

# EXONOTOS

## EXOSQUELETTE PNEUMATIQUE



Alexandre Debrus  
Adrien Lopez  
Jules Thuillier  
Adèle Shi

Monsieur Calbo,  
professeur de physique/chimie

# PLAN DU COMPTE RENDU

<b>I. Introduction:</b>	<b>3</b>
A. Le problème	3
1. Soulever des charges lourdes avec le moindre effort possible	3
B. Les solutions actuelles de compensation par exosquelette	3
<b>II. Notre proposition</b>	<b>4</b>
A. Scénario d'utilisation opérationnelle	4
<b>III. L'architecture de la solution</b>	<b>4</b>
A. Diagramme de contexte	4
B. Les différents éléments et comment ils interagissent	6
C. Les limitations du projet	7
<b>IV. Soulever des charges sans effort</b>	<b>7</b>
A. Supporter la charge	7
Photo de l'armature incomplète:	9
deux jambes, un bras et le tronc	9
B. Soulever la charge	10
<b>V. Traduire les mouvements</b>	<b>15</b>
A. Placement des muscles	15
B. Réseau d'air comprimé	16
<b>VI. Les suites possibles du projet</b>	<b>17</b>
A. Muscles avec compression par fluide	17
B. Protection extérieur de l'utilisateur	17
C. Armature flexible	17
<b>VII. Conclusion</b>	<b>18</b>
<b>VIII. Bibliographie</b>	<b>18</b>
<b>IX. Lien vidéo:</b>	<b>18</b>

# I. Introduction:

## A. Le problème

### 1. Soulever des charges lourdes avec le moindre effort possible

Ce projet a pour but de répondre à la problématique, courante tant dans le monde l'industrie que des services de soulever une charge avec le moins d'effort possible. En effet, dans les usines de production, les hôpitaux, les missions de sécurité civiles ou militaires, soulever des charges de façon simple et rapide améliorerait la productivité et l'ergonomie des postes de travail. L'exosquelette que nous avons mis au point est plus rapide à transporter et à manier par rapport aux autres procédés de soulèvement de charges. Son encombrement est faible et il supporte son propre poids.

## B. Les solutions actuelles de compensation par exosquelette

Il existe déjà quelques exosquelettes en fonctionnement dans le monde qui permettent de décupler la force ou de transporter des charges lourdes sans effort mais la plupart sont encore en développement ou en phase d'amélioration. Nous citerons à titre d'exemple le projet Hercule. Hercule est un exosquelette, développé par la société française RB3D, capable d'accompagner les mouvements de son utilisateur tout en décuplant ses forces. Ce robot collaboratif, constitué de deux jambes en acier, pèse 32 kg et est capable de supporter jusqu'à 40 kg de charge. Son autonomie est de 5 heures à 4 km/h, il peut donc couvrir approximativement 20 km. Le projet est à l'heure actuelle en cours de conception des bras. Au Japon, le vieillissement de la population a suscité des recherches sur les exosquelettes. Cependant, ces projets ne permettent pas de porter des charges au dessus de 40 kg sans effort.

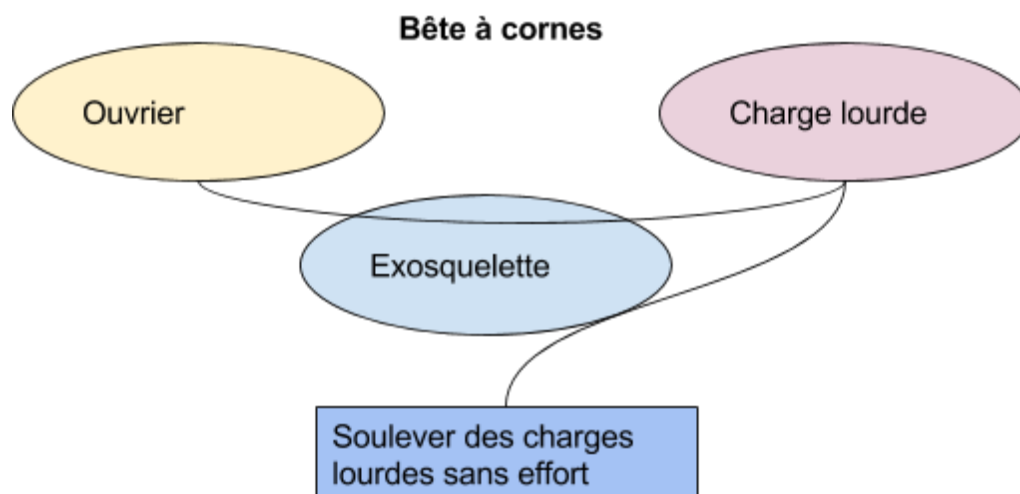
## II. Notre proposition

### A. Scénario d'utilisation opérationnelle

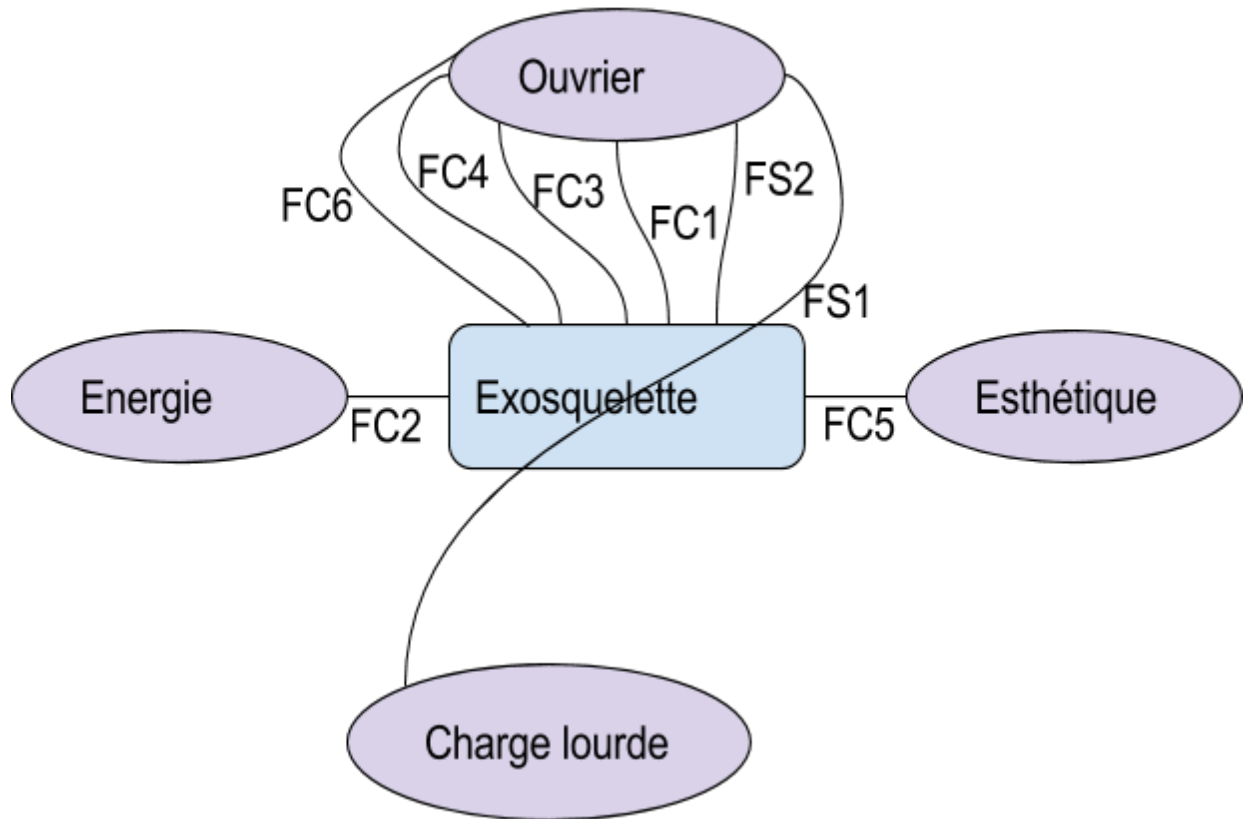
L'exosquelette que nous proposons doit permettre d'accroître le rythme de production et de rendement des ouvriers dans le milieu industriel, en facilitant l'exécution des tâches les plus répétitives et pénibles, et de dépasser les limites physiques humaines, notamment en portant des charges jusque là réservées uniquement aux machines outils, voire aux engins.

## III. L'architecture de la solution

### A. Diagramme de contexte



### diagramme pieuvre



#### Description fonctionnelle:

FP1: soulever des charges lourdes jusqu'à 80 kg sans effort

FP2: traduire les gestes humains

FC1: être sécurisé

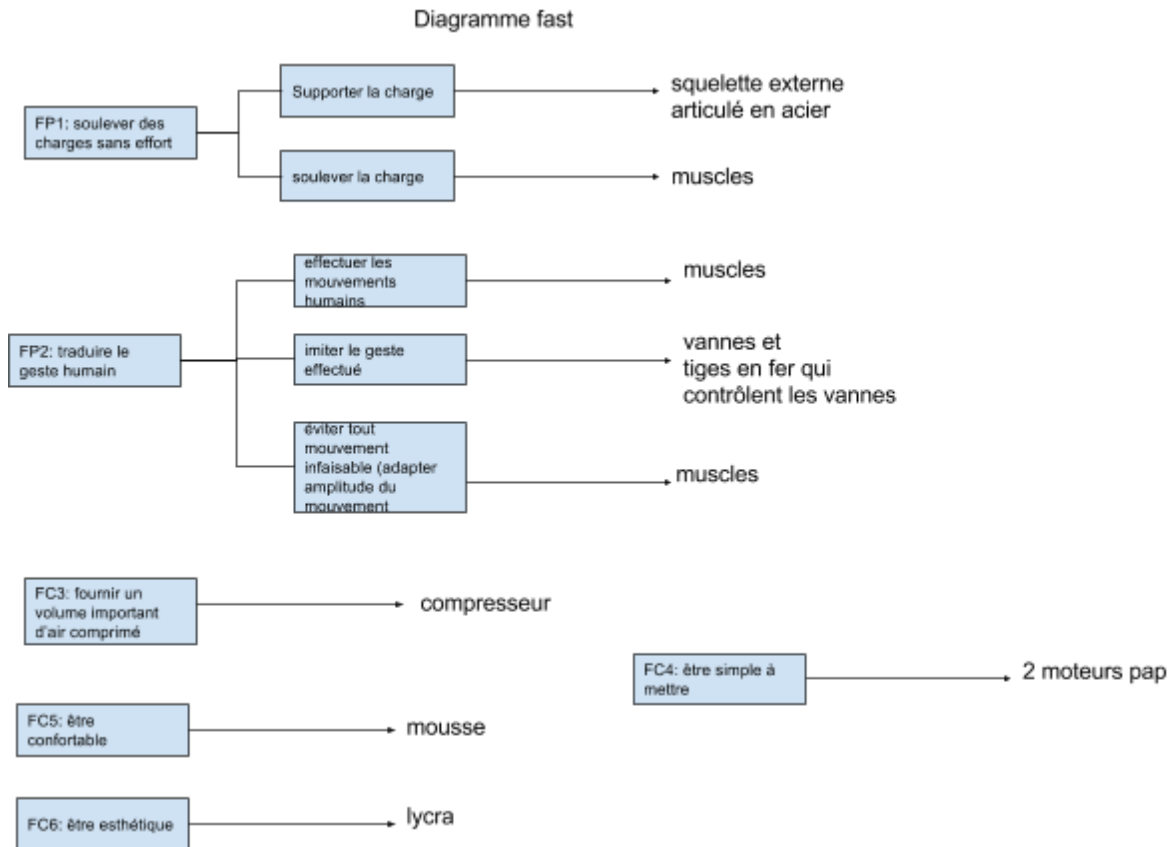
FC2: avoir un volume important d'air comprimé pouvant atteindre 8 bar

FC3: être réactif

FC4: être simple à l'utilisation

FC5: être confortable

FC6: être esthétique



## B. Les différents éléments et comment ils interagissent

Nous avons imaginé un squelette externe en acier répartissant une charge élevée autour de l'individu jusqu'au sol. Nous avons conçu un ensemble de muscles pneumatiques qui fixés à des endroits bien spécifiques de la structure permettent l'actionnement des différentes parties mobiles de la structure pour reproduire les principaux mouvements humains.

L'énergie pneumatique nécessaire pour gonfler les muscles est fournie par un compresseur électrique ou thermique monté sur le dos du squelette et les informations des déplacements de l'ouvrier sont captées mécaniquement par des valves pneumatiques commandant le réseau d'énergie.

Pour faciliter l'ergonomie du produit, nous travaillons sur la mise en place d'un système automatique déployant l'exosquelette autour de l'utilisateur.

Enfin, étant une structure tubulaire, l'exosquelette peut être recouvert d'une protection thermique utile pour les métiers de la sidérurgie et le secourisme.

## C. Les limitations du projet

L'exosquelette que nous avons conçu présente cependant des inconvénients, notamment dûs à son coût peu élevé.

Malgré son poids relativement léger en comparaison aux autres exosquelettes existants, il reste cependant lourd, encombrant surtout avec le compresseur monté sur le dos. Il n'est pas adapté pour des déplacements trop importants et rapides, il est prévu pour être utilisé à un endroit fixe. De plus, étant conçu pour traduire les mouvements élémentaires de l'ouvrier, cette reproduction des mouvements peut justement paraître non naturelle, désagréable. Certains mouvements complexes sont susceptibles de ne pas pouvoir être traduits par l'exosquelette.

L'utilisation d'un compresseur présente aussi des désavantages: il est très bruyant et doit être branché sur une prise secteur. Le remplacement du compresseur par des bouteilles d'air comprimé est envisageable mais cela augmenterait fortement le coût de l'exosquelette.

Notre exosquelette est donc parfaitement adapté à un usage dans le milieu de l'industrie mais son champ d'utilisation peut difficilement être étendu.

## IV. Soulever des charges sans effort

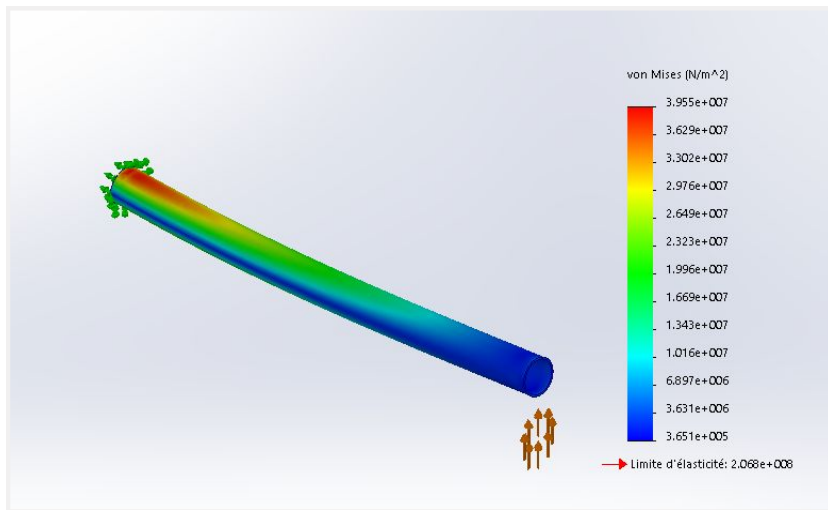
### A. Supporter la charge

Avant de pouvoir soulever une charge, il faut s'assurer que l'exosquelette puisse supporter une charge directement posée dessus par exemple.

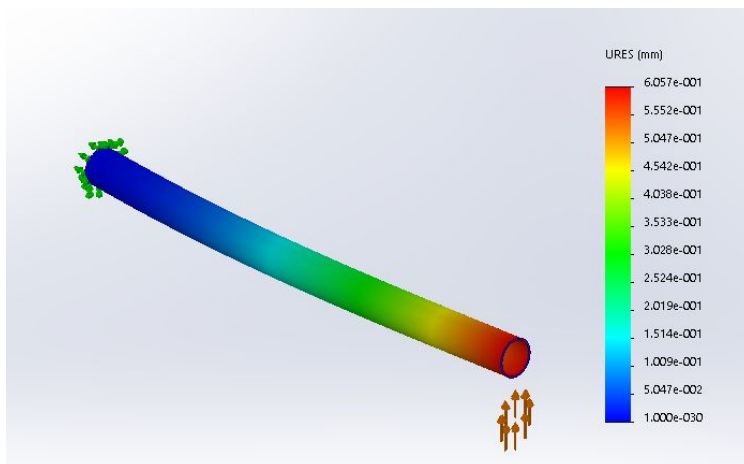
Pour cela, nous avons conçu une armature en acier entourant l'utilisateur et en contact direct avec le sol. Elle permet ainsi de déplacer en quelques secondes le poids de la charge jusqu'au sol. Celle-ci est composée de plusieurs tubes qui emboîtés, forment des liaisons pivots glissants permettant l'étirement ainsi que la rotation du bras ou de la jambe.

Afin de choisir l'acier adapté, c'est-à-dire pouvant supporter une charge pouvant atteindre 80 kg, sans se déformer et surtout se rompre, nous avons effectué des simulations pour tester la résistance de différents matériaux. Les tubes fonctionnant par paires, nous avons appliqué 40 N en bout de tube, perpendiculairement au tube, ce qui représente le cas le plus défavorable. En effet, en réalité, la force n'est pas appliquée en bout de tube et nous omettons dans ces simulations les muscles se trouvant sur la structure diminuant et répartissant le poids.

Nous avons modélisé un tube aux dimensions existantes. L'acier AISI 304 étant très répandu, nous avons appliqué ce matériau.



Le premier résultat indique que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte. C'est-à-dire que notre tube n'aura pas de déformations plastiques. Les déformations plastiques, autrement dit déformations irréversibles sont effectivement à écarter sous peine d'une rupture du tube suite à la déformation progressive causée par les nombreuses utilisations. Ce résultat garantit donc la sécurité de l'utilisateur.



Ce deuxième résultat nous informe sur les déformations élastiques maximales. Elles sont inférieures à 6mm, donc on peut les négliger dans notre utilisation.

Ces simulations nous permettent donc l'utilisation de tubes en acier AISI 304 pour l'armature de l'exosquelette.





Photo de l'armature incomplète:  
deux jambes, un bras et le tronc



Il nous faut de plus permettre aux doigts de supporter la charge. On a donc créé un "gant" métallique.

## B. Soulever la charge

### 1. Choix du système adapté

Afin de permettre le levage d'une charge, nous disposons de trois solutions: soit créer un système tout électrique, fonctionnant avec des moteurs commandables, soit un système hydraulique, soit un système pneumatique. Dans un premier temps, il est nécessaire de comparer toutes ces solutions afin de déterminer la plus adaptée à notre projet.

#### 1. Système tout électrique

Le système tout électrique a la particularité de pouvoir effectuer les mouvements humains. Cependant, il présente des inconvénients majeurs: tout d'abord, afin d'actionner chaque partie séparément, il est nécessaire d'utiliser un moteur pour chaque articulation. De plus, si on cherche à conserver la vitesse des mouvements humains pour soulever des charges importantes, chaque moteur doit fournir un couple très important tout en ayant une vitesse semblable à celle des mouvements humains, donc chaque moteur devrait avoir une grande puissance, ce qui augmenterait fortement le poids de l'exosquelette ainsi que son coût. L'utilisation de moteurs permet de traduire les mouvements. On peut agir sur la vitesse et par conséquent le couple d'un moteur. Cependant, les mouvements manqueraient de naturel.

#### 2. Système hydraulique:

L'utilisation de l'eau comme fluide permettant le soulèvement d'une charge (par exemple, en utilisant des vérins hydrauliques) présente des problèmes d'étanchéité. De plus, cela demanderait la mise en place de tout un réseau hydraulique afin de pouvoir en plus d'envoyer l'eau dans les muscles, l'évacuer et la récupérer pour la réutiliser. De plus, on peut difficilement agir sur la pression de l'eau, fixée à environ 3 bars par la compagnie de distribution d'eau.

### 3. Système pneumatique:

L'utilisation de l'air comme fluide présente l'avantage d'une centralisation de l'énergie: on a seulement besoin d'une source de production d'énergie: le compresseur pesant seulement 6 kg. L'énergie est directement produite et ne pose pas de problème de stockage étant donné qu'elle est directement utilisée. De plus, nous n'avons pas à récupérer l'air comprimé après utilisation, il suffit de l'évacuer.

L'air a surtout la particularité de pouvoir se comprimer jusqu'à 8 bars. Avec le débit de la pompe constant, on parvient donc à atteindre progressivement les 8 bars, permettant un soulèvement progressif et naturel.

Le système retenu est donc le système pneumatique.

### 2. Obtenir un mouvement mécanique de rotation:

Ayant décidé de mettre en place un système pneumatique, il nous reste à transformer l'énergie pneumatique en mouvement mécanique de rotation. 4 possibilités s'offrent à nous.

**Tableau présentant les avantages et les inconvénients de chaque solution**

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>vérins pneumatiques</b>	-faciles à positionner	-chers -lourds -non rigides
<b>vérins angulaires pneumatiques</b>	-adaptés aux mouvements	-difficiles à positionner -chers
<b>moteurs pneumatiques</b>	-grande liberté de mouvement -grande puissance -rendements élevés	-extrêmement compliqués à placer -très chers
<b>muscles pneumatiques</b>	-grande puissance -légers -faciles à placer -coût de fabrication faible	-très volumiques

Nous avons donc opté pour les muscles pneumatiques, pouvant fournir une grande puissance, étant plus légers que les autres solutions, faciles à placer et surtout étant peu coûteux.

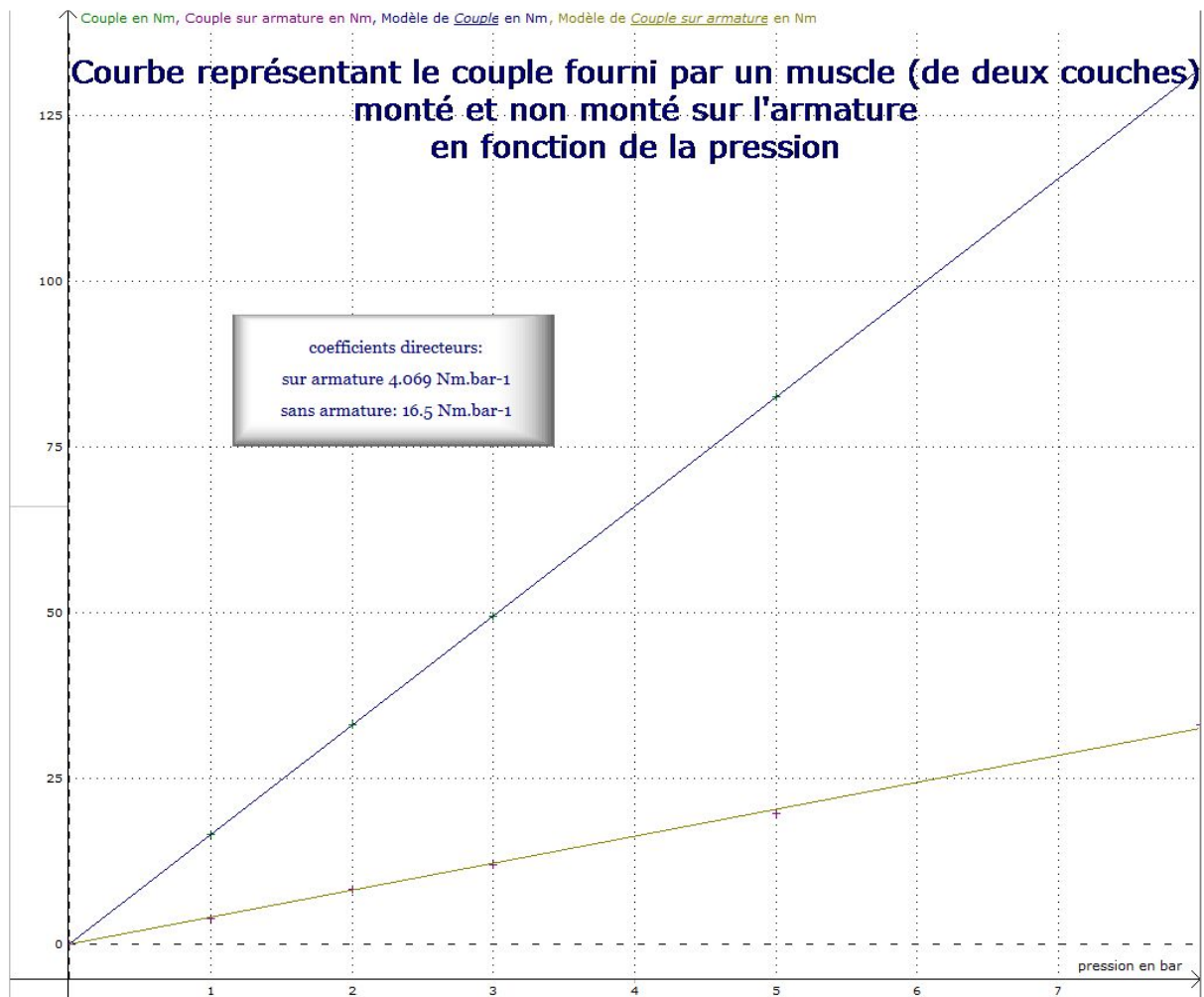
### 3. Soulever une charge de 80 kg avec les muscles

Le principe de fonctionnement des muscles que nous avons conçu ne se rapportant pas à un fonctionnement existant, nous devons déterminer comment fournir un couple, une force adaptée au soulèvement de charges, plus précisément, comment choisir la pression à appliquer dans les muscles et le nombre de couches pour chaque muscle. N'ayant pas pu effectuer directement les calculs pour trouver le couple fourni, ou le poids soulevable en bout de bras, nous avons donc dû effectuer des relevés physiques afin d'établir une relation entre la pression et le couple fourni, ainsi qu'entre le nombre de couches du muscle et le couple fourni.

#### 1. Rapport entre pression appliquée et couple fourni

Afin de déterminer la relation liant la pression et le couple fourni par le muscle, nous avons effectué des tests physiques afin de pouvoir tracer sur latis pro les courbes.

Nous avons des tubes de 33 cm, donc pour trouver le couple, il suffit d'utiliser la formule:  $C=F*L=F*0,33$ .



3.

On a pu modéliser les deux fonctions par des fonctions linéaires, cela prouve que la pression et le couple sont proportionnels. De plus, nous observons une différence entre les deux courbes: le coefficient directeur de la courbe représentant le couple fourni par le muscle monté sur l'armature est nettement inférieur à celle représentant le couple fourni par le muscle non monté. Il est 4 fois inférieur. Cet écart peut cependant s'expliquer: nous n'avons en effet dans les tests sans l'armature pas pris en compte le poids total de l'armature qui est résistant face à la force développée par le muscle.

Donc on a:  $P=4C$  environ. Nous allons donc utiliser de l'air comprimé à 8 bar pour fournir le couple maximal.

## 2. Rapport entre nombre de couches et couple fourni

En plus de pouvoir agir sur la pression appliquée, nous pouvons aussi plier le muscle afin de créer plusieurs couches, créant une force plus importante. Afin de pouvoir choisir le nombre de couches adapté, nous avons tenté de trouver une relation liant le nombre de couches (pouvant être doublé) et le couple en sortie.

Pour cela, nous avons relevé les forces en fonction du nombre de couches d'un muscle. Cependant, nous ne pouvions excéder les quatre couches, la force maximale fournie étant trop élevée. Ne pouvant nous contenter de trois mesures, nous avons relevé la force développée du muscle monté puis ensuite non monté sur l'armature, pour une pression appliquée de 8 bar.

Nombre de couches	Force	Couple	Force sur armature	Couple sur armature
1	40 N	13.2 Nm	10 N	3.3 Nm
2	400 N	132 Nm	100 N	33 Nm
4	4000 N	1320 Nm	1000 N	330 Nm

Dans les deux cas, nous constatons que la force est multipliée par 10 lorsque le nombre de couches est doublé. La relation étant vérifiée dans deux cas différents, on peut considérer qu'elle est vérifiée si on continue d'augmenter le nombre de couches.

Afin de pouvoir soulever 80 kg, c'est-à-dire un poids de 800 N, nous devons donc utiliser des muscles à au moins 4 couches, pouvant soulever 1000 N, soit 100 kg, le muscle à 2 couches ne soulevant que 100 N, soit 10 kg.

Nous avons donc décidé d'utiliser des muscles à quatre couches dans lesquels on enverrait 8 bar.

## V. Traduire les mouvements

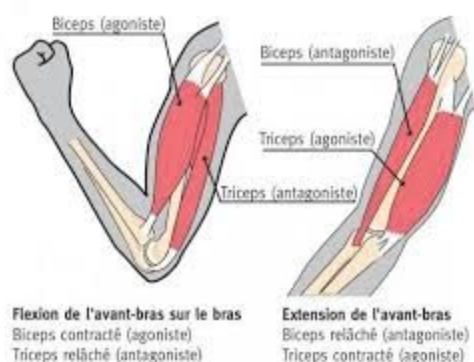
Afin de permettre de traduire les mouvements de l'utilisateur, les muscles doivent être à des emplacements spécifiques sur le squelette métallique.

De plus, il est nécessaire de gonfler les muscles concernés pour chaque mouvement, et non tous les muscles en même temps. Nous avons mis en place un réseau lié au compresseur, permettant de distribuer l'air comprimé aux muscles. Ce système fonctionne avec des vannes.

### A. Placement des muscles

Afin de trouver les emplacements pour les muscles, il faut dans un premier temps définir les mouvements élémentaires effectués par les ouvriers.

- 1er mouvement élémentaire:



Le geste permettant le levage d'une charge est la flexion/extension de l'avant-bras. Nous avons donc placé deux muscles au niveau de cette articulation permettant ce mouvement. Le placement de deux muscles n'est pas lié au problème de soulèvement de charge, mais plutôt pour mieux guider le mouvement.

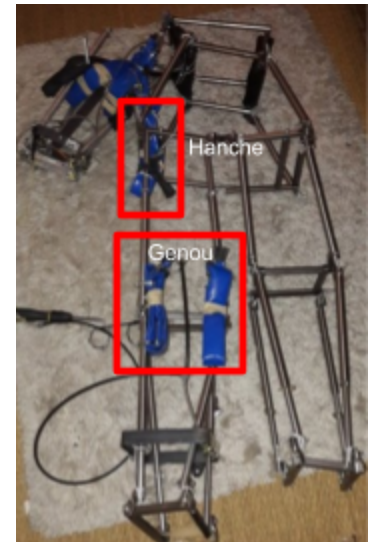


- 2ème mouvement élémentaire:

Il s'agit de la rotation de l'épaule permettant de soulever le bras entier. On a donc placé un muscle au niveau de l'épaule

- 3ème mouvement élémentaire:

L'ouvrier ayant besoin de se baisser pour ramasser des objets par terre, l'exosquelette doit pouvoir l'aider à tendre ses jambes ainsi que sa hanche, pour le relever. Nous avons donc placé deux muscles au niveau du genou.



## B. Réseau d'air comprimé

Comme notre exosquelette marche à l'aide de muscles pneumatiques nous avons un certain nombre de vannes sur notre exosquelette. Tout d'abord ces vannes sont reliées deux à deux en sens contraire afin de pouvoir remplir nos muscles sans les vider et inversement. De plus, ces vannes sont mécaniques et non électriques car les vannes électriques ont un temps de latence qui est trop élevé pour pouvoir être utilisés dans les exosquelettes. Enfin, nous avons des cadres entourant les bras et les jambes afin de lier ces vannes aux mouvements de l'utilisateur car si nous devions utiliser des capteurs pour ouvrir ou fermer les vannes nous aurions plusieurs problèmes:

- déjà le coût du matériel électronique et des capteurs ferait exploser notre budget,
- ensuite il nous faudrait un système mécanique pour ouvrir les vannes ou les fermer lié à la partie intelligente qui gère les capteurs, vu que celles-ci sont mécaniques ce qui est coûteux et encombrant.

C'est pourquoi nous avons choisi cette solution qui est beaucoup plus simple, moins encombrante et moins coûteuse.



## VI. Les suites possibles du projet

### A. Muscles avec compression par fluide

Comme expliqué précédemment notre projet est limité par son utilisation de l'air comprimé. En effet, l'air comprimé a une limite de pression qui s'établit aux alentours de 8 bar. Cela nous pose problème car notre exosquelette ne peut pas montrer l'étendue de ses capacités avec une pression dans ses muscles qui serait limitée à 8 bar c'est pourquoi nous avons envisagé comme amélioration de notre projet l'utilisation de fluides ayant une pression maximale bien supérieure ce qui nous permettrait d'augmenter considérablement le poids que notre exosquelette pourrait soulever.

### B. Protection extérieur de l'utilisateur

Bien que notre exosquelette permette d'augmenter le poids soulevé par son utilisateur il ne permet pas de protéger celui-ci contre des dangers extérieurs comme des chocs, l'usure... En effet, notre exosquelette ne pourrait servir à grand chose si il était abimé ou rouillé et c'est là que se place une autre amélioration de notre projet à laquelle nous avons pensé et qui nous paraît plutôt importante. Il s'agit d'une couverture métallique qui serait composée de plusieurs plaques métalliques superposés et placés tels des écailles et qui permettrait de régler le plus de ces dangers extérieurs possibles car nous nous rendons bien compte que nous ne pourrions pas tout régler juste avec cette protection métallique.

### C. Armature flexible

La dernière amélioration à laquelle nous avons pensé et celle qui nous paraît en fait la plus importante: l'armature flexible. En effet, notre armature actuelle est une armature rigide ce qui nous empêche de bien suivre les mouvements de l'utilisateur et ce qui réduit ses mouvements notamment au niveau des bras ce qui est extrêmement problématique d'où l'armature flexible. Celle-ci, nous permettrait d'avoir plusieurs améliorations en une:

- avoir un exosquelette moins volumineux donc plus pratique dans les endroits exigus,
- avoir des mouvements comparables à l'humain sans exosquelette,
- et faciliter l'ouverture et la fermeture de nos vannes.

## VII. Conclusion

La création de l'Exonotos n'a pas été évidente. La principale difficulté était la méconnaissance des paramètres des muscles que nous avons inventé. Cependant, nous avons pu la surmonter par de nombreux tests physiques qui nous ont permis de choisir la solution la plus adaptée. Certes, l'exosquelette présente des désavantages et des faiblesses, mais il atteint les objectifs que nous nous étions fixés, autrement dit, soulever des charges pouvant atteindre 80 kg tout en traduisant les mouvements de l'utilisateur. Nous travaillons maintenant sur des améliorations, notamment une commande électrique avec un moteur pas à pas permettant la mise en place de l'exosquelette sur l'ouvrier avant utilisation et l'enlèvement.

## VIII. Bibliographie

<http://www.rb3d.com/produits/exosquelettes/>

**Cours et exercices de résistance des matériaux** Auteur : Wielgosz Editeur : Ellipses

[http://www.lnw.lu/Departements/Physique/personnel/reiyv/documents/4eme/cours\\_II,1.pdf](http://www.lnw.lu/Departements/Physique/personnel/reiyv/documents/4eme/cours_II,1.pdf)

## IX. Lien vidéo

<https://www.dailymotion.com/fromschooltostartup>