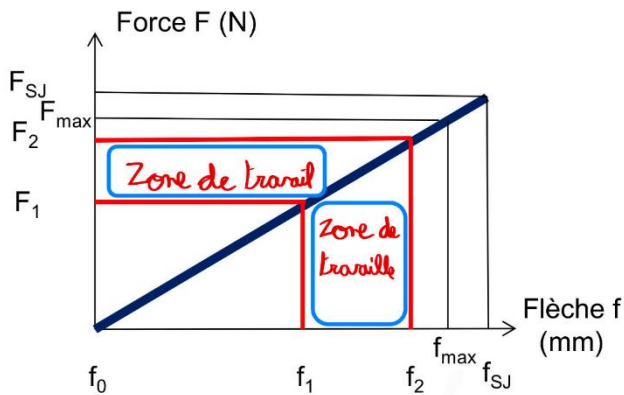


Figure 3626 Schéma plage d'utilisation d'un ressort

De plus, la pièce qui fait la liaison avec le sol à une forme bien particulière de crochet afin d'assurer son contact avec le sol.

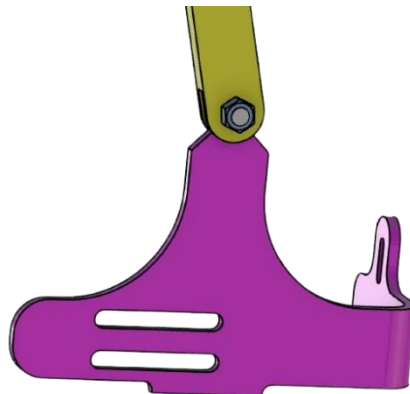


Figure 3727 Vue isométrique du pied

La modification de la longueur au niveau de la cuisse, de manière analogue à l'épaule, précédemment vu a été anticipé : En effet le point de rotule de l'exosquelette est fixe et n'est pas confondu avec celui de notre hanche. En revanche ces deux points immobiles l'un par rapport à l'autre, peu importe le mouvement de l'utilisateur, ils sont séparés d'approximativement 100mm (demi-épaisseur cuisse + exosquelette).

Afin de dimensionner la course, nous allons nous placer dans le cas le plus critique : lors d'un mouvement latéral de la jambe de 80°.

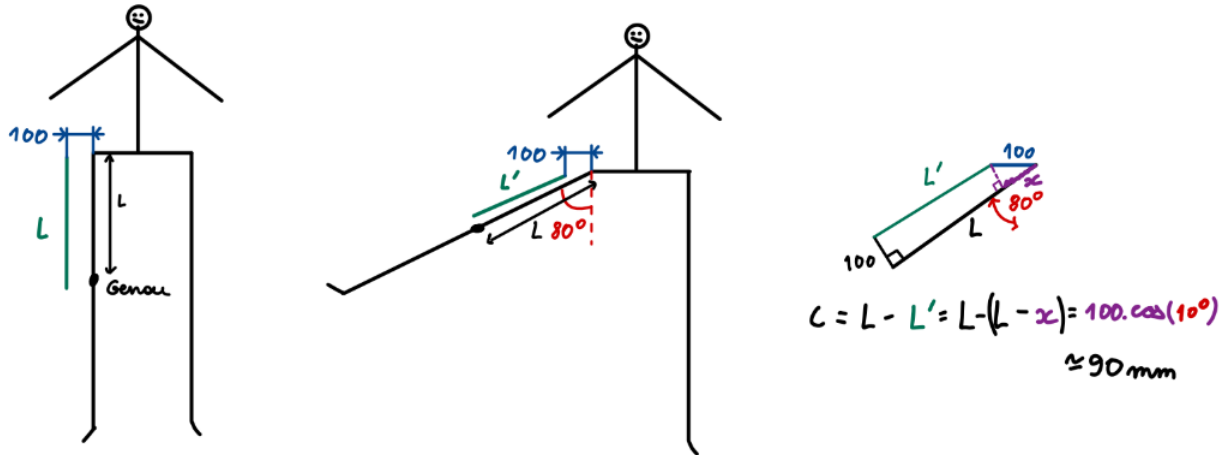


Figure 28 38 Schéma dimensionnement de la course du ressort

Nous avons ainsi nécessité d'une course de 90mm au niveau de la cuisse. Pour cela, nous utilisons un ressort tel que $L - L' > 90\text{mm}$. L'embout à rotule est monté avec un système d'écrou - contre écrou afin de piloter le réglage angulaire sur un axe. L'axe est lui en liaison pivot (pour ne pas sur contraindre par rapport à une glissière) glissant afin de laisser agir le ressort.



Figure 39 Vue isométrique de la jambe

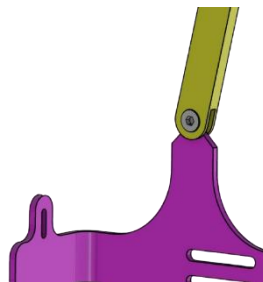


Figure 40 Vue isométrique du pied

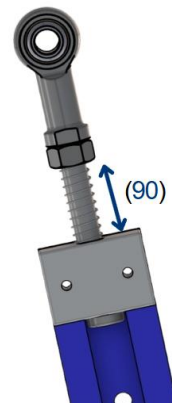


Figure 41 Vue du ressort

Sécurité : Les surface coté utilisateur ont toutes été lissé afin de ne pas le blesser. Le risque de coupure se trouve principalement au niveau des vis, qui, couplé à une position dangereuse et une forte charge pourrait appliquer une pression (inversement proportionnel à la surface de contact, donc on veut la maximiser et éviter les petites surfaces comme le bout d'une vis) élevée aux niveaux du genou et/ou de la malléole. C'est pourquoi les axes de l'exosquelettes ont leurs têtes coté utilisateurs, et sont accompagnés d'un retrait.

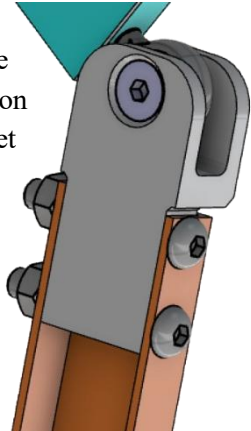
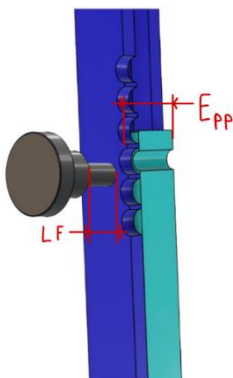


Figure 42 : Surfaces contact utilisateur



De plus la longueur de filetages (LF) des deux vis moletées de réglage ont été dimensionné plus courte que la longueur pièces afin que la vis ne rentre pas en contact avec l'utilisateur.

Figure 43 Système de réglage

Comme vu précédemment, l'adaptabilité aux différentes morphologies est primordiale. Pour cela, nous nous sommes basés sur les données suivantes :

Min tibia	Min cuisse	Max tibia	Max cuisse
380mm	510mm	440mm	520mm

Pour faire le réglage, il suffit de dévisser la vis moletée et la mettre dans le contre-perçage souhaité, qui permet de bloquer le 6e degré de liberté de la liaison glissière. Les données anthropométriques

Le critère de facilité de mise en œuvre est primordial, c'est pourquoi la liaison du corps

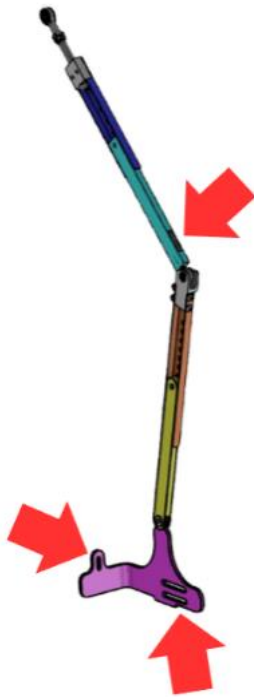


Figure 45 Schéma du placement des sangles de maintien

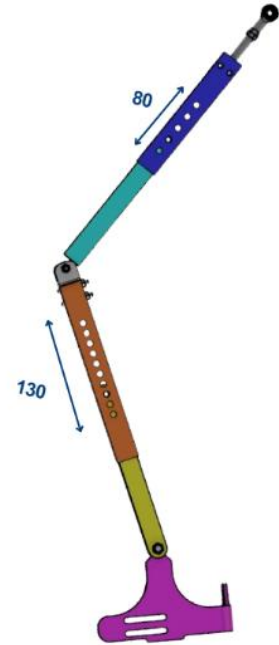


Figure 44 Vue isométrique de la jambe

IV. Résultats

Après avoir assemblé un bras et une jambe sur la partie du dos (évidemment, nous obtenons la conception complète de l'exosquelette. Cet assemblage a pu être validé lors d'une réunion de fin de projet avec Bruno Badoux, notre référent au sein de l'entreprise.

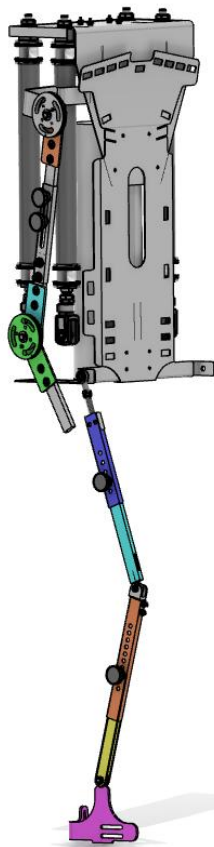


Figure 46 Vue isométrique avant de l'exosquelette

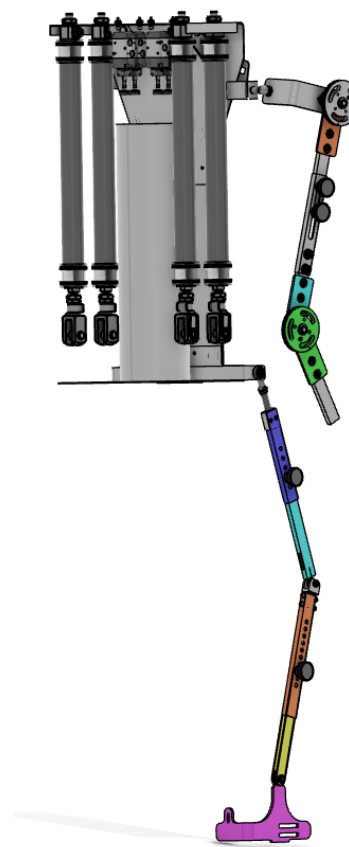


Figure 47 Vue isométrique arrière de l'exosquelette

Conclusion

L'ensemble des objectifs fixés au début de ce projet a été atteint, avec la réalisation de la totalité des livrables attendus. Ces éléments ont été présentés et officiellement validés lors d'une réunion avec Cemex.

Au cours de nos recherches, nous avons identifié des verrous technologiques majeurs, principalement liés à la compacité des actionneurs et aux difficultés de stockage de l'énergie pneumatique, dont les dispositifs actuels demeurent encombrants.

Le projet va être transféré à un ingénieur de l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM) pour la réalisation d'un prototype, permettant de passer du TRL3 (proof of concept) au TRL4 (validation en laboratoire).

D'un point de vue humain et organisationnel, ce projet a été particulièrement exigeant. Partir d'un besoin brut nous a offert une grande liberté d'action, mais a également imposé une charge de travail complexe pour structurer la démarche. Nous avons dû apprendre à transformer des besoins en livrables concrets tout en tenant compte des contraintes liées à la proximité directe entre l'humain et l'exosquelette. Cette expérience nous a permis de progresser sur la gestion de notre organisation : avec le recul, nous identifions un besoin de structurer davantage nos jalons et systématiser la mise en commun des travaux lors de réunions plus fréquentes.

En conclusion, travailler sur un domaine aussi innovant et en plein développement que celui d'exosquelette a été une expérience formatrice. Malgré les difficultés rencontrées, cet exercice nous a permis de confronter notre vision théorique à la réalité d'un besoin industriel.

Annexes

FP1 : Assister l'opérateur

FP1.1 Doit assister l'opérateur lors du soulèvement de la charge

FP1.2 Doit assister l'opérateur lors du transport de la charge

FP2 : Délivrer une assistance

FC1 : Être alimenté en énergie

FP2.1 Avoir une certaine autonomie

FP2.2 Être rechargeable

FC2 : Résister aux conditions extérieures

FC1.1 Résister à la corrosion

FC1.2 Résister à la poussière

FC1.3 Résister aux projections de béton

FC1.4 Résister aux chocs

FC3 : Doit s'adapter à chaque utilisateur

FC2.1 Doit s'adapter à différents poids

FC2.2 Doit s'adapter à différentes tailles

FC4 : Doit être ergonomique

FC3.1 Doit permettre une liberté de mouvement des membres supérieurs

FC3.2 Doit permettre une liberté de mouvement des membres inférieurs

FC3.3 Doit permettre une liberté de mouvement du buste

FC5 : Doit être facile d'entretien

FC6 : Doit être facile d'utilisation

FC5.1 Doit être compatible avec le port d'EPI

FC5.2 Doit être rapidement enfilable

FC7 : Doit être facilement stocké

FC8 : Doit garantir la sécurité de l'utilisateur

FC7.1 Doit être facile et rapide à enlever

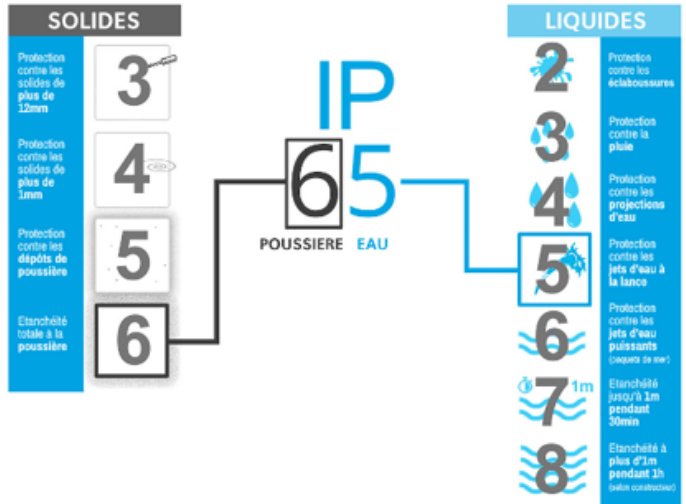
FC7.2 Doit respecter les normes de sécurité

	Fonctions	Critères	Exigences	Flexibilité
FP1	Assister l'opérateur durant toutes les phases d'une opération de coulée	Réduction d'effort lors du soulèvement de charge	Jusqu'à 50 % max Sur le port de charge jusqu'à 2m de haut	F3
		Réduction d'effort lors du transport de charge	Jusqu'à 50% max Dans des escaliers	F3
FP2	Délivrer une assistance	Puissance	A définir	F3
FC1	Être alimenté en énergie	Autonomie	½ journée (4-6h)	F2
		Recharge	Changement de la bouteille d'air comprimé	F2
FC2	Résister aux conditions d'un chantier	Résistance à la corrosion	Résistance aux produits de nettoyage	F3
		Résistance aux projections de béton	Résistance pH de 12 à 13 (pH du béton frais).	F3
		Résistance à la poussière	Norme IP65	F2
		Résistance au choc	Norme IK08 (Chute de 1m)	F3
FC3	Doit s'adapter aux différentes morphologies	Poids	80kg < poids porteur < 140kg	F2
		Hauteur	160cm < Taille < 200cm	F3
FC4	Permettre la liberté de mouvement des membres	Liberté de mouvement	120° de flexion/extension des jambes 20° d'abduction des hanches 75° d'abduction des bras 100° de rotation de l'épaule 150° de flexion du coude 180° rotation du bras	F3
FC5	Être facilement nettoyable après utilisation	Nettoyage	Lavable à l'eau haute-pression, résistance aux détergents, séchage rapide	F2
FC6	Être facile et rapide à mettre et enlever	Facilité d'utilisation	<5 minutes, compatible avec le port d'EPI	F2
FC7	Pouvoir être stocké facilement	Stockage	Compact, rangement dans cabine de camion Longueur : 200cm ; Largeur : 70cm ; Hauteur : 150cm	F1
FC8	Garantir la sécurité de l'utilisateur	Sécurité	Possibilité de décrochement en 20 sec Respect des normes ISO et CE	F3

Norme IK

Indice IK	ÉNERGIE (en joules)	Équivalent à l'impact d'une chute de	
		POIDS	HAUTEUR
IK00	Pas de protection	/	/
IK01	0,15 joule	150 g	10 cm
IK02	0,20 joule	200 g	10 cm
IK03	0,35 joule	250 g	14 cm
IK04	0,50 joule	250 g	20 cm
IK05	0,70 joule	350 g	20 cm
IK06	1 joule	500 g	20 cm
IK07	2 joules	500 g	40 cm
IK08	5 joules	1 700 g	30 cm
IK09	10 joules	5 000 g	20 cm
IK10	20 joules	5 000 g	40 cm

Norme IP



Annexe 3 Normes

- Norme NF X 35-800 « Ergonomie – Méthode d'intégration des dispositifs et robots d'assistance physique à contention de type exosquelette - Expression des besoins, sélection, conception, évaluation et déploiement »
- La norme IEC 61508 traite de la sûreté de fonctionnement des systèmes électriques, électroniques et électroniques programmables (comme l'électronique numérique et les logiciels) pour l'industrie
- ISO 13482 :2014 : Robots et composants robotiques – Exigences de sécurité pour les robots collaboratifs.
 - Applicable si l'exosquelette est motorisé ou assisté par des actionneurs.
 - Couvre les risques liés à l'interaction homme-robot (pincement, collision, mouvements involontaires).
- ISO/TS 15066 :2016 : Robots collaboratifs – Guide pour l'évaluation des risques et la réduction des risques.
 - Complète l'ISO 13482 en détaillant les méthodes d'évaluation des risques pour les exosquelettes.
- Accord AC Z68-800 Dispositifs d'assistance physique à contention de type exosquelettes robotisés ou non - Outils et repères méthodologiques pour l'évaluation de l'interaction humain-dispositif

Annexe 4 Normes

Simogramme Exosquelette Cemex

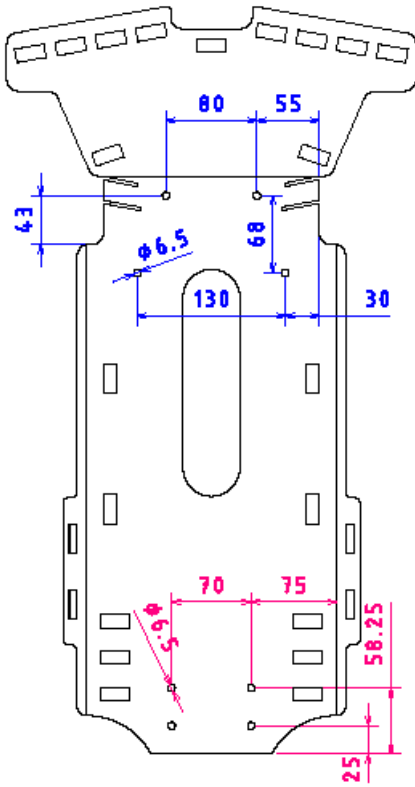


Légende :

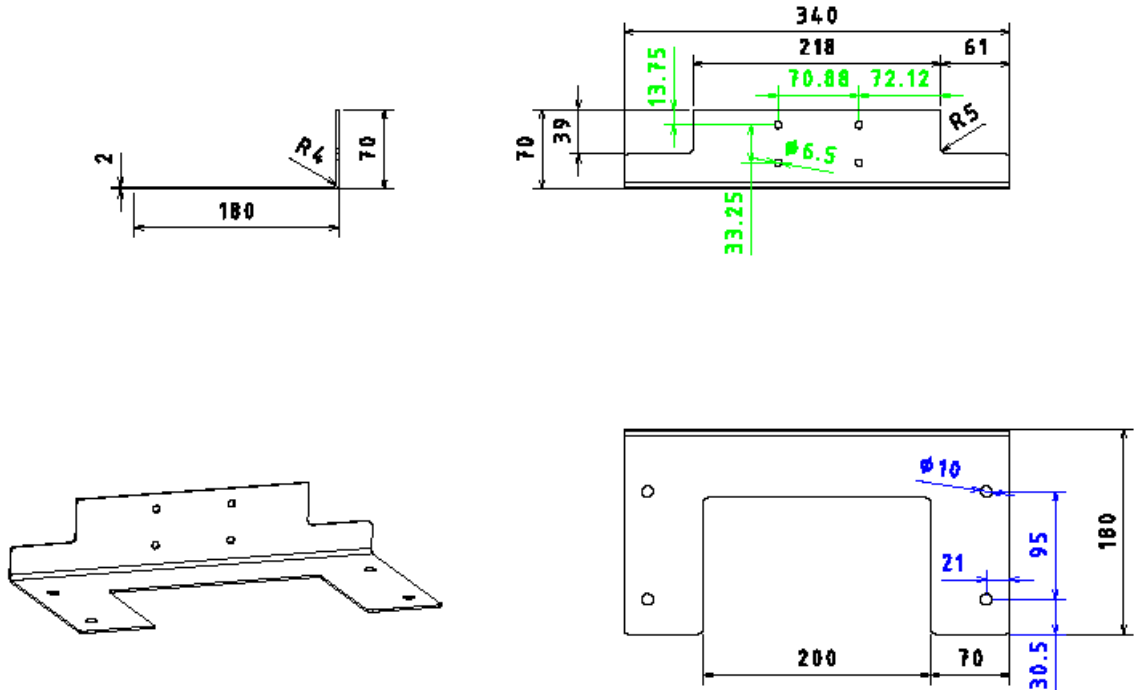


- A: Saisir le tuyau à 2m de hauteur et le poser sur l'épaule
- B: Marcher avec le tuyau
- C: Poser le tuyau au sol
- D: Se mettre en position accroupie
- E: Positionner le collier de serrage
- F: Utiliser une massette pour serrer le collier
- G: Se déplacer sur le lieu de desserrage
- H: Se mettre en position accroupie
- I: Utiliser une massette pour desserrer le collier
- J: Se baisser pour saisir le tuyau
- K: Soulever une extrémité du tuyau et le vider
- L: Reposer le tuyau au sol
- M: S'abaisser pour nettoyer le tuyau
- N: Tenir le nettoyeur haute pression en faisant tourner le tuyau
- O: Porter le tuyau sur l'épaule
- P: Marcher avec le tuyau
- Q: Lever le tuyau au dessus de la tête pour le ranger

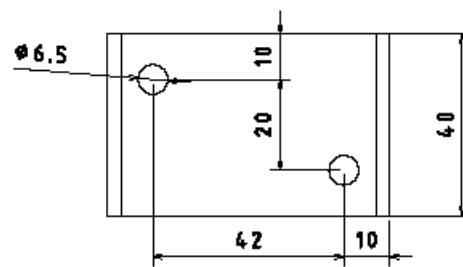
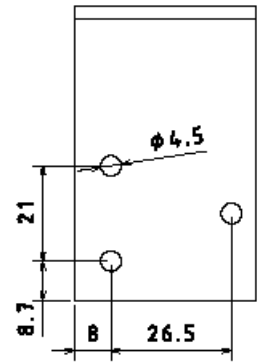
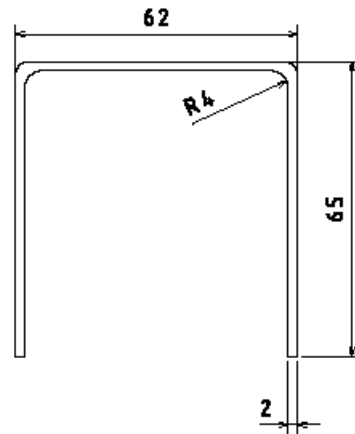
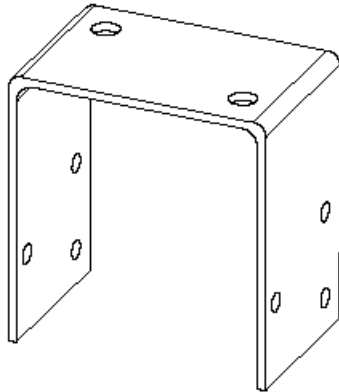
Annexe 5 Simogramme



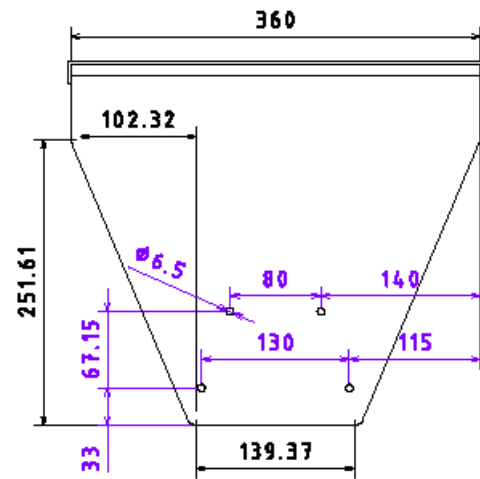
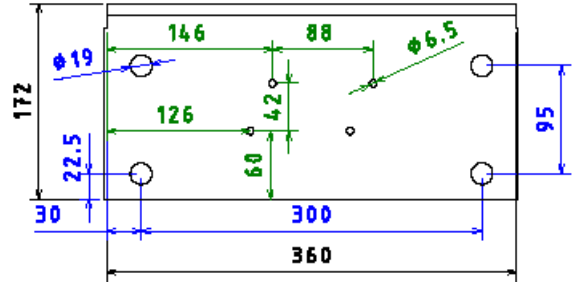
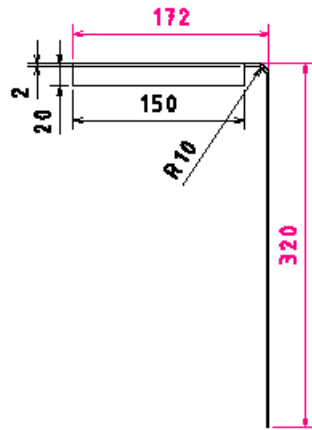
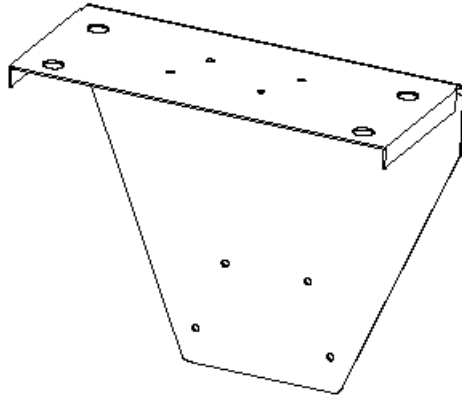
Annexe 6 dessin plaque du dos



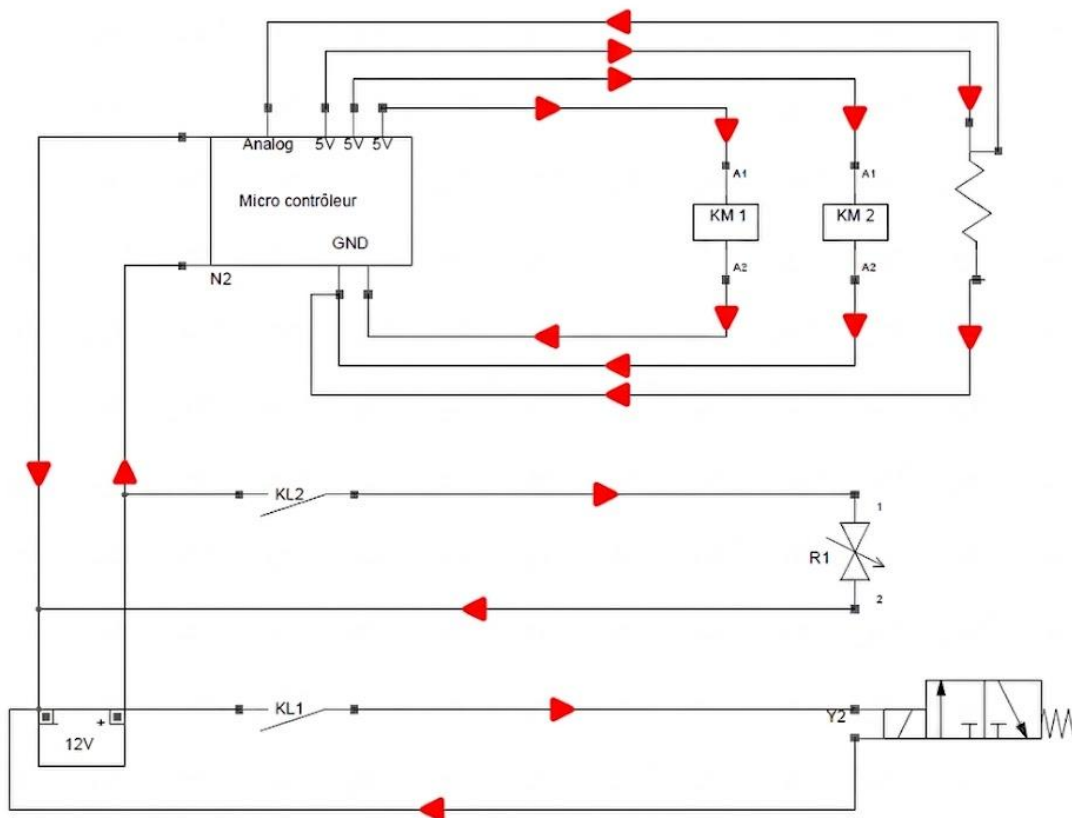
Annexe 7 plan plaque du bas



Annexe 8 plan support distributeur



Annexe 9 plan plaque du haut



Annexe 10 Schéma partie commande

