

AUXIVO

# Livre Blanc

## Comment les Exosquelettes vous Soutiennent

[auxivo.com](http://auxivo.com)



# Introduction

Bienvenue dans le livre blanc d'Auxivo traitant le soutien des exosquelettes. Ce document aborde les principes mécaniques et biomécaniques les plus importants du fonctionnement des exosquelettes portables et du soutien qu'ils offrent à leurs utilisateurs.

Les exosquelettes portables sont des dispositifs portés par les utilisateurs humains pour les soutenir physiquement. Ils sont aujourd'hui utilisés dans des applications médicales, par exemple pour aider les utilisateurs à mobilité réduite, et dans des environnements professionnels, où ils apportent un soutien aux travailleurs en réduisant la charge de travail pour éviter l'épuisement et les blessures causées par la surcharge.

L'objectif de ce livre blanc est de fournir au lecteur les informations nécessaires pour comprendre l'interaction homme-exosquelette et la manière dont les exosquelettes peuvent réduire les contraintes physiques sur le corps humain. Il aborde les concepts courants du soutien d'exosquelette à un niveau conceptuel afin de fournir une bonne vue d'ensemble et n'ajoute des détails techniques ou scientifiques que lorsque cela est nécessaire à la compréhension.

En tant qu'utilisateur potentiel d'un exosquelette, nous souhaitons vous fournir les informations nécessaires pour comprendre les possibilités et les limites des exosquelettes et prendre une décision éclairée et fondée sur des faits afin de déterminer si les exosquelettes sont le bon choix pour vous.

Nous espérons que vous apprécierez cette lecture! N'hésitez pas à nous contacter si vous avez d'autres questions.

L'équipe Auxivo

## Le document est structuré en trois sections

### La section 1

Présente les concepts de mécanique d'ingénierie et de biomécanique les plus importants, nécessaires pour comprendre comment les exosquelettes apportent du soutien.

### La section 2

Aborde les mécanismes et les concepts qui permettent aux exosquelettes portables d'apporter un soutien à leurs utilisateurs.

### La section 3

Aborde certaines des idées reçues les plus courantes sur le soutien d'un exosquelette, en s'appuyant sur les informations et les concepts présentés dans les sections 1 et 2.

# Section 1

## Concepts (bio)mécaniques importants

Avant d'aborder la question du soutien apporté par les exosquelettes, nous devons présenter quelques concepts mécaniques et biomécaniques importants. Cela nous aidera à comprendre comment le travail physique provoque des contraintes sur le corps humain et comment un système mécanique peut contribuer à réduire ces contraintes. Une fois que nous aurons compris ces concepts de base, il sera facile de comprendre les mécanismes de soutien des exosquelettes car ils s'appuient sur ces concepts.

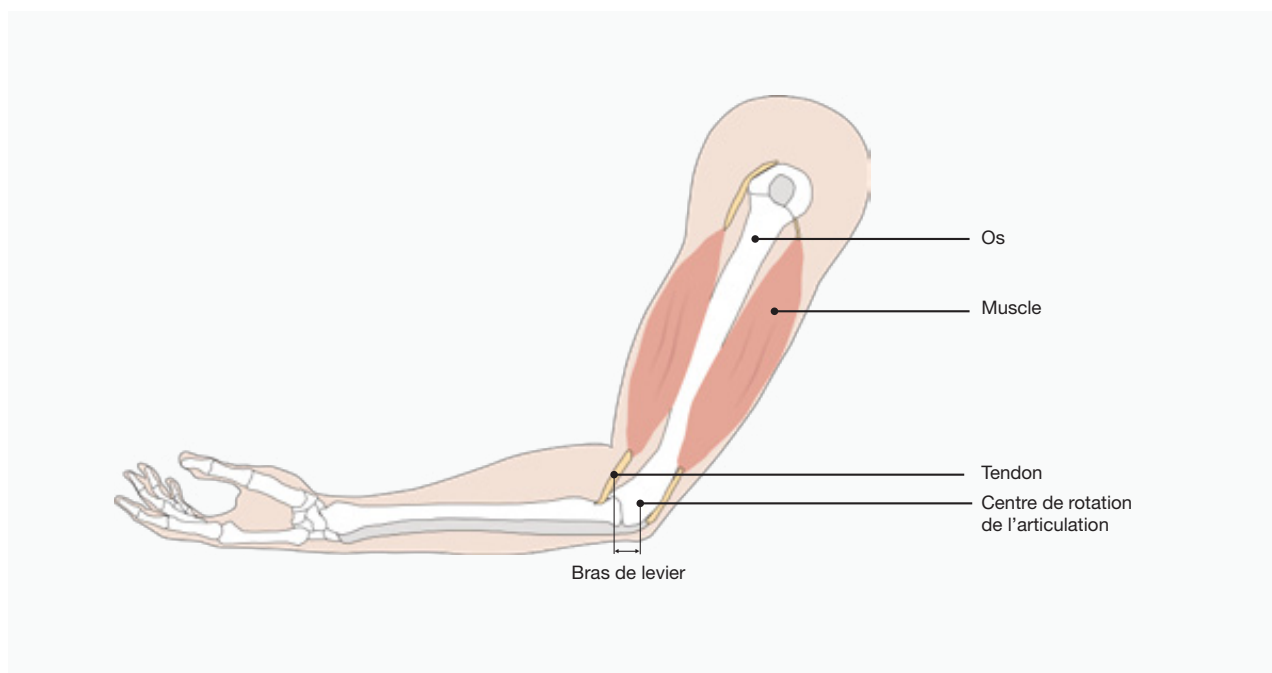
### L'appareil musculo-squelettique humain

Tout d'abord, résumons rapidement à un niveau très élevé comment le corps humain peut déplacer, tenir et soulever des objets en examinant l'appareil musculo-squelettique humain.

Les os de notre (endo)squelette sont reliés par des articulations qui permettent le mouvement. Les muscles relient les différents os à travers une ou plusieurs articulations par des tendons. Lorsque les muscles se contractent, ils exercent une force de traction sur les os. Il existe une certaine distance entre l'attache du muscle et le centre de rotation de l'articulation, que nous appelons le bras de levier. Grâce à ce bras de levier, la force musculaire se traduit par une force de rotation (également appelée couple) au niveau de l'articulation, ce qui entraîne un mouvement de rotation des os autour de l'articulation.

Si une charge externe (ou le poids du corps humain lui-même) impose un couple à une articulation, les muscles correspondants doivent se contracter pour générer un contre-couple autour de cette articulation. Cela permet à l'homme de tenir ou de déplacer une charge externe par la force musculaire. Les muscles humains ne peuvent générer qu'une force de traction. Ils ne peuvent pas pousser contre un os. Pour créer un mouvement dans deux directions, vous devez avoir (au moins) deux muscles par articulation, qui peuvent s'opposer l'un à l'autre. Nous appelons un ensemble de muscles qui s'opposent agoniste et antagoniste.

Si vous activez simultanément les muscles agonistes et antagonistes d'une articulation, celle-ci devient très raide. Vous pouvez ainsi l'empêcher de bouger et créer de la stabilité. C'est ce qu'on appelle la co-contraction. La co-contraction peut également être utilisée pour stabiliser une suite d'articulations, comme la colonne vertébrale. Par exemple, dans la vie quotidienne, les muscles dorsaux et abdominaux collaborent pour générer et maintenir une posture droite.



## Section 1

### Concepts (bio)mécaniques importants

#### Bras de levier - Pourquoi la même charge peut-elle provoquer des contraintes variées sur notre corps?

La force que les muscles humains doivent générer lorsqu'ils manipulent une charge externe dépend de plusieurs facteurs. L'un d'entre eux est le poids absolu de la charge externe. Il y a bien sûr une différence si vous tenez un objet de 5 kg ou 20 kg. Mais il est important de comprendre que ce n'est pas le seul paramètre qui entre en jeu.

La façon dont vous tenez et manipulez la charge peut avoir un impact significatif sur les contraintes qu'elle exerce sur votre corps, plus que le poids de la charge elle-même. Imaginons (ou essayons) de tenir un sac de 10 kg. Si vous portez le sac le long de votre corps, vous pouvez le tenir sans trop d'effort pendant longtemps. Mais dès que vous le soulevez devant votre corps, vous sentez instantanément augmenter la charge dans votre

épaule et vous devez rapidement lutter pour tenir le sac dans cette position.

La cause de cet effet est que souvent, ce n'est pas la force qui est l'aspect déterminant exerçant la contrainte principale sur votre corps, mais plutôt le couple que cette force crée autour de vos articulations. Ce couple correspond à la force multipliée par la distance horizontale entre la force et le centre de rotation de l'articulation (bras de levier) :  $T = F \cdot L$ , où  $T$  est le couple,  $F$  la force et  $L$  le bras de levier.

Par conséquent, augmenter le bras de levier horizontalement en tenant une charge devant vous ou en penchant votre corps vers l'avant peut rapidement augmenter le couple articulaire de manière significative, ce qui peut alors provoquer une surcharge dans les articulations concernées.



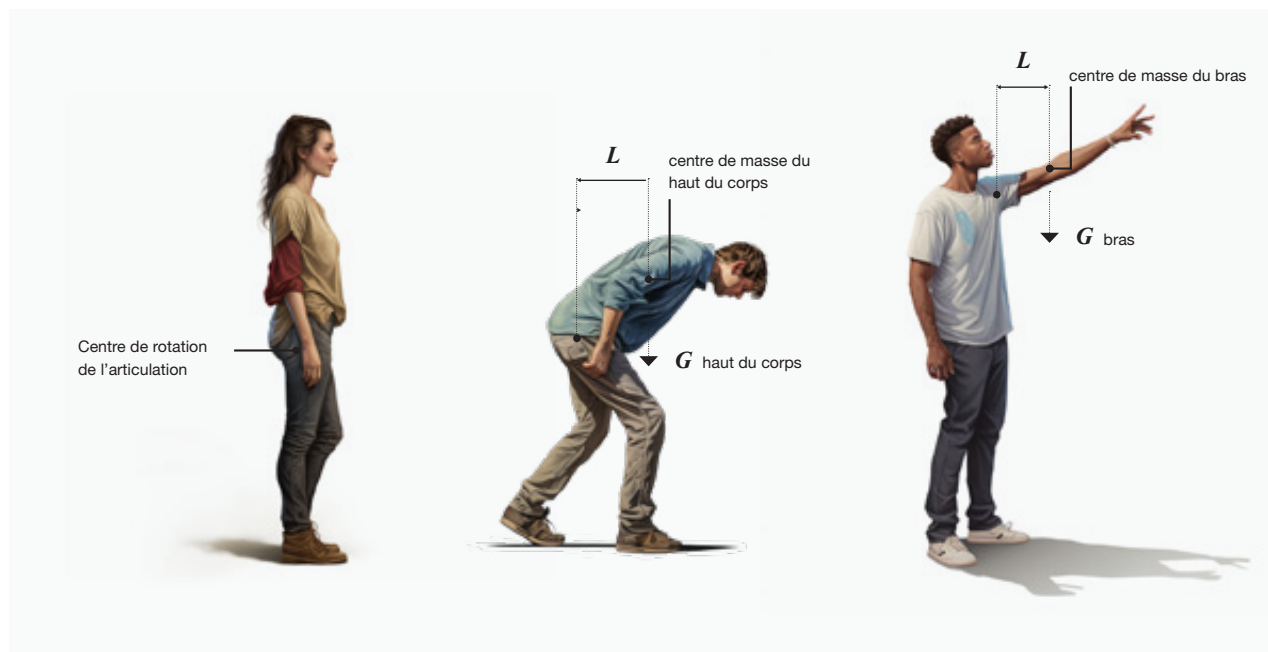
L'effet du bras de levier (c'est-à-dire la distance horizontale entre l'articulation humaine et la force extérieure) est illustré

◀ À gauche : la personne porte un sac à côté du corps. Le sac est plus ou moins aligné horizontalement avec l'articulation de l'épaule. Par conséquent, le poids du sac n'induit qu'un petit couple dans l'articulation de l'épaule, qui doit être contrebalancé par les muscles de l'épaule.

▶ À droite : la personne tient un sac devant son corps. Il en résulte une distance horizontale considérable (bras de levier) entre le centre de masse du sac et l'axe de rotation de l'articulation de l'épaule, ce qui se traduit en un couple plus élevé que les muscles de l'épaule doivent compenser.

## Section 1

### Concepts (bio)mécaniques importants



L'influence de la masse corporelle et de la posture dans le champ gravitationnel sur la charge articulaire.

- ◀ À gauche: Lorsque le corps est en position verticale et que les bras pendent verticalement sur le côté, la charge sur l'épaule, le dos et la hanche est relativement faible. ▲ Au milieu: Avec le haut du corps dans une position plus penchée vers l'avant, la charge sur le dos et les hanches augmente.
- ▶ À droite : Le bras étant tendu vers l'avant, le centre de masse du bras se trouve à une distance horizontale de l'articulation de l'épaule, ce qui se traduit par un bras de levier et un couple d'épaule importants.

#### Gravité et masse du corps humain

En lien direct avec la section précédente, il convient de souligner le rôle dominant que jouent la gravité et la masse du corps humain lorsque l'on parle de charge de travail ou de contrainte. Bien que d'autres aspects entrent en jeu, comme la force dynamique causée par les accélérations et les mouvements, la gravité est notre ennemi principal en ce qui concerne la charge du travail physique. Elle tire en permanence tout vers le bas, y compris toute charge que nous manipulons et toutes les parties de notre corps. Nos muscles doivent travailler en permanence pour contrer cette force gravitationnelle vers le bas.

Il est important de considérer que le concept du bras de levier décrit ci-dessus s'applique également à la masse et au centre de masse de nos segments corporels. Ainsi, la contrainte exercée sur nos articulations et nos muscles individuels dépend fortement de notre posture corporelle. Lorsque nous nous tenons droit, la charge sur nos muscles est relativement faible. En revanche, lorsque nous penchons le haut du corps vers l'avant ou que nous soulevons les bras, la charge sur les articulations augmente considérablement et les muscles du dos ou des épaules doivent travailler dur, comme le montre l'illustration ci-dessous.

Très souvent, la contrainte provoquée par notre propre masse corporelle est le facteur principal qui contribue à la charge de travail globale. Pour comprendre cela, nous pouvons reprendre notre exemple de position penchée vers l'avant. Environ 60 % du poids du corps humain se situent généralement dans la tête, les bras et le torse. Ainsi, les muscles du dos et des hanches d'une personne de 80 kg qui se penche simplement vers l'avant doivent déjà stabiliser une charge d'environ 50 kg. Cela signifie que la contrainte exercée sur le corps par son propre poids est souvent plus élevée que la contrainte supplémentaire causée par le soulèvement d'un objet de 10 ou 15 kg. Par conséquent, l'utilisation d'un exosquelette pour compenser le poids du corps peut réduire considérablement la charge.

## Section 1

### Concepts (bio)mécaniques importants

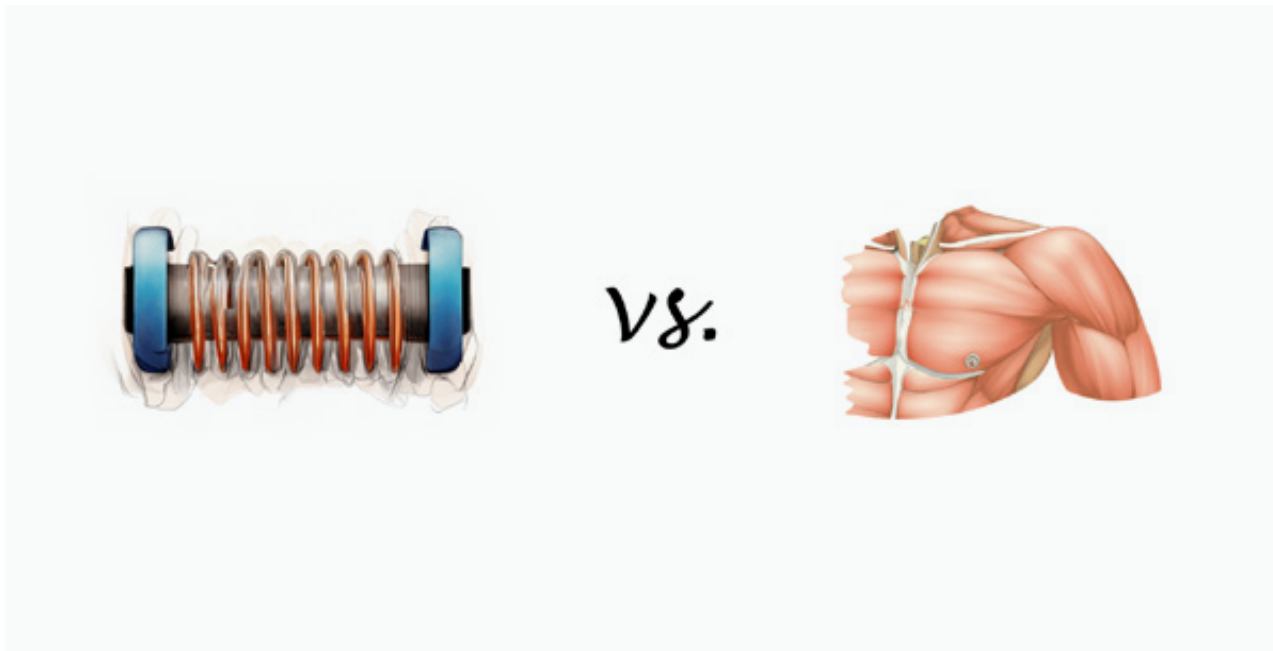
#### Différences importantes entre l'ingénierie mécanique et la biomécanique

Le corps humain n'est pas une machine. Bien que cela semble évident, il est essentiel de comprendre ce que cela signifie au niveau mécanique et biomécanique. Bien que de nombreux concepts de la mécanique d'ingénierie (qui traite des forces et des mouvements dans des machines) et de la biomécanique (qui traite des forces et des mouvements dans le corps humain) soient similaires, il existe des différences. En ce qui concerne les exosquelettes, une différence importante est la façon dont les muscles humains et les ressorts mécaniques créent une force.

Un muscle sous tension est très différent d'un ressort mécanique sous tension d'un point de vue énergétique. L'étirement d'un ressort mécanique nécessite de l'énergie. Cette énergie est libérée lorsque le ressort est relâché. Pendant qu'il est tendu, le ressort mécanique crée en permanence une force sans nécessiter d'énergie supplémentaire. Cette force peut être utilisée pour soutenir une charge contre la gravité.

D'autre part, les muscles humains génèrent une force par contraction à l'aide de protéines qui convertissent l'énergie chimique en énergie mécanique. Les protéines du muscle peuvent glisser l'une dans l'autre, ce qui raccourcit les fibres musculaires et produit une force de traction. Lorsqu'il est actif, le muscle a besoin en permanence d'énergie fournie par les processus métaboliques cellulaires. Cela peut entraîner un épuisement des réserves d'énergie, une fatigue musculaire et d'autres effets métaboliques et neuromusculaires qui nécessitent de l'énergie et limitent la capacité de contraction du muscle.

En résumé, un ressort mécanique, une fois étiré, peut créer une force permanente sans énergie supplémentaire. En revanche, un muscle humain a besoin d'un apport constant d'énergie pour rester contracté, ce qui entraîne de la fatigue et de l'épuisement.



Il est essentiel de comprendre que les ressorts mécaniques et les muscles humains génèrent de la force différemment. Un ressort mécanique prétendu n'a pas besoin d'énergie pour générer une force constante et peut soutenir une charge indéfiniment. En revanche, les muscles humains auront besoin d'un apport constant d'énergie et s'épuiseront rapidement.

## Section 2

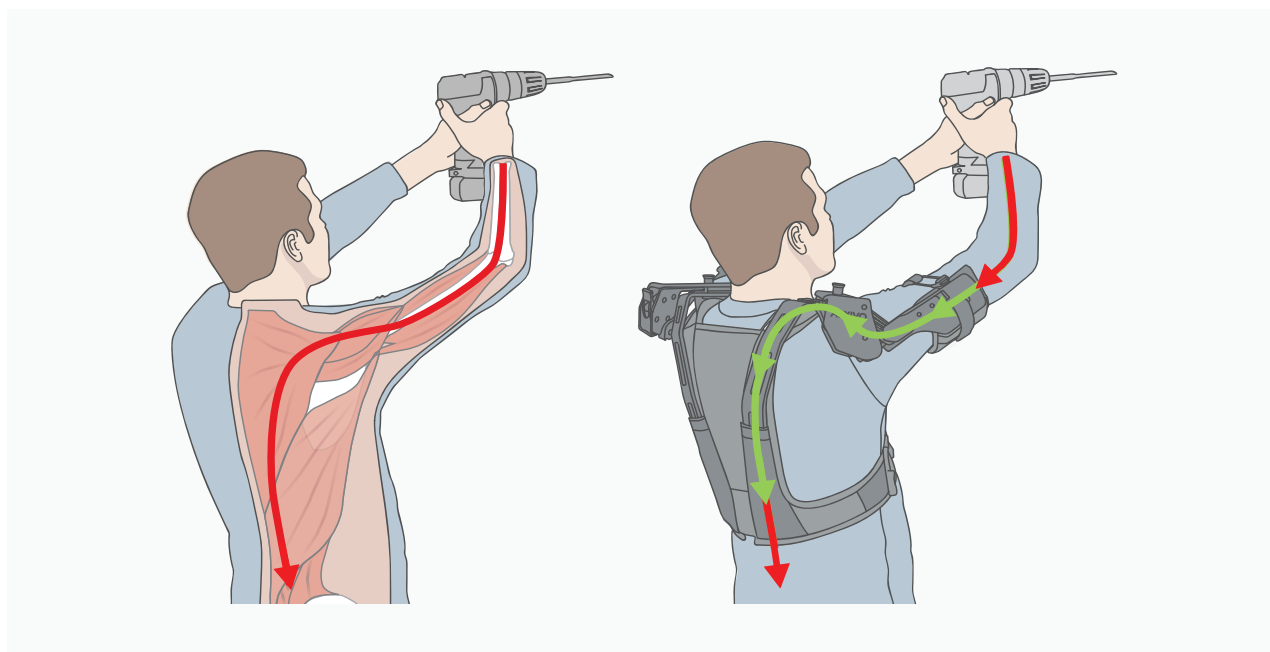
# Principes de Soutien des Exosquelettes

Maintenant que nous avons couvert les bases (bio) mécaniques les plus importantes, découvrons comment les exosquelettes peuvent soutenir leurs utilisateurs. La plupart des exosquelettes combinent plusieurs des principes présentés ci-dessous, mais nous aborderons chacun séparément afin de faciliter la compréhension.

### Le principe de contournement

Il s'agit d'une approche relativement simple mais efficace. De nombreux exosquelettes contournent mécaniquement la charge autour d'une ou plusieurs articulations humaines. Pour les parties du corps couvertes par l'exosquelette, la charge (ou une partie de celle-ci) est donc transférée de votre corps à l'exosquelette. Cette charge est ensuite transmise à travers l'exosquelette, elle contourne donc une partie de votre appareil musculo-squelettique. Au point de fixation inférieur de l'exosquelette, la charge est retransférée au corps. De là elle suit la même trajectoire qu'en l'absence d'exosquelette, elle passe dans les parties restantes du corps jusqu'à atteindre le sol.

Par exemple, lorsque vous tenez un poids de 5 kg dans votre main, la charge passe par votre poignet, votre coude, votre épaule, votre colonne vertébrale, votre hanche, vos jambes, vos genoux, vos chevilles pour finalement être transférée au sol. Tout au long de son parcours, elle exerce une contrainte sur toutes ces parties du corps. Lorsque vous utilisez un exosquelette d'épaule, comme l'Auxivo DeltaSuit, une grande partie de la charge est directement transférée de la partie supérieure de votre bras (point de fixation supérieur) à votre torse (point de fixation inférieur), en contournant l'articulation comparativement vulnérable de l'épaule.

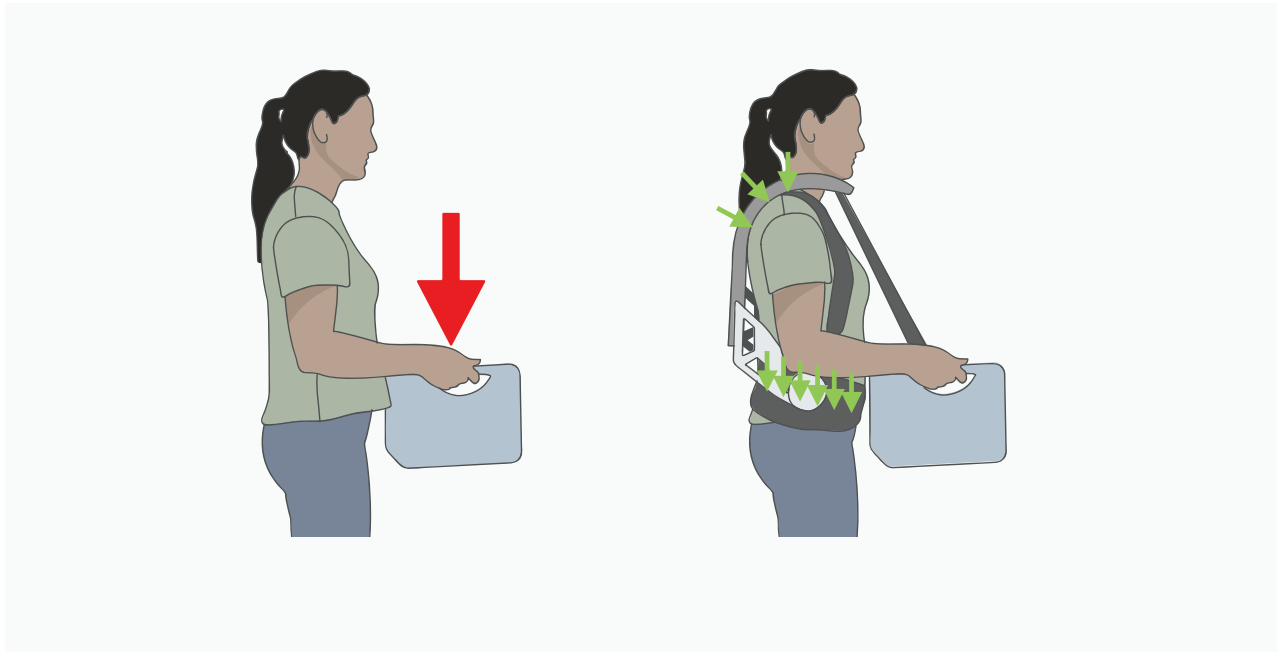


Le principe de contournement est illustré à l'aide du Auxivo DeltaSuit

La flèche rouge indique le trajet de la charge à travers le corps et la flèche verte le trajet à travers l'exosquelette. Le transfert de la charge vers l'exosquelette permet de réduire la contrainte exercée sur les muscles, les tendons et les articulations le long de la partie contournée.

## Section 2

### Principes de Soutien des Exosquelettes



#### Illustration du concept de redistribution de charge.

◀ À gauche: la charge est portée dans les mains et affecte le corps à partir de là. ▶ À droite: Le Auxivo CarrySuit répartit la charge sur l'ensemble de la partie supérieure du corps, réduisant ainsi les pics de charge locaux.

#### Le principe de redistribution de charges

Lorsqu'une charge externe affecte votre corps de manière locale ou asymétrique, par exemple lorsque vous portez un objet lourd d'une seule main, la partie principale de la contrainte ne s'exercera que sur une petite partie de votre corps. Cela est dû au fait que la charge est transmise le long du chemin le plus direct à travers votre corps jusqu'au sol. Cela signifie également que vous avez un risque élevé de surcharge locale dans certaines articulations, alors que le reste de votre corps peut être à peine affecté par la charge.

Les exosquelettes peuvent remédier à cette situation en redistribuant la charge et en la répartissant plus uniformément sur de plus grandes parties du corps et en l'éloignant des parties du corps qui risquent de subir une surcharge locale. Un exemple d'exosquelette utilisant la répartition de charge est le Auxivo CarrySuit, qui consiste d'un cadre entourant la partie supérieure du corps. Lorsqu'une charge y est attachée, le cadre la répartit automatiquement de manière plus homogène sur le corps de l'utilisateur, en la reliant aux hanches et aux épaules des deux côtés.

En appliquant ce principe, l'exosquelette peut évidemment augmenter la charge sur d'autres parties du corps, comme les hanches, ce qui, hors contexte, peut sembler contre-productif. Pourtant, cela signifie également que la charge est mieux répartie sur l'ensemble du corps, évitant ainsi les pics de charge locaux qui augmentent souvent le risque de blessures.



## Section 2

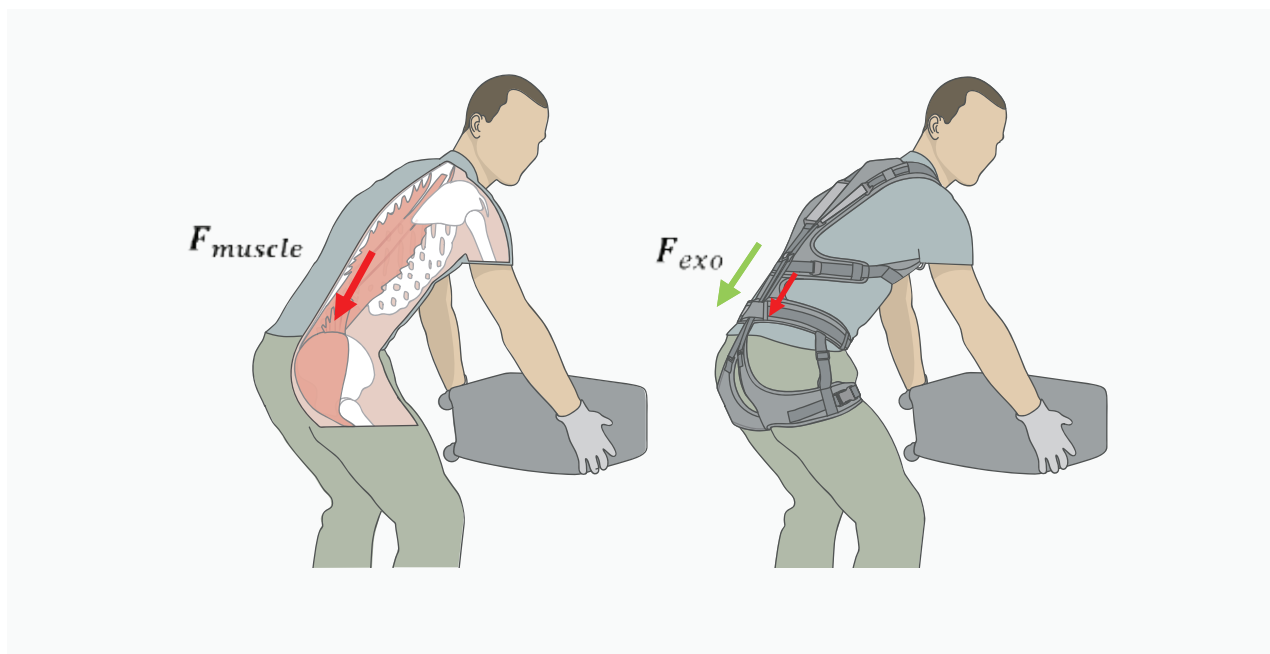
### Principes de Soutien des Exosquelettes

#### Soutien musculaire par muscles artificiels

L'idée du soutien musculaire artificiel est simple: des systèmes de tension passifs ou actifs à l'extérieur du corps créent une force de soutien similaire à la force créée par les muscles humains. Les exosquelettes utilisant ce concept sont dotés de "muscles artificiels" reliés au corps, généralement à l'aide d'interfaces textiles. Ils sont conçus pour créer une force de traction parallèle à celle du muscle humain situé dessous, afin de soutenir le muscle. Ces muscles artificiels peuvent être alimentés par un actionneur relié à un câble ou être réalisés sous forme de ressorts ou de bandes élastiques qui s'étirent pendant le mouvement, créant ainsi une force de traction mécanique.

Ce concept est souvent utilisé par les exosquelettes textiles (également appelés Exosuits) car ils ne nécessitent pas de cadre rigide. Dans ce cas, les muscles artificiels utilisent le (endo)squelette humain pour assurer leur stabilité.

L'objectif principal des muscles artificiels est de réduire la contrainte exercée sur les muscles et les tendons de l'utilisateur. Si les muscles de l'utilisateur travaillent moins, ils se fatiguent moins vite. Lorsque les muscles sont fatigués, leur coordination devient plus difficile. Les contraintes répétitives et la fatigue sont des facteurs de risque de développement de troubles musculo-squelettiques. L'idée principale est donc d'assister les muscles humains par des muscles artificiels et de réduire la fatigue musculaire, l'épuisement, le risque de blessure musculaire ou tendineuse et la charge de travail globale.



#### Illustration de la façon dont les muscles artificiels du Auxivo LiftSuit soutiennent les muscles du dos de l'utilisateur

Lorsque l'utilisateur se penche vers l'avant, les muscles du dos doivent se contracter et créer une force pour maintenir le corps dans la position penchée vers l'avant. Avec l'exosquelette, les "muscles artificiels" créent une force qui soutient directement les muscles dorsaux situés en dessous, réduisant ainsi la contrainte musculaire.

## Section 2

### Principes de Soutien des Exosquelettes

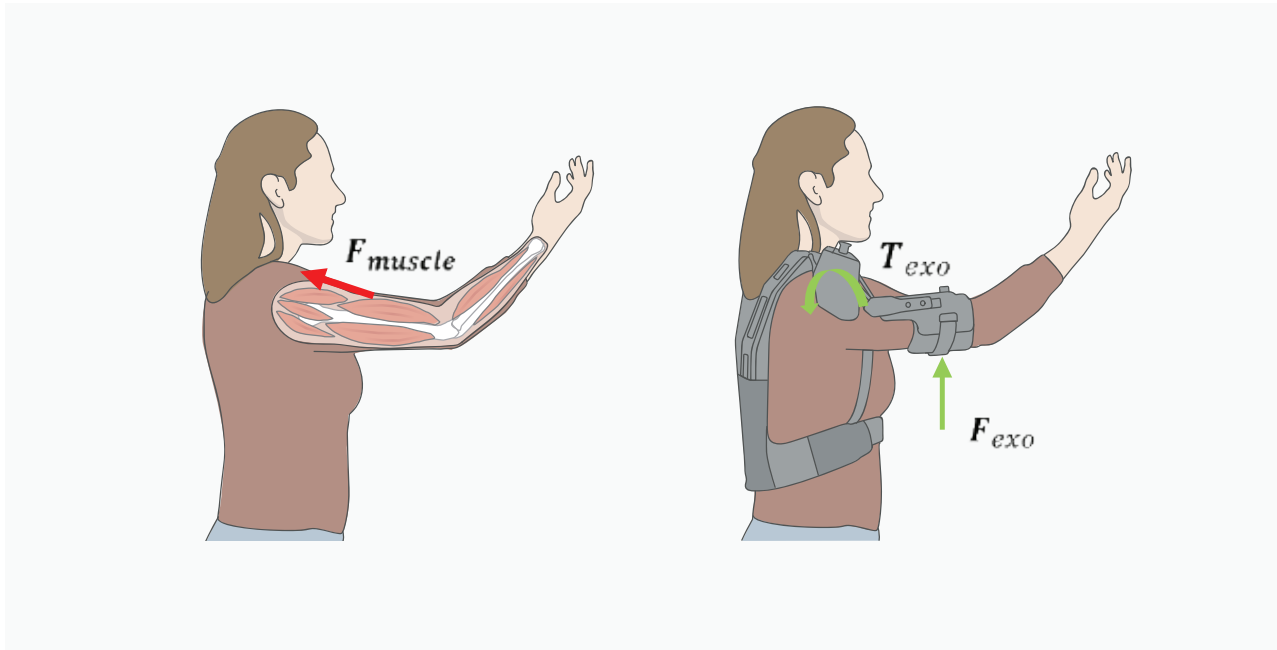


Illustration du soutien d'un exosquelette au niveau d'une articulation.

◀ À gauche: Lorsque l'utilisatrice lève le bras, les muscles correspondants de l'épaule se contractent et créent une force de traction, qui crée ensuite un couple dans l'articulation de l'épaule qui soulève le bras. ▶ À droite: L'articulation étant soutenue par l'exosquelette, ce dernier fournit un couple au niveau de l'articulation qui crée une force vers le haut au niveau de l'interface du haut du bras pour soutenir le soulèvement du bras.

#### Soutien articulaire par un couple

Les exosquelettes peuvent également soutenir leurs utilisateurs en appliquant un couple d'assistance autour d'une articulation spécifique.

Les exosquelettes peuvent générer un couple articulaire de différentes manières. Les exosquelettes actifs reposent généralement sur des actionneurs motorisés, et les exosquelettes passifs sur des ressorts disposés de manière à créer un couple au niveau de l'articulation. Dans les deux cas, les muscles humains peuvent se détendre dans une certaine mesure puisqu'au moins une partie du couple articulaire nécessaire, par exemple pour soulever le bras, est fournie par l'exosquelette.

Un autre avantage de cette méthode est qu'elle peut réduire la compression des articulations et potentiellement prévenir les lésions articulaires telles que l'arthrose. En effet, le soutien articulaire entraîne également une réduction de la force musculaire, similaire aux muscles artificiels. Cependant, contrairement à un muscle artificiel, il ne se contente pas de remplacer une force de traction par une autre. Un couple est créé autour de l'articulation de l'exosquelette, qui est ensuite transféré à travers le cadre rigide sous la forme d'une force perpendiculaire au corps. Cette différence mécanique peut permettre de réduire la force de compression exercée sur l'articulation.

Il est important de noter que la compression naturelle de l'articulation n'est pas mauvaise. Elle contribue en fait à stabiliser l'articulation sous charge. Cependant, si des forces importantes sont fréquemment imposées à une articulation, cela peut entraîner des blessures de surmenage et des douleurs dues à l'endommagement des ligaments et du cartilage de l'articulation.

## Section 2

### Principes de Soutien des Exosquelettes

#### Compensation de la gravité

La gravité étant l'une des principales causes d'une charge de travail physique élevée, la compensation de la gravité à l'aide d'un exosquelette est une méthode courante.

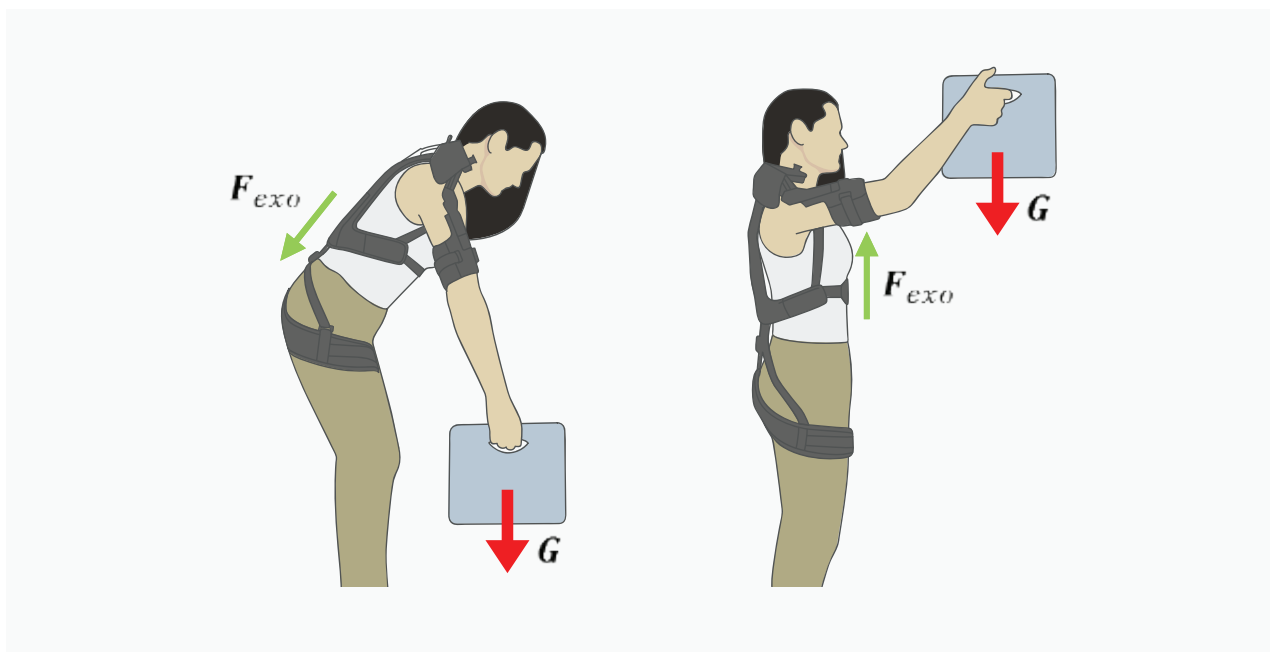
L'idée de la compensation de la gravité est illustrée ci-dessous à l'aide de l'exosquelette OmniSuit, qui offre un soutien au niveau du dos et des épaules. La compensation de la gravité fournie par le module de soutien dorsal de l'OmniSuit commence à agir lorsque l'utilisateur se penche vers l'avant et que la gravité tire le haut du corps vers le bas. Sans le soutien de l'exosquelette, les muscles du dos et des hanches doivent compenser cette attraction gravitationnelle en se contractant et en tirant le haut du corps vers le haut. Lorsque vous portez l'OmniSuit, des ressorts élastiques situés dans le dos sont automatiquement étirés lorsque le haut du corps se penche vers l'avant, absorbant une partie de cette charge et soulageant ainsi les muscles humains.

Un autre exemple est le module de soutien d'épaule de l'exosquelette OmniSuit. Lorsqu'il est porté, il soutient automatiquement et progressivement l'épaule dès qu'on soulève le bras. Les ressorts de l'articulation de l'épaule sont conçus pour fournir un soutien maximal lorsque le bras atteint une position horizontale, c'est-à-dire lorsqu'il est le plus "exposé" à la gravité.

Un détail important ici est que les deux modules de soutien de l'exosquelette ne fournissent une compensation de la gravité que lorsque la gravité impose une charge sur les articulations concernées due à un bras de levier. Ainsi, dans nos exemples, le module de soutien dorsal ne tire pas lorsque l'utilisateur se tient droit, et le module de soutien d'épaule ne pousse pas vers le haut lorsque les bras pendent verticalement sur le côté du corps. Seulement à partir du moment où l'utilisateur se penche vers l'avant ou soulève ses bras, l'exosquelette commence à le soutenir.

En général, un exosquelette ne compense pas entièrement la gravité. Il compense simplement un certain pourcentage (généralement 20 à 50 %) de la charge gravitationnelle qui agit sur le corps et, par conséquent, facilite chaque répétition ou chaque seconde de travail. Cette compensation partielle signifie également que les muscles humains n'ont pas besoin de tendre les ressorts d'un exosquelette passif - c'est la gravité qui le fait.

La compensation de la gravité, associée au fait que les muscles humains ont besoin d'une énergie constante lorsqu'ils maintiennent une force, comme expliqué dans la section I, sont les principes fondamentaux du soutien d'exosquelette lors de tâches statiques, telles que de travailler penché vers l'avant pendant une période prolongée ou de travailler au-dessus de la tête.

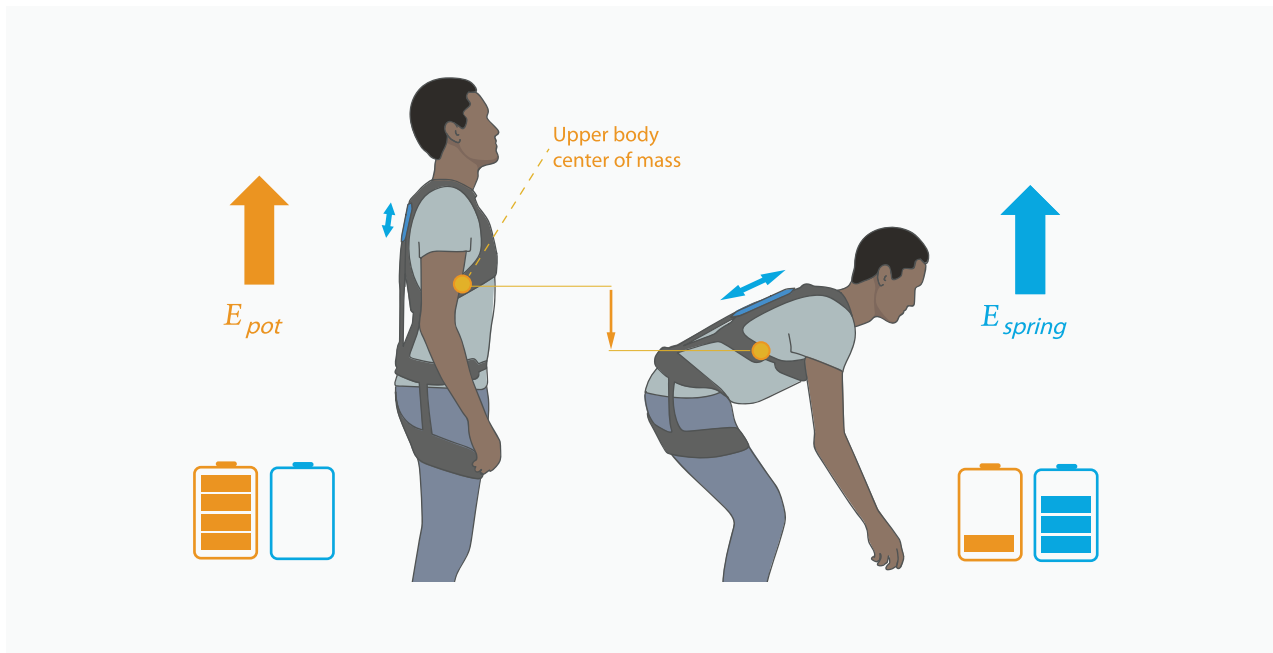


#### Illustration du concept de compensation de la gravité avec l'Auxivo OmniSuit

◀ Gauche: Lorsque l'utilisateur commence à se pencher vers l'avant ou qu'il tient une charge devant son corps, la gravité commence à tirer le haut du corps vers le bas. Lorsque l'utilisateur porte l'OmniSuit, le fait de se pencher vers l'avant déclenche automatiquement l'étirement des ressorts situés à l'arrière de l'exosquelette. La force résultante du ressort tire l'utilisateur vers l'arrière et compense une partie de la force gravitationnelle qui tire vers l'avant. ▶ À droite: Le soutien d'épaule de l'OmniSuit est illustré. Dès que l'utilisateur commence à soulever un bras, il sent la gravité le tirer vers le bas. Lorsque l'utilisateur porte l'OmniSuit, l'exosquelette soutient progressivement l'épaule au fur et à mesure que le bras est soulevé, compensant ainsi la force gravitationnelle vers le bas en poussant le bras vers le haut.

## Section 2

### Principes de Soutien des Exosquelettes



#### Illustration du concept de stockage et de récupération d'énergie

Lorsque l'homme est en position debout, la masse du haut du corps stocke de l'énergie potentielle, tandis qu'aucune énergie n'est stockée dans les ressorts de l'exosquelette de soutien dorsal LiftSuit. Lorsque l'utilisateur se penche vers l'avant, abaissant le centre de masse du haut du corps, l'énergie potentielle est libérée et transférée aux ressorts de l'exosquelette, où elle est stockée. Lorsque l'utilisateur revient en position verticale, l'énergie est reconvertie en énergie potentielle, soutenant ainsi le mouvement.

La récupération d'énergie est un concept clé des exosquelettes passifs à ressorts. Une question fréquemment posée est de savoir d'où vient l'énergie nécessaire pour tendre les ressorts d'un exosquelette passif. La réponse est la suivante : l'énergie est déjà là, stockée dans votre corps lorsque vous vous tenez debout. Pour expliquer cela, nous devons rapidement introduire quelques notions de physique: Tout objet ayant une masse dans un champ gravitationnel a emmagasiné ce que l'on appelle de l'énergie potentielle. La quantité d'énergie stockée dans cet objet est  $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ , donc la masse  $m$  de l'objet multipliée par sa hauteur  $h$  multipliée par l'accélération gravitationnelle terrestre  $g$ . Cette énergie potentielle change lorsque nous modifions la hauteur de l'objet, nécessitant une énergie supplémentaire pour augmenter la hauteur ou libérant de l'énergie en diminuant la hauteur. Pour un exosquelette de soutien de soulèvement comme le Auxivo LiftSuit, l'énergie dont nous parlons est l'énergie potentielle de la masse du corps.

Lorsqu'une personne se tient debout, le haut du corps atteint sa hauteur maximale, et la masse du haut du corps contient de l'énergie potentielle. Pencher le corps vers l'avant déplace le centre de masse vers le bas, libérant de l'énergie potentielle, dont la partie majeure est perdue par dissipation d'énergie. Pour remonter, nos muscles doivent fournir une énergie supplémentaire pour rétablir l'énergie potentielle.

Lorsque nous plaçons le LiftSuit avec ses ressorts mécaniques sur le dos de la personne, ces ressorts sont étirés dès qu'elle se penche vers l'avant, et une partie de l'énergie potentielle libérée par le corps est transférée aux ressorts et reste stockée dans le système au lieu d'être dissipée et perdue. L'énergie d'un ressort est exprimée par l'équation suivante:  $E_{spring} = 1/2 \cdot k \cdot x^2$ , étant la raideur du ressort et  $x$  étant le déplacement du ressort par rapport à sa position d'équilibre. Lorsque le haut du corps humain revient en position verticale, l'énergie mécanique stockée dans les ressorts est reconvertie en énergie potentielle du haut du corps. Ce processus est répété à chaque soulèvement, et l'énergie stockée est transférée et convertie dans les deux sens entre le corps et l'exosquelette.

Bien entendu, les ressorts ne peuvent pas stocker toute l'énergie potentielle du haut du corps et le processus n'est pas efficace à 100 % en raison, par exemple, du frottement. Dans le cas contraire, nous récupérerions toute l'énergie lors de chaque soulèvement dans un bilan énergétique à somme nulle, et nous pourrions en fait le faire indéfiniment. Cependant, même si seulement un certain pourcentage de l'énergie potentielle est stocké et récupéré après chaque soulèvement, ce processus réduit considérablement la charge de travail.

Le principe de récupération d'énergie est la raison pour laquelle les exosquelettes à ressorts sont si efficaces sur le plan énergétique et peuvent fournir un bon niveau de soutien tout en étant petits, légers et rentables.

# Section 3

## Idées reçues

Dans cette dernière section, nous souhaitons aborder quelques idées reçues que nous entendons fréquemment et qui sont souvent source de confusion. Si vous avez lu les sections précédentes, vous serez rapidement capable d'identifier les hypothèses incorrectes sur lesquelles reposent ces méprises.

**Idée reçue n°1: seuls les exosquelettes actifs apportent un soutien réel, car les systèmes passifs exigent que vous investissiez d'abord de l'énergie.**

La méprise principale est qu'avec un exosquelette passif, ce sont vos muscles qui doivent fournir la force nécessaire pour tendre les ressorts de l'exosquelette. Vous devez donc d'abord fournir l'énergie qui vous soutiendra par la suite. Il ne s'agit donc pas d'un "vrai" soutien puisque vous devez d'abord faire tout le travail vous-même. Les systèmes actifs, en revanche, fournissent une force et une énergie supplémentaires. Il est donc logique que seuls les systèmes actifs puissent vous soutenir.

Cette idée reçue repose sur plusieurs hypothèses incorrectes qui peuvent être rapidement résolues en appliquant les concepts de compensation de gravité, de récupération d'énergie et les différences entre la mécanique d'ingénierie et la biomécanique.

**La première hypothèse fautive concerne les forces.**

On suppose que les muscles humains doivent activement tendre les ressorts de l'exosquelette passif. Comme nous le savons, tant que les ressorts passifs ne font que compenser la charge gravitationnelle sur votre corps, vous n'avez pas besoin d'investir une force supplémentaire pour tendre les ressorts car la gravité le fait pour vous ! Lorsqu'il est bien conçu, le soutien par ressort ne surcompense jamais le poids de votre corps, quelle que soit la position, et vous n'avez jamais besoin d'utiliser vos muscles pour tendre les ressorts.

**La deuxième hypothèse fautive concerne le bilan énergétique.**

Elle suppose qu'avec un système passif, vous devez toujours investir de l'énergie et, avec un peu de chance, n'en récupérer qu'une partie. Par conséquent, il s'agit, au mieux, d'un bilan énergétique à somme nulle, ce qui signifie qu'il n'y a pas de véritable soutien ou de réduction de la charge.

L'un des aspects de cette méprise sur l'énergie est qu'un bilan énergétique à somme nulle est quelque chose de mauvais et d'inefficace. En réalité, un bilan énergétique à somme nulle serait un résultat extraordinaire. Cela signifierait que nous pourrions faire un nombre infini de squats au poids du corps sans transpirer parce que, à chaque répétition, nous récupérons toute notre énergie grâce à la récupération d'énergie.

La réalité des soulèvements et des positions penchées vers l'avant est bien pire. Notre corps brûle de l'énergie à chaque seconde où nous restons en position penchée vers l'avant. Chaque fois que nous nous accroupissons, l'énergie potentielle de notre corps se dissipe presque complètement et doit être recréée à l'aide de la force musculaire.

Par conséquent, un exosquelette passif à base de ressorts utilisant la récupération d'énergie pour restituer même un petit pourcentage lors de chaque soulèvement peut faire une différence significative. Il est vrai que cet exosquelette n'ajoute pas d'énergie supplémentaire au système. Mais il nous empêche de perdre et de gaspiller de l'énergie pendant le travail, ce qui est un moyen beaucoup plus efficace d'apporter du soutien.

Un autre aspect de cette hypothèse fautive sur l'énergie est que les différences entre un système mécanique et biomécanique sont ignorées. L'homme peut économiser beaucoup plus d'énergie que celle stockée dans le ressort mécanique simplement parce que, comme nous l'avons vu précédemment, une force de soutien permanente provenant d'un ressort mécanique sous tension permet à l'utilisateur humain d'économiser de l'énergie supplémentaire chaque seconde, grâce au métabolisme musculaire de l'homme.

### Section 3

#### Idées reçues

**Idée reçue n° 2: Les exosquelettes réduisent la charge sur une partie du corps en la transférant vers une autre et en l'augmentant à cet endroit, ce qui est en fait dangereux.**

Tout d'abord, reconnaissons que certaines parties de cette affirmation ne sont pas complètement incorrectes. Comme nous l'avons vu précédemment, les exosquelettes peuvent utiliser la redistribution de la charge de différentes manières. Mais lorsque ce concept est présenté comme indiqué ci-dessus, il implique que la redistribution de la charge est toujours nécessaire et qu'elle provoque une augmentation de contrainte sur les parties du corps qui n'étaient pas soumises à la charge avant. Il est aussi implicite que la redistribution de la charge d'une partie à l'autre est quelque chose d'intrinsèquement mauvais et malsain, ce qui est l'idée reçue que nous voulons aborder.

**Premièrement, il est possible de réduire la contrainte locale sans augmenter la contrainte ailleurs:**

En utilisant le concept de contournement de la charge décrit ci-dessus, il est possible de réduire la contrainte sur le corps humain et les différentes parties du corps sans nécessairement l'augmenter ailleurs. L'exosquelette externe fournit simplement un chemin de charge alternatif vers le sol, où, finalement, toutes les charges induites par la gravité sur le corps arriveront. Alors pourquoi ne pas sauter les parties du corps qui risquent d'être surchargées ?

**Deuxièmement, il peut être utile de répartir la charge sur une plus grande partie du corps:**

La redistribution de la charge, qui consiste à accepter consciemment des augmentations de charge dans d'autres parties du corps, est une approche qui peut être utilisée intentionnellement. Oui, cela signifie que la charge dans certaines parties du corps est augmentée, mais si elle est utilisée correctement, la répartition de charge n'est pas, par défaut, quelque chose de mauvais. La même charge peut être répartie plus équitablement sur une plus grande partie du corps. La redistribution de la charge peut également signifier un meilleur équilibrage de la charge, de sorte qu'elle peut, par exemple, répartir une charge asymétrique de manière plus égale entre les côtés gauche et droit du corps. Une charge de 120% et 50% de la capacité maximale sur les côtés gauche et droit du corps sera plus malsaine qu'une répartition de 90% - 80%.

# Résumé et mots conclusifs

Nous espérons que vous avez apprécié la lecture de ce livre blanc et qu'il vous a aidé à comprendre quels sont les concepts de soutien utilisés par les exosquelettes professionnels modernes.

Il est probablement devenu évident qu'il existe de nombreux concepts parmi lesquels on peut choisir lors de la conception d'un exosquelette, et qu'une bonne compréhension des principes mécaniques et biomécaniques est essentielle pour s'assurer que le design final offre les meilleures performances possibles et le maximum d'avantages à ses utilisateurs.

La plupart des principes abordés peuvent être employés par tous les types d'exosquelettes et sont, d'une certaine manière, universels. Ainsi, que vous ayez un exosquelette actif ou passif, rigide ou souple, ils utiliseront tous, d'une manière ou d'une autre, certains des concepts décrits précédemment.

C'est également la raison pour laquelle aucune de ces catégories d'exosquelettes n'est, par défaut, meilleure ou pire que les autres. Elles reposent toutes sur les mêmes idées de base, qui sont réalisées à l'aide de technologies différentes.

Si vous souhaitez en savoir plus sur les exosquelettes, nous vous invitons à visiter notre site web. Vous pourrez y découvrir notre offre d'exosquelettes professionnels pour différents secteurs d'activité. Si vous souhaitez en savoir plus sur la technologie des exosquelettes, nos exosquelettes éducatifs de la série EduExo peuvent vous aider à apprendre comment concevoir et construire votre propre exosquelette.

# À propos des auteurs



## **Volker Bartenbach**

Volker est co-fondateur et PDG d'Auxivo. Titulaire d'un doctorat en robotique des exosquelettes et ayant plus de 12 ans d'expérience dans le développement, la recherche et la commercialisation d'exosquelettes, son objectif est de développer des exosquelettes de haute performance et de les rendre accessibles à un plus grand nombre de personnes.



## **Rachel van Sluijs**

Rachel est directrice de recherches chez Auxivo. Titulaire d'un doctorat en neurosciences et d'un master en sciences du mouvement, son travail vise à comprendre et à optimiser l'interaction entre les exosquelettes portables et l'utilisateur, afin de s'assurer que le corps humain peut tirer pleinement parti du soutien de l'exosquelette.



## **Roger Gassert**

Roger est co-fondateur et conseiller scientifique d'Auxivo. Il est également professeur titulaire d'ingénierie de la réadaptation à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH). Ses recherches portent sur le développement et la validation clinique de technologies de réadaptation portables telles que les exosquelettes.

## **À propos d'Auxivo AG**

Fondée en 2019 en tant que spin-off de l'ETH Zurich, Auxivo AG est un développeur et fabricant d'exosquelettes de premier plan. La mission de l'entreprise est d'améliorer la sécurité et le bien-être des travailleurs en offrant des solutions innovantes et accessibles qui réduisent la charge de travail physique et le risque de blessure. Le portefeuille d'exosquelettes de l'entreprise, qui grandit rapidement, offre des solutions pratiques pour les secteurs tels que la logistique, la fabrication, la construction ou les soins de santé.



## **Droits d'auteur**

Janvier 2024 © Auxivo AG

Le contenu de ce document est protégé par le droit d'auteur. Tous les droits sont réservés.

Auxivo®, LiftSuit®, CarrySuit®, DeltaSuit®, OmniSuit® sont des marques déposées appartenant à Auxivo AG.

Quel que soit le but recherché, l'utilisation de ces marques est interdite sans l'autorisation écrite d'Auxivo AG.

Modifications techniques, erreurs et omissions sans préavis.

**Auxivo AG**  
Sonnenbergstrasse 74  
8603 Schwerzenbach  
Switzerland

[info@auxivo.com](mailto:info@auxivo.com)  
+41 77 250 35 31

[auxivo.com](http://auxivo.com)

AUXIVO