

Licence Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives
Parcours Ergonomie du Sport et Performance Motrice

Année universitaire 2021 - 2022

Mémoire technique



Sommaire

1- Présentation de la Start-up	3
1.1- Les moyens humains	4
1.2- Les moyens matériels & infrastructures	5
1.3- Les moyens financiers	6
2- Fondement du projet	6
2.1- Contexte	6
2.2- Présentation de la pathologie	6
2.3- Présentation de la discipline	8
2.4- Les principales contraintes	11
2.5- Objectifs	12
2.6- Analyse de l'existant	14
3- Présentation des dispositifs	15
3.1- La chaussure et le chausson	15
3.2- L'exosquelette	19
3.3- Les bâtons	23
3.4- Connectivité du système	25
4- Législation	27
5- Estimation des coûts	27
5.1- Sponsors	27
5.2- Budget	29
5.3- Marketing	29
6- Remerciements	30

Appel d'offre

Proposer un dispositif pour la pratique du slalom en ski alpin permettant de rendre autonome une personne avec séquelles de poliomyélite antérieure aiguë et définitives

1- Présentation de la Start-up

Handi'Innov est une start-up Marseillaise co-fondée en 2010 par Fadil Zakaria et Fourtier Michèle. Notre objectif est de permettre à tous l'accès à la pratique qui lui convient. Pour cela, nous développons des dispositifs adaptés à vos besoins et votre pratique. Que ce soit suite à une pathologie, un accident, une blessure, retrouvez le plaisir de pratiquer votre activité sportive en toute liberté. De plus, notre service vous offre la possibilité d'accéder à la pratique en loisir ou en compétition. Votre bien-être, votre sécurité et la convivialité de notre dispositif sont nos priorités, c'est pourquoi nous plaçons toujours l'humain au centre de notre réflexion.

— *“ Votre potentiel est notre force ”* —

Liberté de pratiquer

Depuis maintenant 10 ans, nous travaillons dur chaque jour pour améliorer la qualité de vie de nos clients et de nos utilisateurs, pour leur permettre de vivre une vie quotidienne indépendante. Pour nous, la qualité de vie est étroitement liée à l'indépendance et la liberté personnelle. Pour cette raison, nous aidons les gens à maintenir ou à retrouver leur liberté de pratique. Afin d'atteindre cet objectif, nous nous concentrons sur l'innovation et la technologie exceptionnelle, combinées à une approche holistique. Ainsi, nous essayons de voir le monde à travers les yeux de nos utilisateurs, tout en poursuivant cet objectif avec courage, respect et engagement.

Nos valeurs, notre culture



Handi'Innov est humain et accessible. Nous attachons une grande importance aux relations personnelles basées sur la confiance ; nous sommes durables, responsables et transparents dans tout ce que nous faisons. En effet, lors de nos interactions, nous considérons les personnes qui utilisent nos produits comme des partenaires.

Nous sommes constamment en contact avec eux afin que nous puissions en apprendre davantage sur leurs préoccupations, leurs besoins et leurs intérêts. A travers cette approche, nous aidons les personnes à mobilité réduite, nous voulons les encourager et renforcer leur confiance en elles. Nous apprécions la diversité individuelle et considérons les différences de chacun non pas comme une limite, mais plutôt une force.

Engagement envers la société et le sport



Notre implication dans la société s'étend aux projets régionaux jusqu'aux jeux paralympiques, en passant par l'avancement de la technologie toujours plus innovante. Notre objectif est de placer les personnes handicapées au centre de la société, afin de déterminer leurs attentes de façon individualisante et précise.

La biologie inspire la technologie



La biologie humaine est toujours au centre des préoccupations chez Handi'Innov. L'analyse des schémas de mouvement humain fournit des informations sur la nature, que nous cherchons à reproduire le plus étroitement possible avec des solutions bioniques. Cependant, le but n'est pas de produire une copie rigide des structures biologiques. Au lieu de cela, nous appliquons les principes à la technologie afin de pouvoir reproduire les fonctions naturelles dans toute la mesure du possible. Grâce à cette approche, nos produits correspondent presque parfaitement au modèle naturel.

1.1- Les moyens humains

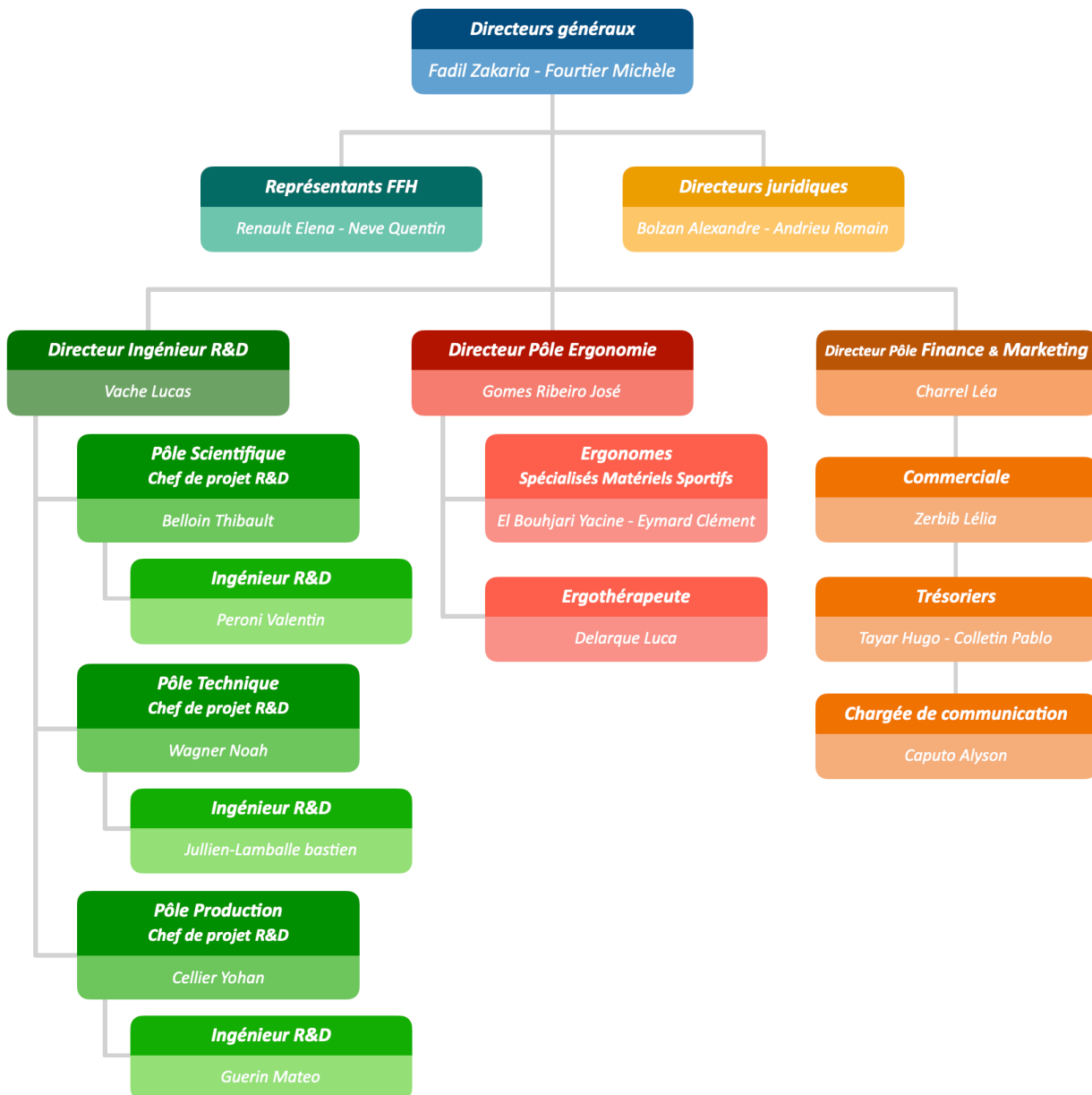


Figure 1 : Organigramme de l'équipe Handi'Innov

Les 22 employés de Handi'Innov ont tous étudié à l'université d'Aix-Marseille et ont réalisé une licence STAPS (Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives), plus spécifiquement la mention ESPM (Ergonomie du Sport et Performance Motrice). Ces années d'études communes nous ont permis d'acquérir des connaissances solides sur un large panel d'activités physiques, sur l'ergonomie, le corps humain mais aussi sur la compréhension et l'analyse du mouvement. Certains ont même effectué un cursus complémentaire dans l'ingénierie grâce au parcours CMI (Cursus Master en Ingénierie).

Par la suite, chacun de nos collaborateurs s'est spécialisé dans un domaine. Ce qui nous permet de répondre au mieux aux demandes en étant présent sur l'ensemble des étapes de développement. De la recherche au marketing, en passant par l'ingénierie et l'ergonomie, l'interaction entre tous ces pôles d'activités nous offre une approche pluridisciplinaire et complète pour trouver la solution parfaite et spécifique au client.

1.2- Les moyens matériels & infrastructures

Nos locaux sont situés à la Faculté des Sciences du Sport de Luminy (163, Avenue de Luminy, case 910, 13288, MARSEILLE, Cedex 9). Grâce à nos connaissances et expériences professionnelles antérieures, nous avons la possibilité de collaborer avec un certain nombre de laboratoires de Marseille. Ainsi, cet accès exclusif nous fournit du matériel sophistiqué, spécifique et adapté.

Ainsi, l'INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale), l'INMED (Institut de Neurobiologie de la Méditerranée) et les hôpitaux de Saint Marguerite et de la Timone, nous accompagnent dans les domaines de la santé, de la récupération et rééducation lorsque ceci est nécessaire.

Aujourd'hui, l'ISM (Institut des Sciences du Mouvement), spécialisée dans l'étude et la modélisation du mouvement humain, est le laboratoire avec lequel nous collaborons le plus. En effet, leur spécialité est en adéquation avec notre volonté de placer l'humain au centre de tous nos projets. A travers cette affiliation, nous disposons de nombreuses plateformes technologiques tel que le Technosport. Cette dernière est dédiée à l'innovation du sport et du mouvement, permettant par conséquent l'étude de la performance dans son acceptation la plus large, du sport de haut-niveau aux mouvements pathologiques grâce à des plateformes de force, analyse vidéo (Qualisys), capteurs EMG et bien d'autres matériels. La plateforme Mecabio est également indispensable pour la création de nos dispositifs. En effet, elle permet de réaliser des tests de caractérisation mécanique sur tous types de matériaux.



Nous sommes également affiliés avec un grand nombre de laboratoires à l'échelle mondiale. Le laboratoire « Human Lab » situé à l'iMUDS (Institut Universitaire conjoint du Sport et de la Santé) de l'Université de Grenade est une véritable plus-value pour notre start-up. En effet, une activité de recherche est développée pour l'analyse biomécanique de la technique de ski alpin, ainsi que pour l'amélioration de la performance sportive. Les activités intérieures sur le simulateur de ski sont combinées à la situation réelle dans la Sierra Nevada.

1.3- Les moyens financiers

Malgré le fait que notre start-up ait souffert de la crise sanitaire, Le Coq Sportif nous fait confiance et nous aide à l'année pour financer nos projets. Notre association s'est renforcée à l'approche des Jeux Olympiques de Paris 2024. En effet, Le Coq Sportif est, depuis 2019, l'équipementier officiel de la Fédération Française Handisport. De ce fait, nous partageons des objectifs et valeurs fortes qui s'ajoutent à notre envie commune de promouvoir le savoir-faire et l'innovation française.

Enfin, avec le travail de notre pôle financier et l'intérêt suscité par nos innovations, chaque projet est aidé par des sponsors spécialisés et spécifiques à la demande, davantage détaillés dans le mémoire technique pour cet appel d'offre.



2- Fondement du projet

2.1- Contexte

Notre patient présente des séquelles de poliomyélite antérieure aiguë, avec une déficience du membre inférieur droit irréversible : le quadriceps droit (*cotation à 1 sur testing musculaire*) et la loge antéro-latérale droite (*cotation à 1 sur testing musculaire*). Le patient souhaite faire du slalom en ski alpin comme une personne valide (c'est-à-dire sans aide motorisé et en étant debout). Ainsi, la création d'un dispositif spécifique à l'individu va être nécessaire pour l'aider au maximum à effectuer cette discipline tout en utilisant ses capacités physiques. Ce dispositif lui offre la liberté de pratiquer, de façon autonome, mais sans oublier la sécurité de l'utilisateur en évitant de rajouter des risques supplémentaires à cette discipline, déjà à risque. Il serait également intéressant de lui donner la possibilité de faire ultérieurement de la compétition.

2.2- Présentation de la pathologie

2.2.1- Définitions de la poliomyélite

La poliomyélite touche principalement les enfants, sans distinction de sexe. Seulement 1 à 2 % des infections entraînent finalement des symptômes neurologiques. La poliomyélite est causée par des poliovirus, pouvant entraîner des paralysies plus ou moins graves et diffuses. Dans sa forme paralytique, elle entraîne une atteinte exclusivement motrice ¹. En effet, la poliomyélite aiguë est une maladie qui touche les motoneurons de la corne antérieure de la moelle épinière et du tronc cérébral. La perte de motoneurons et de la dénervation de leurs muscles squelettiques est associée à des faiblesses et de l'atrophie musculaire. Autrement dit, la poliomyélite antérieure aiguë peut entraîner une paralysie touchant le plus souvent les membres inférieurs et pouvant atteindre l'appareil respiratoire.

La mortalité due à la poliomyélite paralytique aiguë est de 5 à 10 %, mais elle peut atteindre 20 à 60 % en cas d'atteinte bulbaire. Aujourd'hui, il n'existe aucun traitement curatif, le seul moyen de lutter contre cette maladie est le vaccin préventif ².

[1] P. Sautreuil et al., (2009), Lett. Méd. Phys. Réadapt. 25 (127-135)

[2] Santepubliquefrance.fr (2019), maladies-a-prevention-vaccinale/poliomyelite

2.2.2- Physiopathologie

La poliomyélite aiguë est causée par de petits virus de l'acide ribonucléique (ARN) du groupe des entérovirus. Celles-ci infectent le tractus intestinal humain principalement par la voie fécale-orale (main vers bouche). Le poliovirus pénètre dans le système nerveux soit en traversant la barrière hémato-encéphalique, soit par transport axonal à partir d'un nerf périphérique. Il peut provoquer une infection du système nerveux en impliquant le gyrus précentral, le thalamus, l'hypothalamus, les noyaux moteurs du tronc cérébral et la formation réticulaire environnante, les noyaux vestibulaires et cérébelleux, et les neurones des colonnes antérieure et intermédiaire de la moelle épinière. Les cellules nerveuses subissent une chromatolyse centrale (processus dégénératif qui affecte les pigments de certaines cellules), accompagnée d'une réaction inflammatoire, tandis que la multiplication du virus précède l'apparition de la paralysie. Au fur et à mesure que le processus de chromatolyse va plus loin, la paralysie musculaire ou même l'atrophie apparaît lorsque moins de 10 % des neurones survivent dans les segments de cordon correspondants ¹.

2.2.3- Conséquences de la poliomyélite

La poliomyélite paralytique flasque aiguë se caractérise généralement par de fortes douleurs musculaires, des paresthésies, des spasmes et une faiblesse musculaire. Ainsi, le tonus musculaire est flasque et la paralysie sans perte réelle de sensation apparaît dans la région concernée.

Par conséquent, dans cet appel d'offre, le client présente une déficience de la jambe droite, et plus précisément sur son quadriceps et sa loge antéro-latérale. Pour évaluer ce déficit, un testing musculaire a été effectué. En effet, cet examen permet de quantifier la force d'un muscle ou d'un ensemble de muscles selon une échelle de classification allant de 0 à 5.

5	Force normale
4	Résistance imparfaite contre la force
3	Mouvement sans résistance contre la force
2	Mouvement sans pesanteur
1	Contraction musculaire sans mouvement
0	Aucune contraction

Figure 2 : Échelle de cotation du testing musculaire

En ce qui concerne notre patient, la cotation pour les deux groupes musculaires concernés étant à 1, on peut en déduire que celui-ci présente un niveau d'activation musculaire du quadriceps et de la loge antéro-latérale droite très faible. Ce bilan traduit ainsi une incapacité à produire un mouvement nécessitant l'activation des régions musculaires précédemment énoncées. De plus, il est important de noter que ce déficit est présent depuis un long moment, donc les muscles sont atrophiés. En effet, l'atrophie musculaire est définie comme une diminution de la masse d'un muscle. Dans notre cas, l'atrophie est importante et définitive. Ce qui entraîne inmanquablement une modification des mouvements et de la performance ¹.

[1] B. Léger *et al.*, (2011), Sportmedizin und Sporttraumatologie 59 (14–17)

2.2.4- Atteinte du mouvement

Dans notre cas, le patient présente une atteinte au quadriceps et la loge antéro-latérale droite. Il est donc intéressant d'étudier les mouvements impliquant les muscles du quadriceps et de la loge antéro-latérale. En clair, cette analyse va nous permettre de cibler les mouvements difficilement ou nullement réalisables par notre client.

D'une part, le quadriceps est le muscle le plus volumineux de la jambe, regroupant un ensemble de muscles tels que le droit fémoral, vaste médial, vaste intermédiaire et vaste latéral. L'ensemble de ces muscles permettent l'extension du genou (concentrique), la stabilisation du genou et également une fonction antigravitaire (excentrique). Le droit fémoral a, quant à lui, un rôle de fléchisseur de la hanche. D'un point de vue fonctionnel, le quadriceps permet de rester debout, de marcher, de monter des marches, mais il est aussi prédominant dans la plupart des sports ¹.

D'autre part, la loge antéro-latérale correspond à un groupe de muscles distales situés entre l'articulation du genou et de la cheville. Elle regroupe quatre muscles repartis sur la face antérieure de la jambe, dont le tibial antérieur, le long extenseur de l'hallux, le long extenseur commun des orteils, et le troisième fibulaire. Tous ces muscles agissent sur l'articulation de la cheville, favorisant ainsi les mouvements du pied et des orteils ¹.

- Le tibial antérieur permet la dorsiflexion, l'adduction et la supination de la cheville.
- Le long extenseur de l'hallux permet la dorsiflexion, l'extension de l'hallux, l'adduction et la supination de la cheville.
- Le troisième fibulaire permet la dorsiflexion, l'adduction et supination de la cheville.
- Le long extenseur commun des orteils permet la dorsiflexion, pronation et d'extension des orteils (2 à 4).

Malgré le déficit et l'atrophie de ses 2 groupes musculaires de la jambe droite, il est important de signaler que la personne ne présente aucun déficit sur les autres muscles des membres supérieurs et inférieurs. Il est donc en capacité de marcher et réaliser un grand nombre d'activités au quotidien. Notre objectif est donc d'utiliser ce potentiel pour lui permettre de refaire du slalom en ski alpin.

2.3- Présentation de la discipline

2.3.1- Généralités

Le ski alpin est une activité sportive complexe de glisse, où le skieur utilise en grande partie l'attraction de la gravité pour glisser sur des surfaces enneigées. Celle-ci fait appel à des aspects physiologiques, techniques et tactiques. En effet, cette discipline nécessite des tâches motrices de coordination, d'équilibre, d'agilité et de force.

Une des particularités du ski alpin est la différence d'exigence entre sa pratique de loisir, et de compétition. En effet, bien que les caractéristiques techniques du contact ski-neige soient communes aux deux pratiques, la compétition impose l'aménagement de portes sur le parcours et donc des contraintes et une difficulté supplémentaire.

La demande de la personne atteinte de poliomyélite est de faire du slalom en ski alpin. Au sein de cette pratique, il existe différents types de slalom ² :

[1] P.Thiriet *et al.*, (2010), anatomie3d.univ-lyon1

[2] V. Bottollier *et al.*, (2019), HAL (27)

- Le slalom spécial, une épreuve consistant à skier entre des piquets très rapprochés (environ 12 mètres), ce qui nécessite un enchaînement de virages rapides et très courts.

- Le slalom géant qui est une discipline technique comme le slalom spécial, mais plus rapide. Les portes sont composées de deux piquets reliés par une banderole, elles sont plus espacées (environ 18 mètres), ce qui permet de prendre plus de vitesse ¹.

Le slalom spécial est une discipline plus technique, plus tonique, où l'action de relance et de changement d'appui est omniprésente. Pour une personne souffrant de déficience musculaire sur les membres inférieurs, il nous a paru logique et raisonnable de nous focaliser plutôt sur le slalom géant et de créer ainsi un dispositif permettant à cette personne de réaliser cette pratique. Par la suite, si l'envie lui vient de faire du slalom spécial ou autres disciplines, cela est bien évidemment possible, cependant il obtiendra de moindres performances, causées par une augmentation de la difficulté de la discipline.

Le slalom géant est une descente, comportant une succession de virages sur un parcours délimité par des portes. Une manche dure environ 1 min 30, la part d'anaérobie lactique étant donc prépondérante. L'épreuve se divise en 2 manches de tracés différents dans lesquelles les deux temps sont additionnés ; ces tracés comportent entre 30 à 65 portes espacées de 27 mètres environ, ainsi qu'un dénivelé allant de 250 et 450 mètres. Il est important de noter que cette pratique est un exercice à très haute intensité, jusqu'à 160% de VO2max. De plus, la notion de symétrie est prépondérante au sein de cette discipline avec une coordination complexe entre le haut et le bas du corps tout en exécutant des virages bidirectionnels répétés, par des mouvements brefs, intenses et cycliques.

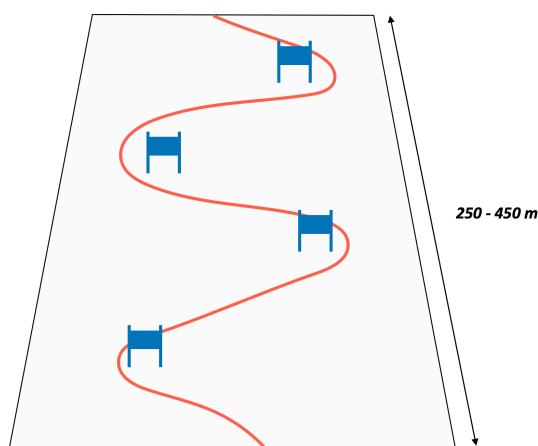


Figure 3 : Représentation d'un trajet en slalom géant

2.3.2- Caractéristiques du slalom géant

Le virage en ski alpin, et notamment en slalom géant, est un élément fondamental pour passer les portes et réguler sa posture en fonction du circuit. Le découpage selon des phases est une approche classique pour analyser un mouvement humain. Ainsi, le passage d'un virage se décompose en 3 phases : déclenchement, conduite du virage et complétion du virage ou conduite II. La première phase, dite la phase de déclenchement du virage, se caractérise par un changement d'appui du ski extérieur (en aval de la pente) pour le ski en amont (futur ski extérieur) du prochain virage. Elle se traduit également par un transfert du poids s'accompagnant d'un changement de carres des skis (côtés du ski) et de direction, afin d'orienter le corps vers le virage suivant. La seconde phase, nommée conduite du virage, est déterminée par l'augmentation de prise de carres se faisant grâce à l'inclinaison du corps vers le centre du virage et l'abaissement du centre de masse du skieur. Enfin, la phase de complétion du virage est visible lors d'une

[1] V. Bottollier *et al.*, (2019), HAL (27)

augmentation de pressions sur les talons dans les chaussures et une extension du skieur à partir de la position basse vers une position plus équilibrée et plus haute ¹.

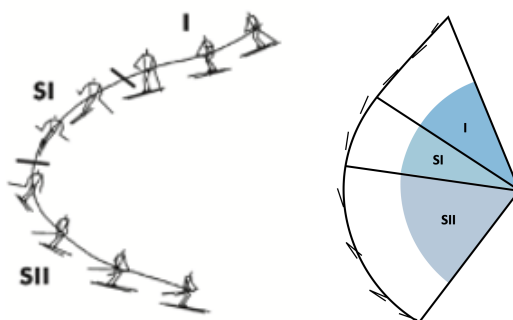


Figure 4 : Triple partition du virage de ski (tirée de Müller *et al.*, 1998)

De plus, d'un point de vue général sur les différentes phases établies lors d'un virage, nous détectons un mouvement angulaire du genou entre 120 à 130 degrés. Ce mouvement induit une sollicitation de plusieurs muscles tels que les adducteurs, le grand fessier, le biceps fémoral, le vaste médial, le fibulaire, le tibial antérieur, l'ensemble de la ceinture abdominale, les muscles dorsaux, obliques et transverses; tous essentiels pour maintenir une certaine stabilité lors du mouvement ².

L'étude cinématique du mouvement est également un point essentiel à prendre en compte pour identifier les mouvements réalisés par un skieur sur slalom géant. Ainsi, à travers ce graphique démontrant les angles des genoux pendant les virages, nous pouvons observer lors de la phase de direction que l'angle du genou de la jambe extérieure est toujours supérieur à celui de la jambe intérieure. Avec des fluctuations relativement faibles, il reste relativement constant entre 120 à 130°. L'angle du genou de la jambe intérieure au début de la première phase de direction est d'environ 120°. Cependant, il se réduit au cours de la phase de virage et atteint son minimum autour de 95° au début de la phase d'initiation (le skieur modifie le contact ski-neige du bord amont au bord aval des skis et initie le virage des skis dans la nouvelle direction). La forte augmentation de l'angle du genou dans la première partie de la phase d'initiation reflète le mouvement de décharge vers le haut et la contribution importante de la jambe intérieure à la décharge totale ¹.

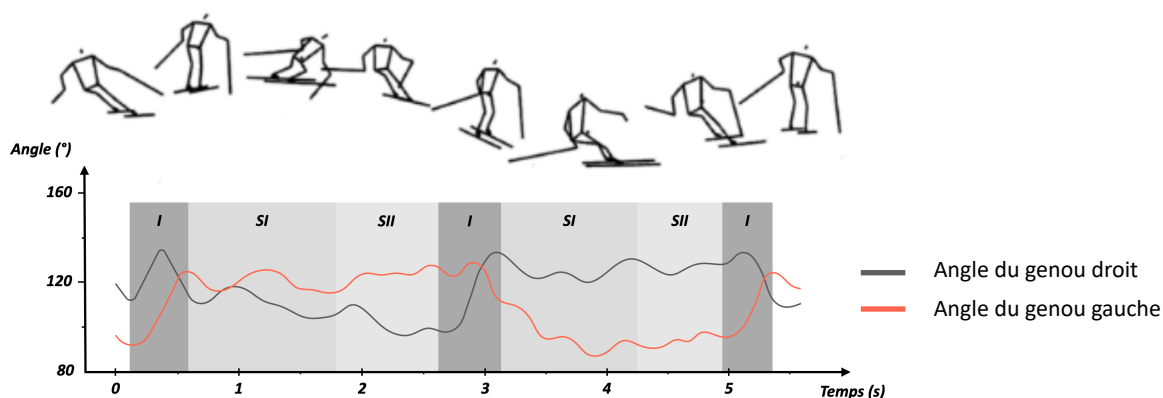


Figure 5 : Évolution des angles des genoux pendant un virage traditionnel en slalom géant (tirée de Müller *et al.*, 2008)

[1] E. Müller *et al.*, (2008) Journal of Sports Sciences, 16 (545-559)

[2] M. Racinais Alhammoud *et al.*, (2019), HAL (19-77)

L'étude des forces totales de réaction au sol donne des informations non négligeables sur l'interaction entre le skieur et le terrain. Ainsi, lors de la phase de déclenchement, la répartition des charges est égale entre la jambe droite et la jambe gauche. En revanche, au moment de la phase de conduite, on observe une augmentation continue de la jambe gauche, dite externe, jusqu'à atteindre un maximum d'environ 180 % du poids de corps, lorsque le virage est orientée vers la droite. En effet, le skieur a tendance à mettre un maximum de poids sur la jambe externe pour permettre d'initier une rotation. Dans la deuxième phase de virage, le ski extérieur est à nouveau davantage sollicité, ce qui permet d'introduire très rapidement la phase d'initiation suivante. A contrario, la jambe interne ne subit qu'une faible charge avoisinante 40% du poids de corps. Cette tendance est ensuite inversée lorsque le virage est orientée vers la droite. En effet, une diminution de la force sur la jambe externe va s'accompagner d'une augmentation de la force sur la gauche ¹.

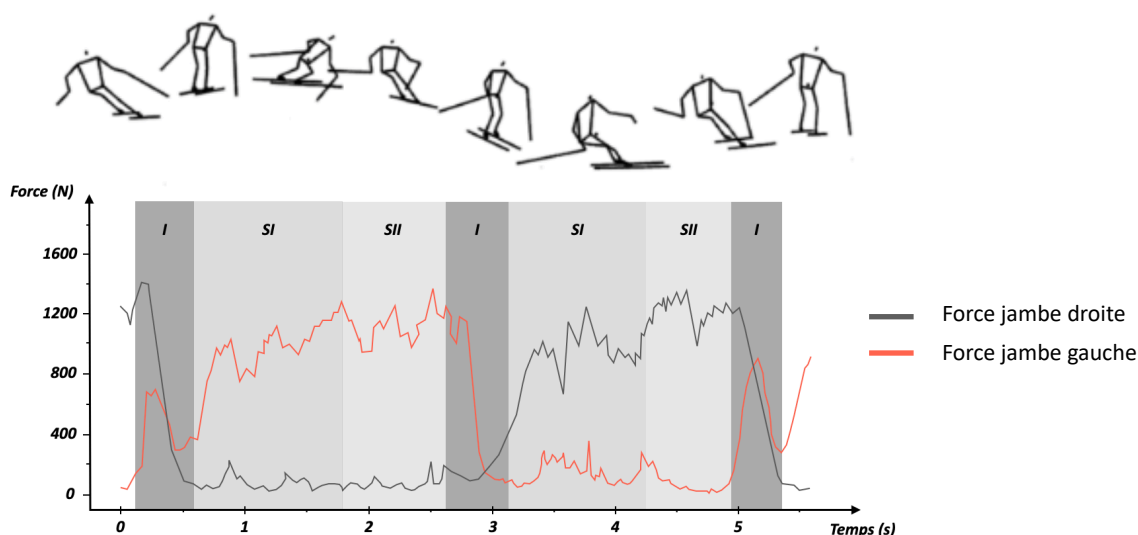


Figure 6 : Forces de réaction au sol de chaque jambe pendant un virage traditionnel en slalom géant (tirée de Müller *et al.*, 2008)

Enfin, il est important de noter que la littérature s'est également intéressée à la distribution de force entre la jambe droite et la jambe gauche lors du slalom géant. En effet, alors que le virage se déroule, la force appliquée sous le pied extérieur augmentait jusqu'à la fin de la phase de conduite, après le passage de la porte. En revanche, la force appliquée sous le pied intérieur restait faible et stable tout au long des virages. Ainsi, au début du virage, la distribution de force était de 50% sur les pieds extérieurs et intérieurs. A la fin de la phase de conduite, il a été remarqué que la distribution de force était généralement proche de 75% ($\pm 5\%$) pour le pied extérieur et 25% ($\pm 5\%$) pour le pied intérieur ².

2.4- Les principales contraintes

Suite à l'analyse de la discipline et de la pathologie indépendamment l'une de l'autre, nous allons pouvoir en déduire les contraintes majeures de notre client liées à la pratique sportive du slalom géant. Ainsi, dû à la poliomyélite, notre demandeur a, d'une part, un déficit au niveau du quadriceps. Cette faiblesse provoque alors une incapacité à fléchir sur les skis. D'autre part, son atrophie au niveau de la loge antéro-latérale l'empêche de gagner son pied pour bénéficier d'un bon appui au sol.

[1] E. Müller *et al* (2003) *Journal of Sports Sciences* 21 (679–692)

[2] E. Müller *et al* (2008) *Journal of Sports Sciences*, 16 (545-559)

Il est important de noter que la plus grande contrainte est présente lors d'un virage vers la gauche. En effet, la jambe droite peut être soumise à une charge de 180 % du poids de corps. A cause de la faiblesse musculaire sur la jambe droite, celle-ci n'est pas capable de supporter seule une si grande contrainte. A l'inverse, le virage vers la droite est beaucoup moins problématique mais il est important de suppléer tout de même le muscle, car celui-ci reste atrophié. Enfin, le dernier point critique correspond aux changements d'appuis rapides et répétés qui imposent au dispositif de réagir instantanément pour adapter l'aide apportée.

2.5- Objectifs

2.5.1- Les objectif de délais

Nous pouvons distinguer deux types d'objectifs : les objectifs de délais et les objectifs fonctionnels. Pour ce qui est des objectifs de délai, nous pouvons les diviser en 6 grandes phases : la phase de recherche, la création d'un prototype, la phase de test et de modifications, la validation du prototype pour enfin pouvoir permettre la production et la mise à disposition. Le rétro-planning ci-dessous permet de visualiser les dates clés. Si nous ne rencontrons aucun problème conséquent, notamment pour l'approvisionnement et la disponibilité des matériaux, notre dispositif sera mis à la disposition du client lors du mois de décembre.

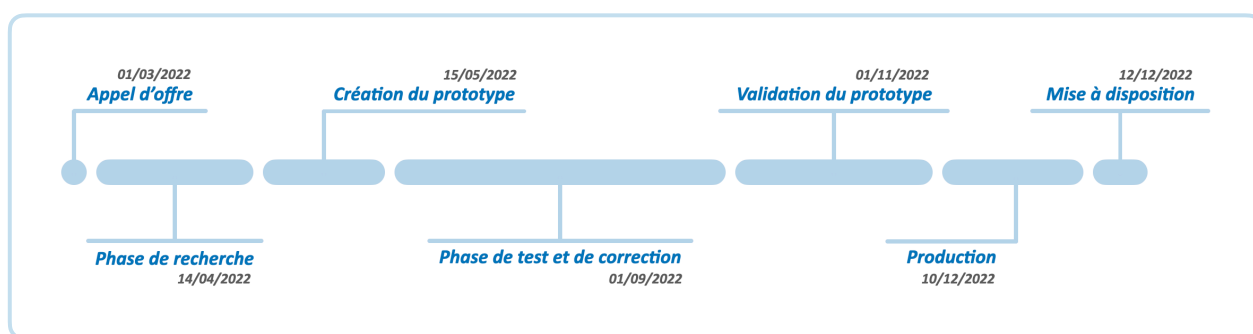


Figure 7 : Rétro-planning

2.5.2- Les objectif fonctionnels

Le cahier des charges fonctionnelles ci-dessous permet de répertorier et classer nos différents objectifs. Chaque fonction est accompagnée de ses critères d'appréciations, du niveau d'exigence et de sa flexibilité. Un niveau d'exigence élevé et une faible flexibilité témoigne de la grande importance de cette fonction. Ces fonctions dites principales sont donc nos priorités et au centre de notre réflexion.

Fonctions principales	Critères d'appréciation	Niveaux d'exigence	Flexibilité
Permet la pratique autonome du slalom géant	Temps pour s'équiper	< 25 min (= temps d'équipement d'un personne valide)	« F1 »
	Nécessite un apprentissage	< 1 heure pour prendre en main le dispositif	« F1 »
	Niveau de fatigue	Aucune fatigue causée par le dispositif en lui-même	« F0 »

Fonctions principales	Critères d'appréciation	Niveaux d'exigence	Flexibilité
Pallier la faiblesse musculaire	Suppléer suffisamment les muscles du quadriceps droit	≥ 180% poids du corps Mobilité = Permet le mouvement	« F0 »
	Suppléer suffisamment les muscles de la loge antéro-latérale droite	Permet de maintenir le pied Permet un appui stable et solide	« F0 »
Sécurité	Prévention de chute	Risque de chute non augmenté par le dispositif	« F0 »
	Chute sans danger supplémentaire	N'empêche pas de se déchausser Bord arrondi , pour éviter tous risques de coupure	« F0 »
	Matières absorbant les chocs	EPI (Equipement de la Protection Individuelle) qui certifie qu'une protection obéit aux exigences de sécurité réglementaires du Code du Sport, de la santé et de la sécurité. CE EN 1621/1 : pour les protections épaules/coudes/genoux/dorsal Pour bénéficier de l'homologation européenne, celles-ci doivent passer un test d'impact. Un poids de 5kg est lâché sur la protection avec une intensité de 50 joules, à 12 reprises. CE EN 1621/2 Niveau 2 : pour le niveau 2, transmission de moins de 9 kN avec un pic autorisé à 12 kN.	« F0 »
Résiste à l'environnement	Température	Fonctionnement garantie < - 40° Batterie résistante au froid (électrolyte faiblement liant) Matériaux « isolants »	« F0 »
	Humidité	Tissus imperméables pour les gants Matériaux inoxydables IP 66 protection contre les jets d'eau puissants	« F0 »
	Poussière	IP 66 Étanchéité totale à la poussière	« F0 »
	Altitude	3 600 m max	« F0 »
Résiste aux contraintes	Vitesse et Force	≥ 4000 MPa Matière solide résistante à la traction Ne se brise pas lors d'un choc	« F0 »
Autonomie	Batterie	≥ 4 h d'autonomie Rechargeable en 1 h	« F1 »
Connectivité	Bluetooth	≤ 10 ms - ANT+ Le système réagit de façon quasi instantanée	« F0 »



Critères secondaires			
Fonction principale	Critère d'appréciation	Niveaux d'exigence	Flexibilité
Confort	Poids	≤ 8 kg	« F1 »
	Taille	Gants en XS/S/M/L/XL/XXL Exosquelette personnalisé Tubes télescopiques offrant une grande amplitude de réglages pour les bâtons Chaussons moulés à son pied	« F1 »
	Feedback des clients	≥ 8 /10 Notation subjective	« F1 »
Convivialité	Coloris (Gants, Bâtons, chaussures)	 0000 9999 9827 6078 2031	« F1 »
	Discrétion	≤ 2 dispositifs apparents	« F1 »
	Esthétique	75% de la population trouve les dispositifs beaux et assez discrets	« F1 »
Prix	Reste accessible	≤ 4 000 €	« F1 »
Ecologique	Matériaux	≥ 20% Matière recyclée ≥ 60 % Matière recyclable	« F1 »
Permet la compétition	Règlement	Entre dans la catégorie LW4 Validé par la STRMTG	« F1 »

Tableau 1 : Analyse fonctionnelle du dispositif
(F0 : pas de marge de manœuvre ; F1 : marge de manœuvre possible)

2.6- Analyse de l'existant

Nous avons cherché et analysé des dispositifs permettant une activité en cas de déficience du membre inférieur de façon générale. Par conséquent, nous avons identifié deux principales solutions dont les orthèses et la neurostimulation. Pour ce qui est des orthèses, il en existe énormément sur le marché (FreeWalk, Ottobock, C-Brace...). Cependant, la plupart de ces dispositifs sont destinés aux activités de la vie quotidienne tel que la marche et non à la pratique d'une activité physique. De plus, certaines orthèses sont imposantes et parfois compliquées à utiliser.

Les systèmes de neurostimulation (L300 Go) permettent quant à eux un soutien et une activation des muscles supplémentaires, grâce au principe de la stimulation électrique fonctionnelle. Dans notre cas, ce genre de dispositif n'est pas utilisable car les muscles de notre client sont atrophiés. Il est donc compliqué de produire une contraction suffisamment forte par rapport aux contraintes exercées par la discipline du slalom.

Nous nous sommes également intéressés à ce qui se faisait dans le milieu du ski, et notamment pour la pratique adaptée et le handisport. L'exosquelette Againer est un parfait exemple de dispositif permettant une pratique adaptée dans le domaine du ski. En effet, un puissant vérin permet de réduire les

pressions habituellement exercées sur les genoux. Bien que surement insuffisante à elle seule, cette solution pourrait être intéressante, notamment pour aider le membre déficient, en réduisant les contraintes exercées sur celui-ci ¹.

Enfin, il existe deux grands types de dispositif handiski ². En premier lieu, le ski 3 empreintes assis est une solution couramment utilisée dans cette discipline, elle ne répond cependant pas aux attentes du client. En effet, ce dispositif est trop différent de la pratique dite classique. En second lieu, il existe également une autre solution dite à 3 empreintes, mais cette fois, le pratiquant est équipé d'un uniski (un seul ski vertical) et de deux bâtons. Il est important de noter que ce dispositif est utilisé par des paraskieurs professionnels (Frédérique Turgeon). Cette dernière a remporté 2 médailles d'or aux Jeux Paralympiques. En revanche, nous souhaitons plutôt proposer un dispositif 4 appuis (2 skis, 2 stabilisateurs), pour reproduire au maximum les sensations du ski « classique ».

Le point de départ de notre dispositif sera donc le dualski. Les stabilos permettront d'utiliser au maximum le potentiel du client via l'utilisation de ses membres supérieurs. Nous ajouterons par la suite différents mécanismes, comme un exosquelette, pour délester la jambe droite.

3- Présentation des dispositifs

Pour répondre à votre demande, notre start-up Handi'Innov a créé le dispositif Oui-Ski. Ce dernier, permet de suppléer un membre inférieur déficient, n'étant plus capable de produire de la force et résister aux contraintes de l'activité du slalom géant. Ce dispositif innovant et intelligent vous permettra de pratiquer à nouveau ou pour la première fois le ski alpin en toute sécurité. Oui-Ski est un système connecté, composé d'un exosquelette, d'une paire de chaussure avec ses chaussons, de deux batons stabilisateurs et d'une application.

3.1- La chaussure et le chausson

3.1.1- Le problème traité

Lors du slalom géant, des forces sont exercées sur le pied et notamment le pied extérieur au virage lors des changements de direction. Pour répondre et résister à ces forces, le skieur doit activer ses stabilisateurs de la cheville. Or, ceux-ci sont pour la plupart lésés pour notre patient. Il s'agit donc de rendre l'aspect gainé au pied afin qu'il puisse agir comme un réel appui. Pour pallier ce problème, nous allons proposer une chaussure de ski avec un chausson rempli d'un fluide non newtonien. Ce matériel va répondre aux contraintes et donc permettre de bloquer totalement le pied afin de remplacer le rôle des extenseurs des orteils ainsi que celui de l'hallux.

3.1.2- Fonctionnement et matériaux utilisés

Les fluides non-newtoniens sont des fluides dont la déformation (viscosité) dépend de la force qu'on lui applique. Il existe les fluides rhéofluidifiants et rhéoépaississants. C'est le fluide rhéoépaississant qui nous intéresse car face à la contrainte, le liquide devient davantage rigide ³. Par conséquent, nous avons choisi le fluide non-newtonien rhéoépaississant D3O pour sa fiabilité et ses caractéristiques et que nous détaillerons ultérieurement. En effet, le D3O est un matériel utilisé par l'armée ainsi que les grandes marques de vélos dans leur équipement de protection (Scott, Fox Racing...). Ce fluide est utilisé et homologué par la validation CE EPI pour le domaine de la protection des motards (dorsal et chaussures).

[1] Againer (2020), againer-ski.com (how-againer-works)

[2] Tessier (2020), dualski.com (tempo-uniski, tempo-dualski)

[3] C. Clanet *et al.*, (2016), cours.espci (96-105)

Le D3O est composé entre autres, de milliards de colloïdes. Lorsque le fluide n'a aucune contrainte de cisaillement, les molécules colloïdales se mélangent facilement de façon uniforme. Ainsi, pendant que le fluide est à l'état liquide, les colloïdes possèdent une faible charge de surface moléculaire, ils ne s'attirent pas entre eux. Mais lorsque la contrainte augmente sur le fluide, l'énergie cinétique résultant de la contrainte de cisaillement va permettre aux colloïdes d'absorber l'énergie cinétique de l'impact. Les colloïdes vont alors s'attirer les uns les autres, la viscosité du fluide augmente drastiquement devenant donc plus rigide. En effet, ces molécules sont dites « flottantes », formant ainsi un tissu mou. Cependant, elles sont également capables de se « verrouiller » ensemble lorsqu'une contrainte est présente. Quand elles reçoivent un impact, ces molécules agissent comme un filet, pour répartir la force sur une surface plus large. Cette réaction est non pas homogène, mais proportionnelle au degré de force appliquée, donc décroissante à partir de l'épicentre du choc, engendrant une diffusion naturelle de la force d'impact. Le deuxième composant est un élastomère, le polyuréthane. Ce polymère a donc été choisi pour sa capacité à coaguler les matières colloïdales ainsi qu'à s'étirer puis à reprendre sa taille initiale une fois l'arrêt de l'impact. L'élastomère va donc permettre de donner une consistance plus visqueuse et compacte au D3O ¹.

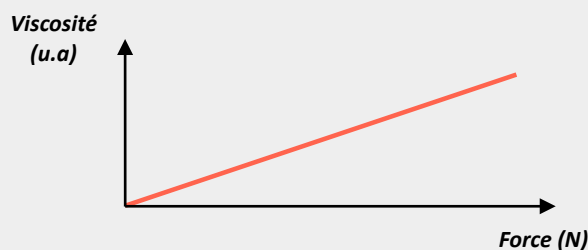


Figure 8 : Schéma simplifié de la viscosité du fluide D3O en fonction de la force appliquée

Comme nous pouvons le constater sur le graphique ci-dessous, la réaction est quasi-instantanée (-10 ms). Dès lors que la contrainte est terminée, le D3O retrouve sa consistance. Il paraît important de dire que la durée de vie de ce fluide est d'environ 3 ans, et qu'il est résistant à des températures allant de -55° à 120°.

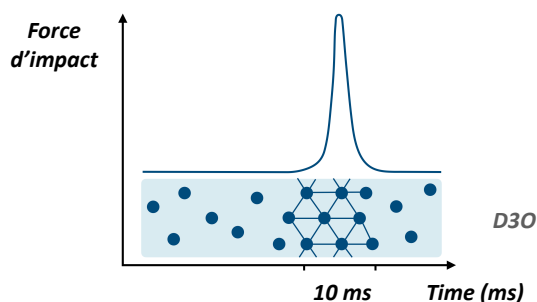


Figure 9 : Temps de réaction du D3O

Pour conclure en ce qui concerne le fluide, ce dernier va plus ou moins se rigidifier selon le niveau de contrainte, permettant d'obtenir un système pied-chaussure bien plus stable notamment lors des

changements de direction. Il va également permettre d'absorber l'énergie des impacts. En effet, le D30 jouera aussi un rôle protecteur quant aux éventuels chocs sur la malléole, le talon ou les orteils.

D'autre part, si le skieur est déséquilibré vers l'arrière à cause de sa faiblesse du tibia antérieur, il ne sera peut-être plus capable de ramener le corps vers l'avant, c'est pourquoi deux lames de carbone à l'arrière et deux à l'avant de la chaussure sont ajoutées. Le carbone est un alliage léger et rigide, qui ne surchargera pas la chaussure, tout en la rigidifiant. Néanmoins, la caractéristique qui nous intéresse davantage est sa capacité à restituer l'énergie de façon très efficace. Autrement dit, l'effet ressort de la lame de carbone viendra suppléer le tibia antérieur lésé, permettant alors au client de ne pas tomber en arrière.

Enfin, nous avons décidé d'implanter des semelles captant les forces sous le pied, à l'intérieur des deux chaussures de ski. En effet, nous utilisons des capteurs Loadsol® permettant de mesurer de façon mobile la force normale de réaction au sol sur la surface plantaire du pied. Ce système est fiable à la fois pour les mesures statiques et dynamiques et dans tous les environnements. Grâce à sa grande amplitude (2,5 à 5 000 N) et sa fréquence d'acquisition de 200 Hz, les forces générées entre le pied et la chaussure sont quantifiées avec précision. De plus, ce capteur textile, souple, déformable et ultra-fin (< 3,4mm) permet un confort optimal ¹.

Pour optimiser la fiabilité de la récolte de nos données grâce aux semelles, nous tenons également à prendre en compte certains facteurs liés à l'environnement, telles que les bosses. En effet, une bosse va induire un pic de force. Par conséquent, un filtre va être appliqué pour négliger ce bruit. Ainsi, lorsqu'un pic de force est présent sur un temps extrêmement court, le pic va être supprimé.

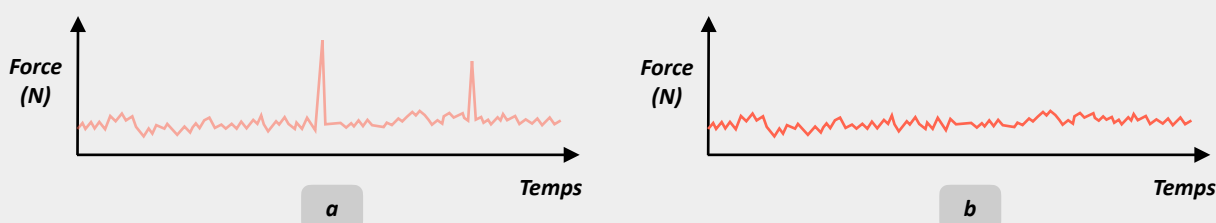


Figure 10 : Schéma simplifié de l'évolution de la force en fonction du temps avec (b) et sans filtre (a)

3.1.3- Emplacement et réglages

Il a été prouvé que les pressions maximales en ski alpin étaient atteintes sous le talon, la première métatarso-phalangienne, ainsi que l'hallux. Il apparaît que le déplacement du centre de pression mesuré selon l'axe médio-latéral par les semelles de pression est relativement faible, et faiblement corrélé à une mesure issue d'une plateforme de force. Le pattern global de pression est principalement appliqué sous l'avant-pied du pied extérieur au début du virage, puis sous le talon en fin de virage. Il est donc vrai que des points précis sont contraint à une pression maximale, mais il a été fait le choix d'harmoniser la couche de fluide à l'intérieur du chausson, afin d'éviter les déséquilibres et l'inconfort ². Ainsi, une couche de seulement 8 mm sera intégrée au chausson, permettant alors une protection efficace avec une faible épaisseur. Pour éviter que le fluide glisse vers l'avant de la chaussure lors de la descente, nous allons compartimenter le fluide dans 8 différentes poches tout autour du pied, 2 sur l'avant du pied autour des orteils, 2 sur les côtés du pied, 1 à droite et à gauche du talon, et enfin 2 sur le dessus du pied. Aucune

[1] GmbH (2022), novel.de (loadsol)
[2] T.Falda-Buscaiot (2017), ResearchGate

poche ne sera placée en dessous du pied pour éviter les déséquilibres entre la jambe droite et gauche. Pour réaliser une chaussure confortable et optimiser l'aide apportée, le chausson sera réalisé à partir d'un moule du pied du client.

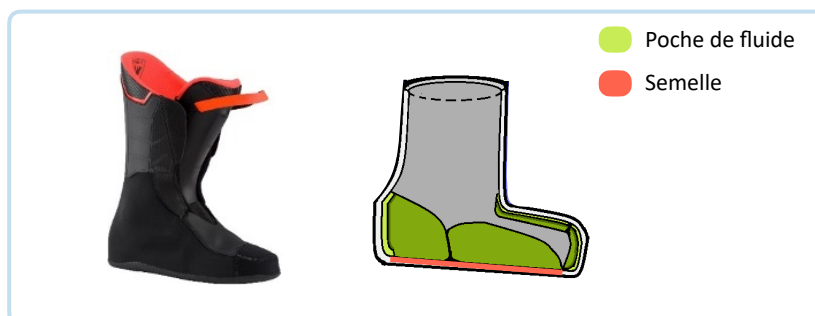


Figure 11 : Chausson de notre partenaire Rossignol et schématisation des poches en vue latérale

Le Flex de la chaussure, c'est-à-dire sa rigidité, pourra être choisi par le client selon son niveau de pratique, mais nous recommandons un minimum de 110 pour avoir une chaussure bien rigide, ce qui viendra renforcer le maintien du pied.

En ce qui concerne les lames de carbones, 2 lames seront placées à l'arrière de la chaussure; du haut de celle-ci (milieu du mollet) jusqu'au-dessus de la malléole (cf. bandes rouges sur la figure 12 ci-dessous). Deux autres lames plus courtes seront placées à l'avant de la chaussure (cf. bandes vertes sur la figure 12). Toutes les lames seront invisibles et totalement incrustées dans la chaussure. La largeur et longueur est déterminée selon la morphologie et la pointure du client. Leur épaisseur sera de 2 mm pour permettre un maximum de restitution d'énergie.



Figure 12 : Emplacement des lames dans la chaussure de ski

Pour ce qui est des semelles, leur calibrage est nécessaire au bon fonctionnement du dispositif. Celui-ci se réalisera de manière simple; en touchant le bouton calibrage de l'application, et les semelles analyseront la répartition des forces sur les pieds en position statique. Dans notre cas, on peut imaginer que la répartition ne soit pas du 50/50%, ce qui rend le calibrage d'autant plus important.

3.1.4- Sécurité et convivialité

Le D3O sera lâche tant qu'aucune pression n'est exercée sur la chaussure, elle gagnera donc en confort pour l'utilisateur. De plus, le moule étant totalement réalisé sur mesure, le confort de la chaussure sera optimal. Comme nous avons pu le dire précédemment, lorsqu'une force s'exerce, la matière se rigidifie et le pied du skieur sera parfaitement maintenu. Enfin, le D3O a aussi de grandes propriétés protectrices en absorbant l'énergie lors d'éventuels chocs, chutes, et donc éviter des fractures de la malléole par exemple.

Les lames de carbones permettent, quant à elle, davantage de sécurité puisqu'elles préviennent les éventuels déséquilibres et chutes en arrière.

3.1.5- Maintenance du système

A cause de l'usure de la chaussure et des lames, les chaussures doivent être changées après 200 journées de ski, soit environ 4 saisons. Pour ce qui est du chausson, après 3 ans, le fluide perd de ses capacités, il est alors vivement recommandé de le remplacer. A noter que le chausson et les chaussures peuvent être achetés séparément, pour permettre de renouveler simplement le chausson. Il est également important de souligner que ces deux dispositifs sont garantis 2 ans à partir de la date d'achat.

3.2- L'exosquelette

3.2.1- Le problème traité

L'élément central de notre dispositif est l'exosquelette. En effet, c'est celui-ci qui va permettre de traiter la déficience liée au quadriceps droit. Il devra donc donner la possibilité à notre client de se placer en position de ski (jambes fléchies), tout en l'aidant à se rehausser pour qu'il effectue les transitions entre les virages. Son rôle primordial est de suppléer totalement le quadriceps lors des virages, pour que celui-ci soit capable de supporter la contrainte (180% poids du corps). En d'autres termes, ce dernier a pour but d'accompagner son mouvement lors de la flexion de genou, de l'aider pour l'extension de genou, et enfin de résister à la pression ¹.

3.2.2- Fonctionnement et matériaux utilisés

Nous pouvons décomposer notre dispositif en 3 grandes technologies; les vérins, les bagues, et le système passif de rehaussement. L'ensemble du système est intelligent car il s'adapte en temps réel aux actions de l'utilisateur grâce à l'interconnexion avec les capteurs des chaussures. En effet, ces capteurs récupèrent les forces exercées au sol et les communiquent au système, alors capable de modifier sa force de résistance.

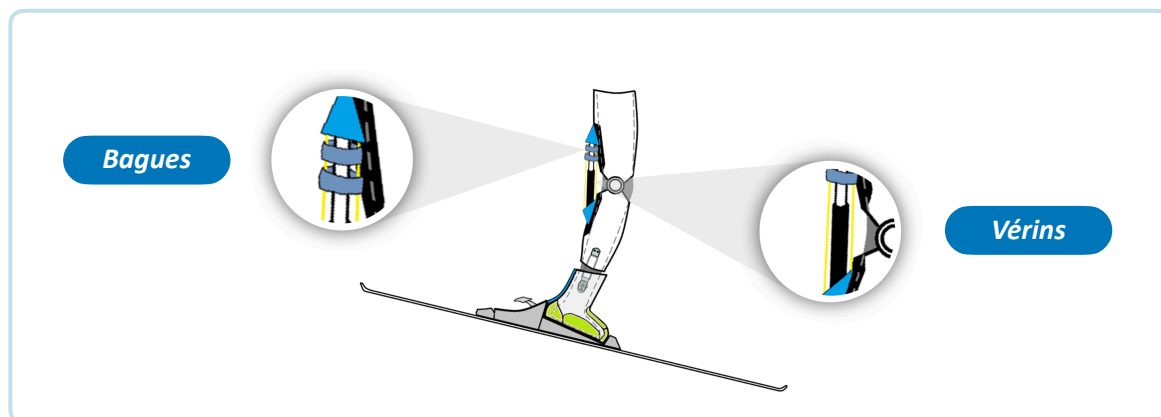


Figure 13 : Schéma du dispositif

[1] E. Müller et al., (2003) Journal of Sports Sciences 21 (679- 692)

Le système sera composé de 4 « tiges », 2 à l'arrière et un sur chaque côté de la jambe de l'utilisateur. La partie basse de chacune d'entre elles sera fixée directement sur la chaussure via une structure rigide, tandis que la partie haute sera fixée à l'aide d'un harnais à l'arrière proximale de la cuisse de l'utilisateur. Chaque « tige » comprend une structure rigide sur laquelle viendront se placer des bagues de freinage. La seconde partie amovible est composée d'un ressort et du vérin. Dorénavant, il est question de détailler le fonctionnement et l'utilité des vérins, des bagues et du système passif de remontée.

Pour ce qui est des vérins, nous avons choisi d'utiliser des vérins pneumatiques, et non hydrauliques. En effet, le vérin hydraulique fonctionne avec un liquide (huile, eau, lubrifiant...), ce qui demande un système de réservoir avec des pompes. Ce dernier aurait été dangereux en cas de chute, mais aussi très encombrant et nuisible à la discrétion de notre dispositif. De plus, le vérin pneumatique présente de nombreux avantages ; l'air comprimé est insensible aux variations de température, et c'est aussi un fluide de travail qui offre une forte puissance pour un espace relativement restreint. Enfin, l'air comprimé est défini comme fluide de travail rapide, ce qui est un point non négligeable au regard de l'activité.

Un vérin est composé d'une partie « mâle » et d'une partie « femelle » faites en titane « grade 5 ». Nous avons choisi le titane de grade 5 pour sa bonne propriété de traction à la température ambiante (même froide). De plus, cet alliage a une excellente résistance à la fatigue, aux fissures et à la corrosion, offrant une durée de vie du dispositif maximale ¹. Pour ce qui est du fonctionnement d'un vérin, la partie mâle va venir glisser dans la partie femelle, dont le fond est rempli d'air avec une pression de 8 bars ². Ainsi, il ralentit les mouvements et allège les muscles en absorbant les contraintes. La partie mâle est également entourée par les bagues de freinage. La tige en titane glisse dans un premier temps dans les bagues avant de glisser dans la partie femelle.

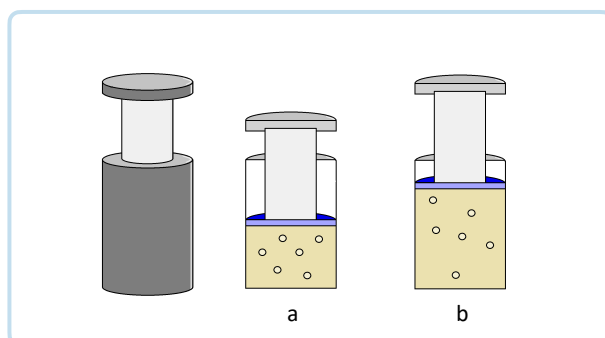


Figure 14 : Schéma du vérin avec (a) et sans charge (b)

Les bagues sont fixées sur l'armature rigide du système. La partie centrale des bagues, qui sera donc directement en contact avec le vérin, est l'équivalent d'un patin de vélo. La partie centrale est en caoutchouc pour maximiser les frottements et favoriser la résistance (cf. Figure 15). Autrement dit, une fermeture des bagues ou une augmentation du serrage va provoquer une augmentation du freinage. La périphérie des bagues sera quant à elle composée également de titane, elles seront divisées en quatre blocs reliés entre eux par une partie mobile qui coulisse sur elle-même. Un moteur miniature sera inclu afin de serrer les quatre blocs entre eux.

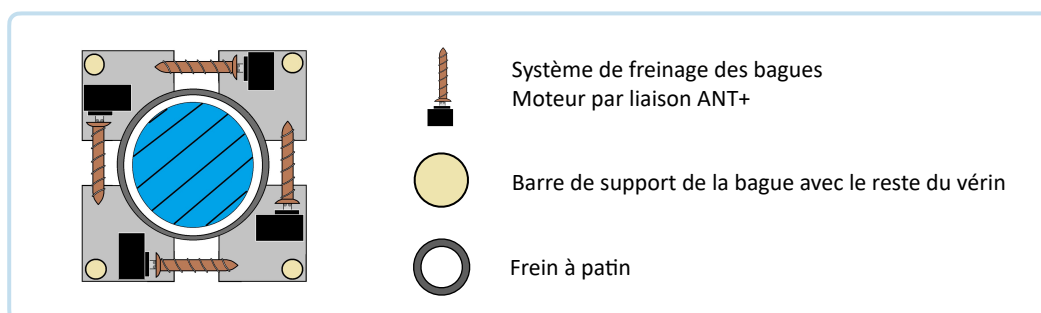


Figure 15 : Schéma d'une bague de serrage

[1] ACNIS (2021), acnis-titanium.com (Titane-grade5)

[2] Socah *et al.*, (2016), ahr-socah.fr

Ces bagues auront une importance capitale puisque ce sont elles qui, en étant contrôlées par les informations recueillies par les semelles, vont permettre d'ajuster l'amplitude du mouvement du vérin et donc de la jambe. En effet, le serrage des bagues va dépendre du ratio de force établi entre le pied droit et le pied gauche. Ainsi, le serrage des bagues sera progressif, et toujours proportionnel à la répartition de force sous le pied. En d'autres termes, une augmentation du pourcentage de la répartition de force va induire une fermeture des bagues. Ainsi, lors d'un virage avec la jambe lésée vers l'extérieur, les bagues seront serrées au maximum, permettant à la jambe de supporter tout le poids imposé par l'action, et de maintenir dans une position optimale.

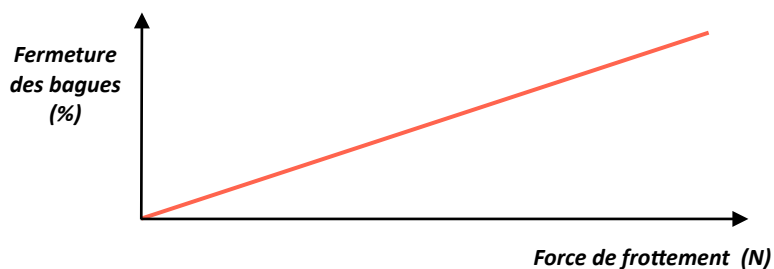


Figure 16 : Influence de la fermeture des bagues sur la force de frottement

À partir de l'analyse experte précédemment effectuée sur la discipline, des seuils ont pu être établies. En effet, la distribution de force était généralement proche de 75% ($\pm 5\%$) pour le pied extérieur et 25% ($\pm 5\%$) pour le pied intérieur. Ainsi, le serrage de nos bagues sera maximal lorsque le pied lésé aura une distribution supérieure à 70%. Le serrage maximal va restreindre le mouvement de flexion du genou en réduisant l'amplitude du mouvement grâce au vérin. Autrement dit, la jambe aura une flexion variant sur un faible intervalle ($\pm 10^\circ$).

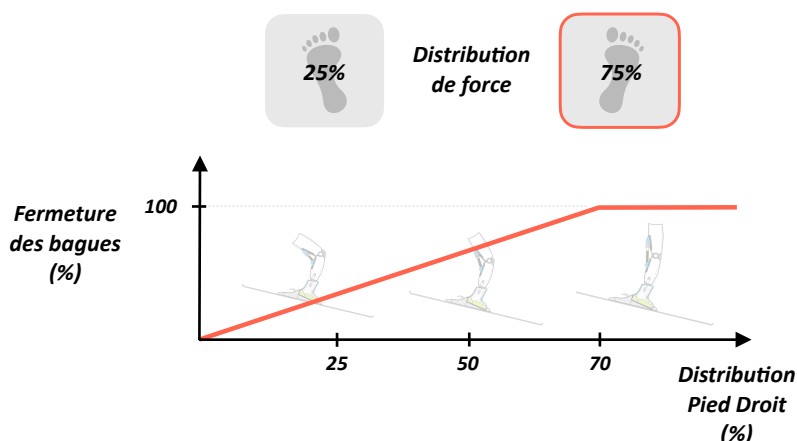


Figure 17 : Influence de la distribution du pied droit sur la fermeture des bagues

De plus, il est important de noter que l'amplitude du mouvement est toujours adaptée à l'action réalisée. La résistance de ces bagues est adaptable en fonction des conditions de pratiques visées via différents modes préprogrammés (cf. 3.2.3- Réglages).

Le système de restitution d'énergie fonctionne, quant à lui, grâce à deux mécanismes passifs. Un système de pression qui, lorsque la tige en titane du vérin est en position basse (c'est à dire lors de la flexion de genou) comprime l'air présent dans la partie femelle du vérin. Ainsi, lorsque les bagues vont se relâcher pour permettre au vérin de remonter, c'est cette pression, à l'intérieur de la partie femelle, qui va aider à remonter la partie mâle.

Un ressort par tige est mis en place au niveau de la fixation supérieure du système sous la cuisse. Celui-ci fait la jonction entre le harnais et la partie mâle du vérin. Ces ressorts d'extension en acier inoxydable ont un coefficient de raideur (k) de 60 kN/m, étant un bon compromis entre flexibilité et restitution d'énergie importante. À nouveau, lorsque la jambe est fléchie et le vérin en position basse, le ressort s'étend et emmagasine de l'énergie ¹. Ainsi, quand les bagues vont se relâcher, le vérin ne sera plus retenu. L'énergie du ressort va pouvoir être restituée et participer alors au rehaussement du skieur. La combinaison de ces deux systèmes, accompagnée des muscles valides du client qui compenseront certains mouvements, lui permettra de réaliser une extension de genou en fin de virage.

3.2.3- Réglages

Le dispositif est fait sur mesure pour l'acheteur en fonction de la longueur de ses membres, il n'a donc pas de réglage à effectuer de nouveau par la suite. Cependant, il est primordial de choisir son "mode" parmi les 4 proposés. Ainsi, selon le mode sélectionné, le serrage des bagues sera plus important pour une même contrainte, rendant par conséquent le système plus ou moins rigide.

Le mode vert : La flexion du genou et de la hanche est moins prononcée lors des virages, ce qui implique une verticalité accrue et une force dans les chaussures réduite. Le serrage des bagues doit donc être moins important avec des amplitudes maximales assez faible. La compression maximale des bagues est ainsi égale à 80% de la force maximale.

Le mode bleu : L'amplitude doit être plus importante, ainsi que la résistance lors des phases de pression lors des virages. La compression maximale des bagues est alors de 85% de la force maximale. La restitution d'énergie va augmenter car l'étirement des ressorts et la pression dans les vérins seront plus importants.

Le mode rouge : L'amplitude sera encore plus importante et la résistance lors des virages également (serrage de bague à 90% de la force maximale). Le système devient de plus en plus rigide afin de limiter l'amplitude de mouvement. Les systèmes passifs de restitutions d'énergie restituent toujours un peu plus d'énergie pour permettre la remontée.

Le mode noir : L'amplitude ainsi que les forces de résistance seront maximales, le serrage des bagues sera très important, soit 95% de la force maximale. Ce réglage permet de résister à la très forte contrainte. La restitution d'énergie devra être maximale pour permettre un retour de la position tendue de la jambe sans difficulté.

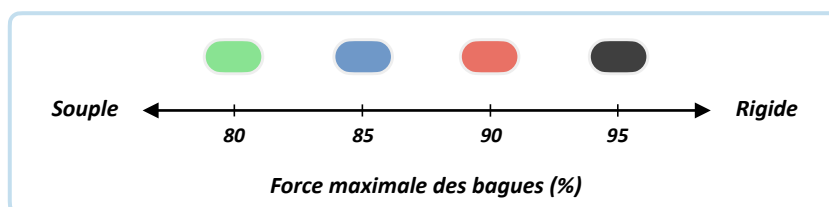


Figure 18 : Modes préprogrammés

La force de serrage pour chaque mode préétabli sera modulable ($\pm 3\%$) grâce aux bâtons stabilisateurs (cf. 3.3.2-Fonctionnements et matériaux utilisés). Ainsi, le skieur aura une marge de manœuvre, rendant le système plus adaptable et flexible aux conditions (état de la piste, qualité de la neige) et aux pratiquants.

3.2.4- Sécurité et convivialité

Pour assurer la sécurité des utilisateurs, l'ensemble des bords visibles, comme la structure rigide de la chaussure à laquelle s'accrochent les vérins, est arrondi et non coupant. De plus, en cas de chute, étant donné la force importante exercée sur les chaussures, les bagues se relâchent, ce qui évite que le membre reste bloqué dans une position. Ainsi, les risques de fracture ne sont pas augmentés par notre dispositif.

D'un point de vue sécuritaire, le vérin pneumatique présente de nombreux avantages. En effet, ce dernier résiste très bien à la surcharge. Il n'y a donc aucun risque d'explosion ou d'incendie avec l'air comprimé. Enfin, d'un point de vue écologique, les fuites d'air comprimé ne causent aucun dommage environnemental.

Concernant la convivialité, nous avons opté pour des micros-moteurs, offrant un dispositif plus discret, en rapport aux orthèses présentes sur le marché actuellement.

3.2.5- Maintenance du système

Concernant les batteries des micros-moteurs placés dans les bagues, ces dernières ont une autonomie de 8h. Le temps de recharge est quant à lui de 2h. Il est donc vivement conseillé de les recharger après chaque sortie.

Pour finir, ce dispositif est composé d'un consommable, les freins à patin. Une pompe et 8 patins sont livrés avec le dispositif. Il est conseillé de vérifier via l'application, le niveau d'air du vérin et la batterie des moteurs avant chaque sortie. La pompe permettra d'ajuster le niveau de pression dans la chambre de combustion du vérin. De plus, l'application vous permettra de voir en temps réel le niveau d'air et vous enverra une notification lorsqu'il faudra l'ajuster. En ce qui concerne les patins, il est recommandé de les renouveler 2 fois par saison, sachant que la pompe et les patins sont achetables dans nos magasins.

3.3- Les bâtons

3.3.1- Le problème traité

Pour permettre à notre client de compenser son déficit au niveau de sa jambe droite et d'être plus stable, nous allons exploiter au maximum son potentiel, en utilisant son haut du corps. Le skieur sera donc équipé de bâtons de ski spécifiques à la pratique du handiski. Ces bâtons sont appelés stabilos ou stabilisateurs. Ils sont composés de 3 parties qui prolongent le bras pour avoir un appui glissant sur la neige, donnant un point d'équilibre : l'appui-bras, la poignée et une patinette équipée de « petit ski » à l'extrémité distale.

Les bâtons seront deux nouveaux points d'appui qui permettront de soulager les contraintes exercées sur les jambes, et ceci notamment lors des virages. A noter que pour tourner à droite, il faut exercer une pression du côté droit et réciproquement pour tourner à gauche.

3.3.2- Fonctionnement et matériaux utilisés

En plus de leurs rôles de stabilisateurs et de points d'appui, les bâtons seront reliés au dispositif de vérin présenté précédemment. Les stabilos seront munis d'un bouton de chaque côté pour pouvoir adapter la rigidité des vérins selon le ressenti du pratiquant et ses besoins (neige, état de la piste...). Le bouton placé

au bout du bâton stabilisateur droit permet d'augmenter la rigidité et à l'inverse le bouton sur le bâton stabilisateur gauche sert à la diminuer. Chaque pression permet d'augmenter la force de serrage de 1%. A noter que la rigidité ne peut pas descendre en dessous de la valeur seuil prédéfinie selon le type de piste (valeur seuil = valeur initiale – 3 pressions). Grâce à un système ANT+, l'information est transmise aux vérins instantanément, évitant un temps de latence entre la demande et la réalisation de l'action.



Figure 19 : Représentation d'un bâton stabilisateur avec bouton (en rouge)

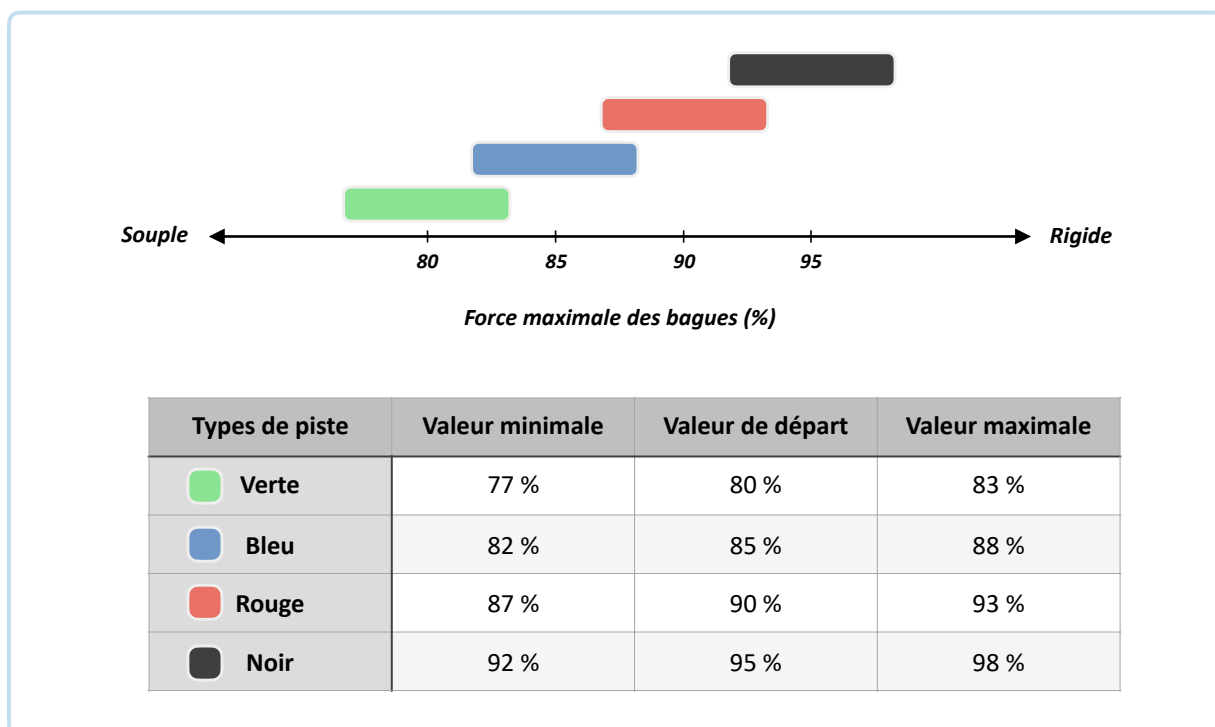


Figure 20 : Schéma et tableau détaillé de l'amplitude de la force de serrage des bagues (en % force max) en fonction de la difficulté de la piste

Pour ce qui est des matières, les stabilisateurs seront en fibre de carbone, kevlar et aluminium. Le kevlar et l'aluminium permettent d'apporter de la légèreté au bâton. La légèreté est très importante car les bâtons sont portés en permanence à bout de bras, et l'économie de ce poids va directement influencer les performances. Des bâtons de ski plus légers sont davantage faciles à utiliser, influençant alors la dépense d'énergie. Ces deux métaux sont aussi très solides et résistants aux chocs. La fibre de carbone permet un

plus haut degré de technicité et un apport de performance inégalable, grâce à l'aérodynamisme, la rigidité, et l'absorption des vibrations. Le carbone a aussi pour avantage de conserver ses propriétés techniques dans le temps; c'est un matériau excessivement peu sensible à l'usure, qu'elle soit due à toutes sortes d'agressions provenant du milieu, du temps, de la manipulation ...

3.3.3- Sécurité et convivialité

Les stabilisateurs sont totalement réglables, grâce à des tubes télescopiques permettant d'adapter le stabilo à la taille du skieur ¹. De plus, grâce aux matériaux choisis, chaque bâton pèse moins d'1kg chacun (995g /unité), ce qui facilite leur manipulation et limite la fatigue. La poignée en caoutchouc assure le confort et une bonne prise en main. Les appuis-bras larges, quant à eux, offrent un confort maximal et assurent une bonne tenue de l'avant-bras. Enfin, nous proposons les bâtons en 5 coloris (noir, gris, blanc, bleu et rouge). Pour finir, les deux sangles positionnées au niveau de l'avant-bras préviennent la perte des bâtons lorsque ceux-ci sont lâchés.

Actuellement, la marque Tessier, avec qui nous collaborons, ne présente pas de système de sécurité qui pourrait faire en sorte qu'une partie du stabilisateur se détache en cas de chute. Pour le moment, les systèmes de sécurité les plus performants se décrochent lorsque les bâtons sont soumis à une force ou un poids trop important. Ce système n'est malheureusement pas applicable en handiski car les bâtons sont de réels appuis (beaucoup plus de force exercée sur ces derniers). Par conséquent avec ce système, le risque de décrochage non souhaité est trop important et mettrait en danger le pratiquant ¹.

3.4- Connectivité du système

3.4.1- Le système d'interconnexion

Afin d'interconnecter les capteurs des chaussures, le système de vérins et l'application, nous avons décidé d'utiliser le système ANT+ (Advanced and Adaptive Network Technology) ². Cette technique de transfert a été développée par la firme canadienne Dynastream en 2004 et se sert des communications radios sur la bande de fréquence 2,4 GHz ISM. Bien que l'ANT+ fonctionne sur de courtes distances, généralement inférieures à 1,5 mètres, la portée maximale de certains capteurs peut être élevée à 30 mètres ². Il est à noter que cet inconvénient ne posera pas de problèmes puisque l'ensemble des éléments du système ont une proximité mutuelle. Par ailleurs, nous avons choisi ce système car sa capacité de transfert est de l'ordre de 20 kbps (kilobits par seconde), ce qui sera suffisant pour transmettre l'ensemble des données en temps réel et sans latence. Son principal avantage par rapport au Bluetooth réside dans le fait qu'il permet d'être utilisé et interconnecté entre plusieurs appareils simultanément. Il s'agit donc de la solution la plus adaptée pour l'intégration des différents paramètres de notre système. En outre, le fait qu'il soit également peu énergivore est un atout non négligeable afin d'avoir une autonomie suffisante durant plusieurs heures de pratique. Enfin, il s'agit d'une technologie reconnue et utilisée par de nombreux fabricants sportifs (Garmin, Suunto, Polar...), le froid n'étant pas un facteur limitant pour l'ANT+.

3.4.2- L'application

Pour tout achat d'un dispositif, l'application Oui-Ski est comprise. Cette dernière sera composée de 3 onglets. Le premier permet de calibrer le dispositif et de voir les pressions exercées sur les skis grâce aux semelles. L'onglet "Maintenance" permet de voir le niveau de batterie des moteurs et le niveau d'air des vérins. Enfin, si vous ne disposez pas du gant, l'application vous permettra de choisir la couleur de la piste et

[1] Tessier (2020), dualski.com (stabilisateurs)

[2] Y. Boissy (2019), lemarcheduvelo.com (technologie-ant)

donc de choisir le réglage de l'exosquelette. Cette application a été réalisée par nos soins, et nous avons mis un point d'honneur à ce qu'elle soit ergonomique et facile à prendre en main.



3.4.3- Les gants

Nous vous proposons en option une paire de gants connectés (inspirée des gants Specktr). Celle-ci va permettre de gagner du temps. En effet, le skieur ne sera pas contraint d'enlever ses gants et de sortir son téléphone pour choisir la piste qu'il s'apprête à descendre et donc régler correctement la pression de ses vérins. Il lui suffira d'exercer une pression entre son pouce et un de ses doigts pour choisir la piste. Néanmoins, pour éviter tout risque d'insécurité, le temps de pression entre les deux doigts devra dépasser 6 secondes. Chaque extrémité des doigts sera de la couleur de la piste, évitant au skieur de se tromper.

Les matériaux seront identiques à une paire de gants pour le ski classique. La couche extérieure se compose de polyester car cette matière est imperméable et respirante. La couche intérieure est en micro Bemberg, ce tissu est agréable et doux. Enfin, la couche isolante permettant de garder ses mains au chaud, est un isolant haut de gamme Primaloft® Silver ¹. Ce dispositif est disponible dans nos 5 coloris habituels et est garanti 1 an.

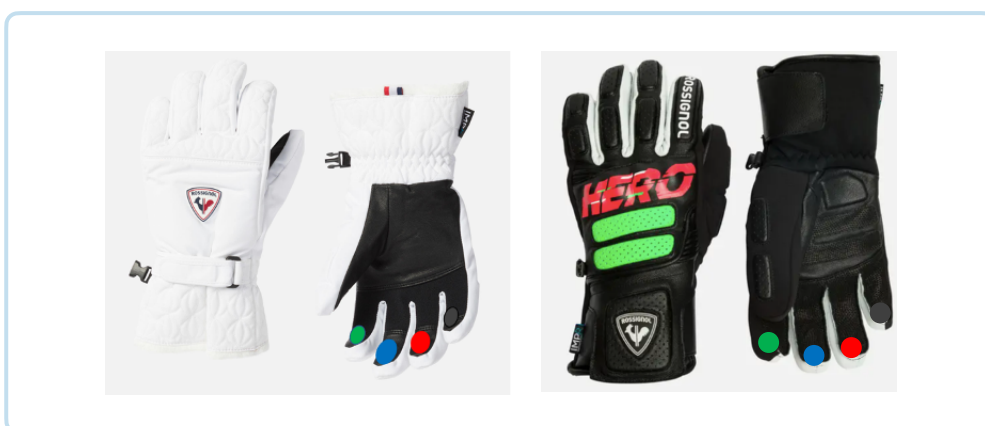


Figure 21 : Respectivement gant de loisir et de compétition Rossignol avec code couleur intégré aux extrémités

4- Législation

En ce qui concerne la législation du ski alpin, les personnes atteintes de poliomyélite n'ont aucune possibilité de participer aux compétitions des personnes valides du moment qu'il y a un ajout de dispositif sur la personne. Notre client doit donc concourir en section ski alpin handisport. Cette discipline de ski alpin handisport est autorisée à tous types de handicap, et notamment aux personnes atteintes de myopathie (manque de force musculaire). La pratique du ski alpin handisport peut se faire selon 3 façons : le ski debout, le ski assis autonome et le ski assis accompagné. Pour participer aux compétitions handisports, il est nécessaire de se faire attribuer une classe de handicap par un médecin rattaché à une structure affiliée à la Fédération Française Handisport. La classification est établie selon les capacités fonctionnelles du skieur : ce que je peux faire ou ne peux pas faire physiquement dans la pratique de l'activité. Dans la situation présente, la catégorie qui nous concerne est la LW4. Cette catégorie regroupe les personnes présentant une déficience à un membre inférieur et skiant debout avec 2 skis et 2 bâtons ¹.

En ce qui concerne le matériel handisport, il faut savoir que tous les dispositifs utilisés par un usager sont considérés comme "engin spécial". Le règlement impose que chaque engin spécial soit apte à emprunter l'installation mécanique (les remontées mécaniques). Cette aptitude est évaluée par un avis du STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés) ². Pour être validé, l'équipement doit obligatoirement posséder une notice d'utilisation, référencée et datée, qui contient le descriptif général de l'engin, ainsi que les consignes d'utilisation et d'entretien définies par le constructeur. Enfin, la conception du dispositif doit être telle qu'aucun composant, notamment extérieur, ne soit susceptible de blesser un tiers.

5- Estimation des coûts

5.1- Sponsors

Afin de compenser l'ensemble des dépenses nécessaires à la réalisation du projet, nous avons dû faire appel à des partenaires, dans le but d'obtenir des subventions. Parmi celles-ci, nous retrouvons des aides de l'État, de différents ministères, des collectivités publiques, des conseils régionaux et généraux qui se sont sentis concernés par notre projet. En effet, les départements accueillant des stations de ski comme les Alpes, ou la Savoie peuvent être cités, tout comme les Bouches-du-Rhône où le projet est né.

Par ailleurs, les organismes universitaires et/ou de recherche pourront se joindre à notre projet tels que AMU, le CNRS, FSDIE (aide aux développements des initiatives étudiantes). Des fédérations sportives peuvent également agir en notre faveur (FF Handisport, Agence Nationale du Sport).

En plus de nos partenaires annuelles comme Le Coq Sportif, notre équipe financière a trouvé d'autres partenaires spécifiques au projet Oui-Ski. Nous citerons ici Tessier et Rossignol qui, en plus de nous verser une aide, nous permettent d'avoir des prix attractifs sur leurs produits réputés dans le monde du ski. Ces deux marques travaillent aussi avec nous afin d'améliorer et d'adapter au mieux leurs produits à nos contraintes.



[1] FFH (2015), handisport.org (ski-alpin-et-snowboard)

[2] strmtg.developpement-durable.gouv (2022), documents-utiles-aux-fabricants

Enfin, nous envisageons de postuler dans plusieurs concours de recherche et d'innovation autour du sport et de l'handisport afin d'obtenir plus de notoriété, et d'augmenter notre budget. Si jamais cela venait à ne pas suffire, ou bien qu'un de nos partenaires se désiste, nous avons la possibilité de financer une partie de ce projet à nos frais grâce à la trésorerie de l'entreprise. Ci-dessous, vous retrouvez un tableau prévisionnel des subventions que nous pourrions obtenir.

	Subventions	
Collectivités privées	AMU	1000 €
	CNRS	5000 €
	FFHandisport	5000 €
	BPI France	7000 €
	FSDIE	3000 €
	Agence nationale du Sport	7000 €
État	Ministère chargé des sports	5000 €
	Ministère de la santé	5000 €
	Ministère de l'enseignement supérieur de la recherche et de l'innovation (MESR)	10 000 €
	Ministère des Solidarités et de la Santé	10 000 €
Collectivités locales	Conseil général 74 (Haute Savoie)	3000 €
	Conseil général 05 (Hautes-Alpes)	3000 €
	Conseil général 04 (Alpes de Haute Provence)	3000 €
	Conseil général 64 (Pyrénées)	3000 €
	Conseil général 13 (Bouches du Rhône)	3000 €
Partenaires	Société générale	6000 €
	Coq Sportif	10 000 €
	Rossignol (chaussures)	5000 €
	Tessier (Stabilos)	5000 €
Concours	Concours Inosport	5000 €
	i-Nov	5000 €
	i-Lab	5000 €
	Prix Pepite	5000 €
	Concours French Outdoor Awards Winter	5000 €
	Go Innov'	5000 €
	Total	127 000 €

Tableau 2 : Tableau prévisionnel des subventions

5.2- Budget

Dépenses		Recettes	
Dispositif		Sponsors	
Gants	50 €	Collectivités privées	28 000 €
Stabilisateurs	550 €	Etat	30 000 €
Lames de carbone	66 €	Collectivités locales	15 000 €
Chaussures Rossignol	300 €	Partenaires	26 000 €
Capteurs	750 €	Concours	28 000 €
Total chaussures	1 116 €	Vente	
Fluide D30	35 €	Starter pack	3 200 €
Moule du pied	15 €	Pack premium	3 800 €
Total Chaussons	50 €	Entretiens	
Vérins (x4)	400 €	Entretien annuel	50 €
Bagues	150 €	Changement d'une pièce (hors période de garanti)	50-350 € (selon la pièce)
Ressorts (x4)	50 €	Pompe	15 €
Moteurs	400 €		
Accroches	100 €		
Total Exosquelette	1 100 €		
Prix total d'un dispositif (avec gants)	2 866 €		
Autres dépenses			
Prototype et expérimentation	7 500 €		
Application et mise à jour ponctuelle	20 000 €		
Masse salariale de l'entreprise	100 000 €		
Total	130 366 €	TOTAL = 131 100 €	

Tableau 3 : Tableau prévisionnel de l'estimation des coûts

5.3- Marketing

Notre produit Oui-Ski est proposé en deux packs différents.

Le Pack Classique comprend :

- L'exosquelette Oui-Ski
- Une paire de chaussons moulés
- Une paire de chaussure connectée avec coque renforcée (lames de carbone)

- Les bâtons connectés
- L'application Oui-Ski

Le tout pour 3 200 €, ce pack offre une garantie de 2 ans à partir de la date d'achat.

Le Pack premium offre une expérience optimale et plus agréable grâce aux gants connectés, qui viennent compléter le pack classique. De plus, ce pack vous offre une extension de garantie d'un an (3 ans de garantie au total), ainsi qu'un entretien à nos frais à chaque début de saison pendant cette période. Enfin, en choisissant ce pack, vous aurez accès à un plus grand panel de finition, permettant de personnaliser au maximum votre matériel, pour que ce dernier vous ressemble !

Ce pack vous est proposé pour la somme de 3 800 €.

6- Remerciements

L'entreprise vous remercie de nous avoir fait confiance et d'avoir fait appel à nos services. En espérant que notre solution réponde à vos attentes. Pour toutes questions ou renseignements après la lecture de ce dossier, n'hésitez pas à nous contacter. Nous serons ravis de vous répondre dans les plus brefs délais.

La Team Handi'Innov



Adresse : 163, Avenue de Luminy, case 910, 13288, Marseille, Cedex 9

Site internet : <https://www.handiinnov.com/>

Téléphone : 04. 32. 17. 08. 00

Chargés de projet

Fadil Zakaria
Fadil.Zakaria@handiinnov.com

Fourtier Michèle
Fourtier.Michèle@handiinnov.com