



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*  
Discipline ou spécialité : *Génie Mécanique*

---

Présentée et soutenue par *Françoise REY*  
Le 19 décembre 2008

Titre : *Contribution à la modélisation cinématique et dynamique d'un geste sportif :  
le pas de patineur*

---

### JURY

*BOHATIER Claude, Professeur à L'Université de Montpellier II Rapporteur*  
*GOGU Grigore, Professeur à l'IFMA de Clermont Ferrand Rapporteur*  
*CHOLLET Didier, Professeur à l'UFR STAPS de Rouen Examineur*  
*FERRAND André, Maître de Conférences à l'INSA de Toulouse Examineur*  
*GUILLOT Jean, Professeur Emérite à l'INSA de Toulouse Examineur*  
*SARTOR Marc, Professeur à l'INSA de Toulouse Examineur*

---

**Ecole doctorale** : *Ecole doctorale Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés*  
**Unité de recherche** : *Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse*  
**Directeur(s) de Thèse** : *Jean Guillot et André Ferrand*



## REMERCIEMENTS

A, M. Jean GUILLOT, Professeur Emérite à l'INSA de Toulouse

Pour la confiance qu'il m'a accordée en m'accueillant au Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse. Ses conseils avertis m'ont guidé dans mon travail de recherche, dans l'élaboration et la soutenance de ma thèse.

Veillez trouver l'assurance de ma haute considération.

A, M. André FERRAND, maître de conférences à l'INSA de Toulouse

Pour m'avoir suivi pendant ce travail et pour la patience et la pédagogie dont il a fait preuve lors de nos nombreuses collaborations.

Veillez trouver la manifestation de mes remerciements et de ma gratitude.

A, M. Marc SARTOR, Professeur à l'INSA de Toulouse et Directeur du Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse

Pour avoir accepté de présider le Jury de ma thèse et pour la gentillesse et le soutien que vous m'avez accordé.

Veillez accepter toute ma reconnaissance et mon plus profond respect.

A, M. Alain DEDIER, Directeur du Département de Génie Mécanique de Toulouse

Pour son soutien et son enthousiasme.

Permettez-moi de vous apporter le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A, M. Claude BOHATIER, Professeur à l'Université de Montpellier II

A, M. Grigore GOGU, Professeur à l'IFMA de Clermont Ferrand

Pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse.

Veillez trouver la manifestation de mes remerciements et de mon plus profond respect.

A, M. Didier CHOLLET, Professeur à l'UFR STAPS de Rouen

Pour m'avoir fait l'honneur de siéger à mon Jury, un exemple pour moi de compétences scientifiques et pédagogiques.

Veillez trouver l'expression de ma gratitude et de ma considération.

Aux membres du Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse

Au personnel administratif, technicien et enseignant, pour leur gentillesse et leur soutien.

Soyez assuré de mon amitié.

Aux membres du Centre des APS de l'INSA de Toulouse

Au personnel administratif, technicien et enseignant, plus particulièrement, à Joël CORBEAU avec qui j'ai débuté ce travail de recherche.

Veillez accepter mes sincères remerciements.

A tous ceux qui me sont chers

A mes parents

A mon compagnon

A Julien



# CONTRIBUTION A LA MODELISATION CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE D'UN GESTE SPORTIF : LE PAS DE PATINEUR

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
<b>OBJECTIFS ET PLAN D'ETUDE.....</b>	<b>12</b>
<b>PROBLEMATIQUE.....</b>	<b>14</b>
<b>1 ETAT DE L'ART DU PAS DE PATINEUR ET DU STYLE DECALE</b>	
<b>EN SKATING .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNIQUES.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.1 Le choix d'une technique .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.2 Le cycle de mouvement .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.3 Le pas de un .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.4 Le pas de vitesse.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.5 Le décalé.....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 LES METHODES D'ANALYSES CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE</b>	
<b>EXISTANTES ET LEURS LIMITES.....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.1 La mesure des efforts .....</b>	<b>20</b>
1.3.1.1 La plate-forme de force .....	20
1.3.1.2 Les capteurs piézoélectriques.....	21
<b>1.3.2 L'analyse d'images .....</b>	<b>21</b>
1.3.2.1 En laboratoire .....	21
1.3.2.2 En situation.....	22
<b>1.3.3 Le couplage analyse d'images et simulation .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4 BILAN DES ETUDES REALISEES .....</b>	<b>23</b>
<b>1.4.1 Dans le domaine de la biomécanique.....</b>	<b>23</b>
1.4.1.1 Côté fort, côté faible.....	23
1.4.1.2 Fréquence, longueur et vitesse du cycle.....	23
1.4.1.3 Modifications liées à la pente.....	25
1.4.1.4 Centre de gravité .....	27
1.4.1.5 Analyse qualitative du décalé.....	27
1.4.1.5.1 Repère utilisé pour l'analyse du mouvement.....	28
1.4.1.5.2 Déplacements horizontaux .....	30
1.4.1.5.3 Déplacements verticaux .....	30
1.4.1.5.4 Déplacements latéraux .....	31
1.4.1.5.5 Les écarts relatifs en X, Y, Z.....	31
<b>1.4.2 Dans le domaine énergétique.....</b>	<b>37</b>
1.4.2.1 Les repères utilisés .....	37

1.4.2.2	Bilan des efforts lors du geste .....	37
1.4.2.2.1	Actions d'un bâton .....	38
1.4.2.2.2	Action d'un ski.....	39
1.4.2.3	L'énergie mécanique.....	40
1.4.2.4	L'énergie métabolique .....	43
<b>1.4.3</b>	<b>Dans le domaine de la tribologie .....</b>	<b>46</b>
1.4.3.1	Caractéristiques mécano-physiques des différents types de neige.....	46
1.4.3.2	Caractéristiques techniques du ski .....	47
1.4.3.2.1	Structure du ski.....	47
1.4.3.2.2	Rigidité du ski .....	47
1.4.3.2.3	Semelle du ski .....	48
1.4.3.2.4	Spatule du ski .....	48
1.4.3.3	Interface ski/neige .....	48
1.4.3.3.1	Coefficient de frottement .....	49
1.4.3.3.1.1	La vitesse .....	49
1.4.3.3.1.2	La rugosité du ski .....	49
1.4.3.3.1.3	La nature de la neige .....	50
1.4.3.3.1.4	Le fartage.....	50
1.4.3.4	Bilan des valeurs retenues pour la modélisation .....	52
<b>1.5</b>	<b>VERS UNE APPROCHE ECOLOGIQUE ET DYNAMIQUE DU GESTE....</b>	<b>53</b>
<b>1.5.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>53</b>
<b>1.5.2</b>	<b>Approche écologique .....</b>	<b>53</b>
1.5.2.1	Notion d' "affordance".....	53
1.5.2.2	Notion de "point critique" .....	53
1.5.2.3	Notion de "point optimal" .....	54
1.5.2.4	Les possibilités de notre étude dans une approche écologique .....	54
1.5.2.5	Le rapport Sujet/Environnement .....	55
<b>1.5.3</b>	<b>Approche dynamique des coordinations perceptivo-motrices .....</b>	<b>56</b>
1.5.3.1	Définition .....	56
1.5.3.2	Expériences de dynamiques de coordinations motrices .....	57
1.5.3.2.1	Exemple du cheval .....	57
1.5.3.2.2	Exemple de l'être humain .....	58
1.5.3.2.3	Exemple en skating .....	58
<b>1.5.4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>60</b>
<b>1.6</b>	<b>LES DETERMINANTS DE LA PERFORMANCE LORS DU DECALE.....</b>	<b>60</b>
<b>1.6.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>60</b>
1.6.1.1	Amélioration du travail mécanique .....	60
1.6.1.1.1	Augmentation de la fréquence ou de l'amplitude du cycle.....	60
1.6.1.1.2	Augmentation de la vitesse lors du cycle .....	61
1.6.1.2	Diminution du coût énergétique .....	61
<b>1.6.2</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>62</b>
<b>2</b>	<b>MODELE DYNAMIQUE DU CORPS HUMAIN DE LA SKIEUSE .....</b>	<b>63</b>
<b>2.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>63</b>
<b>2.2</b>	<b>LES MOYENS INFORMATIQUES .....</b>	<b>63</b>
2.2.1	Le logiciel ADAMS [2] .....	64
2.2.2	Le logiciel LifeModeler [1] .....	64
<b>2.3</b>	<b>LES PREMIERES TENTATIVES DE MODELISATION .....</b>	<b>64</b>
2.3.1	Les modélisations sur le logiciel ADAMS [2].....	64
2.3.1.1	Modélisation d'un membre inférieur .....	65

2.3.1.2	Modélisation du bas du corps.....	66
2.3.1.3	Modélisation du bas du corps sur une pente à 6° .....	67
<b>2.3.2</b>	<b>Réalisation d'un modèle de base sur le logiciel LifeModeler [1].....</b>	<b>67</b>
<b>2.4</b>	<b>MODELISATION DYNAMIQUE DU CORPS HUMAIN.....</b>	<b>69</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Démarche de modélisation.....</b>	<b>69</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Construction du modèle.....</b>	<b>71</b>
2.4.2.1	Cadre de l'étude .....	71
2.4.2.2	Capture vidéo .....	71
2.4.2.3	Recueil des données cinématiques .....	71
2.4.2.4	Traitement des données.....	72
2.4.2.4.1	Création et localisation des marqueurs.....	72
2.4.2.4.2	Création du fichier de pilotage du mouvement .....	73
2.4.2.5	Etapes de construction du modèle.....	75
2.4.2.5.1	Génération des segments.....	75
2.4.2.5.2	Génération des articulations.....	75
2.4.2.5.3	Utilisation des "motion agents".....	76
2.4.2.5.3.1	Système de pilotage du modèle humain.....	76
2.4.2.5.3.2	Génération des motion agents .....	76
2.4.2.5.4	Analyse statique du modèle.....	77
2.4.2.5.5	Création du sol et des contacts .....	77
2.4.2.5.6	Simulation dynamique inverse.....	79
2.4.2.5.7	Création d'un "tracker agent" .....	79
2.4.2.5.8	Simulation dynamique directe.....	80
<b>2.5</b>	<b>VALIDATION DU MODELE DYNAMIQUE DU CORPS HUMAIN .....</b>	<b>81</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Analyses des résultats du modèle et comparaison avec la littérature.....</b>	<b>81</b>
2.5.1.1	Analyse cinématique .....	81
2.5.1.2	Analyse dynamique .....	82
2.5.1.3	Bilan énergétique.....	84
<b>2.6</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>85</b>
<b>3</b>	<b>MODELE DYNAMIQUE DE LA SKIEUSE DANS SON .....</b>	<b>87</b>
	<b>ENVIRONNEMENT.....</b>	<b>87</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>87</b>
<b>3.2</b>	<b>L'AMELIORATION DU CORPS HUMAIN .....</b>	<b>87</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Génération des muscles.....</b>	<b>88</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Génération des 20 motion agents .....</b>	<b>91</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Filtrage des données .....</b>	<b>94</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Posture de départ .....</b>	<b>94</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>94</b>
<b>3.3</b>	<b>L'ENVIRONNEMENT.....</b>	<b>95</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Modélisation des bâtons.....</b>	<b>95</b>
3.3.1.1	Modélisation de la poignée du bâton.....	95
3.3.1.2	Modélisation du panier du bâton.....	96
3.3.1.3	Constitution et dimensions du bâton .....	96
<b>3.3.2</b>	<b>Modélisation du bloc neige .....</b>	<b>98</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Modélisation des skis.....</b>	<b>98</b>
3.3.3.1	Dimensions et poids du ski.....	99
3.3.3.2	Tests de souplesse .....	99
<b>3.4</b>	<b>LES INTERACTIONS DU CORPS HUMAIN AVEC L'ENVIRONNEMENT .</b>	<b>101</b>

<b>3.4.1</b>	<b>Les liaisons du corps humain avec l'environnement.....</b>	<b>101</b>
3.4.1.1	Données du matériel.....	101
3.4.1.2	Importation du bâton .....	101
3.4.1.3	Importation du bloc de neige et des skis .....	102
<b>3.4.2</b>	<b>Les contacts.....</b>	<b>103</b>
3.4.2.1	Type de contact utilisé : impact.....	103
3.4.2.2	Localisation des contacts.....	105
<b>3.4.3</b>	<b>Type de liaison utilisé entre le matériel et le modèle humain : liaison</b>	
<b>bushing</b>	<b>.....</b>	<b>107</b>
3.4.3.1	Liaison bushing de la main.....	107
3.4.3.2	Liaison bushing du pied .....	108
<b>3.4.4</b>	<b>Simulation dynamique inverse.....</b>	<b>109</b>
3.4.4.1	Ajustement des paramètres des motion agents.....	109
3.4.4.2	Ajustement des paramètres musculaires .....	110
<b>3.4.5</b>	<b>Préparation du modèle à la simulation dynamique directe.....</b>	<b>112</b>
<b>3.4.6</b>	<b>Simulation dynamique directe .....</b>	<b>113</b>
<b>3.5</b>	<b>BILAN DE LA MODELISATION .....</b>	<b>115</b>
<b>3.6</b>	<b>DIFFICULTES RENCONTREES LORS DE LA MODELISATION.....</b>	<b>115</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Au niveau de la modélisation du corps humain.....</b>	<b>116</b>
3.6.1.1	Défauts de placement de segments lors de l'analyse statique.....	116
3.6.1.2	Fluidité du modèle du corps humain lors du mouvement .....	120
<b>3.6.2</b>	<b>Au niveau de la modélisation du matériel .....</b>	<b>125</b>
3.6.2.1	La modélisation du bâton .....	125
3.6.2.2	La modélisation du ski .....	126
<b>3.6.3</b>	<b>Au niveau de la liaison pied/ski.....</b>	<b>126</b>
3.6.3.1	Essai d'une fixation simple en liaison pivot .....	126
3.6.3.2	Essai d'une fixation à deux points d'encrage : liaison pivot avec ressort ...	128
3.6.3.3	Essai d'une fixation en liaison bushing .....	129
<b>3.6.4</b>	<b>Au niveau de la simulation dynamique directe .....</b>	<b>130</b>
3.6.4.1	Variation de l'incrément de calcul.....	130
3.6.4.2	Variation des paramètres globaux .....	131
3.6.4.2.1	Variation des paramètres des motion agents .....	131
3.6.4.2.2	Variation des gains proportionnels et différentiels des muscles .....	131
<b>3.7</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>132</b>
<b>4</b>	<b>ANALYSE DES RESULTATS .....</b>	<b>133</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>133</b>
<b>4.2</b>	<b>ANALYSE CINEMATIQUE .....</b>	<b>134</b>
4.2.1	Position des deux pieds en XYZ .....	134
4.2.2	Angles de rotation des skis.....	135
4.2.3	Kinogrammes.....	139
4.2.4	Conclusion.....	141
<b>4.3</b>	<b>ANALYSE DYNAMIQUE .....</b>	<b>141</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Les forces de contact des bâtons et des skis et comparaison avec la</b>	
<b>littérature</b>	<b>.....</b>	<b>141</b>
4.3.1.1	Les forces de contact des bâtons .....	143
4.3.1.2	Les forces de contact des skis .....	144
4.3.1.3	Les pourcentages du cycle du modèle de la simulation dynamique inverse....	
	.....	148
<b>4.3.2</b>	<b>Les efforts musculaires .....</b>	<b>152</b>

4.3.2.1	Exemple du Rectus Femoris.....	153
4.3.2.2	Comparaison des groupes musculaires de la cuisse et de leurs actions mécaniques .....	155
4.3.2.2.1	Description des muscles de la cuisse modélisés par le logiciel.....	155
4.3.2.2.2	Analyse des résultats .....	158
4.3.2.2.2.1	Résultats des muscles de la loge antérieure de la cuisse .....	158
4.3.2.2.2.2	Résultats des muscles de la loge postérieure de la cuisse .....	160
4.3.2.2.2.3	Résultats des muscles de la loge interne de la cuisse.....	163
4.3.2.2.2.4	Graphe des fessiers et intégration du Gluteus Maximus 1 aux résultats .....	165
4.3.2.2.2.5	Analyse et interprétation des résultats.....	165
4.3.2.2.2.6	Limites et conclusion .....	168
<b>4.3.3</b>	<b>Bilan énergétique.....</b>	<b>170</b>
4.3.3.1	Energie cinétique et énergie potentielle de la skieuse.....	170
4.3.3.2	Vérification du modèle suite à l'analyse dynamique .....	171
4.3.3.3	Comparaison du haut du corps et du bas du corps .....	172
4.3.3.4	Comparaison des membres inférieurs .....	175
4.3.3.5	Comparaison des membres supérieurs .....	178
<b>4.4</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>179</b>
	<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>181</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>183</b>
	<b>Annexe 1 .....</b>	<b>187</b>
	<b>Annexe 2 .....</b>	<b>189</b>
	<b>Annexe 3 .....</b>	<b>199</b>
	<b>Annexe 4 .....</b>	<b>205</b>
	<b>Annexe 5 .....</b>	<b>207</b>
	<b>Annexe 6 .....</b>	<b>221</b>
	<b>Annexe 7 .....</b>	<b>225</b>
	<b>Annexe 8 .....</b>	<b>229</b>



# INTRODUCTION

En ski de fond, la technique du "pas de patineur" constitue une activité physique et sportive à part entière : le skating. Bill Koch, lors de la saison de compétition 1980-1981, utilise le premier "le style libre" et gagne un marathon dans le sud du Vermont en moins de deux heures. Cette performance est aujourd'hui largement dépassée. A partir de ce moment, son style va révolutionner le ski de fond jusqu'à créer un nouveau sport : le skating.



*Figure 1 : le skating*

Ce sport se situe au carrefour d'un geste technique et d'une évolution technologique. Le geste est directement emprunté au patinage sur glace et au patinage à roulette. Il est essentiellement constitué d'appuis latéraux et alternatifs des jambes, associés à des appuis simultanés ou décalés des bras. Les appuis des jambes suivent les trois axes de déplacement : vers l'avant, latéralement et verticalement.

Ce sport est en perpétuelle évolution du fait de l'amélioration continue du matériel.

En effet, le matériel était au départ très proche de celui utilisé pour "le style classique" lors du "pas alternatif". Dans ce style, le skieur n'a aucune action latérale et garde ses deux skis parallèles dans des traces. Ce mouvement se réalisant uniquement sur un plan longitudinal, les semelles des skis sont constituées d'écaillles afin d'éviter un glissement en sens opposé à l'avancement. La fixation de la chaussure réalise une liaison pivot entre la pointe de la chaussure et le ski.

Les constructeurs ont su s'adapter au changement de technique et pour optimiser le phénomène de glisse du "pas de patineur", ils ont apporté des modifications au niveau du matériel : ski, fixation et chaussure mais aussi au niveau du fartage.

- **Le ski** (figure 2) : le changement principal a consisté à supprimer les écailles de la semelle qui permettaient une adhérence lors du pas alternatif. La semelle est complètement lisse, d'où la nécessité d'utiliser le pas de patineur lors du déplacement. De nouveaux matériaux, un nouveau cambre (hauteur du ski sans pression) et une nouvelle taille donnent au ski plus d'efficacité lors du transfert du poids du corps d'une jambe sur l'autre.

- **La fixation** : elle comporte une butée ou tampon à son extrémité, limitant la rotation frontale du pied sur le ski. Un premier point de fixation, identique à celui du style classique, constitue une liaison pivot entre la pointe de la chaussure et le ski. Sur certaines fixations, (figure 4 à 6), un second point de fixation situé légèrement en arrière du premier, est relié au ski par l'intermédiaire d'une barrette. Celle-ci possède avec le ski un degré de liberté en rotation (liaison pivot) et un degré de liberté en translation (liaison glissière) perpendiculaire à la liaison pivot. Un ressort de rappel agit sur la liaison glissière (figure 6), (patin clap en patin à glace) créant ainsi une liaison plus rigide de la chaussure avec le ski qui limite les rotations frontales, sagittales et transversales. Le skieur a un meilleur maintien du ski, il le dirige mieux lors des appuis et des retours aériens des jambes.

- **La chaussure** : une coque rigide au niveau de la cheville empêche les mouvements latéraux du pied dans la chaussure. Par rapport au ski de fond originel, le skieur utilise d'avantage la plante du pied lors du mouvement, en effet, il doit transmettre une composante d'effort perpendiculaire au ski. Pour faciliter la transmission de cet effort, la semelle peut comporter deux points de fixation et une goulotte (figure 3) qui vient s'emboîter dans une partie saillante de la fixation du ski lorsque le skieur repose le pied.

- **Le bâton** (figure 7) : sa constitution, son poids et sa forme ont changés. De nouvelles dragonnes entourant le poignet et le pouce permettent de créer un point d'attache au niveau de la "pince" de la main. Le skieur peut lâcher le bâton lors du retour aérien du bras, entraînant une plus grande amplitude du mouvement et un relâchement musculaire. Lors de l'appui, il a un meilleur maintien du bâton qui se retrouve automatiquement dans sa main pour la poussée.

- **Le fart** : il est apparu de nouveaux composants, entre autre les composés fluorés qui sont appliqués sous la semelle du ski.



*Figure 2 : retour aérien de la jambe*





Figure 3 : chaussure de skating à deux points de fixation



Figure 4 : fixation de skating à deux points de fixation

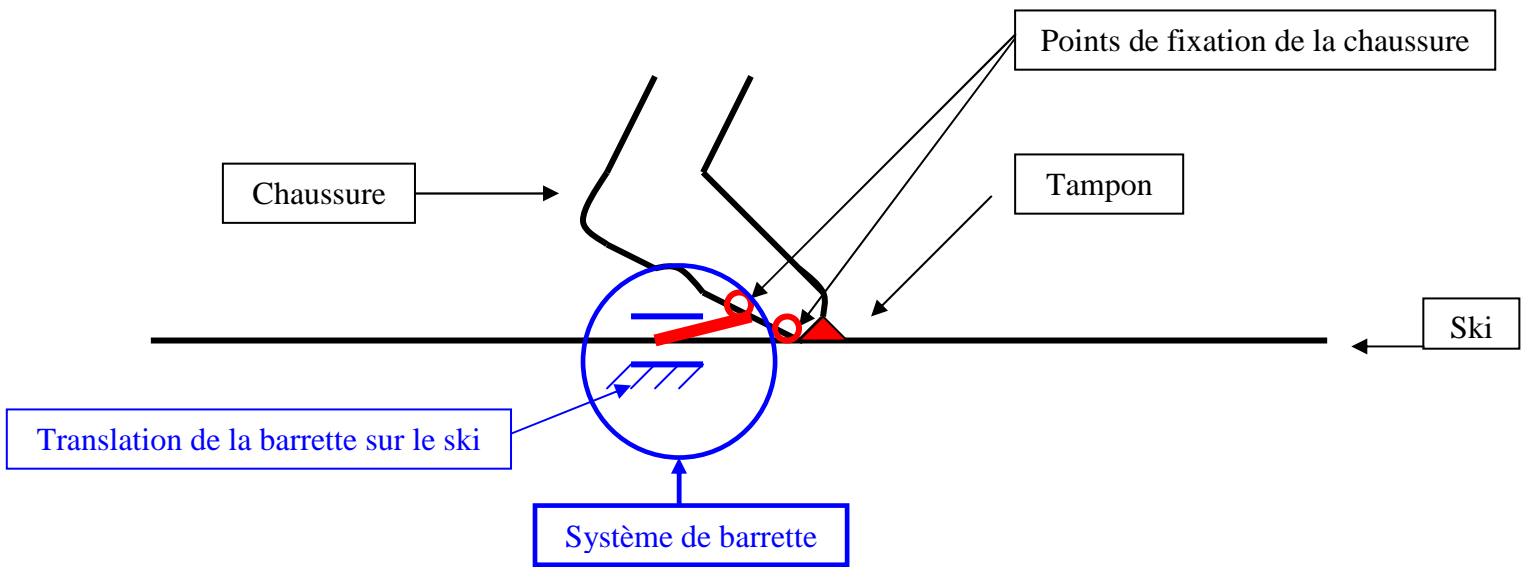


Figure 5 : schéma d'une fixation de ski de skating

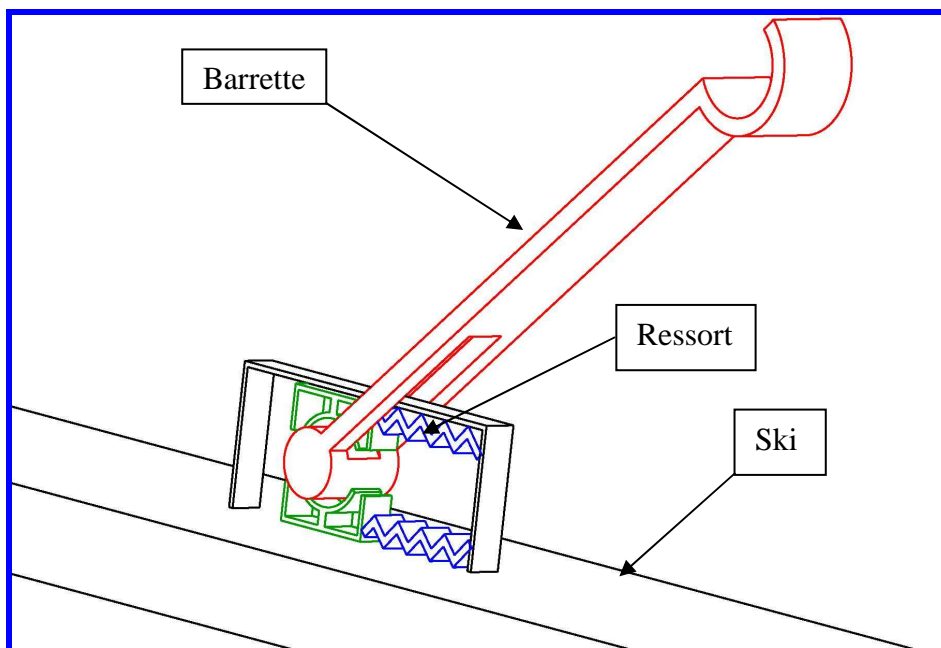


Figure 6 : schéma simplifié de la liaison de la barrette avec le ski



*Figure 7 : bâton de skating et positionnement de la main dans la dragonne*

La description précédente ne se veut pas exhaustive mais elle montre comment l'amélioration du matériel induit une motricité précise de plus en plus efficace et performante. A l'heure actuelle on ne sait plus si c'est la technique du skieur qui influence la technologie ou si c'est le skieur qui doit s'adapter à la technologie.

Face à ce paradoxe, la création d'un modèle cinématique et dynamique du pas de patineur nous a paru être un outil intéressant pour étudier le geste et essayer de le rendre le plus performant possible, par un changement de la motricité spécifique du skieur et/ou par la modification du matériel. C'est la problématique de notre travail qui pourrait avoir des applications dans les domaines sportif, industriel et médical.

## OBJECTIFS ET PLAN D'ETUDE

L'objectif principal est la réalisation d'un modèle cinématique et dynamique capable de reproduire le geste technique du "décalé", technique dérivée du "pas de patineur" en skating.

Le but de ce travail est d'analyser cette technique d'un point de vue mécanique et biomécanique grâce à une modélisation la plus aboutie possible du geste.

Il s'agit donc de créer un modèle biomécanique pouvant répondre à des sollicitations internes et externes.

Par *sollicitations internes*, nous entendons tous les déterminants liés à la typologie comportementale du skieur : données anthropométriques, cinématiques, musculaires et mécaniques.

Les *sollicitations externes* sont liées au matériel : chaussures, skis, bâtons... et à l'environnement : nature du terrain d'évolution : degré d'inclinaison de la pente, coefficient de frottement...

En modifiant certains paramètres, par la technique et/ou par la technologie, c'est à dire par des facteurs internes, propres au skieur, ou externes propres au matériel et à l'environnement, le sportif ou l'industriel pourrait alors vérifier l'opportunité de ses choix. Le modèle servirait ainsi de "banc d'essai".

Ce mémoire synthétise les études réalisées au sujet du pas de patineur ainsi que notre travail de recherche qui concerne la construction d'un modèle dynamique développé sur les logiciels LifeModeler [1] et ADAMS [2] d'une skieuse pratiquant la technique du " décalé " en pas de patineur. Il comporte quatre chapitres, une conclusion, une bibliographie et huit annexes :

- Dans le **chapitre I**, nous analysons le mouvement et l'environnement dans lequel il se déroule.

Nous relevons, les connaissances actuelles sur le pas de patineur et sur le style du décalé ainsi que les différentes méthodes d'analyse utilisées.

Nous étudions qualitativement ce geste dans les trois dimensions de l'espace.

Ce chapitre décrit également l'approche écologique et dynamique du geste. Ces connaissances sont spécifiques d'une certaine façon d'appréhender la motricité et nous montrent des aspects intéressants pouvant influencer notre recherche.

Nous concluons cet état de l'art, en regard des diverses connaissances précédentes, en définissant les déterminants de la performance dans le style décalé.

- **Le chapitre II** décrit la modélisation en 3D du corps humain de la skieuse.

A partir de données acquises en situation de compétition, nous traitons ces données pour modéliser le corps humain, sans matériel, réalisant le mouvement du décalé sur un sol dur incliné. La méthode et les étapes de modélisation sont présentés. L'analyse des résultats par comparaison avec la littérature valide la modélisation.

- **Le chapitre III** est consacré au modèle dynamique de la skieuse dans son environnement : matériel et neige.

Nous décomposons la procédure de création en trois étapes. En premier lieu, l'amélioration du corps humain de la skieuse, la modélisation de l'environnement, puis la liaison et l'interaction du corps humain à l'environnement.

Pour clore ce chapitre, nous dressons un bilan de la modélisation et nous décrivons les difficultés rencontrées.

- **Le chapitre IV** présente certains résultats et leurs interprétations.

Une analyse cinématique et dynamique vont permettre une validation du modèle dynamique de la skieuse dans son environnement. Ce qui va entraîner une recherche plus fine de résultats lors de moments spécifiques du cycle du décalé.

L'enjeu de notre étude est avant tout la réalisation d'un modèle dynamique en trois dimensions :

- les forces de contact sont étudiées et nous portons une attention particulière à leur composante latérale, inhérente à la prise de carre du ski.
- Les efforts musculaires développés par la skieuse sont également analysés.

Nous faisons, à des instants spécifiques du geste, un bilan mécanique des forces, des énergies et des efforts musculaires.

Notre modèle apporte au niveau cinématique une représentation anatomique musculaire et osseuse. Nous avons un choix spatio-temporel de prise de vue, par kinogramme ou par arrêt sur image.

La cinématique du modèle doit refléter le plus fidèlement possible le mouvement réel car les erreurs ont des conséquences importantes sur le modèle dynamique.

L'analyse des résultats peut révéler des indices précis sur lesquels l'entraîneur et le concepteur pourront s'appuyer pour améliorer l'efficacité du geste.

Ce travail peut donc intéresser les milieux industriel, sportif et médical à des fins spécifiques.

## PROBLEMATIQUE

La modélisation du corps humain en mouvement est d'une grande complexité de part l'étendue du sujet étudié : son squelette, ses liaisons articulaires à plusieurs degrés de liberté, son nombre important de muscles et de tendons. De plus, il répond à des lois biomécaniques propres à ses caractéristiques physiques et il fait partie d'une identité complexe, gérée par divers systèmes : nerveux, respiratoire, sanguin... L'environnement psychologique et social joue aussi un rôle important, particulièrement chez un sportif de haut niveau. Face à cette entité complexe, la modélisation du corps humain en mouvement ne peut être que limitée. Cependant, elle peut répondre à des problèmes techniques d'ordre mécanique et biomécanique et peut aussi permettre la comparaison de solutions technologiques entre elles.

Il s'agit aussi de rendre compte de la complexité gestuelle du pas de patineur. En skating, différentes techniques de patinage sont utilisées mais elles ne sont pas toujours les mêmes pour tous les skieurs. En effet, le niveau de performance, de fatigue de l'individu, la difficulté du terrain... sont inhérents au choix d'une technique. Nous avons choisi d'étudier le style décalé utilisé lors des montées pour maintenir la vitesse, voire l'augmenter, car c'est souvent dans les montées que se créent les écarts de performances lors des courses en compétition. Ce geste est complexe car il s'effectue dans les trois dimensions de l'espace ; c'est une poussée alternative des jambes vers l'avant, latéralement et verticalement associée à une poussée décalée des bras qui crée le mouvement.

Sa complexité apparaît également dans la nature de son support : la neige qui, par son instabilité entraîne divers types d'appuis. La nature de la neige intervient lors du fartage, dans la préparation du matériel, mais elle a aussi une incidence sur le geste technique, nécessitant d'augmenter ou de diminuer les prises de carre par exemple.

Il s'agit donc de construire un modèle dynamique permettant l'accès aux trois dimensions du geste et de pouvoir l'analyser mécaniquement.

Le choix d'un niveau qualitatif de modélisation est primordial. Il ne peut être comparable à la mise en situation réelle du skieur, mais il doit s'en rapprocher afin d'obtenir une analyse comparative fiable.

Pour appréhender cette complexité gestuelle, nous avons utilisé le logiciel LifeModeler [1]. C'est un logiciel de biomécanique qui modélise le corps humain comme un robot anthropomorphe, dans les trois dimensions de l'espace. C'est un module du logiciel ADAMS [2], logiciel de modélisation et de simulation cinématique et dynamique, distribué par la société Mc Software.

## ETAT DE L'ART DU PAS DE PATINEUR ET DU STYLE DECALE EN SKATING

### 1.1 INTRODUCTION

Dans ce premier chapitre, nous faisons le point sur l'état de l'art du pas de patineur. Nous restreignons notre champ d'action au ski de fond et plus précisément à la discipline sportive émanant de ce geste : le skating.

Disposant d'informations bibliographiques précises sur le décalé : technique de pas de patineur utilisé à des instants précis lors des courses, notre travail de recherche va se focaliser sur cette dernière technique. Grâce à une base de données cinématiques, nous faisons une première analyse qualitative du geste.

Au regard de sa réalisation complexe : avec matériel, sur la neige, nous dressons ensuite un bilan des études réalisées dans les domaines de la biomécanique, de l'énergétique et de la tribologie.

Pour finir, nous retenons des valeurs pouvant être utilisées lors de la conception du modèle informatique.

### 1.2 PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNIQUES

#### 1.2.1 Le choix d'une technique

En skating, différentes techniques de patinage sont utilisées mais elles ne sont pas toujours les mêmes pour tous les skieurs. En effet, la qualité de la neige et de la piste, les caractéristiques personnelles de l'individu, son niveau de fatigue... sont inhérents au choix d'une technique. Nous allons donc présenter les techniques les plus utilisées, lors des courses en compétition, par les skieurs de haut niveau. Globalement, elles sont au nombre de trois, chacune peut avoir des dénominations différentes et leur utilisation dépend souvent du profil du terrain (figure 8).

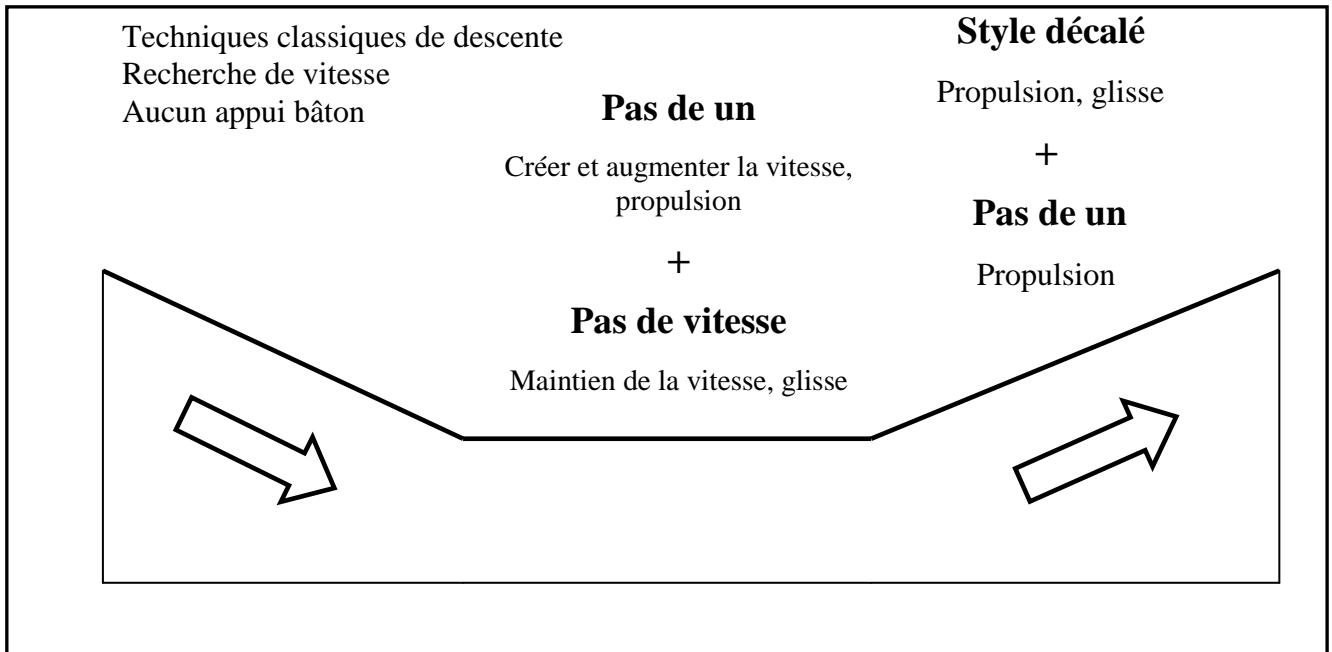


Figure 8 : techniques utilisées en fonction du profil du terrain

### 1.2.2 Le cycle de mouvement

Les auteurs ayant travaillé sur le pas de patineur s'accordent à dire que chaque technique se caractérise par deux phases distinctes lors du mouvement. Bilodeau [3], par une analyse effectuée à partir d'une vidéo (30 images /s), distingue :

Pour les jambes :

- **Une phase d'appui** (ski en contact avec la neige). Elle se divise en deux sous-phases : l'une de glisse et l'autre de propulsion.

- *La phase de glisse* commence au moment où le ski touche la neige et se termine au début de l'extension du genou.

- *La phase de propulsion* débute au début de l'extension du genou et finit lorsque le milieu du ski quitte la neige.

- **Une phase de retour** (phase aérienne). Un ski est dit soulevé lorsque la surface de la neige apparaît sous sa cambrure. Il est posé lorsque sa cambrure disparaît et que la spatule n'oscille plus latéralement.

Ces deux phases et ces deux sous-phases ont des durées différentes, elles varient avec la vitesse et/ou la pente du terrain. Elles sont inhérentes à la technique utilisée.

La fin de la phase de propulsion sur un ski et le début de la phase de glisse sur l'autre se chevauchent, c'est le transfert du poids du corps d'un ski sur l'autre.

Pour les bras :

Pour Bilodeau [3], il semblerait que toute la phase d'appui des bâtons soit une phase de propulsion.



Les instants décrits précédemment sont délicats à observer car les soulevés et poses de ski sont techniquement différents d'un skieur à l'autre. De plus, ils sont souvent issus d'analyses filmiques et correspondent à des chrono-phases liées à la fréquence des images de la caméra.

Toutefois, l'intervention du cycle de bras lors du cycle de jambes va être révélatrice de la technique utilisée. A l'heure actuelle, en compétition, elles sont généralement au nombre de trois : le pas de un, le pas de vitesse et le décalé.

### 1.2.3 Le pas de un

Cette technique est aussi appelée : style symétrique, double poussée, pas de patineur un temps, 1 V, 1-skate, V2... Elle est décrite figure 9.

A une poussée simultanée des bras correspond une poussée des jambes, autrement dit un demi-cycle de jambe. Elle sert à créer de la vitesse, elle est utilisée au départ, dans les plats, les plats montants et le début des montées.



Figure 9 : le pas de un

### 1.2.4 Le pas de vitesse

Egalement appelé : pas de patineur deux temps, VV, V2 alternée, 2-skate,...est décrit figure 10.

A une poussée simultanée des bras correspond deux poussées de jambes, un cycle complet de jambe. Cette technique sert à conserver la vitesse, elle est utilisée dans les plats et les plats descendants.

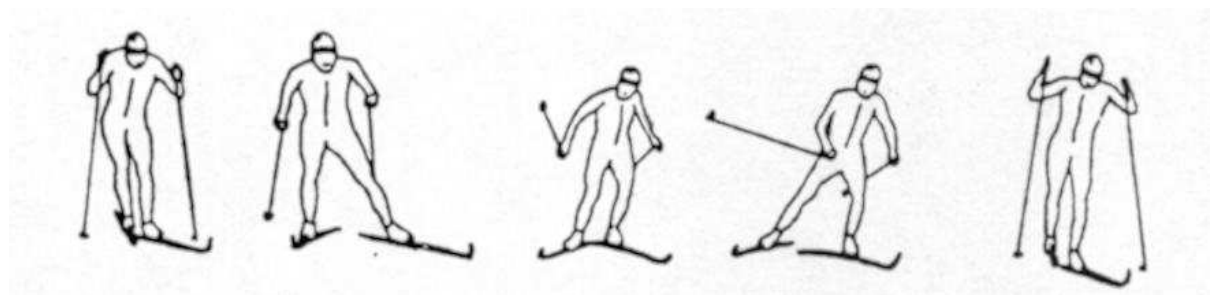


Figure 10 : le pas de vitesse, Bilodeau et al [3]

### 1.2.5 Le décalé

Egalement appelé : pas de patineur deux temps de base, déphasé, V1, offset, alternate stride skating, est décrit figure 11.

A une poussée décalée des bras, dans le temps et dans l'espace, correspond un cycle complet de jambe. Cette technique est utilisée pour maintenir la vitesse, voire en créer à nouveau, lors des montées. Elle est quelquefois abandonnée au profit du pas de un, en particulier chez les skieurs puissants du haut du corps et des bras.



*Figure 11 : le décalé*

Nous avons choisi d'étudier le style décalé car il reste le plus utilisé par les sportifs de haut niveau dans les montées à fort pourcentage ou lors de moments éprouvants physiquement. De plus, la littérature nous fournit des informations propres à cette technique, suffisamment précises pour nous permettre d'enrichir notre modélisation.

Les images des figures 12 à 15, extraites d'une compétition de haut niveau, illustrent les différentes phases du mouvement du style décalé.



Figure 12 : fin de la phase de propulsion du côté gauche, associé au début de la phase de glisse du côté droit.



Figure 13 : transfert du poids du corps côté droit, phase de glisse côté droit, phase aérienne côté gauche.



Figure 14 : phase de propulsion du côté droit, associé au début de la phase de glisse du côté gauche.



Figure 15 : transfert du poids du corps côté gauche, phase de glisse côté gauche, phase aérienne côté droit.

Smith [4], en plaçant des capteurs de force entre le ski et la fixation, observe dans ce style des différences entre les membres inférieurs et distingue "le côté fort et le côté faible". Sur les images des figures 12 à 15, on remarque que le "côté fort" du skieur est le côté droit : le contact du bâton droit est décalé dans l'espace, plus en avant sur un plan frontal, et dans le temps, il touche la neige plus tard que le bâton gauche. L'action du skieur côté droit est plus en poussée alors que celle côté gauche est plus en glisse.

### 1.3 LES METHODES D'ANALYSES CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE EXISTANTES ET LEURS LIMITES

Les travaux réalisés dans le domaine du décalé, sont de trois types :

- mesure des efforts, grâce à des plates-formes de force et à des capteurs piézoélectriques
- analyse d'images émanant d'un film
- couplage, analyse d'image et simulation.

#### 1.3.1 La mesure des efforts

##### 1.3.1.1 La plate-forme de force

(Komi 1987, Xu 1999 [5] ), figure 16.

Des capteurs enregistrent les pressions exercées sur une plate-forme rigide posée au sol. Les informations recueillies sont transmises à un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'une liaison filaire.

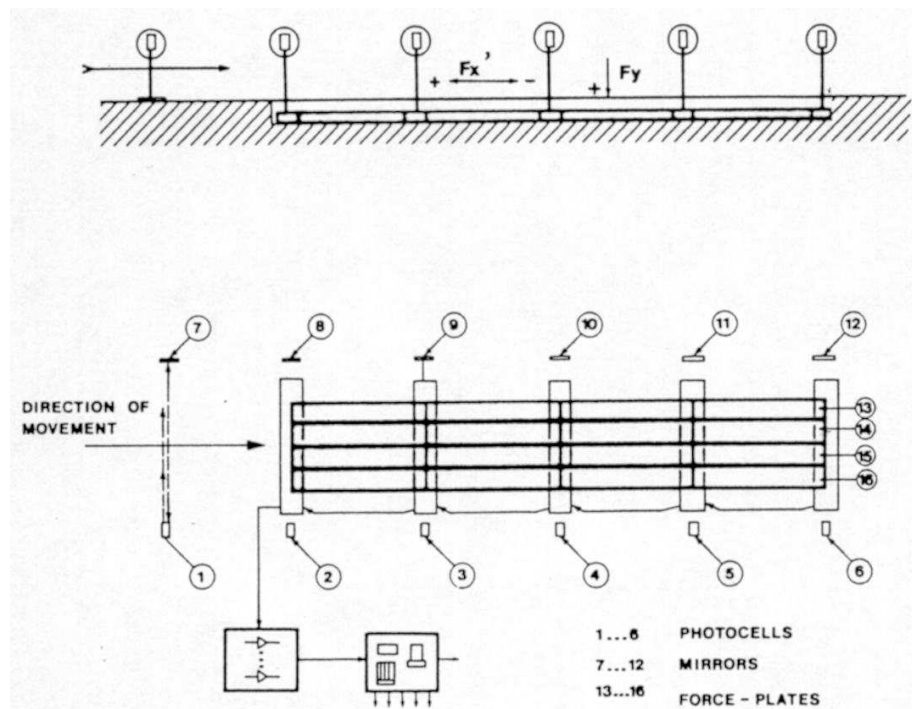


Figure 16 : schéma de la plate-forme de force posée sous la neige, utilisée par Komi 1987

Cette plate-forme mesure 6 m et est formée de 4 éléments de 1,5 m de long et de 15 cm de large. Elle enregistre à la fois les forces verticales et horizontales. Le plateau rigide de la plate-forme est fait en aluminium. Les quatre éléments sont connectés électriquement et produisent des signaux qui sont transmis à un enregistreur et à un micro-ordinateur. Dans l'analyse immédiate, une cellule photoélectrique fait démarrer le micro-ordinateur pour qu'il puisse recevoir et analyser les signaux de force.

Ce matériel est surtout un matériel de laboratoire, il est lourd, encombrant, difficile à déplacer et ne permet que peu d'expérimentations en dehors d'une structure adaptée.

Il n'enregistre les informations qu'à un temps donné. Dans l'expérimentation de Komi, les mesures n'ont pu se réaliser que lorsque le ski était en contact avec la neige. Or, dans la technique du skating, la phase aérienne, correspondant au ramené de jambe, intervient aussi dans la performance.

### **1.3.1.2 Les capteurs piézoélectriques**

(Smith 1989 [6])

Ces capteurs sont placés entre le ski et la fixation. Un petit enregistreur, porté à la taille par le skieur, recueille les données mécaniques qui permettent de mesurer les forces sur la surface du ski et de localiser le centre de pression. (Ces données permettent d'obtenir le tracé du déplacement du point par lequel passe la résultante de l'ensemble des forces appliquées sur la surface totale des marqueurs, ce point est appelé centre de pression.)

Ce matériel est lourd (1,3 kg) et encombrant et ne peut refléter réellement la technique optimale (port d'un sac à dos ou d'une ceinture, liaison filaire). Le placement des capteurs ne permet pas une analyse fine des pressions : une même réponse peut être donnée pour deux gestes différents.

### **1.3.2 L'analyse d'images**

Smith 1988 [7], 89[6], 94[8], Street 1994[9], Gregory 1994[10], Ruby 1995[11], Coulmy 2000[12]

La séquence filmée aboutie à une analyse cinématique du geste étudié en 2 ou 3D. Elle peut être réalisée en situation sur le terrain ou en laboratoire.

#### **1.3.2.1 En laboratoire**

Face au développement technologique, aux demandes des fédérations sportives et à l'engouement des sciences du mouvement humain, de nouveaux laboratoires se créent et se spécialisent dans l'analyse cinématique du geste sportif. Tel est le cas par exemple, à Poitiers où l'équipe "Matériaux et matériel à usage sportif" des laboratoires de Métallurgie Physique et de Mécanique des solides a développé une activité de recherche fondamentale d'analyse du geste sportif (Junqua A. 2001 [13], Duboy J., Junka A. et Lacouture P. 1994 [14]). Les études réalisées récemment par l'équipe de Poitiers portent par exemple sur l'analyse du salto arrière en gymnastique, du coup droit en tennis, d'une pirouette en patinage artistique, d'un saut en VTT, ...

L'analyse cinématographique débute par une capture vidéo réalisée par plusieurs caméras, (au minimum trois pour l'étude en 3D), synchrones les unes aux autres afin d'avoir une rapidité d'image la plus grande possible. Le corps du sportif est équipé de marqueurs disposés à des endroits préférentiels qui définissent des axes articulaires correspondants aux différents

segments du corps. Les images sont ensuite numérisées et on reconstitue dans l'espace la position, à chaque instant, de chacun des marqueurs. Ainsi, on aboutit à des variations de position, de vitesse et d'accélération et la cinématique du geste est retrouvée. Couplée à des relevés de forces effectués lors du mouvement par des capteurs piézoélectriques, la dynamique du geste peut être aussi étudiée.

### **1.3.2.2 En situation**

Le pas de patineur nécessite une analyse en 3D et une expérimentation en situation, compte tenu de la nature spécifique de la neige, (Smith 1988[7], 89[6], 94[8], Street 1994[9], Gregory 1994[10], Ruby 1995[11], Coulmy 2000[12]).

L'analyse 3D part d'une séquence d'images filmées sur le terrain et aboutit à la construction d'un fichier micro-informatique de données numériques contenant, image par image, les coordonnées cartésiennes des points étudiés. Les auteurs utilisant cette méthode s'accordent sur certaines opérations :

- Le calibrage de l'espace est réalisé par plusieurs mires disposées à travers le champ de prise de vue.
- Les caméras sont synchrones.
- La reconstruction de l'espace 3D est réalisée par la méthode D.L.T. (Direct Linear Transformation) (Allard, 1994[16]).
- Les données brutes (pixel) ou calculées (2D-3D) sont ajustées par un filtre Butterworth à une fréquence de coupure variant de 2 Hz à 6 Hz.

Le choix des auteurs diverge quant à la cadence des images, au nombre de caméras et à l'angle de prise de vue de chacune d'entre elles.

Plus la cadence est élevée, plus la précision du découpage temporel du geste est grande mais plus le nombre d'images à numériser et à digitaliser est important. Le nombre de caméras est fonction du geste technique étudié.

Ce matériel demande une longue préparation et une organisation précise qui peuvent être difficiles en milieu naturel. Le temps d'analyse est bref et ne reflète, dans le cas du skating, qu'un seul cycle de mouvement. De plus, il convient de chercher les dispositions optimales des caméras tout en tenant compte des aléas des situations de terrain et de compétition qui peuvent amputer les champs de prise de vue : conditions climatiques, arbres, fossés, talus, filets de protection, spectateurs...

### **1.3.3 Le couplage analyse d'images et simulation**

A partir de l'analyse filmique du décalé des modèles simulant le mouvement ont été créés.

Divers types de représentations existent. A Ruby [11] a réalisé une représentation filaire du sujet en mouvement. D'autres auteurs, Verriest, 1990 [17], Tavernier et coll., 1993 [18] ont développés des mannequins volumiques anthropomorphes. Ils permettent plus de précisions dans l'analyse cinématique et peuvent répondre à la préoccupation des praticiens.

Toutefois, ces modèles intègrent peu les propriétés inertielles du sujet et n'induisent pas des études énergétiques et dynamiques poussées, telles que la mesure des forces de contact, des efforts musculaires ou des dépenses énergétiques de chaque partie du corps. Seule une analyse des images est réalisée où les angles, le centre de gravité et l'énergie totale du système peuvent être relevés.



## **1.4 BILAN DES ETUDES REALISEES**

### **1.4.1 Dans le domaine de la biomécanique**

#### **1.4.1.1 Côté fort, côté faible**

Smith (1992) [4], montre qu'il existe des différences significatives entre l'action des deux jambes. Il place quatre capteurs piézoélectriques entre le ski et la fixation pour mesurer les forces de réaction et localiser le centre de pression du pied lors du décalé. Ces capteurs produisent des informations qui sont échantillonnées et stockées dans un petit ordinateur porté par le skieur dans un sac à dos. L'expérimentation se réalise sur une pente à 8°, à allure modérée et en sprint. Les résultats montrent que le centre de pression se situe toujours au même endroit chez un individu (approximativement, sur une ligne parallèle à la médiane longitudinale du ski, près du milieu du pied). Sa position diffère d'un sujet à l'autre et d'un pied à l'autre : 10 à 15 % en avant pour le côté fort du skieur par rapport au côté faible. Lors du mouvement, il migre vers l'avant sur la ligne médiane horizontale du ski.

Coulmy (2000) [12] dans sa thèse, distingue un côté "d'attaque" correspondant à l'action de la poussée d'une jambe concomitante à la poussée des deux bras. Il nomme par extension le côté opposé, le côté "controlatéral". Il précise que pour des raisons d'adaptation à la piste, le skieur peut changer son côté d'attaque.

#### **1.4.1.2 Fréquence, longueur et vitesse du cycle**

Le tableau 1 (Bilodeau 1992) [3], montre les corrélations entre deux variables : l'amplitude et la fréquence du cycle sur terrain plat et en pente, au seuil de 0,05 (la limite de confiance pour une probabilité). Le calcul du coefficient de corrélation (la covariance) détermine si les deux variables sont dépendantes ou non. S'il y a une relation entre les variables, la corrélation est significative.

- Si le coefficient de corrélation est supérieur à zéro (corrélation positive), lorsque la première variable augmente, la seconde aussi.
- Si le coefficient de corrélation est inférieur à zéro (corrélation négative) lorsque la première variable augmente, la seconde diminue.
- Si le coefficient de corrélation est nul, il n'existe pas de relation entre les variables.

Terrain	Variables	Vitesse du cycle		
		Pas de 1	Pas de vitesse	Décalé
Plat	Longueur du cycle	0.91*	0.97*	0.34
	Fréquence du cycle	- 0.57	- 0.74*	- 0.80*
En pente	Longueur du cycle	0.68*	0.96*	0.87*
	Fréquence du cycle	0.23	- 0.53	0.36

( \* : corrélation significative au seuil 0.05 observée par l'auteur.)

*Tableau 1 : Bilodeau 1992, corrélations entre l'amplitude et la fréquence du cycle sur terrain plat et en pente [3].*

Que ce soit sur un terrain plat ou en pente, plus le cycle est long, plus la vitesse est importante, exception faite du style décalé sur le plat. Quant à la fréquence, elle perturbe la vitesse sur le plat uniquement pour les techniques du pas de vitesse et du décalé.

Smith (1988) [7], en utilisant des variables cinétiques et cinématiques, montre aussi que la longueur du pas de patineur, analysé sur terrain plat et en montée, est le facteur le plus significatif distinguant les meilleurs skieurs. Il montre aussi qu'en décalé la vitesse du cycle est corrélée positivement avec la longueur du cycle (Smith, 1989) [6] et que l'amplitude est corrélée négativement avec la fréquence (Smith 1992) [4].

Bilodeau et al. 1991[3], illustrent par le schéma figure 17, le pourcentage des phases d'appuis bâtons et jambes lors du décalé. Ils distinguent le côté fort et le côté faible. ( SP : bâton fort, WP : bâton faible, SPP : planté du bâton fort, strong leg : jambe forte, weak leg : jambe faible)



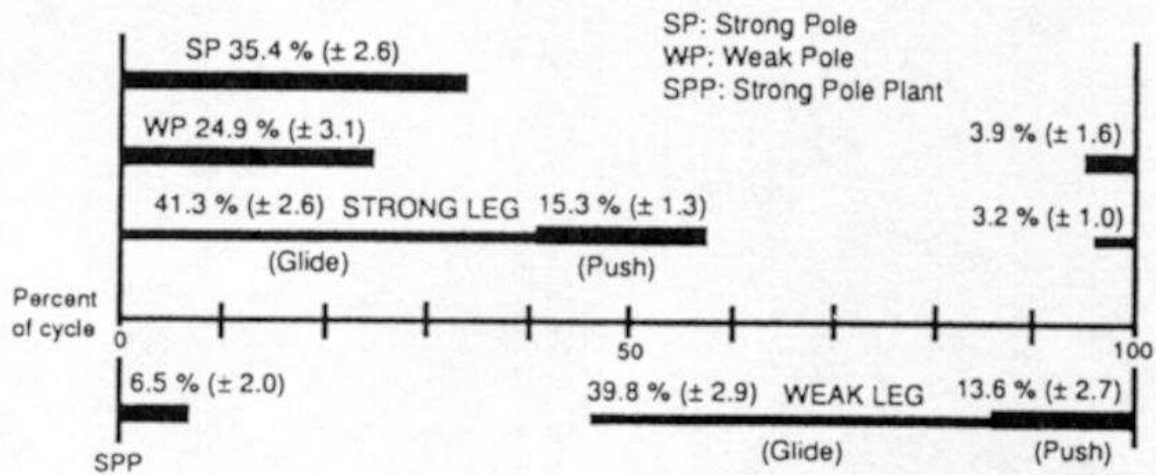


Figure 17 : pourcentages des phases d'appui lors du décalé, Bilodeau 1991 [3]

Toutefois, les résultats divergent d'un auteur à l'autre. Les durées des phases d'appui jambes et bâtons sont corrélées négativement avec la vitesse (Smith 1988) [7].

Pour Grégory, 1994 [10], le skieur choisirait d'augmenter l'amplitude du pas ou sa fréquence. Il ferait le choix, en fonction de paramètres précis, personnels ou externes, de faire basculer le rapport amplitude / fréquence vers l'amplitude ou vers la fréquence. L'objectif étant toujours de conserver ou d'augmenter sa vitesse.

Quant à la vitesse du cycle, elle est généralement corrélée positivement, avec la vitesse de course.

Nous prendrons donc en compte, dans notre étude dynamique, la vitesse du cycle que nous associerons au rapport amplitude/fréquence. L'étude des forces exercées pendant l'appui sera inhérente à la longueur des phases mais aussi à la durée de ces dernières.

#### 1.4.1.3 Modifications liées à la pente

Le tableau 2 (Bilodeau 1992) [18], synthétise les données relatives moyennes du cycle: vitesse, fréquence, longueur, sur deux types de terrain : sur du plat et en montée (5%), lors de trois techniques différentes de skating : 1-Skate (pas de 1), 2-Skate (pas de vitesse), Offset (décalé).

Nous pouvons voir que ces résultats sont très différents sur le plat et en pente. Les pourcentages de glisse et de propulsion du décalé sont significatifs par rapport aux autres techniques. Le décalé lorsqu'il est effectué en pente est le pas le plus rapide. Il a la fréquence la plus élevée et la longueur de pas la plus faible.

D'après Smith (1994) [8], plus la pente augmente, plus l'angle des deux skis avec la direction générale du skieur est grande, plus les skis divergent. En style décalé, les deux bâtons sont inclinés latéralement pendant la phase de planté, vers le côté fort. Alors qu'en pas de vitesse, le bâton côté fort est orienté vers le côté faible.

En style décalé et pas de vitesse, le bâton côté faible est plus incliné vers l'avant que le bâton côté fort pendant la phase de planté. Cette différence augmente avec la pente. La flexion maximale des deux genoux augmente aussi avec la pente. Elle est plus importante pour le style décalé. Dans ce dernier style, l'orientation du ski faible par rapport à la trajectoire rectiligne du skieur, les durées des phases d'appui du côté fort (ski et bâton) sont corrélées

négativement avec la vitesse (Smith 1988) [7]. L'amplitude du mouvement du genou côté fort semble être un paramètre déterminant dans l'acquisition de la vitesse en pas de vitesse (Smith 1994) [8].

Terrain	Variables	Pas de 1	Pas de vitesse	Décalé P
Plat	Phase de propulsion (%)	44.9 ± 2.0	45.9 ± 2.5	48.3 ± 2.4†
	Phase de glisse (%)	55.1 ± 2.0	54.1 ± 2.5	46.1 ± 2.9*
	Vitesse (m.s. <sup>-1</sup> )	5.89 ± 0.33	5.79 ± 0.32	5.84 ± 0.34
	Fréquence du cycle (Hz)	0.68 ± 0.03§	0.71 ± 0.02§	0.81 ± 0.02
En pente	Longueur du cycle (m)	8.69 ± 0.77*	8.18 ± 0.65*	7.19 ± 0.54*
	Phase de propulsion (%)	51.9 ± 2.5¶	49.5 ± 3.4¶	53.8 ± 6.5¶
	Phase de glisse (%)	48.1 ± 2.5¶	50.5 ± 3.4¶	35.7 ± 4.5*¶
	Vitesse (m.s. <sup>-1</sup> )	4.58 ± 0.15¶	4.45 ± 0.22*¶	4.62 ± 0.25¶
	Fréquence du cycle (Hz)	0.74 ± 0.02§¶	0.76 ± 0.02§¶	0.89 ± 0.02¶
	Longueur du cycle (m)	6.19 ± 0.23*¶	5.87 ± 0.37*¶	5.19 ± 0.26*¶

Tableau 2 : données relatives moyennes du cycle pour les phases de propulsion et de glisse, la vitesse, la fréquence et la longueur, sur le plat et en pente [18].

\* Corrélation significativement différente que les deux autres techniques, au seuil de 0.05

† Corrélation significativement différente que le pas de un, au seuil de 0.05

§ Corrélation significativement différente que le décalé, au seuil de 0.05

¶ Corrélation significativement différente que sur terrain plat, au seuil de 0.05

Conclusion : en relation avec l'augmentation de la pente, il est donc observé :

- Une augmentation de la fréquence gestuelle.
- Une augmentation de l'inclinaison latérale des deux bâtons vers le côté fort et vers l'avant pour le bâton côté faible.
- Une diminution de l'amplitude du cycle, essentiellement due à une diminution de la phase de glisse.
- Une forte diminution de la vitesse.

Ces données permettront d'exploiter dans notre travail les paramètres significatifs liées à la performance du décalé et de pouvoir valider les simulations réalisées : vérification des diverses phases, de la longueur, la vitesse, l'amplitude et la fréquence du geste.

#### 1.4.1.4 Centre de gravité

Les mouvements du centre de gravité du skieur sont positivement corrélés à la longueur du cycle et négativement à la fréquence du cycle. Dans les fortes montées, les bâtons jouent un rôle important, 66 % en force propulsive contre 20 % en équilibration (terme technique traduisant l'action permettant de retrouver l'équilibre du corps humain). Le corps doit lutter contre la gravité et les composantes verticales et latérales sont importantes sur les skis. Le déplacement latéral du centre de gravité est corrélé positivement avec l'amplitude du cycle et négativement avec la fréquence (Smith 1992) [4].

Le déplacement vertical du centre de gravité n'est pas en relation avec la vitesse du cycle.

Il semble que les skieurs les plus rapides, lors d'un cycle sont ceux qui gardent le déplacement latéral du centre de gravité le plus proche possible de la trajectoire rectiligne (Smith 1988) [7].

La vitesse pendant le cycle est liée au maintien d'une vitesse constante du centre de gravité suivant l'axe des déplacements (Ruby 1995) [11].

La composante latérale du déplacement du centre de gravité du skieur est inhérente à sa vitesse, plus elle est importante, plus l'amplitude du cycle est grande, entraînant une perte de vitesse. Le skieur ayant pour objectif de conserver sa vitesse, doit s'organiser techniquement pour que son centre de gravité ait une vitesse constante en module.

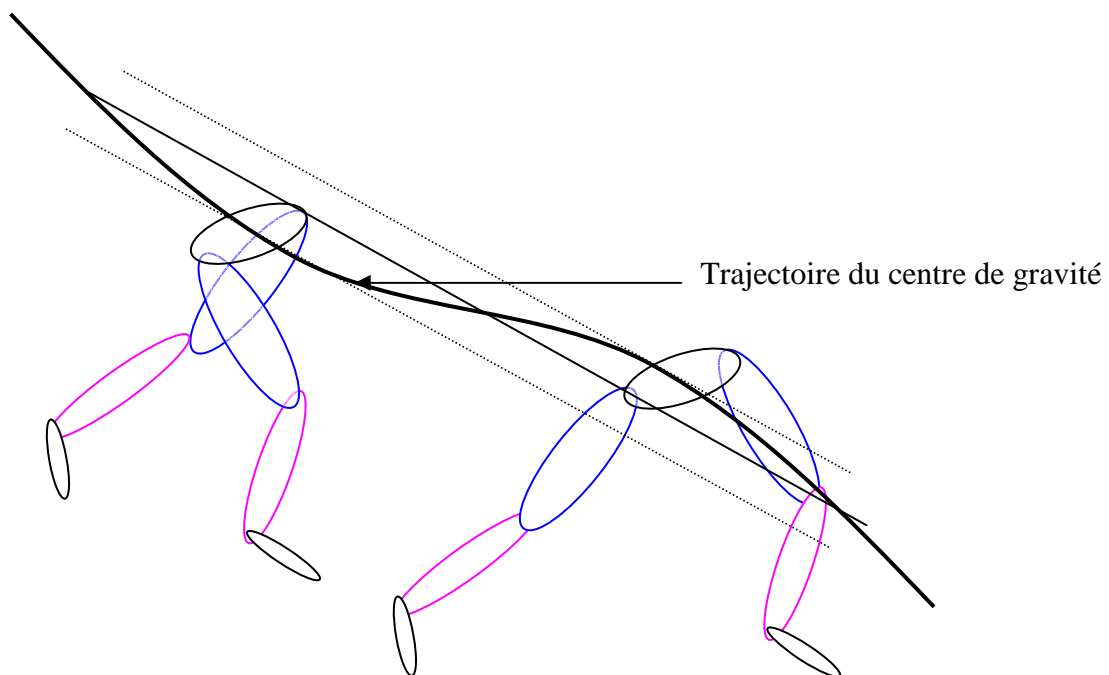


Figure 18 : trajectoire sinusoïdale du centre de gravité lors du pas de patineur, Rey 2002 [19].

#### 1.4.1.5 Analyse qualitative du décalé

Les connaissances tirées de la littérature ont permis une première approche biomécanique du décalé. Ces études vont fournir les données nécessaires pour modéliser et simuler ce mouvement. Toutefois, il nous paraît intéressant d'approfondir la recherche cinématique pour mettre en évidence des instants caractéristiques propres à ce pas, contribuant à une technique optimale.

Si le modèle dynamique est validé, ces instants sont autant de déterminants de la performance que nous pouvons paramétrer pour optimiser l'efficacité du skieur.

Pour cette analyse, nous utilisons les données d'Anne Ruby (1995) [11] qui a réalisé une thèse sur les performances en ski de fond. Elle a fait une analyse filmique en 3D en utilisant une méthode géodésique, lors de la coupe du monde de 1994. Elle a filmé le style décalé sur une pente à  $6^\circ$ , avec trois caméras et a pu faire, en utilisant le logiciel "mouvement ski" (version 0,62 fr, 1994), un calcul de paramètres cinématiques en 3D. La séquence filmée est prise in situ, sans marqueur ni matériel qui puissent entraver l'évolution de la sportive et en situation de compétition où l'efficacité gestuelle doit être maximale. Ensuite, par visée et relevé de chaque articulation et de points précis du matériel, elle digitalise les images en construisant un fichier de données numériques en utilisant le programme de capture d'images du logiciel d'analyse d'images et la carte Super Vidéo Windows (DVA 4000). Ce fichier contient, image par image, les coordonnées cartésiennes de 26 marqueurs d'une skieuse. Les coordonnées sont données dans un repère fixe dont l'origine est située en bord de piste à un mètre du sol, annexe 3.

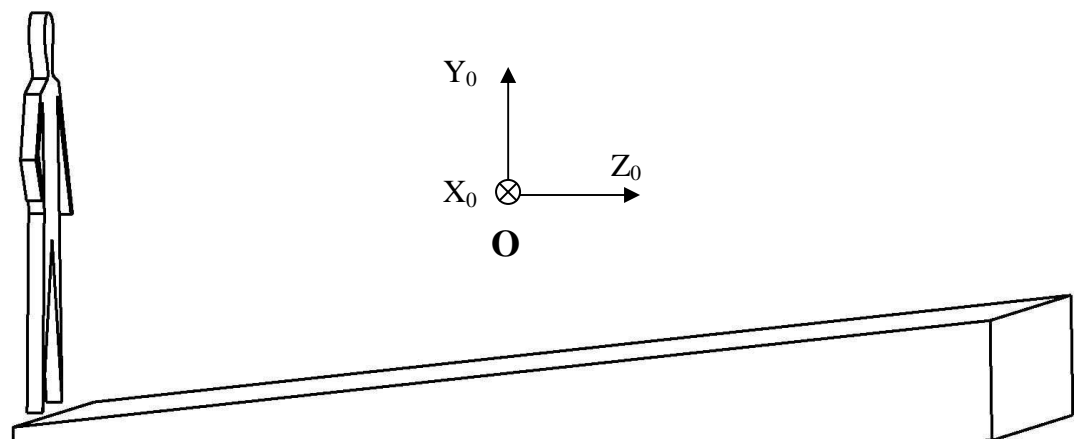
Nous avons utilisé ces données pour rechercher les instants remarquables lors du cycle qui permettent d'analyser qualitativement le geste. Nous nous sommes limités au bas du corps car ce sont les appuis des pieds sur le ski qui nous intéressent dans un premier temps.

Les coordonnées des points relevés sont celles du pied gauche, de l'avant du pied, (AV pied G), du talon, (AR pied G), du genou, (Genou G) et du centre de masse du corps de la skieuse, (C masse).

Nous avons utilisé ces données afin d'établir le déplacement des points caractéristiques réalisé en fonction du temps. Les caméras utilisées étant de 25 Hz, l'intervalle de temps entre chaque image est de 0.04s. La première image est prise après le déclenchement d'une cellule. La première position est donc relevée à 0.04s. Les données correspondent à 35 clichés, soit un temps total de 1.4s.

#### ***1.4.1.5.1 Repère utilisé pour l'analyse du mouvement***

Le repère utilisé  $R_0 (O, X_0, Y_0, Z_0)$ , est un repère fixe dont l'origine est à un mètre du sol, sur le côté droit de la piste, au milieu de la distance parcourue. L'axe  $(O, Y_0)$  est sur la verticale ascendante. L'axe  $(O, Z_0)$  est parallèle au plan moyen d'avancement.



*Figure 19 : schéma du repère utilisé lors de l'analyse*

- Le déplacement horizontal est sur l'axe  $Z_0$ , l'axe sagittal.
- Le déplacement vertical est sur l'axe  $Y_0$ , l'axe vertical.
- Le déplacement latéral est sur l'axe  $X_0$ , l'axe frontal ou transversal.
- Les rotations autour de l'axe frontal : le mouvement se fait dans le plan sagittal autour d'un axe frontal passant par le centre géométrique de l'articulation (si l'axe est au niveau du cou, c'est le mouvement du "oui" avec la tête.)
- Les rotations autour de l'axe sagittal : le mouvement se fait dans le plan frontal (mouvement de la tête en "éventail, oreille vers épaule")
- Les rotations autour de l'axe vertical : le mouvement se fait dans le plan transversal, (c'est le mouvement du "non" avec la tête.)

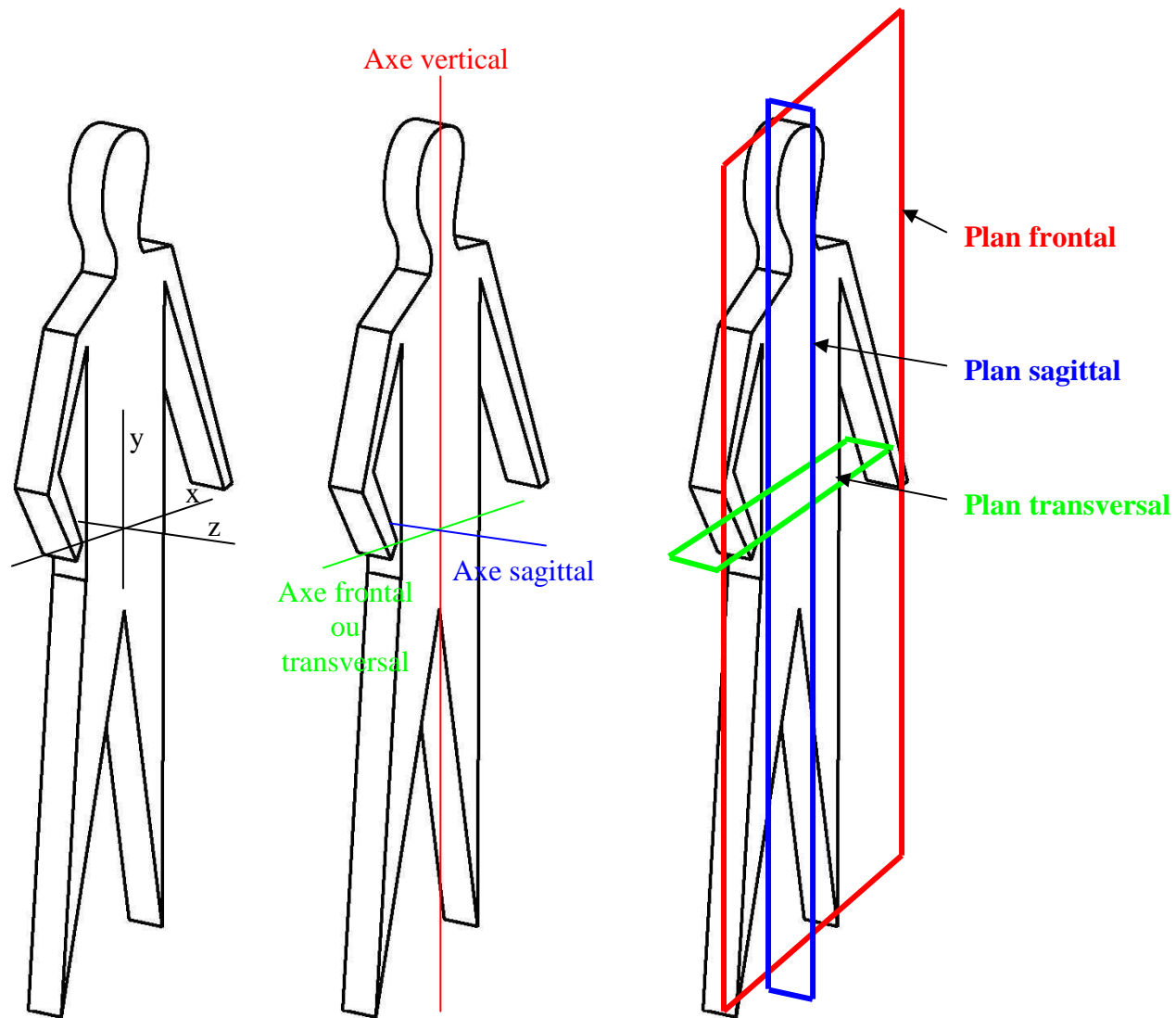


Figure 20 : définition des axes et des plans

### 1.4.1.5.2 Déplacements horizontaux

Le relevé des coordonnées des points nous permet de tracer leur évolution en fonction du temps.

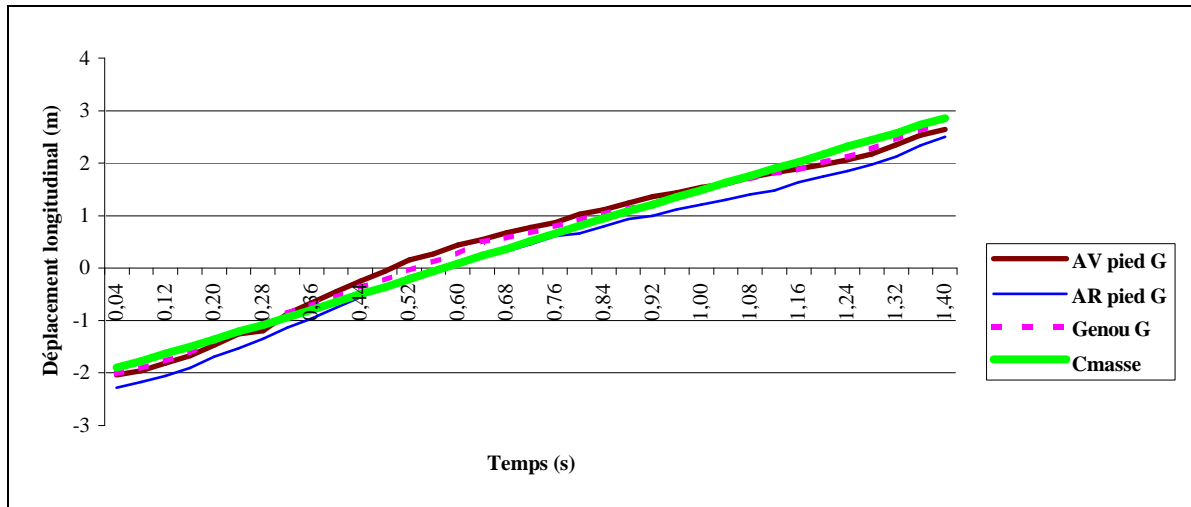


Figure 21 : déplacements horizontaux des points caractéristiques en Z, Rey, 2002 [19].

L'aspect général des courbes de la figure 21, montre que le mouvement est périodique, de faible amplitude et que la vitesse est quasiment constante. L'observation des déplacements des membres de droite confirme cette hypothèse. Cette évolution ne représente pas uniquement une phase d'appui sur la jambe gauche mais aussi une partie du retour.

### 1.4.1.5.3 Déplacements verticaux

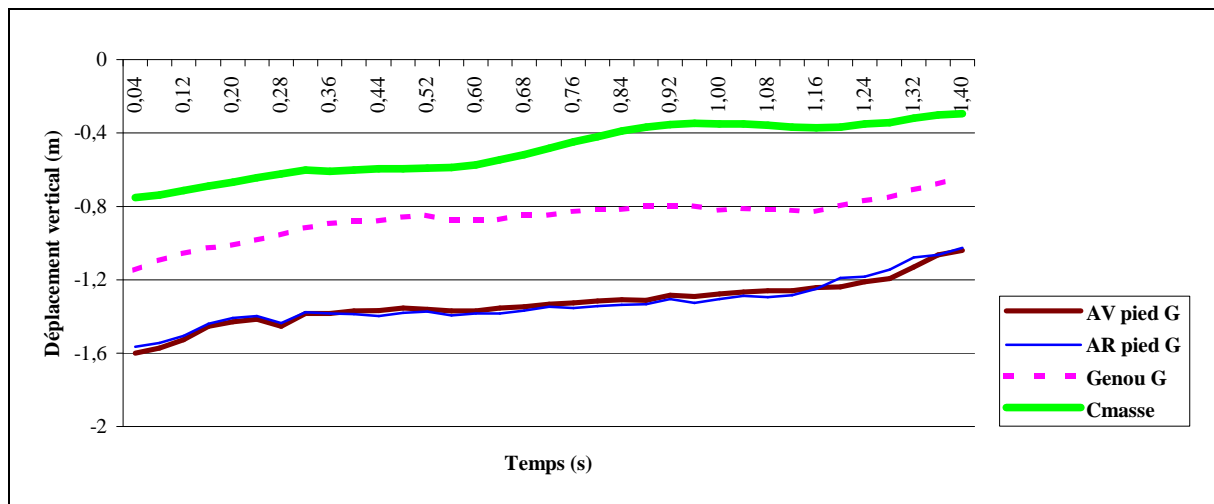


Figure 22 : déplacements verticaux des points caractéristiques en Y, Rey, 2002 [19].

Les mouvements verticaux sont quasiment périodiques, figure 22. L'ensemble du corps est en permanence en train de s'élever. Ceci est cohérent avec l'expérimentation qui s'est déroulée sur une pente ascendante de  $6^\circ$ .

#### 1.4.1.5.4 Déplacements latéraux

La figure 23, montre un comportement quasi périodique. Les différentes parties du corps s'éloignent puis se rapprochent du plan sagittal de déplacement. Ceci correspond à la poussée latérale présente lors du mouvement du pas de patineur qui est une des caractéristiques principales du mouvement. Les écarts les plus importants sont en fin de poussée ; de même, les écarts les plus faibles sont en début de glissement.

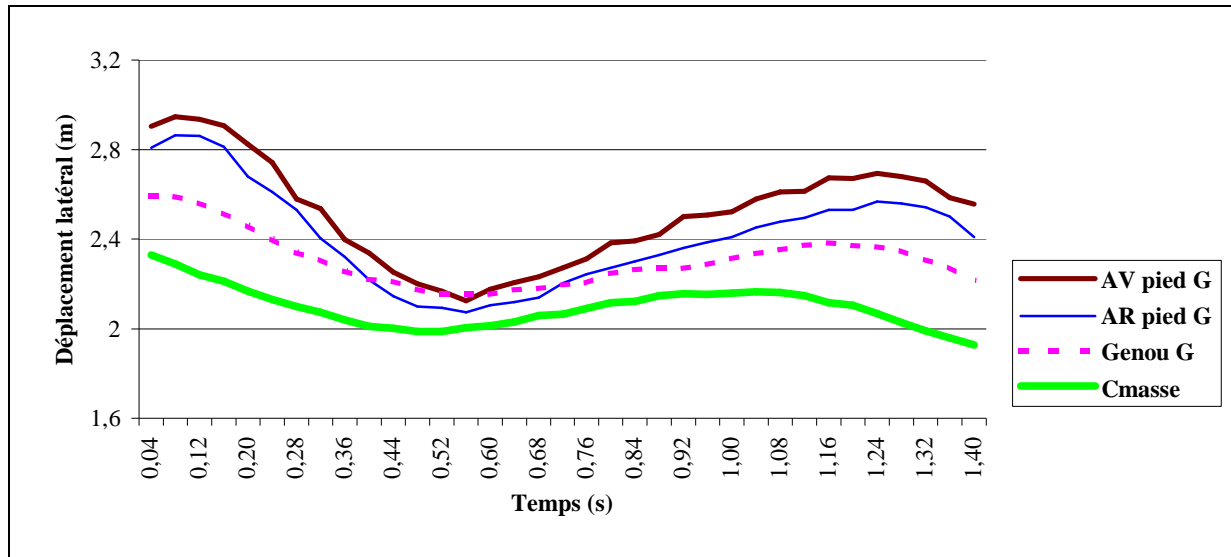


Figure 23 : déplacements latéraux des points caractéristiques en X, Rey, 2002 [19].

Ces trois graphes, figures 21 à 23, établis à partir des résultats d'Anne Ruby [11], permettent de valider le choix de la séquence gestuelle filmée. Le fait que la vitesse soit constante et que le comportement soit périodique traduit un bon choix de cette séquence car elle présente un mouvement continu, sans coupure de rythme pouvant être due par exemple à une faute technique. Elle est donc révélatrice d'une action typique de course.

#### 1.4.1.5.5 Les écarts relatifs en X, Y, Z

Le tableau 3, résume les graphes des écarts relatifs réalisés en XYZ pour l'avant pied (AvP), le talon (ArP), le genou (G) et le centre de masse (CM) de l'appui gauche dans le temps. Les sommets extrêmes des courbes sont illustrés par max et min, ils peuvent être positifs (+) ou négatifs (-).

Les flèches ↗ → ↘ représentent les écarts relatifs (ER) ascendants, stables, descendants et =0 les ER nuls.

= les ER égaux les uns aux autres.

◆————◆ Correspond à des plateaux de stabilité.

		0,54 s	0,56 s	0,58 s	0,60 s	0,90 s	1,01s	1,10 s	1,15 s	1,30 s
<b>En Z</b>	<b>AvP</b>	CM max + G max +			ArP		G=0 ↗ CM ↘		G=0 ↘	ArP min + CM max -
	<b>ArP</b>	CM max + G min -			AvP		AvP=G=C M	G max -	AvP=G	Cm max - AvP min -
	<b>G</b>	AvP max - ArP min +				CM=0 ↘	AvP=0 ↗	ArP max +	AvP=0 ↗	
	<b>CM</b>					G=0 ↗	AvP=0 ↗		AvP=G	AvP max + ArP max +
<b>En Y</b>	<b>AvP</b>			G	ArP	CM max -			ArP=0 ↘	
	<b>ArP</b>			G	AvP	CM max -			AvP=0 ↗	
	<b>G</b>	CM min -					CM		AvP=ArP	
	<b>CM</b>	G min +				AvP max + ArP max +			AvP=ArP	
<b>En X</b>	<b>AvP</b>		G=0 ↘	G max - ArP min + CM min +	G=0 ↗			ArP		CM max + G max +
	<b>ArP</b>			AvP min - G max -				AvP		G max + CM max +
	<b>G</b>		AvP=0 ↗	AvP max + ArP max +	AvP=0 ↘	CM min +				AvP max - ArP max - CM max +
	<b>CM</b>			AvP min - ArP min -		G min -				AvP max - G max - ArP max -

Tableau 3 : tableau récapitulatif des graphes des écarts relatifs réalisés en X, Y et Z pour l'avant du pied, le talon, le genou et le centre de masse de l'appui gauche dans le temps.



L'observation du tableau 3, nous a permis de relever les instants les plus caractéristiques du cycle, que nous allons analyser en utilisant les graphes des écarts relatifs les plus représentatifs.

Nous avons pu déterminer par l'analyse globale de ces graphes, les différentes phases de l'appui qui sont représentées par la figure 24 : l'appui du ski sur la neige débute à 0,54 s et se termine à 1,30 s de la séquence filmée. La durée de l'appui est donc de 0,76 s et se compose d'une phase de glisse de 0,61 s représentant les 80% de l'appui et d'une phase de propulsion de 0,15 s représentant les 20% de l'appui.

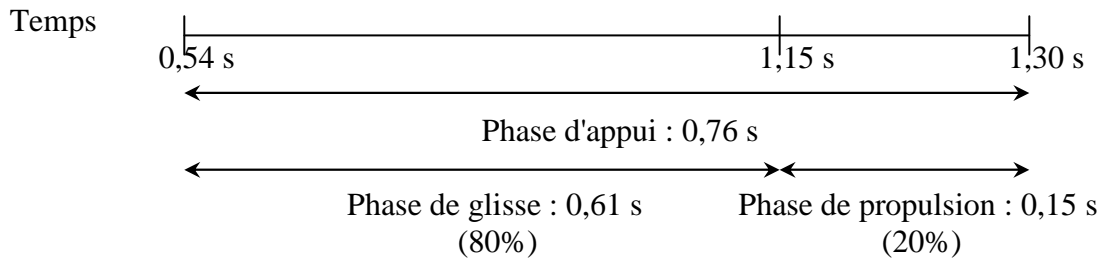


Figure 24 : les différentes phases de l'appui gauche, Rey, 2002, [20].

Pour illustrer le début de la phase d'appui et approfondir notre analyse, nous choisissons le graphe des écarts relatifs entre l'ArP et les autres points caractéristiques en Z, figure 25.

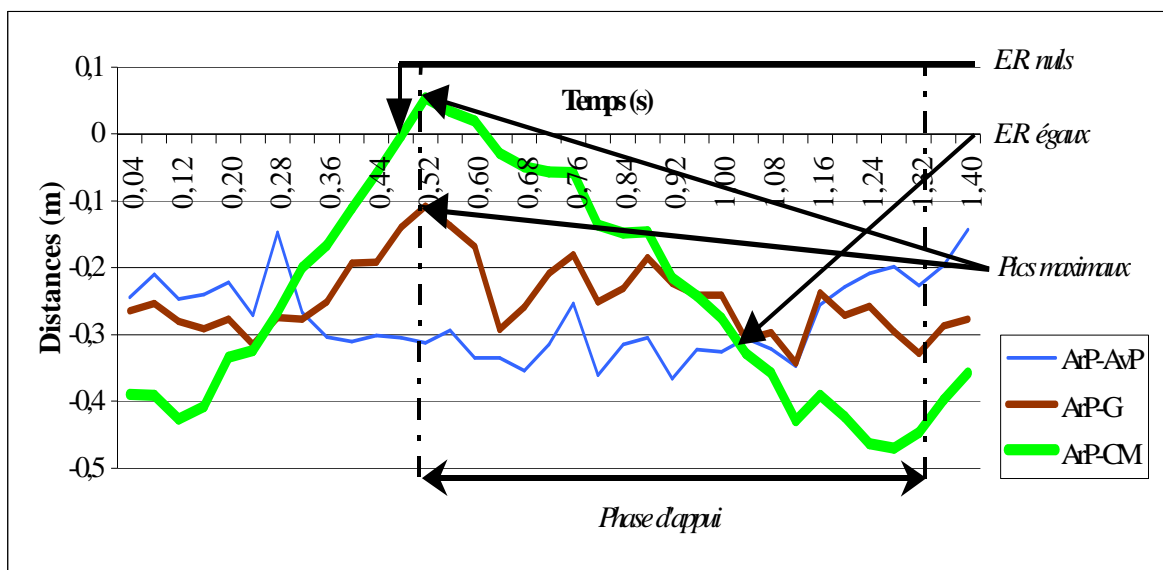


Figure 25 : écarts relatifs entre l'arrière du pied et les autres points caractéristiques en Z, Rey 2002, [19].

Le début se situe à 0,54 s et est représenté par un pic de la courbe des ER ArP-CM. Sur le plan frontal, le CM est derrière le talon et la phase d'appui commence lorsqu'il s'en rapproche. Il est aussi marqué par un pic des ER ArP-G, c'est le moment où le genou est le plus proche du talon et le moment où la flexion du genou est minimale car il n'y a pas extension de la cheville (pas de variation des ER ArP-AvP). Le pied est à plat à l'attaque de la phase d'appui.

Nous relevons aussi dans ce graphe l'instant où les courbes des ER se croisent, à 1,01 s. Il traduit, sur le plan frontal, un alignement corporel AvP, G, CM par rapport à l'ArP. Le CM continue à s'éloigner vers l'avant, il dépasse l'ArP, le genou puis l'AvP : c'est la fin de la phase de glisse.

La fin de la phase d'appui se situe dans l'intervalle de temps de 1,10 s à 1,30 s ; les ER ArP-AvP diminuent rapidement alors qu'ils étaient stables auparavant. Les ER ArP-G et ArP-CM ayant le même comportement, il existe une extension de la cheville (le pied bascule vers la pointe du pied, autour de l'axe frontal, c'est la préparation de l'action en début de la phase de propulsion). Il y a en même temps une extension du genou car les ER ArP-G varient peu.

Le début de la phase de propulsion est plus significative sur le graphe des ER du G avec les autres points caractéristiques en Y, figure 26.

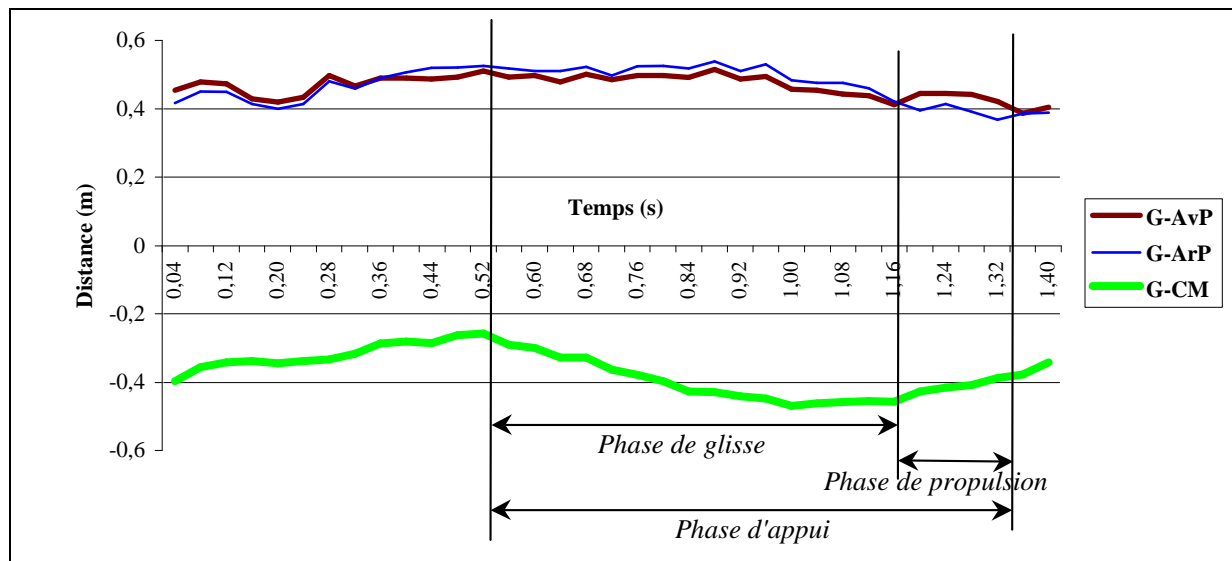


Figure 26 : écarts relatifs entre le genou et les autres points caractéristiques en Y, Rey, 2002 [19].

A 1,15 s, débute la phase de propulsion. Les ER G-AvP ont la même valeur que les ER G-ArP, puis les courbes se croisent. Pendant cet intervalle de temps, il existe un pic de la courbe des ER G-CM en X. Le CM est devant le G et l'AvP afin que la poussée sur l'AvP soit efficace. Il y a extension du G et de la hanche.

Toutefois, les ER entre le genou et les autres points caractéristiques augmentent en X. C'est le genou puis le CM qui se décalent latéralement, avec pour conséquence une diminution des ER G-CM en Y, après un plateau de stabilité. La prise de carre est observée : c'est une poussée latérale de l'AvP qui se propage sur une jambe semi-tendue avec une orientation latérale vers l'intérieur, on parle de carre intérieure. Elle permet l'avancement grâce au CM placé devant l'appui et le transfert sur l'autre jambe. Seule une bascule du pied suivant Y et X est observée. L'AvP ne fait aucun mouvement, ni vers l'extérieur, ni vers l'intérieur (aucun mouvement ni de pronation, ni de supination). Les ER AvP-ArP restent stables pendant la phase de propulsion en X (ER AvP - autres points en X). Le bord intérieur du ski pénètre dans la neige et ainsi le skieur peut pousser sur son ski sans glisser latéralement. L'avancement se réalise par une poussée alternative des deux jambes associée à l'avancée et au recul du CM par rapport à l'appui.

En fin de phase d'appui et pendant la phase aérienne du retour de jambe, l'ArP reste plus haut que l'AvP (ER G - autres points en Y). Ceci est compréhensible car le poids du ski, par gravité, entraîne l'AvP vers le sol dans les phases aériennes, les fixations à deux points de fixations permettent de retenir le ski à la chaussure sous la plante du pied. Le poids du ski et la position de l'axe de fixation sur la chaussure peuvent donc avoir une incidence sur le mouvement.

Des plateaux de stabilité caractérisent aussi le mouvement du pas de patineur. Nous choisissons le graphe des ER entre le G et les autres points caractéristiques en Z et plus particulièrement celui des ER G-AvP pour les illustrer, figure 27.

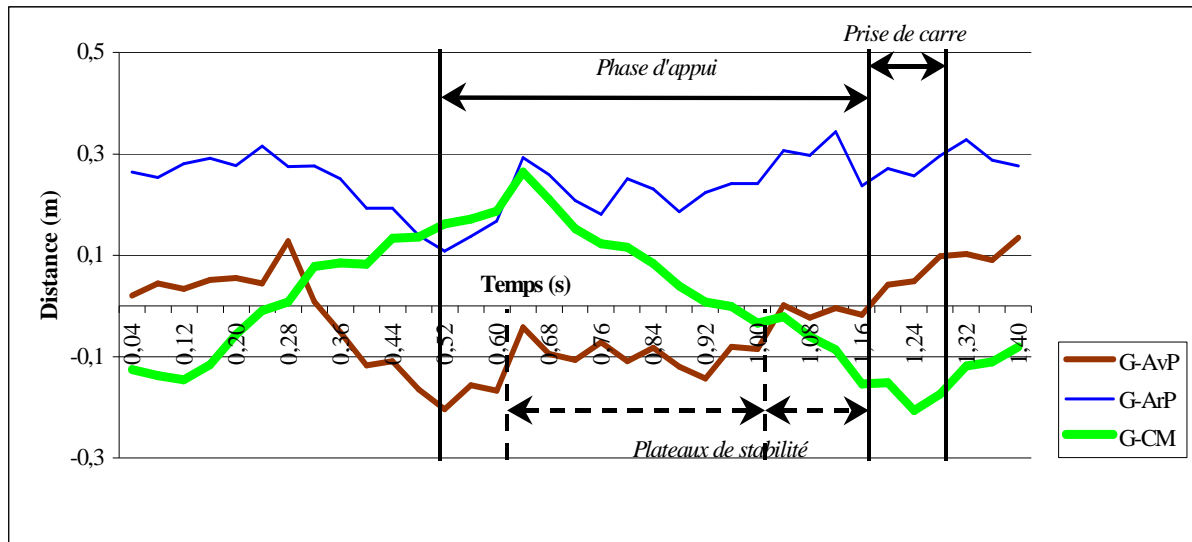


Figure 27 : écarts relatifs entre le genou et les autres points caractéristiques en Z, Rey 2002, [19].

Ils restent à une valeur constante de 10 cm de 0,64 s à 1,04 s alors qu'en même temps les ER G-CM diminuent. Cette stabilité engendrée par le genou permet donc au CM, après avoir été derrière le G, de s'en rapprocher et de le dépasser. Une deuxième valeur constante, correspondant à l'écart G-AvP quasi nul, de 1,06 s à 1,20 s, où le G se situe au niveau de l'AvP, permet aussi une stabilité afin que le CM passe devant le G et puisse se placer vers l'avant afin de recevoir la poussée créée par la prise de carre. Il reste devant le G pour s'en rapprocher avant la fin de la phase d'appui : c'est le début du transfert sur l'autre jambe. Ces plateaux de stabilité apparaissent avant un changement important de placement, le CM se place sur l'axe de poussée de la jambe pour le transfert des forces de contact. On peut penser que cette phase stable est nécessaire à une prise d'information efficace pour un placement articulaire optimum.

L'observation des graphes en X, nous a permis de découvrir une autre prise de carre beaucoup plus légère, en début de la phase d'appui. Nous choisissons pour l'illustrer les courbes des ER AvP avec les autres points caractéristiques en X, figure 28.

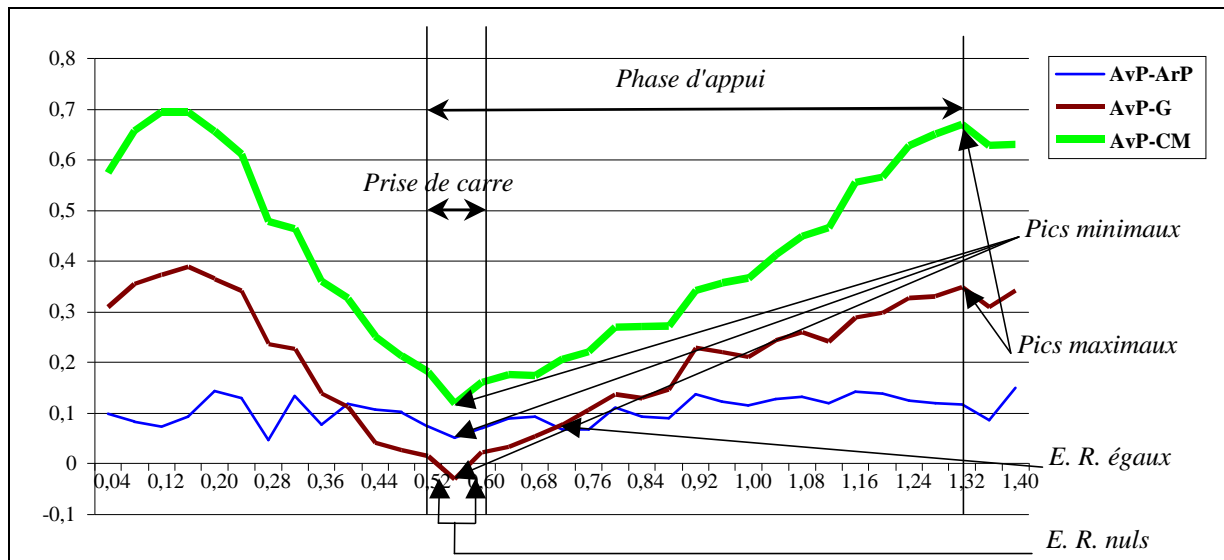


Figure 28 : écarts relatifs entre l'avant du pied et les autres points relevés en X, Rey, 2002 [19].

Les ER nuls sont ceux de AvP-G à 0,56 s et à 0,60 s dont le pic minimum est à 0,58 s. Les ER AvP-ArP et AvP-CM sont les plus proches et forment aussi un pic à 0,58 s. Sur le plan sagittal, le genou est devant l'AvP de 0,56 s à 0,60 s puis il le dépasse. Il dépasse aussi l'ArP à 0,75 s pour se situer entre le CM et l'ArP jusqu'à la fin de la phase d'appui de 0,75 s à 1,30 s. Le ski est bien ouvert sous le corps et les divers pics observés illustrent le ski accrochant la neige sur une jambe semi fléchie, mais il semble que cette fois, ce soit avec la carre extérieure. Toutefois, le mouvement étant exécuté sur une pente de  $6^\circ$ , le ski peut être incliné latéralement. Dans ce cas, le pied ne peut pas être à plat car le ski accroche la neige et il s'agit alors d'une prise de carre intérieure.

Les courbes des ER de l'AvP-G et de l'AvP-CM sont presque identiques. Nous remarquons de faibles variations du CM. En effet, des déplacements latéraux périodiques et importants du CM par rapport au plan sagittal de déplacement entraîneraient de fortes variations de pression, néfastes au glissement.

L'analyse qualitative du pas de patineur nous a permis de mettre en évidence le mouvement dans sa globalité. Nous nous sommes ensuite intéressés à la phase d'appui et plus particulièrement aux phases de glisse et de propulsion qui la constituent. Pour finir, nous avons relevé des instants spécifiques propres au mouvement, tels que : la prise de carre intérieure ou extérieure en début de mouvement et la prise de carre intérieure en fin de mouvement ainsi que les divers alignements corporels et les instants de stabilité lors du geste. Nous considérerons ces instants comme autant de déterminants de la performance à prendre en considération lors de la conception du modèle sur le logiciel. Le comportement du modèle devra traduire ces instants spécifiques afin de les analyser plus précisément au niveau mécanique et biomécanique.

## 1.4.2 Dans le domaine énergétique

En skating, les courses sont de longue durée et font fortement appel au potentiel physiologique du skieur, particulièrement à ses capacités cardio-respiratoires. Des études ont été réalisées sur ce sujet mais notre recherche ne s'intéressera qu'au "coût énergétique". Ce paramètre peut être déterminant quant à l'efficacité du geste.

En effet, comme le précise Leplat, 1989 [21]. "Une activité sera dite d'autant plus efficace qu'elle permettra d'atteindre à moindre coût le même niveau d'efficacité."

Le logiciel utilisé pour la modélisation du décalé peut nous donner un bilan énergétique du mouvement. La variation d'un paramètre du modèle, associé à la dépense énergétique peut justifier la performance. Cependant le geste économe n'est pas forcément performant.

Le modèle construit permet d'obtenir les forces extérieures au cours du mouvement ainsi que les forces internes, nécessaires à tout bilan mécanique.

La recherche de l'efficacité maximale peut alors se traduire de deux manières différentes :

- A performance donnée, recherche du « coût énergétique » minimal.
- A capacité énergétique donnée, recherche de la performance maximale.

### 1.4.2.1 Les repères utilisés

- Repère  $R_0$  ( $O, X_0, Y_0, Z_0$ ), fixe, considéré comme galiléen.  $Y_0$  est la verticale ascendante.

- Repère  $R_1$  ( $CM, X_1, Y_1, Z_1$ ), d'origine le centre d'inertie du skieur (ou centre de masse  $CM$ ). **Ce repère est en translation par rapport au repère  $R_0$  ;**

- Repère  $R_s$  ( $CM, X_s, Y_s, Z_s$ ), d'origine le centre d'inertie du skieur.  $Y_s$  est la verticale ascendante,  $Z_s$  se trouve à chaque instant dans le plan constitué par l'axe ( $CM, Y_s$ ) et la vitesse instantanée du centre de masse. Autrement dit, ce repère est en rotation autour de l'axe ( $CM, Y_1$ ) de manière à ce que la vitesse du centre de masse soit contenue dans le plan ( $CM, Y_s, Z_s$ ).

### 1.4.2.2 Bilan des efforts lors du geste

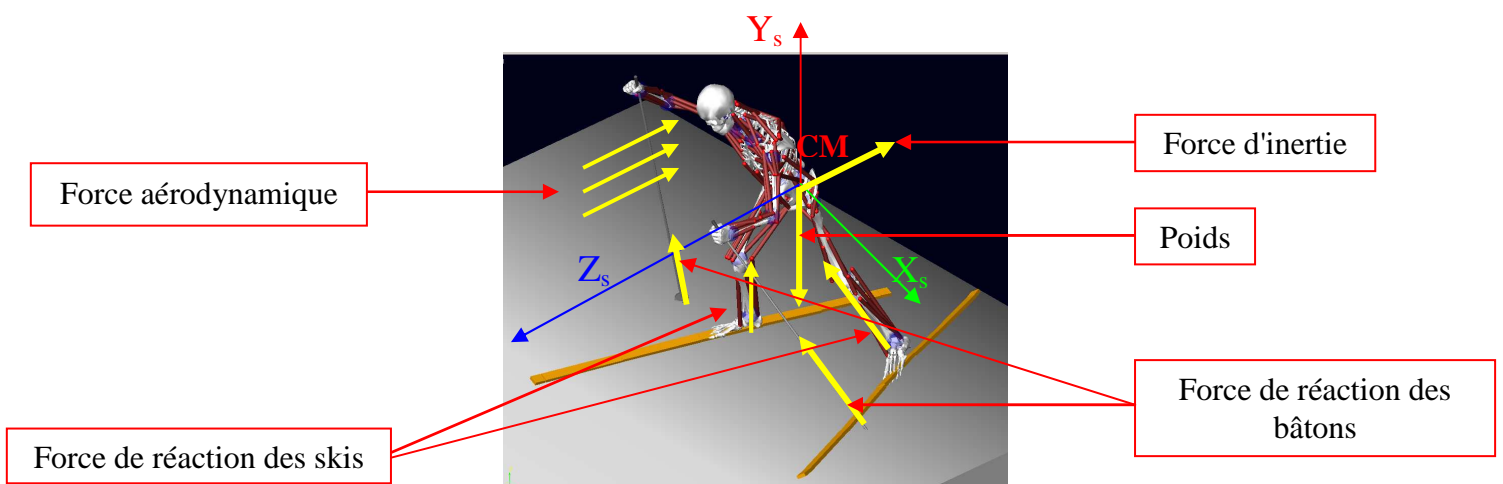


Figure 29 : bilan des forces

Le système étudié est défini par le skieur, les bâtons et les skis. Les efforts sont de deux types, ils sont schématisés figure 29.

- **Les forces dépendant de la masse du skieur**

- . Le poids.
- . La force d'inertie.

Le poids est pris en compte par le logiciel, les forces d'inerties sont également calculées.

- **Les actions extérieures**

- . Force du sol sur les deux skis.
- . Force du sol sur les deux bâtons.

Ces forces de contact sont calculées par le logiciel. Néanmoins elles nécessitent un réglage fin des paramètres de contact (coefficients de frottement, coefficients de pénétration, raideur, amortissement, etc.). Le réglage de ces paramètres est décrit au paragraphe 3.4.2. et en annexe 7.

- . Force aérodynamique.

Elle dépend de la traînée, de la surface de pénétration du skieur dans l'air et de sa vitesse. La force aérodynamique due au seul déplacement du skieur est faible : 0.4N, Coulmy, 2000 [12]. Dans notre étude, nous considèrerons que cette force est négligeable devant les autres forces et qu'il y a absence de vent.

#### 1.4.2.2.1 Actions d'un bâton

Pour étudier qualitativement les forces qui agissent sur le bâton, nous prendrons l'hypothèse simplificatrice de deux liaisons ponctuelles situées aux extrémités A et B du bâton. En effet le skieur doit forcer dans l'axe du bâton (au point A) car l'action d'un couple serait très faible sur le bâton tout en étant traumatisante pour l'articulation du poignet. Le bâton est donc soumis à deux forces égales et opposées, figure 30.

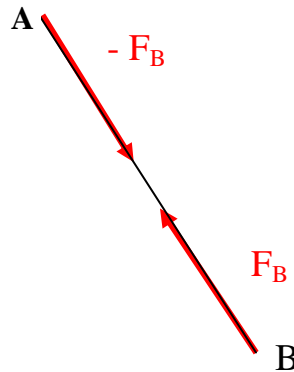


Figure 30 : équilibre du bâton gauche

Les composantes de la force du bâton  $F_B$  dans le repère  $R_s$  sont alors figure 31 :

$$F_B \begin{cases} F_x \text{ nommée force latérale} \\ F_y \text{ nommée force verticale} \\ F_z \text{ nommée force horizontale ou force propulsive} \end{cases}$$

Plus grande est la composante horizontale, plus le skieur va être propulsé vers l'avant. La force verticale affecte le mouvement de bas en haut, elle ne participe pas à l'avancement. Quand à la composante latérale, elle est liée au transfert du poids du skieur d'un ski sur l'autre et peut affecter le mouvement.

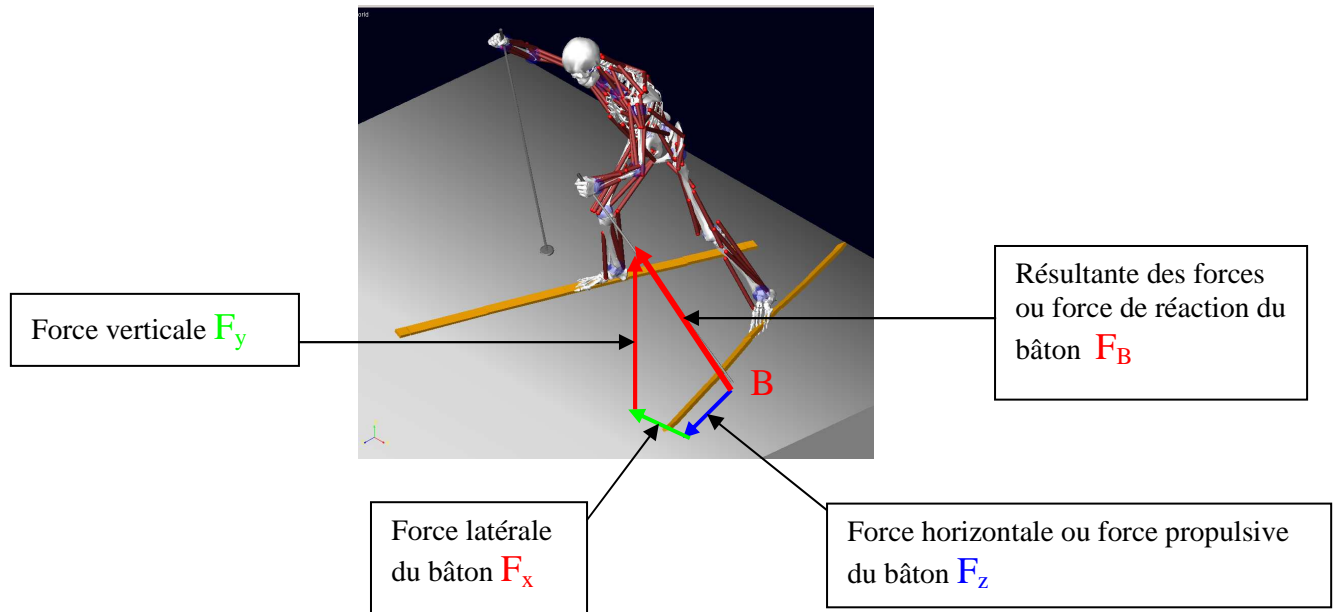


Figure 31 : force de réaction du bâton gauche

#### 1.4.2.2 Action d'un ski

Comme nous l'avons fait précédemment pour le bâton, nous présentons l'action des skis de manière qualitative. Le repère utilisé est  $R_s$ .

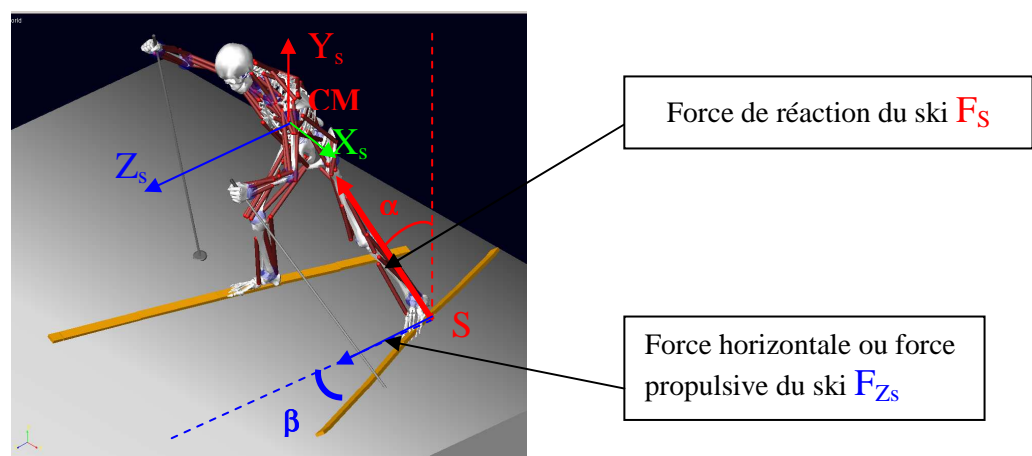


Figure 32 : force de réaction du ski gauche

La force de réaction du ski se décompose également en une composante propulsive (horizontale) selon l'axe  $Z_s$  et en une composante verticale.

La composante sur l'axe  $Z_s$  est appelée force propulsive. L'angle  $\alpha$  détermine la perpendiculaire au sol par rapport au ski et l'angle  $\beta$  détermine l'orientation du ski par rapport à l'axe de déplacement.

$$F_{\text{propulsive}} = F_{\text{ski}} \sin \alpha \sin \beta$$

En montée, le skieur a des difficultés pour conserver sa vitesse, sa réponse motrice est d'augmenter la force propulsive en augmentant l'angle d'orientation du ski  $\beta$ .

La spécificité du pas de patineur est de se réaliser dans les trois dimensions de l'espace. Si la force propulsive semble primordiale à l'avancement, les deux autres composantes, sont peu étudiées dans la littérature, toutefois la composante latérale peut être déterminante dans l'efficacité du geste. En effet, la prise de carre du ski, en début et en fin de phase d'appui, inhérente à la performance, correspond à une action latérale de la jambe, associée à une rotation sagittale du pied.

Lors de l'analyse des résultats, il sera intéressant de relever les forces latérales car elles pourraient jouer un rôle important lors de la prise de carre mais aussi lors du transfert du poids du corps d'une jambe sur l'autre où le centre de gravité du skieur suit une trajectoire sinusoïdale (figure 18) dont le déplacement latéral est de plus ou moins grande amplitude. Les calculs de ces forces seront facilités grâce au logiciel, en effet nous pourrons relever à chaque instant du geste, les forces de contact et leurs composantes.

### 1.4.2.3 L'énergie mécanique

Pour effectuer le calcul de l'énergie cinétique manuellement, on simplifie considérablement la tâche en utilisant le théorème de Koenig. On considère le mouvement d'entraînement comme étant celui du repère  $R_1$  (cf § 1.4.2.1) qui, rappelons le, est en mouvement de translation par rapport au repère galiléen. On calcule alors l'énergie cinétique du centre d'inertie CM du skieur, celle-ci est appelée énergie de transport. Puis on calcule l'énergie du skieur dans son mouvement par rapport au repère  $R_1$ . Dans le domaine étudié, cette dernière énergie est traditionnellement appelée « énergie de gesticulation ». L'énergie cinétique totale est la somme de ces deux énergies, (il est très difficile de calculer les énergies cinétiques de chacun des membres d'un corps humain en mouvement sans l'aide d'un logiciel spécialisé), annexe 1.

Les études sur l'évaluation des énergies mécaniques se basent le plus souvent sur le seul déplacement du centre de masse (énergie de transport), rarement sur le mouvement des segments (énergie de gesticulation).

Le théorème de l'énergie cinétique ( $E_c$ ) fait intervenir à la fois les travaux des forces externes ( $WF_{\text{ext}}$ ) et les travaux des forces internes ( $WF_{\text{int}}$ ) :

$$\Delta E_c \text{ totale} = WF_{\text{int}} + WF_{\text{ext}}$$

Une approche globale de ce problème consiste à appliquer le théorème de l'énergie cinétique pour évaluer le plus correctement possible les travaux de l'ensemble des forces en jeu ainsi que l'énergie cinétique de gesticulation dépensée dans le geste. On peut ainsi remonter jusqu'aux travaux des forces internes et accéder à la puissance mécanique du sujet caractérisant ses propres capacités à réaliser le geste [13].

L'énergie potentielle de hauteur dépend de la trajectoire du skieur et de la fluctuation du centre de masse par rapport à la trajectoire du mouvement.



Les auteurs qui suivent, ont calculé les sommes des variations d'énergie cinétique et potentielle entre chaque image pour le décalé avec des résultats différents, ils sont en désaccord sur certains points. Les valeurs comparées sont les variations d'énergie cinétique de transport calculées selon les trois axes : horizontal (mouvements antéro-postérieurs), vertical et latéral, lors du cycle.

Pour Ruby [11], les valeurs sont différentes d'une skieuse à l'autre de 10% à 12%. Pour une skieuse de 60 kg, elle trouve les valeurs suivantes dans le tableau 4.

$\Delta E_c$ horizontale	$\Delta E_c$ latérale	$\Delta E_c$ verticale	$\Delta E$ cinétique	$\Delta E$ potentielle
295 J	82 J	19 J	314 J	9 J

*Tableau 4 : variation d'énergie cinétique de transport selon les trois axes X, Y et Z et variation d'énergie cinétique et potentielle de hauteur*

Les variations de vitesse entraînent une augmentation importante de dépense d'énergie Normalisés à une vitesse de 3 m/s, les résultats obtenus sont :

$\Delta E$ horizontale	$\Delta E$ latérale	$\Delta E$ verticale	$\Delta E$ cinétique	$\Delta E$ potentielle
264 J	82 J	19 J	280 J	9 J

*Tableau 5 : variation d'énergie cinétique de transport selon les trois axes X, Y et Z et variation d'énergie cinétique et potentielle de hauteur, normalisées à une vitesse 3m/s*

Coulmy [12] donne des valeurs moyennes des énergies sur un échantillon de 12 skieurs.

$\Delta E$ horizontale	$\Delta E$ latérale	$\Delta E$ verticale	$\Delta E$ cinétique	$\Delta E$ potentielle
228 J	83 J	8 J	279 J	41 J

*Tableau 6 : valeurs moyennes des variations d'énergie cinétique de transport selon les trois axes X, Y et Z et d'énergie cinétique et potentielle de hauteur.*

Les résultats trouvés par ces auteurs sont un peu différents ; l'énergie dépensée sur l'axe horizontal est la plus importante, vient ensuite la composante latérale puis la composante verticale.

Restons prudents quant à ces résultats car comme le montre une autre étude de Coulmy [12], une faute technique peut faire varier l'énergie cinétique du simple au double. Il s'agissait de faire la comparaison de deux passages d'un skieur sur la même portion de piste. A une vitesse moyenne identique de  $3.8 \text{ m.s}^{-1}$ , l'amplitude du cycle est de 4.66 m pour le premier passage et de 4.95 m pour le second caractérisé par une faute technique due à l'adhérence du ski.

	$\Delta E$ cinétique de transport	$\Delta E$ cinétique gesticulation	$\Delta E$ potentielle
Passage 1	78 J	474 J	456 J
Passage 2	166 J	895 J	396 J

*Tableau 7 : variation des énergies de transport, de gesticulation et potentielle de hauteur lors d'une faute technique*

Certains auteurs (Norman 1985 [21], 1987 [22], Leplanquais 1995 [23], Minetti 2000 [24]) émettent l'hypothèse d'un transfert d'énergie potentielle en énergie cinétique, au niveau des

mouvements pendulaires des segments libres en retour d'appui ou en reprise d'appui. Ils seraient susceptibles de créer de l'énergie cinétique à partir de l'énergie potentielle. Toutefois, il est nécessaire de rester prudent car un segment libre (partie du corps apparemment non concernée par l'action en cours) ne peut pas être considéré comme un pendule simple. Pour le geste étudié, la tête peut être considérée comme un segment libre ainsi que les bras et les jambes lors de leur retour aérien.

Contrairement aux constats de plusieurs auteurs (Frederick 1987 [25] et Ruby [11]), Coulmy [12] trouve une différence significative au niveau de l'énergie mécanique totale et notamment au niveau de l'énergie cinétique de transport et de gesticulation. Les variations de vitesse sur l'axe horizontal impliqueraient une grande production d'énergie. Une variation de vitesse de 1 m/s entraîne une variation d'énergie dix fois plus importante selon l'axe longitudinal que selon l'axe latéral.

Les résultats de Coulmy [12], laissent à penser que l'énergie cinétique de transport est prépondérante dans la production totale d'énergie mécanique mais que l'énergie de gesticulation à cause de l'énergie cinétique de gesticulation de translation n'est pas négligeable.

Il montre aussi que lors d'un troisième passage, caractérisé par le même type de faute, le skieur a produit plus d'énergie pour obtenir une vitesse inférieure. " Le taux final de 12% à 18% d'énergie mécanique produit en plus n'est certes pas convertible en énergie métabolique mais il est permis de penser qu'une faute semblable répétée souvent sur la totalité d'une course, conduit à un surcoût énergétique non négligeable et pénalisant."

Toutefois, ces travaux ne prennent pas en compte les forces de frottement et les forces aérodynamiques qui font aussi parties des forces extérieures exercées sur le système. Les auteurs ont préféré tout de même les négliger.

Nous remarquons donc l'importance de la technique au niveau de la vitesse mais aussi au niveau de la consommation énergétique. L'orientation optimum des skis constitue un facteur d'efficacité mais aussi d'économie lors du décalé. Dans notre étude, le degré de prise de carre lié à l'orientation de la surface du ski avec la neige, modifie grandement la direction de la force de contact et devrait apparaître comme un déterminant important de la performance. De plus, le bilan énergétique du cycle devra impérativement être mis en relation avec la vitesse moyenne du skieur pour vérifier si la diminution ou l'augmentation d'énergie est profitable ou non à l'efficacité du geste. Nous pouvons dans ce cas entrevoir l'ambiguïté de la notion du coût énergétique souvent défini par les physiologistes comme l'énergie métabolique par unité de longueur parcourue. Une évolution du coût énergétique n'entraînant pas forcément une évolution de la performance.

$\text{L'efficacité mécanique} = \text{travail physique} / \text{coût énergétique}$
---

L'amélioration de l'efficacité mécanique serait due à une diminution du coût énergétique ou / et une augmentation du travail physique, résultat d'une force par une distance. L'amélioration du travail physique se traduirait par une meilleure technique, une orientation des forces plus efficace et une diminution de mouvements parasites.

La notion d'efficacité et d'économie sont des notions doubles de part leur aspect quantitatif et / ou qualitatif.

Dès 1963, Knapp [26], définit l'habileté comme "la capacité à produire un résultat prédéterminé avec un maximum de certitude et un coût énergétique minimum."

Un autre paramètre pourrait aussi personnaliser la production du sportif, celui de rendement énergétique qui serait le rapport, pour une allure donnée, entre les forces internes effectivement mise en jeu et l'énergie métabolique nécessaire.

#### 1.4.2.4 L'énergie métabolique

Nous remarquons que le coût énergétique en skating varie en fonction de trois facteurs principaux :

- les résistances au glissement entre le ski et la neige qui dépendent essentiellement de la température, de l'hygrométrie de la neige et du degré de métamorphose des cristaux de neige ;
- les résistances aérodynamiques (négligeables compte tenu de la vitesse peu élevée de la skieuse et par l'absence de vent) ;
- la force de pesanteur.

Le coût énergétique représente une quantité d'énergie consommée par unité de distance parcourue. Il est caractérisé par le rapport entre l'énergie chimique contenue dans les substrats et la distance parcourue. Il dépend à la fois du rendement musculaire et de l'habileté technique du sujet. La mesure de l'énergie libérée lors de la dégradation des substrats peut être réalisée par la méthode de thermochimie respiratoire. Le principe de cette méthode repose sur la connaissance de l'équivalent énergétique du litre d'oxygène consommé lorsqu'un type particulier de substrats est oxydé. Un litre d'oxygène consommé correspond à 21.3 kJ d'énergie chimique dégradée pour les glucides et 19.6 kJ pour les lipides. Ces chiffres demeurent un sujet de controverses dans la littérature scientifique, toutefois, ils peuvent nous servir d'ordre de grandeur pour vérifier la validité du modèle dynamique.

Le coût énergétique est généralement normalisé en fonction de la masse corporelle du sujet et exprimé en  $J.m^{-1}.kg^{-1}$ . Il peut aussi être exprimé en  $O_2ml.m^{-1}.kg^{-1}$ .

Saïbene et al. 1989 [27], par des mesures directes aboutissent à un coût énergétique plus faible de 15% à 35% en technique de pas de patineur qu'en technique classique, à force de frottement égale. Ils proposent des équations permettant de prédire une dépense énergétique en pas alternatif et en pas de patineur (ml/min/kg) sur terrain plat.

En pas alternatif  $-23.09 + 0.189 V + 0.62 F$

En pas de patineur  $-32.63 + 0.171 V + 0.68 F$

V est la vitesse en  $m.min^{-1}$

F est la force de frottement en N, généralement comprise entre 10N et 60N

Grâce aux résultats obtenus, ils réalisent un nomogramme, figure 33, pour calculer la consommation d'oxygène en fonction de la vitesse et de la force de frottement.

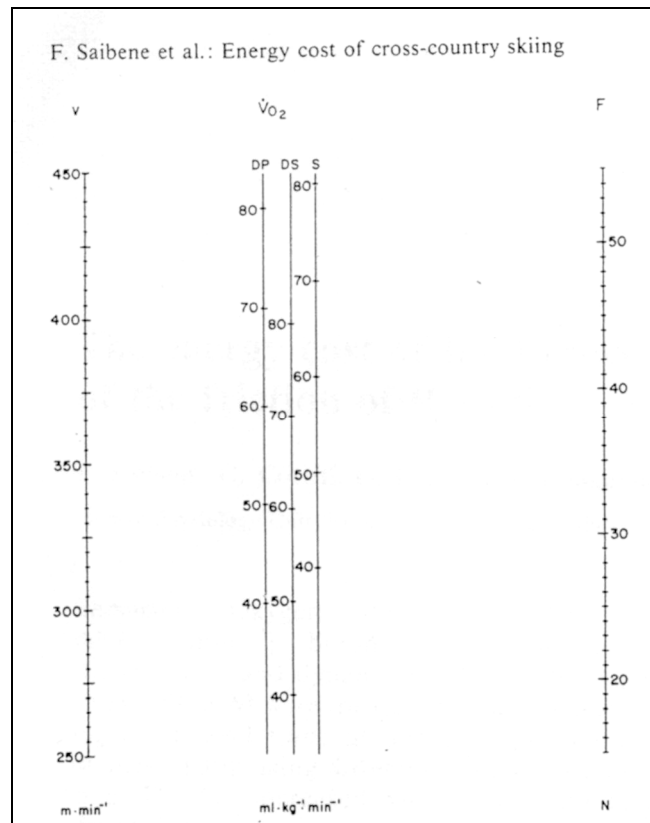


Figure 33 : nomogramme pour calculer la consommation d'oxygène des différentes techniques de skating (DP : double pole, DS : diagonal stride, S : skating technique) en fonction de la vitesse et de la force de frottement.

Pour une valeur de force de frottement moyenne de 35 N

	Force de frottement moyenne de 35N			
VITESSE (m.min <sup>-1</sup> )	285	344	405	450
VO <sub>2</sub> (ml. kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	40	50	60	68

Tableau 8 : consommation d'oxygène en fonction de la vitesse pour une force de frottement de 35 N

En montée, il existe un surcroît de dépense énergétique (Es en J). L'équation suivante permet de l'estimer :

$$E_s = M g \Delta_H T^{-1} \eta^{-1}$$

- M : masse de l'athlète et du matériel (kg)
- g : accélération de la pesanteur (m s<sup>-2</sup>)
- $\Delta_H$  : hauteur de l'élévation de M (m)
- T : temps de l'élévation (s)
- $\eta$  : rendement musculaire sans dimension

Grâce aux équivalences suivantes :

- 1 l d'O<sub>2</sub> = 21 kJ
- 1kCal = 4.186 J
- 1J = 0.1 kg m

En utilisant ces équivalences, nous pouvons obtenir à partir de la dépense d'énergie mécanique, la dépense de l'énergie métabolique.

Cette conversion est intéressante car la dépense énergétique serait l'un des facteurs déclenchant d'un changement de mode de locomotion. Hoffman M.D. 1992 [28], détermine une augmentation de 10% à 35% des vitesses moyennes maintenues en compétition avec le pas du patineur sur le plat par rapport au pas classique. Ce gain entraîne une réduction du coût énergétique de 15% à 35% à résistance de friction égale (Saibene et al. [27]). Ce facteur pourrait expliquer l'engouement pour le skating des skieurs de fond.

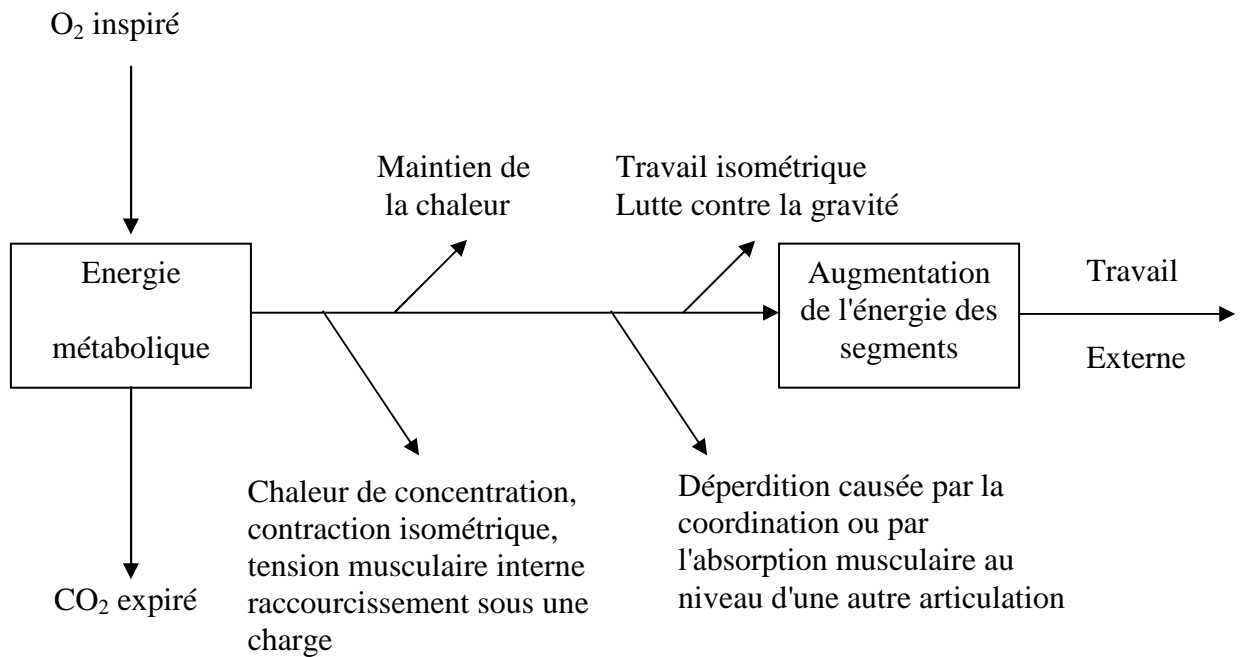
Quant aux différentes techniques de skating, Millet G. 1997 [29], dans son étude, présente la relation qui peut exister entre la performance et le coût énergétique aérobie, pour le décalé, le pas de vitesse et le pas de un, sur le plat.

Le coût énergétique aérobie peut être défini succinctement par la consommation faisant intervenir uniquement le métabolisme aérobie : le mécanisme de phosphorylation (reconstitution de l'ATP) s'effectue par l'intermédiaire de l'oxygène. Les réactions du métabolisme aérobie dépendent de l'approvisionnement en oxygène. La mesure de la consommation d'oxygène permet une évaluation du métabolisme énergétique par spirométrie. Millet G. trouve entre ces deux facteurs (performance et coût énergétique) un coefficient de corrélation significatif pour le pas de un et le pas de vitesse mais pas pour le décalé. Il explique ces résultats par le rôle joué par le haut du corps et les membres inférieurs dans la technique du décalé et par le peu de variation de vitesse du centre de gravité.

Le coût énergétique le plus bas est celui du décalé ( $161 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{km}^{-1}$ ), du pas de vitesse ( $163 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{km}^{-1}$ ) et du pas de un ( $168 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{km}^{-1}$ ).

Hoffman et Clifford 1990 [30], ont trouvé un coût énergétique du décalé de  $177 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{km}^{-1}$ . Mognoni et al. 2001 [31], trouvent lors d'une compétition des valeurs comprises entre 162.1 et  $147.7 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{km}^{-1}$  quelque soit la technique de patinage utilisée (la consommation d'oxygène est mesurée et reportée à la vitesse).

Ces connaissances scientifiques peuvent être utiles à notre travail et nous permettre de vérifier la validité du modèle réalisé. Toutefois, il serait intéressant de trouver une relation entre énergie métabolique globale et énergie mécanique totale dépensée mais l'une permet peu de rendre compte de l'autre. Il s'avère difficile voire impossible d'évaluer toutes les composantes du coût énergétique global. Le schéma de D. A. Winter, décrit par A. Junka [13], figure 34, résume bien ce problème.



*Figure 34 : flux de l'énergie du niveau métabolique jusqu'au travail mécanique externe. L'énergie est dégradée en chaleur associée au processus contractile ou par insuffisance à la suite de sa conversion en énergie mécanique.*

Ces connaissances scientifiques révèlent aussi un paramètre déterminant dans la performance, celui des résistances de frottement entre le ski et la neige. Bien que le décalé se réalise sur piste damée, la température, l'hygrométrie de la neige et le degré de métamorphose des cristaux de neige induiront un certain niveau de résistance à l'avancement. Le skieur s'en informe toujours pour mettre sur ses skis le fart adapté voire même à l'heure actuelle, pour choisir sa paire de ski adaptée, plus ou moins rigide. Des notions sur la tribologie sont nécessaires et nous permettront de créer et de faire varier le coefficient de frottement d'une manière réaliste lors de la mise en situation du modèle dynamique.

### 1.4.3 Dans le domaine de la tribologie

Les frottements du ski de skating sur la neige étant très spécifiques et étant l'un des facteurs les plus influents sur l'efficacité du mouvement, il nous paraît intéressant d'étudier l'interface ski/neige. L'échauffement du ski sur la neige crée une pellicule d'eau sous le ski. Son évacuation va conditionner la glisse du ski.

Pour optimiser cette interface nous ferons une analyse rapide des divers types de neige que peut rencontrer le skieur de skating et du matériel adéquat proposé.

#### 1.4.3.1 Caractéristiques mécano-physiques des différents types de neige

Les caractéristiques des différents types de neige ont une influence sur les choix tactiques du skieur de skating : type de matériel, de fart, gestion de ses potentialités physiques par rapport aux difficultés que peuvent entraîner les conditions climatiques...

Les connaissances, liées aux différents types de neige, leur formation, leur différence, leur métamorphose au sol, leurs propriétés physiques et mécaniques ainsi que l'influence des

conditions atmosphériques, sont traités en annexe 2, elles sont issues d'un site internet de l'association nationale des professionnels de la neige de culture ([www.anpnc.com](http://www.anpnc.com)) 2007 [32]. Beaucoup de critères entre en jeu sur la nature du sol, il est important de les connaître mais il serait vain, de part le coté aléatoire de ces critères dans une compétition, de vouloir s'adapter à tous. Le plus classique rencontré en skating est une neige dure et froide dont les grains sont réunis par cohésion de regel. Lorsqu'il neige, le ski s'enfonce dans la neige fraîchement tombée mais traverse cette couche pour prendre appui sur la piste damée.

### 1.4.3.2 Caractéristiques techniques du ski

#### 1.4.3.2.1 Structure du ski

Il existe trois grands types de constructions de ski de fond, tableau 9 :

Sandwich noyau MOUSSE	Sandwich noyau LAMELLE VERTICALE	Sandwich noyau NID D'ABEILLE / AIR CORE
<p><b>Principe :</b> Le noyau est moulé par injection puis assemblage à la semelle et au cap par empilement.</p>	<p><b>Principe :</b> Noyau lamellé collé vertical. Les lamelles peuvent être en bois ou en bois et fibre de verre. On trouve aussi des systèmes de canaux d'air pour alléger le ski.</p>	<p><b>Principe :</b> Le noyau est constitué d'une multitude d'alvéoles permettant d'être constitué jusqu'à 80% d'air.</p>
<p><b>AVANTAGE :</b> Bon rapport solidité / poids</p>	<p><b>AVANTAGE :</b> Plus solide mais aussi plus lourd. Le système à canaux d'air permet de gagner du poids.</p>	<p><b>AVANTAGE :</b> Le plus léger mais aussi le plus fragile Réservé pour la recherche de performance</p>

Tableau 9 : trois types de construction de ski de fond 2003 [33].

#### 1.4.3.2.2 Rigidité du ski

Un ski rigide en torsion sur toute sa longueur améliore considérablement le rendement (peu de perte de restitution due à la déformation). Toutefois, le skieur, en fonction de sa force et des conditions climatiques, choisira un ski plus ou moins rigide. Un ski raide déforme plus la piste et sera donc plus efficace sur piste damée ou gelée que sur neige fraîche non compressée où il va s'enfoncer à chaque foulée. A contrario, un ski moins raide n'a peut être pas un rendement optimum sur neige gelée mais il permet de bien skier sur des neiges différentes.

Un ski plus souple avec un cambre prononcé offrira un effet de ressort plus important qui peut aider au transfert du poids du corps d'une jambe sur l'autre.

### 1.4.3.2.3 Semelle du ski

Ce sont les mêmes matériaux qu'en ski alpin, des semelles extrudées ou des semelles à haut, voire très haut, poids moléculaire, (matériaux plastiques les plus denses).

Il existe différents types de matériaux pour la semelle : polyuréthane, polyéthylène ultra haut poids moléculaire (PEUHPM), etc. Ce type de matériau polymère possède de bonnes caractéristiques de glisse avec un coefficient de frottement sur neige très faible : 0.02/0.15. D'un point de vue physico-chimique, il présente de bonnes propriétés d'hydrophobie de par sa conception paraffinique (angle de contact d'une goutte d'eau = 90°) et d'un point de vue mécanique, il possède une bonne dureté ainsi qu'une très grande résistance à l'abrasion, Ducret et coll. 1971 [34].

La forme de la semelle est également importante. En skating, le fait de réaliser des prises de carre permet de s'affranchir du système anti-recul du style classique (ski avec écailles) et donc d'utiliser des semelles lisses. Toutefois, elles comportent des rainures longitudinales dont les formes varient selon les skis. La semelle n'est pas parfaitement lisse, sa rugosité due à des micro-aspérités contribue à :

- diminuer la surface de contact et le frottement (des molécules d'eau se logent dans les espaces formés par les aspérités) ainsi, la quantité d'énergie nécessaire pour faire fondre la neige sous le ski est moindre.
- permettre une meilleure évacuation du surplus d'eau sous le ski, au même titre qu'un pneu de F1 évoluant sous la pluie.
- améliorer le guidage du ski.

Sur un ski de fond, il n'y a pas de carre métallique. Ce sont les bords de la semelle qui jouent le rôle des carres et qui par conséquent s'usent plus rapidement que sur les skis classiques, notamment sur neige dure. Sur certains modèles, il existe un léger débord servant à optimiser la prise de carre.

### 1.4.3.2.4 Spatule du ski

Plus la spatule est fine et plus le ski gagne en précision et efficacité. En revanche, comme pour un ski alpin étroit, il est beaucoup moins maniable et donc réservé aux skieurs expérimentés. De plus, la souplesse de la spatule joue également un rôle important : une spatule souple est moins stable sur neige dure, mais très appropriée sur neige molle ou fraîche (meilleure "flottaison").

### 1.4.3.3 Interface ski/neige

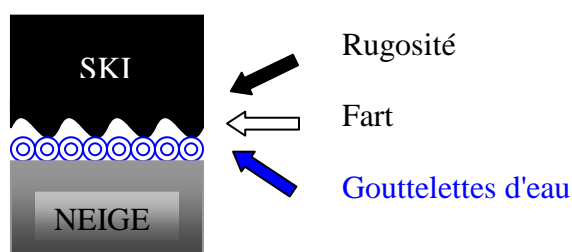


Figure 35 : schéma de la glisse du ski sur la neige

Le schéma, figure 35, nous permet de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent sous un ski pendant la phase de glisse. De fines gouttelettes d'eau nées d'une fusion avec la



première couche de neige directement en contact avec la semelle du ski, viennent lubrifier l'interface ski/neige. Le fart et les structures de semelles optimisent la formation et la hauteur de ce film aqueux.

#### 1.4.3.3.1 Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est un paramètre important lors de la glisse. C'est le rapport de la force tangentielle relevée lors d'un déplacement (force de frottement  $F_f$ ) sur la force normale (charge exercée sur la semelle relevée lors du frottement :  $N$ ). Plus il est bas, meilleure est la glisse sous le ski.

Les trois paramètres principaux qui l'influencent sont la vitesse du ski, sa rugosité et la nature de la neige.

##### 1.4.3.3.1.1 La vitesse

Shimbo 1971 [35], trace l'évolution du coefficient de frottement d'un ski en fonction de la vitesse du skieur, figure 36. Nous remarquons qu'il existe une grande différence entre le coefficient de frottement statique ( $C_s$ ) et le coefficient de frottement dynamique ( $C_d$ ) mais la transition entre les deux se produit pour une vitesse de glissement très faible ( $\approx 0,01$  m/s). Ce graphe est aussi intéressant si l'on souhaite connaître la vitesse de transition entre adhérence et frottement dynamique.

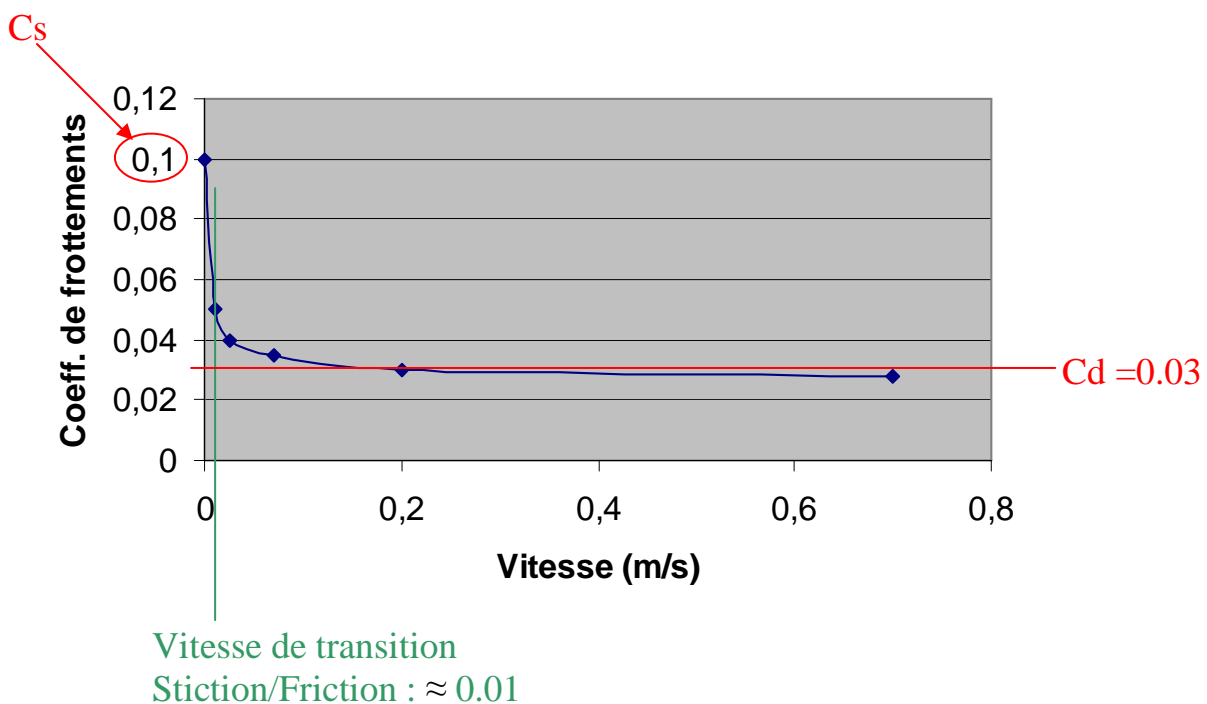


Figure 36 : coefficient de frottement en fonction de la vitesse du ski sur neige humide et compacte, Shimbo [35].

##### 1.4.3.3.1.2 La rugosité du ski

Nous avons vu précédemment l'importance de la structure de la semelle. Shimbo [35], nous montre dans le graphe figure 37, l'évolution du coefficient dynamique de frottement en fonction de la rugosité d'une semelle de ski.

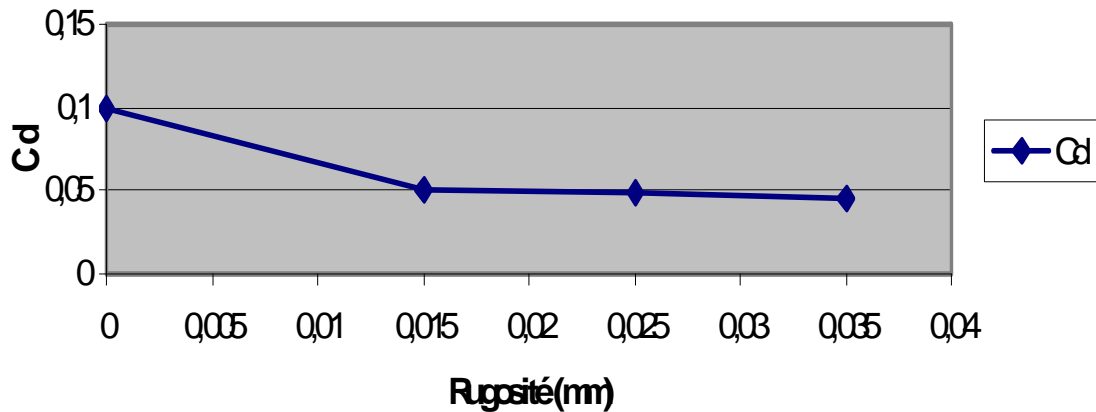


Figure 37 : l'évolution du coefficient dynamique de frottement en fonction de la rugosité d'une semelle de ski Shimbo [35].

#### 1.4.3.3.1.3 La nature de la neige

Ducret et coll. [34] recréent le frottement d'une semelle de ski polyéthylène sur la glace. Grâce à un appareil de simulation d'usure, ils mesurent et calculent en laboratoire, les coefficients de frottement. La quantification de l'usure passe ensuite par l'analyse topographique en 3 D des semelles du ski. Ils remarquent une évolution du coefficient de frottement par rapport à la vitesse de frottement mais surtout par rapport à un changement de relief dû à une surface plus granuleuse et plus rugueuse de la glace. La semelle a beaucoup plus de mal à glisser sur une surface granuleuse, alors qu'elle évolue facilement sur une surface plate.

Sur surface plate le coefficient passe de 0.6 à 0.04 lorsque la vitesse augmente.

Sur surface rugueuse le coefficient passe de 0.17 à 0.32 lorsque la vitesse augmente.

La nature de la neige induit aussi la profondeur de pénétration du ski, tableau 10.

Pour la modélisation, nous pouvons prendre deux valeurs de pénétration, selon qu'il neige ou non sur la piste.

type de neige sur la piste	profondeur de pénétration (mm)
neige fraîche tombant sur la piste	15-20
neige tassée sur la piste	2-3

Tableau 10 : profondeur de pénétration selon le type de neige

#### 1.4.3.3.1.4 Le fartage

C'est une technique de préparation des skis qui consiste à appliquer sur la semelle du ski une couche de paraffine qui induit une interface semelle / neige optimale. Cette couche plus ou moins épaisse, change l'état physico-chimique de la semelle. Elle a aussi des propriétés

d'hydrophobie qui permettent suivant la température de la neige, une bonne évacuation de l'eau dans un but d'optimisation du film lubrificateur situé à l'interface.

Le fart doit donc optimiser la formation et la hauteur du film aqueux entre la neige et le ski. Les industriels décrivent les conditions d'application selon la température mais à haut niveau d'expertise, le fartage avant course reste souvent secret et est plus du domaine de l'expérience que de la chimie.

Compte tenu des diverses connaissances sur ce sujet, nous résumons dans le tableau 11, les valeurs approchées de coefficient de frottement selon le type de neige et le fart adéquat à ce type de neige.

Type de neige	Fart utilisé (épaisseur couche)	Coefficient de frottement	
		Coefficient statique	Coefficient dynamique
Très froide et dure (<-10°C)	Fine couche (0.3 mm)	<b>0.15</b>	<b>0.04</b>
		<b>0.09</b>	<b>0.02</b>
Froide et compacte (-5°C/-10°C)	Couche moyenne (0.6 mm)	<b>0.03</b>	<b>0.025</b>
Humide (0°C)	Couche épaisse (0.8/1.2 mm)		

*Tableau 11 : coefficient de frottement selon le fart utilisé et le type de neige*

Dans notre étude, nous utilisons les valeurs de coefficient de frottement pour le type de neige le plus fréquent :

**Coefficient statique = 0.1**

**Coefficient dynamique = 0.03**

La liaison ski / neige est complexe à étudier car les divers paramètres vus précédemment, peuvent jouer un rôle au niveau de la performance. Toutefois, sur le site de la compétition, le skieur et les préparateurs ont des informations sur les conditions météorologiques et sur la température et l'hygrométrie de la neige. Ils doivent alors faire des choix : de la paire de ski, architecture et structure des semelles et choix d'un fart adapté.

Chacun de ces paramètres est partie intégrante du savoir faire du skieur.

La modélisation du matériel sur le logiciel peut être déterminante. En effet, il est possible de faire varier la densité des matériaux et leur flexibilité, le coefficient de frottement et la pénétrabilité dans la neige. Faire varier ces paramètres en constatant les performances du modèle peut s'avérer intéressant pour notre étude.

#### 1.4.3.4 Bilan des valeurs retenues pour la modélisation

Au regard de ces connaissances dans le domaine de la tribologie et de la spécificité du skating, particulièrement du décalé qui se pratique la majorité des cas sur neige damée, nous choisissons des valeurs moyennes répertoriées dans le tableau 12.

PARAMETRES	VALEURS
Pénétration	10 mm
Coefficient statique	0.1
Coefficient dynamique	0.03
Transition en adhérence	10 mm/s
Transition en glisse	11 mm/s

*Tableau 12 : valeurs retenues pour la modélisation*

#### Conclusion

Le ski de fond est avant tout un sport de pleine nature et le skieur, en plus de ses sollicitations internes, de son état de fatigue, doit aussi gérer des sollicitations externes liées à son matériel et à la nature de l'environnement, de la météo et de la neige.

Les travaux cités précédemment ont permis de répondre à ces deux types de sollicitation en analysant le pas de patineur dans sa globalité puis en affinant les connaissances sur la technique du décalé que nous avons choisie d'analyser afin de la modéliser.

Suite à la présentation des techniques de skating, nous avons décrit les différentes méthodes d'analyses existantes et leurs limites. Nous avons ensuite réalisé un bilan des études dans les domaines de la biomécanique, de l'énergétique et de la tribologie.

Toutefois, les connaissances précédentes sont partielles : analyse du sujet d'un point de vue biomécanique et physiologique, analyse du matériel et de la nature du sol. Il est aussi important d'analyser le geste dans sa globalité et en situation.

Des études ont été réalisées à ce sujet se situant dans une approche écologique et dynamique du geste. Cette approche demande à être connue en particulier pour les mouvements cycliques. De plus, elle pourrait aussi être révélatrice de déterminants de la performance, nous y consacrons le dernier sous chapitre de l'état de l'art.

## **1.5 VERS UNE APPROCHE ECOLOGIQUE ET DYNAMIQUE DU GESTE**

### **1.5.1 Introduction**

Brisswalter et coll., 1994 [36], lors de leurs travaux sur la marche, relèvent un "point optimal" correspondant à la fréquence de marche librement choisie par le sujet. Au delà de ce point, lorsque la vitesse augmente, la dépense énergétique croît de façon exponentielle jusqu'à une zone où le sujet change spontanément son mode de locomotion. Cette transition, située entre 7 et 8 km.h<sup>-1</sup>, est classiquement expliquée par des principes d'optimisation de la dépense énergétique, de la production d'énergie mécanique ou de la stabilité des paramètres cinématiques.

Le mode de fonctionnement du skieur peut être aussi envisagé par cette approche. Empiriquement, en nous référant uniquement aux observations réalisées lors des courses, nous relevons que le décalé est généralement utilisé dans les pentes ascendantes mais qu'il peut être aussi utilisé sur le plat, proche de l'arrivée. A priori, ce changement de motricité dépendrait plus de la dépense énergétique que d'un changement purement mécanique dû au degré d'inclinaison de la pente, par exemple.

Dans ce chapitre, nous présentons sommairement dans un premier temps, l'approche écologique en définissant des notions spécifiques que nous déterminons dans notre étude.

Dans un second temps, après avoir défini l'approche dynamique des coordinations perceptivo-motrices, nous essayons d'interpréter des expériences de dynamiques de coordination-motrice pour réaliser la dynamique du décalé.

### **1.5.2 Approche écologique**

Warren 1984 [37], met en évidence les notions d'"affordance", de "point critique" et de "point optimal".

#### **1.5.2.1 Notion d' "affordance"**

Le sujet s'informant de sa relation à l'environnement peut en retour moduler ses forces internes qui sous-tendent la production du mouvement. Dans l'approche écologique le terme d'"affordance" traduit les possibilités d'actions offertes par l'environnement compte tenu des potentialités du sujet.

La perception d'affordance explique le choix du mode d'action.

La perception d'affordance se traduirait en skating par la prise d'information du skieur assujettie à l'environnement : nature du terrain, de la neige, mais aussi à ses possibilités physiques du moment et permettrait une adaptation à l'environnement, soit en modulant ses forces internes, soit en changeant de mouvement, pas de un, décalé,...

#### **1.5.2.2 Notion de "point critique"**

Lorsqu'il est demandé au sujet de franchir des escaliers de hauteur de marche différente, il a une estimation du "point critique" correspondant à la valeur prédite par la biomécanique,

rapport de la hauteur de genou par rapport à la hauteur de marche. Le point critique est dans ce cas, la transition de la bipédie à la quadrupédie pour monter l'escalier.

Le point critique est le niveau pour lequel le sujet change de "pattern" ou "patron moteur" (de mode d'organisation motrice) pour s'adapter à la tâche.

Les changements de techniques en skating pourraient être dus à une estimation du point critique, chacun des styles étant alors considéré comme un patron moteur. L'estimation de la métrique serait dans ce cas le degré de la pente. Cependant, il se peut que les différentes techniques de skating soient un seul et même patron moteur "le pas de patineur" que le skieur modifie.

### **1.5.2.3 Notion de "point optimal"**

Le point optimal est la hauteur optimale de la marche pour laquelle le sujet réalise un patron moteur dont le coût énergétique est le plus faible. La perception par le sujet est aussi très précise, elle correspond à la valeur prédite par la mesure de la consommation d'oxygène.

D'où l'idée émise par Gipson 1986 [38] : l'individu ne perçoit pas qu'une "métrique" extérieure, il la perçoit par rapport à son propre corps ; c'est une mesure intrinsèque (anthropométrique, énergétique, mécanique ...)

Pour Lee 1974 [39], il n'existe pas d' "extéroception" mais une "exproprioception", d'emblée l'environnement est ramené à des caractéristiques individuelles.

### **1.5.2.4 Les possibilités de notre étude dans une approche écologique**

La conception du modèle dynamique du skieur est intéressante à ce niveau car elle peut permettre de changer des valeurs intrinsèques à l'individu : mesures anthropométriques, force des appuis, amplitude et fréquence du pas,...ainsi que des valeurs extrinsèques, sur la nature du terrain : coefficient de frottement, degré d'inclinaison de la pente, nature du sol...

La propriété pertinente du système "Sujet/Environnement" (S/E) peut être identifiée car elle correspond à un changement de patron moteur chez le skieur ; transition du pas de un au décalé par exemple.

Les différents paramètres du mouvement contrôlés par le skieur, pour moduler son geste et sa nature, peuvent être repérables. Dans une approche écologique, le terme "d'invariants" est utilisé (informations sur la permanence des surfaces de l'environnement et sur l'état de la relation du sujet avec l'environnement).

Salvelsbergh et al. 1991 [40], De Rugy et al. 2001 [41], Cutting 1986 [42], 1991 [43], Laurent et al. 1996 [44] s'accordent à dire qu'il n'y aurait pas un invariant mais plusieurs pouvant spécifier la propriété du système S/E, utiles à la réalisation de l'action. Le sujet aurait à sa disposition une palette informationnelle extrêmement riche utilisée de différentes façons selon son niveau d'expertise et, ou, des conditions de réalisation de la tâche. Cutting [42] parle de "perception dirigée".

Le fait de pouvoir faire varier certains paramètres du modèle dynamique pourrait être intéressant pour identifier un, voire plusieurs invariants et leur nature.

Toutefois, seule la technique du décalé d'une sportive de haut niveau a été filmée et analysée en 3D. Le logiciel utilisé pouvant calculer l'énergie mécanique lors de l'action, notre travail ne peut se porter que sur la notion de point optimal, sur l'efficacité motrice caractérisée par un faible coût énergétique.

L'analyse du geste grâce à l'étude des écarts relatifs entre les articulations a fait apparaître des instants précis de pic, de stabilité... Des instants de stabilité peuvent caractériser des "lois de contrôle" (relation information-force, Warren [37])

Amazeen et al. 1999 [45] parlent d'instant privilégiés lors du geste pendant lesquels l'information est déterminante.

Laurent et Thomson 1988 [46] ont montrés que le contrôle d'un déplacement locomoteur finalisé s'effectue sur la base d'un simple échantillonnage de l'information lors de chaque pose de pied au sol.

L'analyse qualitative du mouvement nous a révélé des plateaux de stabilité, en particulier pendant la phase de glisse du pied gauche. Il serait intéressant d'observer la dépense énergétique du skieur lors de ces phases.

### 1.5.2.5 Le rapport Sujet/Environnement

Ce rapport entretient la polémique inné-acquis.

Pour Warren [37], l'adaptation à l'environnement serait innée. Lors d'une tâche de passage de porte, il observe la transition du passage frontal à latéral. Il réalise un rapport  $\pi$ ,  $\pi$  entre la largeur des épaules et la largeur de la porte. Il trouve la même valeur de  $\pi$  chez l'homme et la grenouille.

Toutefois, Sparrow, Irizarry et Lopez 1987 [47], étudient l'évolution du coût énergétique et de l'efficacité motrice au cours de l'apprentissage. La tâche consiste à marcher en quadrupédie sur tapis roulant. Les résultats montrent que le patron moteur fluctue les 5 premiers jours avant de se stabiliser entre le 5<sup>ème</sup> et 10<sup>ème</sup> jour.

La valeur du coût énergétique diminue puis se stabilise. L'efficacité motrice serait égale au rapport du travail mécanique sur le coût énergétique.

$$\text{Efficience} = W \text{ mécanique} / \text{coût énergétique}$$

L'apprentissage induirait donc une augmentation de l'efficacité motrice c'est à dire une augmentation de l'efficacité mécanique dans la réorganisation des patrons moteurs, liée à une diminution du coût énergétique.

La locomotion fait partie des activités réflexes chez le nourrisson. Le pas de patineur semble être un geste résultant d'une acquisition.

Ce type de coordination s'apparenterait à la marche avec des invariants quasi identiques. En effet, les informations seraient prises au même instant lors de la pause du pied d'appui et plus précisément, pour le décalé, lors de la phase de glisse côté faible, correspondant à une stabilité articulaire (paragraphe 1.4.1.5.4 Les écarts relatifs en X, Y, Z.). Le skieur étant en constant équilibre sur des appuis fuyants semble créer un nouveau patron locomoteur, plus économique lui permettant une phase de récupération, nécessaire à une coordination efficace.

Même à haut niveau d'expertise la chute peut intervenir. Bjorndalen (quatre fois médaillé d'or aux J.O. de Salt Lake City), premier, loin devant les autres skieurs, chute à dix mètres de l'arrivée lors d'une course en compétition alors qu'il n'y avait aucune difficulté et que la piste était damée sans déformation apparente. Le couplage de la coordination semble avoir été rompu. Il serait intéressant d'en étudier les causes : la fatigue et, ou, la proximité de la ligne d'arrivée qui interviennent en déstructurant les paramètres de la coordination. La fatigue ne paraît pas en être la cause car l'énergie qu'il doit utiliser pour se relever et relancer sa course est très importante, il serait resté au sol si il avait été au bout de ses limites physiques. La prise

d'information visuelle de la ligne d'arrivée a peut être perturbé les invariants. Ou est ce le côté psychologique d'une arrivée très proche dans le temps ?

Ces réflexions nous emmènent à tendre vers la "théorie de l'acquis" pour ce qui est des différents types de coordination utilisés en skating. Toutefois nous étayerons notre analyse en utilisant les travaux réalisés sur la locomotion.

Comme la locomotion, le pas de patineur est aussi une action régulée par des caractéristiques cycliques qui s'accommodent d'un contrôle de type intermittent. Nous pourrions en utilisant le modèle dynamique faire également une proposition de loi de contrôle. Ce serait un outil conceptuel permettant d'appréhender les mécanismes de contrôle qui sous tendent les actions finalisées. En effet, toutes les articulations du corps humain sont maîtrisées dans le modèle dynamique : modulation des degrés de liberté, des angles, de la raideur, de l'amortissement. Grâce à cet outil, nous pouvons visualiser et analyser avec précision les relations spatio-temporelles des composants, impliqués dans la relation du geste. Nous sommes donc intéressés par l'approche dynamique des coordinations perceptivo-motrices.

### **1.5.3 Approche dynamique des coordinations perceptivo-motrices**

#### **1.5.3.1 Définition**

L'approche dynamique des coordinations perceptivo-motrices, cherche des processus, des principes communs qui s'appliquent au système neuro-musculo-squelettique lors de la production des comportements moteurs coordonnés.

Son précurseur, Bernstein 1967 [48], émet l'idée que l'élaboration d'une coordination motrice traduit la maîtrise des degrés de liberté redondants du système d'action et leur incorporation au sein d'une unité facilement contrôlable. Des "couplages" s'effectuant entre les différents composants, face aux contraintes appliquées au système, réduisent les degrés de liberté du système d'action multi-articulaire. Ce sont des assemblages macroscopiques appelés les "patrons de coordinations". Les invariants spatio-temporels qui caractérisent ces patrons sont considérés comme la "signature" comportementale de l'auto-organisation du système.

Cette théorie vient à l'encontre de la théorie (bio) cybernétique dans laquelle le système nerveux a la charge des degrés de liberté grâce à un stockage de programmes moteurs couplés à un système de traitement de l'information.

Il pourrait donc exister des comportements adaptatifs et "intelligents" sans programme préformé, ni contrôleur stocké mais seulement par la vertu des couplages et de l'auto organisation.

Kugler et al 1980 [49], 1982 [50], ont proposé de considérer les coordinations motrices comme des assemblages temporaires qui émergent en fonction des contraintes spécifiques à la tâche.

Les patrons dynamiques de la coordination permettent d'étudier l'apparition, la stabilité, la dissolution et la flexibilité des coordinations motrices.



### 1.5.3.2 Expériences de dynamiques de coordinations motrices

#### 1.5.3.2.1 Exemple du cheval

Les travaux de Hoyt et Taylor 1981 [51], portent sur les modes de coordinations du cheval par rapport à une vitesse donnée par tapis roulant. L'augmentation de la vitesse entraîne des changements de modes de coordination : du pas au trot puis au galop. Ces changements permettent au cheval de s'adapter en créant un nouveau mode de déplacement plus confortable et moins coûteux en énergie. Ils se traduisent par une modification du coût énergétique. Ils sont schématisés par la position des différents segments à un moment donné, caractérisant un patron de coordination précis, tableau 13.

Stewart 1998 [52], réalise un pictogramme des relations de phase entre les membres assimilés à des oscillateurs. Relation en phase  $0^\circ$  pour les membres homo-latéraux et une relation en anti-phase  $180^\circ$  pour chaque couple de membre, tableau 13.

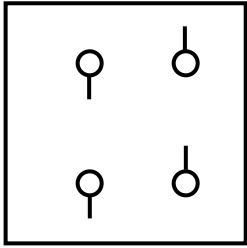
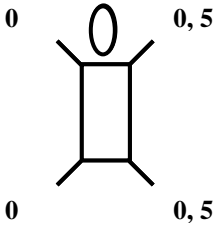
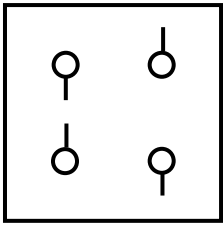
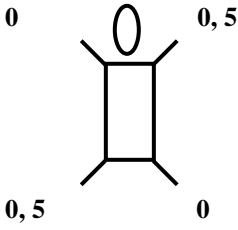
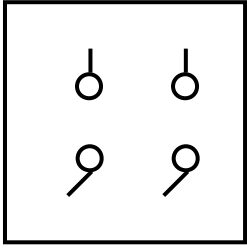
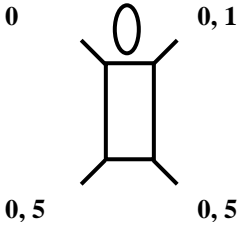
	Hoyt et Taylor	Stewart
<b>Le pas</b>		
<b>Le trot</b>		
<b>LE GALOP</b>		

Tableau 13 : les différents modes de coordination adoptés par le cheval décrits par Hoyt et Taylor et le pictogramme des relations de phase entre les quatre membres décrit par Stewart

### 1.5.3.2.2 Exemple de l'être humain

On peut retrouver ces changements de mode de coordination chez l'être humain. Son répertoire locomoteur obéit aux mêmes principes dynamiques.

Beuter et Lefèvre 1988 [53] , Diedrich et Warren 1995 [54], montrent qu'à partir d'un certain seuil de vitesse, il existe une transition spontanée de la marche à la course.

D'autres transitions peuvent être observées dans certains sports. Par exemple, en natation Chollet, Chabies et Chatard 2000 [55], Seifer, Chollet et Bardy 2004 [56], Seifert, Chollet et Rouard 2007 [57] décrivent les divers modes de coordination en crawl et utilisent "un index de coordination" pour étudier les variations spontanées en fonction de différents paramètres.

Face à ces "transitions spontanées" les contraintes sont dites "non spécifiques" (vitesse de déplacement, morphologie...). Elles reflètent un mode de coordination qui permet d'optimiser la dépense énergétique, de réduire le niveau des forces requises pour réduire le mouvement ou de diminuer les chocs appliqués sur les membres (Diedrich et Warren [54], Farley et Taylor 1987 [55], Hoyt et Taylor [51]).

Il est intéressant de souligner la relation étroite entre les systèmes physiques et les systèmes biologiques. Les changements de mode de coordination peuvent être volontairement inhibés (la marche athlétique) ou suscités (courir sans avoir précédemment marché).

Les spécialistes des systèmes dynamiques s'accordent sur le fait que l'apparition de nouvelles formes de coordination du développement ou de l'apprentissage s'apparente à des phénomènes dynamiques auto-organisés tels que ceux rencontrés dans la plupart des systèmes complexes.



### 1.5.3.2.3 Exemple en skating

Les diverses techniques utilisées en skating par le skieur peuvent être considérées comme des patrons de coordination spécifiques de l'adaptation du skieur au terrain.

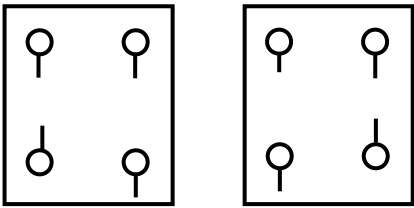
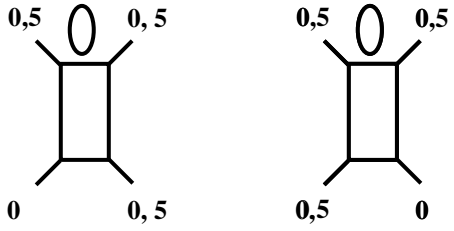
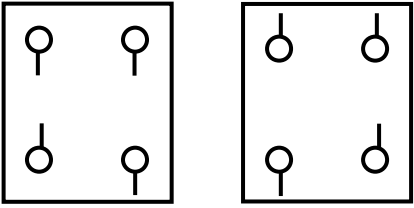
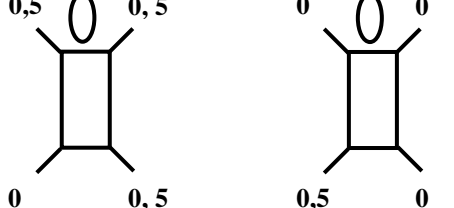
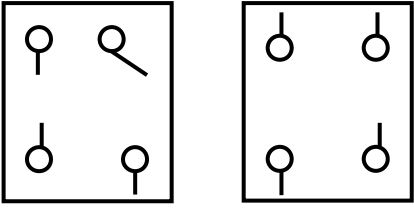
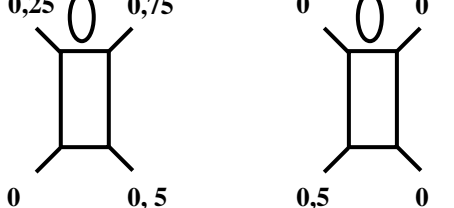
C'est la difficulté du terrain (plat, côte), le contexte (départ lors des compétitions), l'état physique qui contraignent le skieur à changer de technique pour adapter une nouvelle coordination plus confortable car moins coûteuse en énergie. Lors des courses en compétition, certaines techniques sont privilégiées et apparaissent dans des situations précises. Le pas de un, au départ ; Le pas de vitesse, sur le plat ; Le décalé, dans les côtes (paragraphe 1.2.1).

Nous inspirant des travaux précédents, nous allons schématiser chaque technique en un cycle comprenant deux temps, l'intervalle entre les deux temps étant le transfert du poids du corps d'une jambe sur l'autre, le décalé est représenté côté fort à droite, tableau 14.

Les deux rectangles et les deux pictogrammes par colonne schématisent un cycle de jambe. Un rectangle ou un pictogramme correspond à un mouvement de jambe, la première ligne représente les membres supérieurs du skieur, la seconde, les membres inférieurs et la première colonne, les membres gauches, la seconde, les membres droits. Les membres en phase correspondent au symbole

En phase décalé dans le temps   
Ceux en anti-phase 

Les pictogrammes représentent les quatre membres assimilés à des oscillateurs, relation en phase  $0^\circ$  (0) pour les membres homo-latéraux et une relation en anti-phase  $180^\circ$  (0,5) pour chaque couple de membre.

<p><b>Le pas de un</b></p>		
<p><b>Le pas de vitesse</b></p>		
<p><b>Le décalé</b></p>		

*Tableau 14 : les différents modes de coordination en skating et le pictogramme des relations de phase entre les quatre membres*

Ces trois modes de coordination sont disponibles dans le répertoire du skieur, ils apparaissent sous certains régimes de contraintes et entraînent des changements "qualitatifs".

Le skieur peut les moduler volontairement s'il le souhaite, on parle de "multi-stabilité" mais à un certain degré de côte, il utilise uniquement le décalé, c'est de la "mono-stabilité".

La transition d'une technique au décalé, obéit au phénomène "d'hystérèse" propre aux systèmes dynamiques complexes ouverts et éloignés de leur état d'équilibre. Après cette transition, la coordination se stabilise sur ce mode et aucun retour spontané n'est observé quelque soit le régime adopté. C'est une dynamique de coordination spontanée les fluctuations de l'état actuel conduisent le système à "visiter" différents états de coordinations jusqu'à ce qu'il trouve celui qui correspond au maximum de stabilité et au minimum de coût.

Toutefois, Coulmy [12], précise que pour des raisons d'adaptation à la piste, le skieur peut changer son côté d'attaque (coté fort). Ce changement de côté est-il un autre mode de coordination ou fait il partie du même mode? Est-il spontané où est-il la conséquence d'un apprentissage?

## 1.5.4 Conclusion

Plusieurs facteurs contribuent à la stabilisation et à la déstabilisation des patrons préférentiels de coordination, des facteurs intrinsèques et, ou, extrinsèques à l'individu. L'approche écologique précédente nous a permis de mieux les cibler et de pouvoir aussi nous situer dans une perspective de dynamique comportementale intégrant le système [sujet/environnement].

Nous avons interprété diverses notions spécifiques de l'approche écologique et de l'approche dynamique des coordinations perceptivo-motrices pour les appliquer au skating. Toutefois, ces interprétations devraient être renforcées en entreprenant des travaux de recherche spécifique à ce sujet à l'aide d'outils de simulation actuels. Le modèle numérique musculaire devrait également se situer dans une dynamique comportementale de part la pertinence du système sujet/environnement.

Dans le paragraphe qui suit, nous résumons les déterminants de la performance du décalé afin de les développer précisément dans notre étude.

## 1.6 LES DETERMINANTS DE LA PERFORMANCE LORS DU DECALE

### 1.6.1 Introduction

Comment évaluer la performance d'un geste technique ?

Nous avons vu que dans les chapitres précédents, il était plus approprié de parler d'efficacité gestuelle que de performance et nous l'avons défini comme étant le rapport entre le travail mécanique et le coût énergétique. Dans le but d'optimiser ce rapport, nous proposons dans le chapitre qui suit, de développer les critères permettant une amélioration du travail mécanique puis ceux permettant une diminution du coût énergétique.

Au regard des deux chapitres précédents sur l'état de l'art, huit déterminants de la performance dans le style décalé sont mis en exergue. Ils seront toujours privilégiés dans notre travail de recherche.

#### 1.6.1.1 Amélioration du travail mécanique

L'amélioration du travail mécanique est révélée par des critères mécaniques précis. Chacun d'eux entraîne des actions motrices propres à une certaine technique mise en œuvre par le skieur. Les diverses connaissances acquises lors de l'analyse du décalé, nous permettent de relever les critères mécaniques suivants :

##### *1.6.1.1.1 Augmentation de la fréquence ou de l'amplitude du cycle*

Lors des montés, le skieur adopte le style décalé, la plupart du temps en augmentant la fréquence de cycle par rapport à celle utilisée antérieurement. Ce changement entraîne un effort physiologique important mais moindre que s'il n'avait pas eu lieu. Toutefois, le fait de garder de l'amplitude en particulier sur la jambe faible, permet une conservation de la vitesse,

si non, il n'existerait aucun moment de glisse et le skieur serait d'avantage, en "impulsion". L'efficacité du décalé est un compromis entre la fréquence et l'amplitude du cycle. Lorsque le skieur veut augmenter sa fréquence, il a tendance à diminuer les temps de glisse. Inversement, lorsqu'il veut augmenter son amplitude, il cherche à augmenter la vitesse lors du cycle.

#### *1.6.1.1.2 Augmentation de la vitesse lors du cycle*

Elle induit une diminution du temps d'exécution ou une augmentation de la distance parcourue.

- L'augmentation du temps de glisse : lorsque les surfaces du ski sont à plat sur la neige. Cette période correspond à une stabilité motrice.

Un des premiers critères mécaniques est donc **le temps et la distance de la phase de glisse.**

- La diminution des périodes de ralentissement : lors du début et de la fin du contact avec la neige, lorsque les surfaces ont un frottement important. Cette période correspond à un déséquilibre lors du transfert du poids du corps d'une jambe sur l'autre. Dans un premier temps, le skieur prend appui sur la neige et pour ne pas glisser latéralement, il effectue une prise de carre. En fin de mouvement de jambe, il réalise le même geste pour transférer son corps sur l'autre jambe. Ceci demande un grand nombre de mouvements synchrones et puissants.

Un autre critère mécanique important est **la prise de carre**, angle de la surface du ski avec celle de la neige, au début et à la fin du mouvement de jambe d'appui.

- Ces deux derniers critères montrent l'importance de **l'action des jambes** elles même mais aussi dans leur synchronisation. Ces actions induisent une technique spécifique et elles sont bien sûr un critère de la performance.

- L'efficacité de l'action des bâtons. Elle peut jouer plusieurs rôles. Les bâtons sont souvent propulseurs côté fort et permettent d'équilibrer le corps dans le but de soulager l'action des jambes. Cette phase d'appui des bâtons n'a jamais été bien explorée par les scientifiques. Toutefois, ils s'accordent à dire que le haut du corps est important dans cette technique et que **l'action des bras** et leur synchronisation est un critère de performance.

Pour l'amélioration du travail mécanique nous nous limiterons à ces cinq critères : le temps et la distance de glisse, la prise de carre, la puissance des bras et leur synchronisation.

#### **1.6.1.2 Diminution du coût énergétique**

L'approche écologique et dynamique du geste ainsi que les diverses études physiologiques, biomécaniques et mécaniques des chapitres précédents, nous amènent à relever un déterminant de la performance :

- **l'énergie mécanique** lors du cycle, comparaison du haut et du bas du corps.

## 1.6.2 Conclusion

Nous avons fait le choix de cinq critères de performance au regard de l'état de l'art réalisé précédemment :

- la phase de glisse
- la prise de carre du ski
- les actions des jambes
- les actions des bras
- l'énergie mécanique

Il est évident que ce choix est restrictif face aux divers facteurs que côtoie le skieur en compétition. Cependant, ils nous paraissent objectifs et appropriés au but de notre étude qui est la réalisation d'un modèle musculaire dynamique en 3 D.

Actuellement, les études sur le skieur ou le matériel, sont expérimentales (pose de capteurs, par exemple), et les modélisations bidimensionnelles ou tridimensionnelles, issues de capture vidéo, filaires ou volumiques, restent cinématiques.

**Nous nous proposons de réaliser un modèle musculaire dynamique en trois dimensions afin d'associer la biomécanique à un modèle cinématique. D'autre part, nous souhaitons optimiser le modèle afin d'affiner les analyses lors du mouvement au niveau mécanique et musculaire.**

Le chapitre qui suit va décrire la création du modèle du corps humain, son historique, sa première validation et son amélioration.

# MODELE DYNAMIQUE DU CORPS HUMAIN DE LA SKIEUSE

## 2.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les diverses phases de modélisation du corps humain de la skieuse réalisant le geste du décalé, sans matériel, sur un sol dur.

Dans un premier temps, nous décrivons les moyens informatiques mis à notre disposition et les premières tentatives de modélisation. Les premiers modèles créés sur le logiciel ADAMS ont abouti à un modèle de bas de corps avec skis, évoluant sur un sol incliné. Les difficultés de modélisation, nous ont amené à utiliser le logiciel LifeModeler sur lequel nous avons construit un modèle de base, nous révélant toutes les potentialités de ce logiciel.

Dans un second temps, nous présentons la construction du modèle dynamique du corps humain sur LifeModeler. Nous avons recueilli et traité les données de Ruby [11] afin de réaliser un fichier de pilotage du mouvement nécessaire aux étapes de la construction. Suite à la génération du squelette, des articulations et du mouvement, nous réalisons une première analyse, cette analyse statique a pour fonction d'équilibrer le modèle sur sa position de départ. La création du sol et des contacts vont permettre de lancer la seconde analyse, la simulation dynamique inverse. Nous préparons ensuite le modèle à une troisième analyse, la simulation dynamique directe qui clôt la modélisation et permet de recueillir les résultats dynamiques.

Pour finir, l'analyse des résultats nous permet de valider le modèle dynamique du corps humain de la skieuse par comparaison avec la littérature, c'est une étape importante de notre travail.

## 2.2 LES MOYENS INFORMATIQUES

Nous avons d'abord utilisé le logiciel ADAMS [2] puis le logiciel LifeModeler [1]. Les diverses versions de ces logiciels, nous ont permis de progresser lors de nos modélisations. Les moyens informatiques sont les principaux freins en modélisation et simulation. Il faut souvent faire des hypothèses réductrices, mais maîtrisées, sur les phénomènes pour obtenir un résultat exploitable et des temps de calculs convenables.

## 2.2.1 Le logiciel ADAMS [2]

Ce logiciel est un outil de simulation cinématique et dynamique distribué par la société MCS Software. Il dispose d'une bibliothèque de toutes les interactions modélisables entre deux objets (forces ponctuelles ou réparties, gravité, champs, contacts, frottements...). Il permet de modéliser un système en fonction de paramètres choisis, puis de réaliser une simulation dépendant d'une situation initiale et enfin d'exploiter tous les résultats possibles.

Nos premiers essais de modélisation ont été réalisés avec ce seul logiciel et il nous a été difficile de concevoir le corps humain compte tenu de sa complexité.

Par la suite, le logiciel LifeModeler [1], module de ADAMS [2] nous a permis d'appréhender la modélisation du corps de la skieuse avec plus de facilités.

## 2.2.2 Le logiciel LifeModeler [1]

Ce logiciel est un outil spécialisé de biomécanique qui s'intègre à ADAMS [2]. Il simplifie toutes les fonctions utiles à l'étude cinématique ou dynamique d'un mouvement en général. Il permet de modéliser finement le corps humain et d'être performant quant-à la commande type robot anthropomorphe par un modèle dynamique inverse, transparent à l'utilisateur.

Ce logiciel possède de nombreuses possibilités, il permet une variation des données anthropomorphes et une variation de représentations (filaire, osseuse, musculaire, ...).

Par la création de forces externes et internes, il simule l'interaction "homme/environnement" d'une manière réaliste.

Les applications sont nombreuses dans divers domaines :

- domaine sportif : étude de gestes sportifs (marcheur, golfeur, combat, équilibre du danseur)
- domaine médical :
  - traumatismes corporels (crash tests, chute, saut à l'élastique),
  - équipements orthopédiques (prothèses, orthèses)
  - programmes de rééducation (exercices musculaires)
- domaine de l'ergonomie : (transport d'objets lourds, ergonomie d'un lit d'hôpital ou d'un poste de travail).

## 2.3 LES PREMIERES TENTATIVES DE MODELISATION

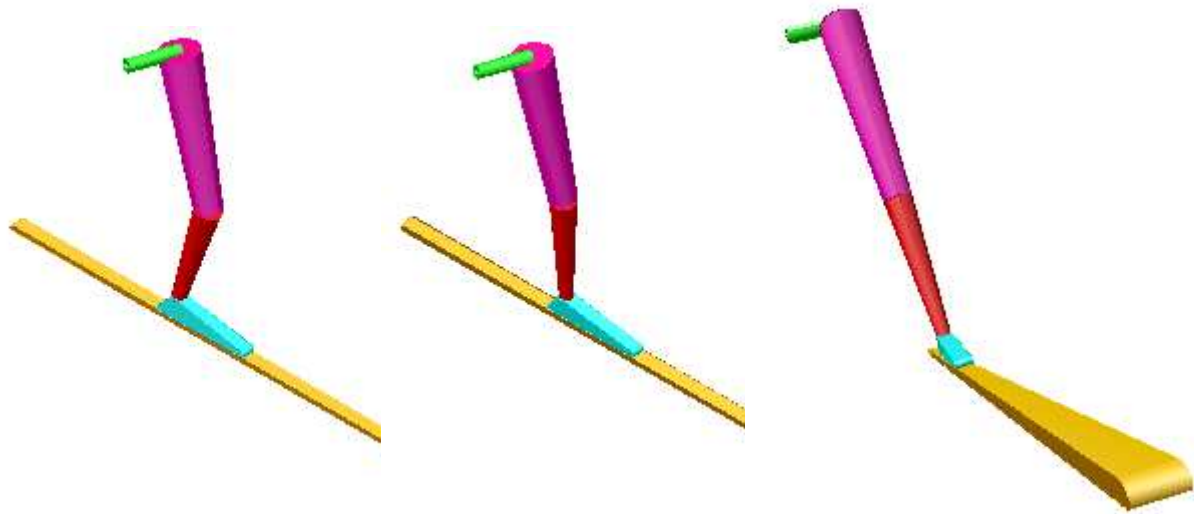
### 2.3.1 Les modélisations sur le logiciel ADAMS [2]

Le corps humain étant très complexe à modéliser à cause de ses liaisons articulaires à plusieurs degrés de liberté et de son grand nombre de muscles et de tendons agissant sur le squelette, nous procédons par étapes et nous validons celles-ci, au fur et à mesure de leur réalisation. La première étape consiste à analyser le mouvement du skating après avoir limité et simplifié le domaine d'étude. Au point de vue des performances du modèle, nous pensons qu'il serait inutile et très coûteux de vouloir modéliser la totalité du corps humain car nous souhaitons comparer des solutions technologiques entre elles et non avoir un rendu très fidèle de la réalité. C'est pourquoi, nous avons d'abord modélisé un membre inférieur. Ce premier modèle correspondant à nos exigences, nous l'avons complexifié en modélisant le bas du corps humain, puis en ajoutant une pente.

Notre première préoccupation a été la constitution du modèle physique sur le logiciel.



### 2.3.1.1 Modélisation d'un membre inférieur



*Figure 38 : modélisation d'un membre inférieur sous ADAMS*

Les segments du membre inférieur sont considérés comme des corps rigides, le reste du corps comme un seul corps rigide, les articulations comme des liaisons élémentaires.

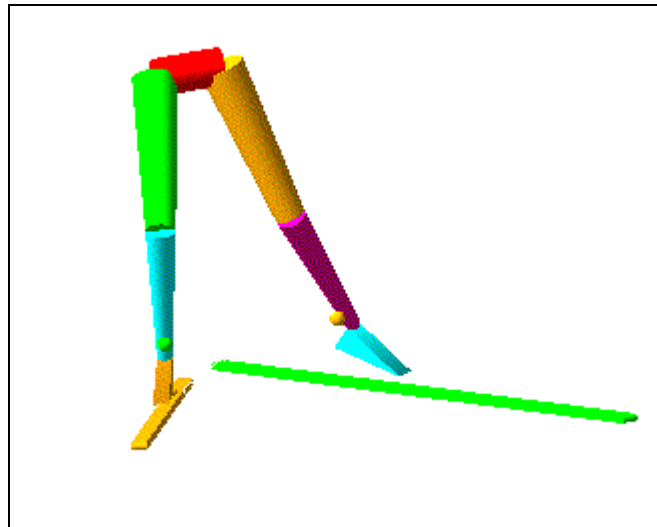
Le poids, la longueur et le volume des segments corporels sont respectés ainsi que les degrés de liberté des articulations, en associant des liaisons pivot et rotule. Il est important pour établir le modèle de choisir des valeurs de longueur et de masse pour les différentes parties, en concordance avec la réalité.

Dempster et al. 1967 [59], mandatés par l'armée de l'air américaine, ont cherché à définir l'espace requis pour un opérateur assis. Après une étude statistique sur les proportions des segments du corps humain, ils aboutissent à des résultats chiffrés sur les tailles et les masses des différentes parties du corps.

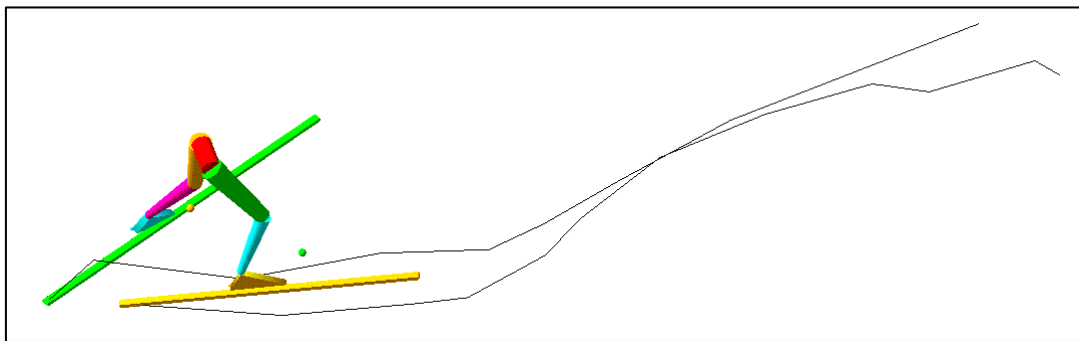
Nous avons utilisé ces données et réalisé une simulation de la phase d'appui du pied gauche lors du glissement dans une direction rectiligne. Pour cela, nous avons imposé les trajectoires de l'avant du pied, l'arrière du pied et le genou afin de vérifier visuellement le mouvement. Le centre de gravité du reste du corps est placé sur l'articulation de la hanche qui suit un mouvement rectiligne uniforme. Grâce à ce modèle, nous pouvons mettre en évidence, la phase d'appui du ski : la phase de glisse et la phase de propulsion.

Puis nous sommes passé de ce modèle plan unijambiste, figure 38, à un modèle simplifié tridimensionnel à deux jambes, figures 39 et 40.

### 2.3.1.2 Modélisation du bas du corps



*Figure 39 : modélisation du bas du corps sous ADAMS*



*Figure 40 : traces des skis lors du mouvement*

L'étude du pas de patineur utilisé en monté, le décalé, montre une phase de double appui et une dissymétrie lors du mouvement, côté fort et côté faible. Il était donc nécessaire d'étudier le geste lors d'un cycle, ce qui imposait la modélisation des deux membres inférieurs et du bassin. Le modèle réalisé est un ensemble multi corps rigide à 20 degrés de liberté : 6 pour le bassin, 3 pour la hanche, 1 pour le genou, 2 pour la cheville et 1 pour la liaison pied/ski.

### 2.3.1.3 Modélisation du bas du corps sur une pente à 6°

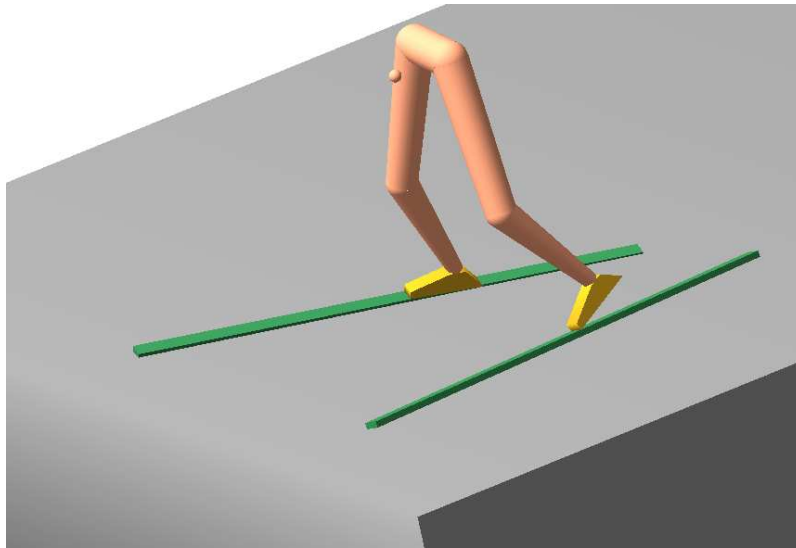


Figure 41 : modélisation du bas du corps sur une pente à 6°

Pour être proche de la réalité du geste, il était peu réaliste que le modèle suive une trajectoire dans l'espace. Nous avons donc matérialisé un sol, figure 41, afin de recueillir les efforts et d'analyser les prises de carres, en début et en fin du mouvement. La valeur de 6° de la pente correspond aux données de Ruby [11].

Les résultats ont révélé un modèle cinématique en concordance avec l'analyse du mouvement faite précédemment (chapitre I, paragraphe 1.4.1.5), ce qui valide la programmation. Toutefois, aucune corrélation n'apparaît entre les efforts mesurés in situ et les efforts calculés par le logiciel. Les forces de contact sont faibles et les temps d'appui correspondent peu à la réalité. L'animation du modèle reflète le geste du pas de patineur, mais un travail plus approfondi aurait été nécessaire pour que celui-ci puisse être utilisé, en tant que modèle dynamique.

Concevoir le modèle avec le logiciel ADAMS [2] uniquement, aurait demandé la construction de bases de données morphologiques, cinématiques et mécaniques afin de pouvoir réaliser des choix optimum, ce qui représente un très gros investissement. Le logiciel Life Modeler [1] possède toutes les bases de données permettant de modéliser très finement un corps humain ainsi qu'une palette d'outils destinés à faciliter la programmation des mouvements.

### 2.3.2 Réalisation d'un modèle de base sur le logiciel LifeModeler [1]

Sur le logiciel ADAMS, les trajectoires des articulations étaient imposées et les imprécisions géométriques dues à la capture vidéo, rendaient variable la longueur des segments du corps humain. Un segment était piloté par deux points, correspondant aux articulations, qui quelque fois s'écartaient et se resserraient. Si ces écarts étaient trop importants, le segment pouvait alors osciller, ce qui provoquait des défauts de placement d'abord, et des oscillations parasites sur la plupart des données cinématiques. Cette situation était peu compatible avec un modèle constitué de corps rigides. Le système proposé par LifeModeler [1] était donc une bonne alternative pour s'affranchir de ces difficultés.

Ce logiciel procède par cinématique inverse de façon transparente pour l'utilisateur : le mouvement opérationnel est imposé en pilotant chaque articulation à partir d'un fichier de commande de mouvement, obtenu par traitement vidéo ou provenant de la base de données existante, puis le logiciel optimise les coordonnées généralisées de l'humain en respectant l'équilibre statique pas à pas.

De plus, le logiciel permet de créer des repères spatio-temporels qui servent à piloter un point particulier du corps à partir de relevés expérimentaux. La technique utilisée, permet également de pallier les erreurs intrinsèques à la mesure des déplacements. Nous avons donc pu traiter les problèmes de singularités géométriques, rencontrés lors des modélisations précédemment réalisées sur le logiciel ADAMS [2].

Afin de mettre au point la méthodologie de programmation, nous avons entrepris de partir d'un modèle de marche humaine du tutorial de LifeModeler [58], pour le retranscrire au pas de patineur. Le modèle du skieur ainsi obtenu, est un modèle simplifié du bas du corps dont la cinématique représente le geste étudié et qui aboutit à des résultats dynamiques, figure 42.

Grâce à la conception de ce modèle de base, la méthodologie a donc pu être validée et permettre la continuité du travail avec ce logiciel.

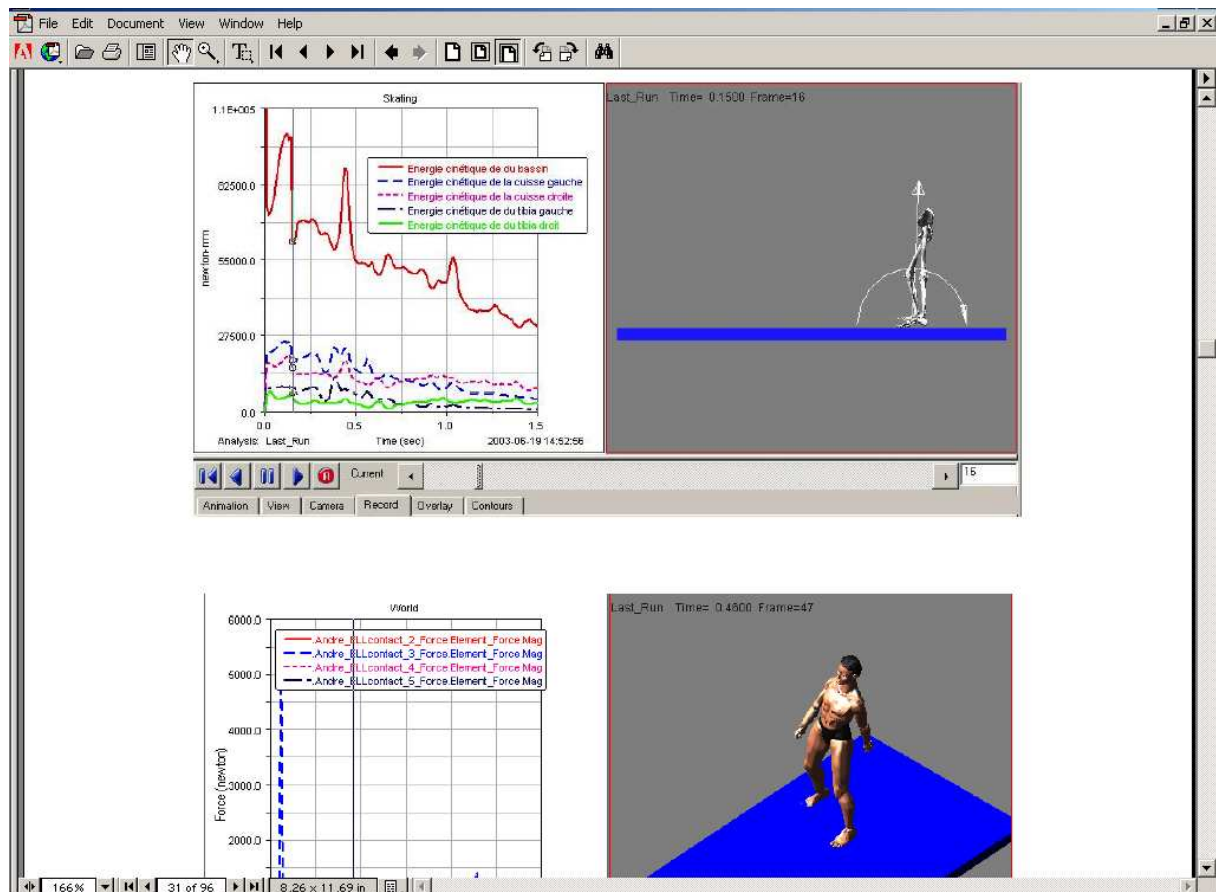


Figure 42 : modèle de base sur LifeModeler

## **2.4 MODELISATION DYNAMIQUE DU CORPS HUMAIN**

### **2.4.1 Démarche de modélisation**

Lors du processus de création du modèle, nous commençons par créer le corps humain : création des segments puis création des articulations. Le modèle est ensuite placé dans une posture de départ, une première analyse est effectuée, basée sur l'équilibre de départ. Pour lancer une simulation dynamique inverse, les agents de locomotion, "motions agents", sont associés au modèle humain pour piloter le mouvement.

Lors de la simulation dynamique directe, les articulations sont pilotées en utilisant l'historique des coordonnées angulaires enregistrées durant la simulation dynamique inverse.

Le but est de modéliser les interactions du modèle humain avec son environnement, c'est à dire, les interactions du corps humain de la skieuse avec son matériel et la neige.

Le recueil des résultats dynamiques permet de valider la modélisation par comparaison aux résultats expérimentaux de la littérature.

Le tableau 15 récapitule la méthodologie de modélisation sous LifeModeler [1].

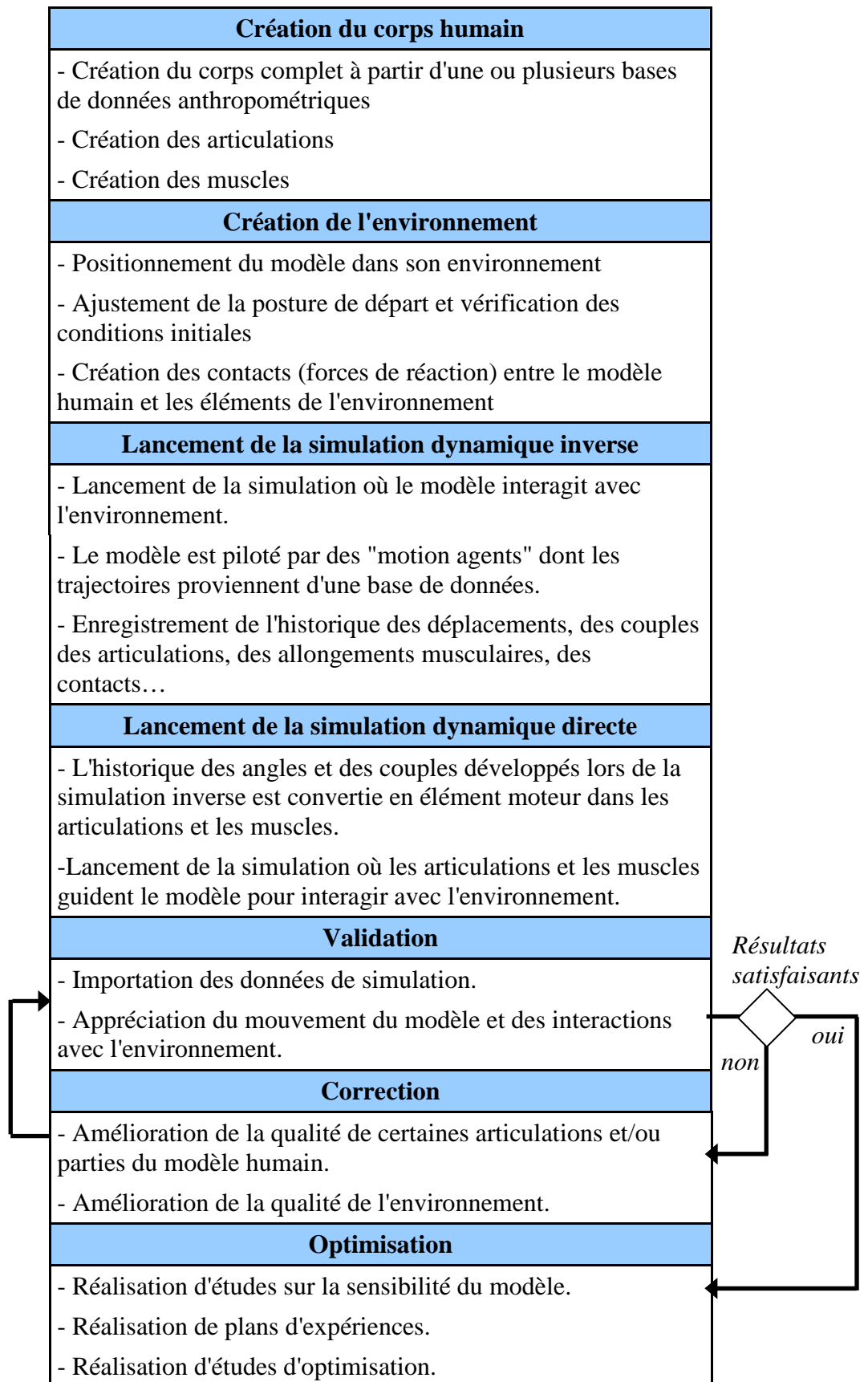


Tableau 15 : méthodologie de modélisation du logiciel LifeModeler

## 2.4.2 Construction du modèle

Cette étude se base sur les données de la Thèse de RUBY [11] qui concernent le style " décalé ".

### 2.4.2.1 Cadre de l'étude

Le sujet observé est une femme de 24 ans, mesurant 166 cm et pesant 60 kg.

Les positions des marqueurs employés sont données par un schéma légendé, figure 43 et tableau 16.

Le terrain d'évolution du modèle est une pente de neige inclinée à 6°.

Les conditions climatiques sont pour la température de la neige de - 6.4° C et pour l'air de - 6.8° C. La qualité de la neige est "fraîche - froide", se référer à l'annexe 2.

La compétition est l'épreuve du 30 Km femmes, la course se déroule en style libre, à Lhati (Finlande, 5 et 6 mars 1994).

### 2.4.2.2 Capture vidéo

Dans le travail de Ruby [11], le point d'observation, origine des mesures, est situé en bord de piste, à un mètre au dessus du sol, environ deux mètres devant et deux mètres à droite du modèle en position initiale.

La spécificité de ces données est qu'elles sont acquises en situation de compétition dans le cadre d'une compétition de niveau mondial. Trois caméras sont utilisées afin d'appréhender le mouvement en 3 D.

### 2.4.2.3 Recueil des données cinématiques

Par méthode géodésique, les relevés de terrain permettent une acquisition des coordonnées cartésiennes en 3D de 26 points précis situés sur la skieuse et le matériel. Cette acquisition est répertoriée dans un tableau en annexe 3. La visualisation des points apparaît figure 43 et ils sont définis dans le tableau 16.

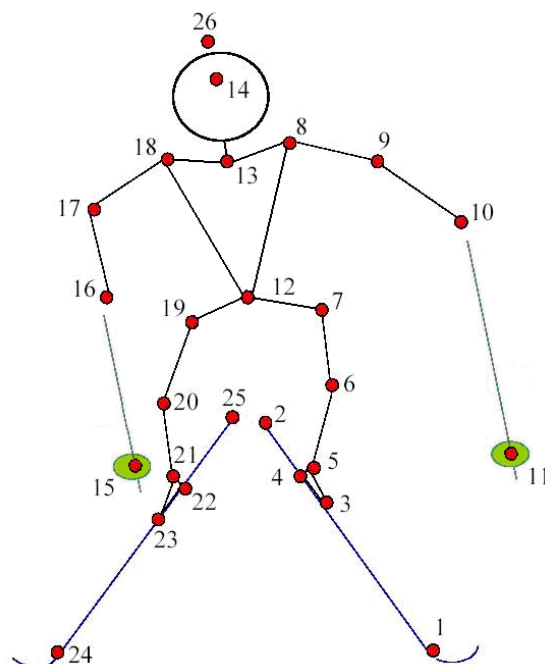


Figure 43 : visualisation des points caractéristiques relevés lors de la capture vidéo

1	Spatule gauche	14	Front
2	Talon ski gauche	15	Panier droit
3	Orteils gauches	16	Poignet droit
4	Talon gauche	17	Coude droit
5	Cheville gauche	18	Epaule droite
6	Genou gauche	19	Hanche droite
7	Hanche gauche	20	Genou droit
8	Epaule gauche	21	Cheville droite
9	Coude gauche	22	Talon droit
10	Poignet gauche	23	Orteils droits
11	Panier gauche	24	Spatule droite
12	Pelvis	25	Talon ski droit
13	Cou	26	Sommet tête

*Tableau 16 : définition des points caractéristiques*

#### **2.4.2.4 Traitement des données**

Nous avons transcrit les trajectoires en 3D des divers points caractéristiques, en données cinématiques du mouvement pouvant être implémentées dans le logiciel LifeModeler.

Ce logiciel propose plusieurs types de fichier de pilotage du mouvement. Compte tenu des données que nous possédons (coordonnées en x, y et z), notre choix s'est porté sur l'utilisation d'un fichier de pilotage du mouvement où sont rentrées les coordonnées cartésiennes de l'origine des marqueurs.

##### ***2.4.2.4.1 Création et localisation des marqueurs***

Nous avons utilisé certains marqueurs proposés par le fichier qui étaient en concordance avec la localisation géométrique des points caractéristiques de la skieuse, tableau 17. Les marqueurs sont des repères situés sur le modèle, Figure 44. Ils entraînent, lors du mouvement, la partie du corps qui leur correspond. Ils suivent une trajectoire spécifiée par les coordonnées cartésiennes dans les 3 dimensions, relevées par l'analyse d'images.



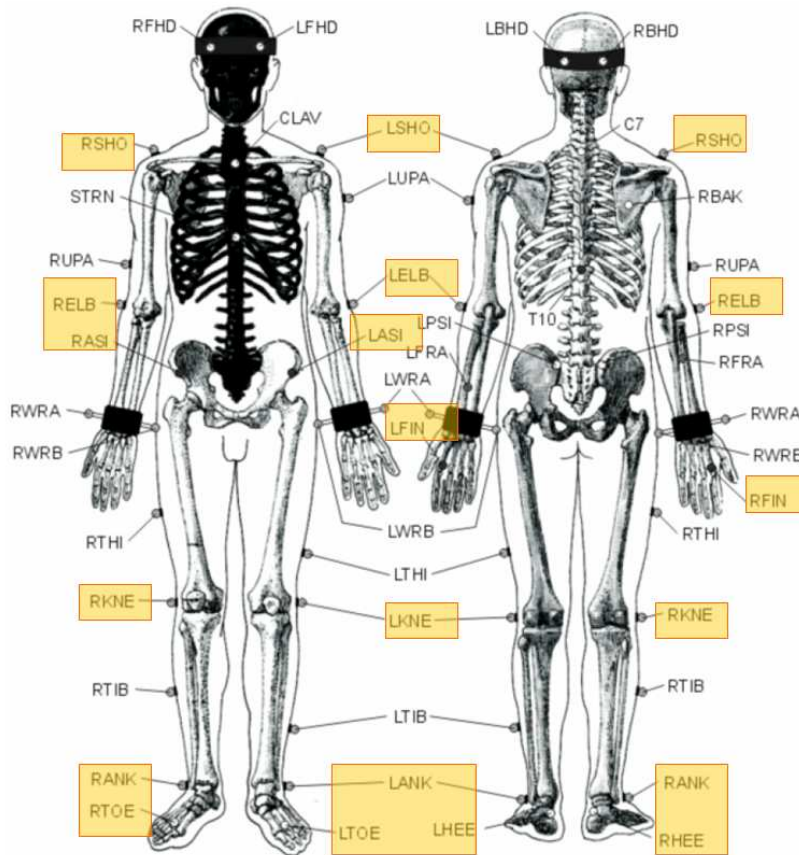


Figure 44 : localisations des marqueurs du logiciel LifeModeler

Mot. agents	Marqueurs	Marqueurs
LifeMod	Marche	A.RUBY
1	LSHO	8
2	LELB	9
3	LFIN	10
4	RSHO	18
5	RELB	17
6	RFIN	16
7	LASI	7
8	RASI	19
9	LKNE	6
10	LANK	5
11	LHEE	4
12	LTOE	3
13	RKNEE	20
14	RANK	21
15	RHEE	22
16	RTOE	23

Tableau 17 : définition des marqueurs

#### 2.4.2.4.2 Création du fichier de pilotage du mouvement

Dans un premier temps, les unités et les données anthropométriques du sujet étudié sont spécifiées. Puis, les marqueurs pilotés par les données de déplacement sont activés, les autres restent passifs. Les marqueurs sont des repères situés sur le modèle. Ils entraînent, lors du mouvement, la partie du corps qui leur correspond. Ils suivent une trajectoire spécifiée par des coordonnées cartésiennes dans les 3 dimensions, relevée par capture vidéo.

Puis les données de déplacement des marqueurs et leur base de temps sont insérées.

Les données anthropométriques sont éditées. La base de temps est de 2 secondes et les coordonnées cartésiennes sont relevées dans les trois dimensions de l'espace.

Nous insérons d'abord les marqueurs communs à ceux de Ruby [11] et à ceux proposés par LifeModeler [1] : 16 points de la skieuse.

Sont insérés dans ce fichier figure 45 :

- Les unités choisies pour la conception du modèle
- Le genre, la masse, la taille et l'âge du sujet, la posture des mains et le choix du modèle corporel
- La spécification des marqueurs actifs
- La base de temps associée aux données de déplacement des marqueurs : ordre de création et coordonnées en 3D, données en annexe 3.

```

UNITS
[UNITS]
LENGTH           ='millimeter'
FORCE            ='newton'
ANGLE           ='radians'
MASS            ='kg'
TIME            ='second'
-----
ANTHROPOMETRIC_DATA
[ANTHROPOMETRIC_DATA]
SUBJECT_NAME      = 'skieuse'
GENDER           = 2.0          genre: 1 Homme, 2 Femme, 3 Enfant
TOTAL_BODY_MASS  = 60.00      masse
TOTAL_BODY_HEIGHT = 1660      taille
AGE              = 300        âge (mois)
HANDS            = 2          mains : 1 ouvertes, 2 fermées
NOHAT           = 1          1 corps entier, 2 bas du corps
-----
MARKER_SET
[MARKER_SET]
TYPE = 'plugin'
LEHD = 'OFF'
REHD = 'OFF'
LEHD = 'OFF'
REHD = 'OFF'
C7 = 'OFF'
T10 = 'OFF'
CLAV = 'OFF'
STERN = 'OFF'
LEAK = 'OFF'
REAR = 'OFF'
LSHO = 'ON'
LNEA = 'OFF'
-----
MOTION_DATA
[MOTION_DATA]
( time      part  x      y      z      yaw  pitch roll )
0.000 1 2442 -428 -1768 0 0 0
0.000 2 2565 -614 -1635 0 0 0
0.000 3 2499 -666 -1391 0 0 0
0.000 4 2076 -381 -1776 0 0 0
0.000 5 1896 -422 -1719 0 0 0
0.000 6 1899 -282 -1825 0 0 0
0.000 7 2421 -722 -2041 0 0 0
0.000 8 2253 -746 -2050 0 0 0
0.000 9 2594 -1147 -2019 0 0 0
0.000 10 2800 -1499 -2195 0 0 0
0.000 11 2806 -1864 -2282 0 0 0
0.000 12 2904 -1601 -2098 0 0 0
0.000 13 2180 -1090 -1804 0 0 0
0.000 14 2209 -1458 -1918 0 0 0
0.000 15 2224 -1861 -1967 0 0 0
0.000 16 2191 -1628 -1768 0 0 0
0.05882 1 2355 -394 -1636 0 0 0
0.05882 2 2508 -577 -1531 0 0 0

```

Figure 45 : fichier de pilotage du mouvement

Lors des premières étapes de la conception du modèle, plusieurs fenêtres du logiciel font appel à ce fichier. La programmation est présentée en annexe 5.

## 2.4.2.5 Etapes de construction du modèle

### 2.4.2.5.1 Génération des segments

L'anatomie du squelette humain est générée, figure 46.

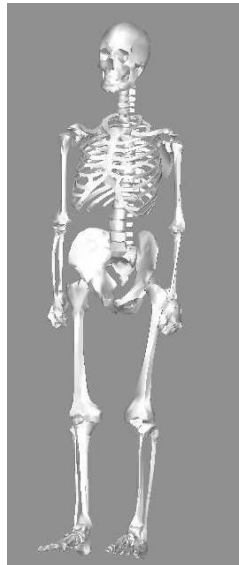


Figure 46 : génération du squelette

### 2.4.2.5.2 Génération des articulations

La seconde étape est la génération des articulations.

Dans cette phase, les segments créés dans l'étape précédente sont connectés entre eux par des articulations. La figure 47, montre que les os du squelette peuvent maintenant bouger les uns par rapport aux autres.

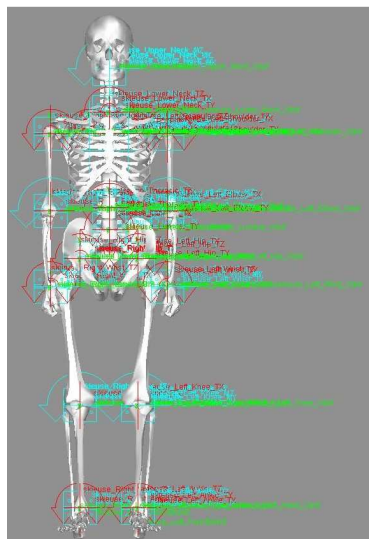


Figure 47 : génération des articulations

### 2.4.2.5.3 Utilisation des "motion agents"

#### 2.4.2.5.3.1 Système de pilotage du modèle humain

Pour piloter le corps humain, les concepteurs du logiciel ont créé un système de sphères reliées par une liaison ressort.

A chaque segment du corps est associé deux sphères sans masse, une sphère rouge (liaison de type : 3 forces et 3 couples) et une sphère jaune, figure 48.

La sphère rouge est collée au segment du corps, la sphère jaune est un agent de mouvement (motion agent) qui est asservi à la trajectoire provenant du fichier cinématique importé.

La liaison ressort va permettre de compenser les différences géométriques entre le modèle et le sujet humain réel, et également de corriger les problèmes de singularités géométriques. Des valeurs de raideur et d'amortissement en translation et en rotation peuvent être attribuées à cette liaison. Ces valeurs sont inhérentes à la qualité du fichier cinématique. Plus celui ci est précis et plus la liaison est souple. Les valeurs que nous avons choisies, données en annexe 5, sont identiques à celles de la marche [60] et elles donnent un résultat correct par rapport à la réalité du geste.

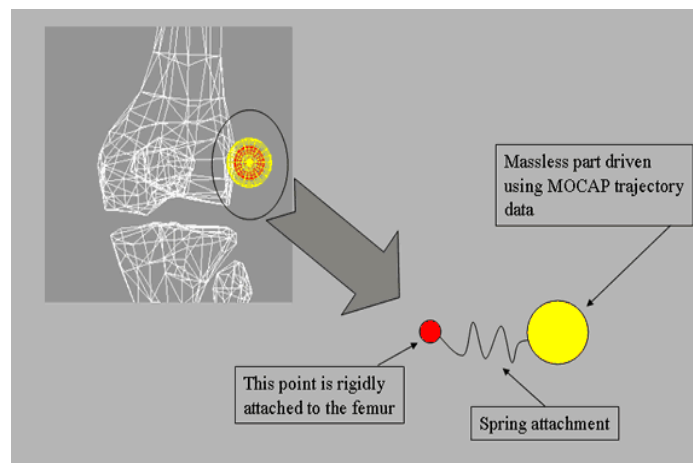


Figure 48 : constitution des motion agents

#### 2.4.2.5.3.2 Génération des motion agents

Nous insérons les marqueurs communs à ceux de Ruby [11] et à ceux proposés par LifeModeler : 16 points de la skieuse, figure 49.

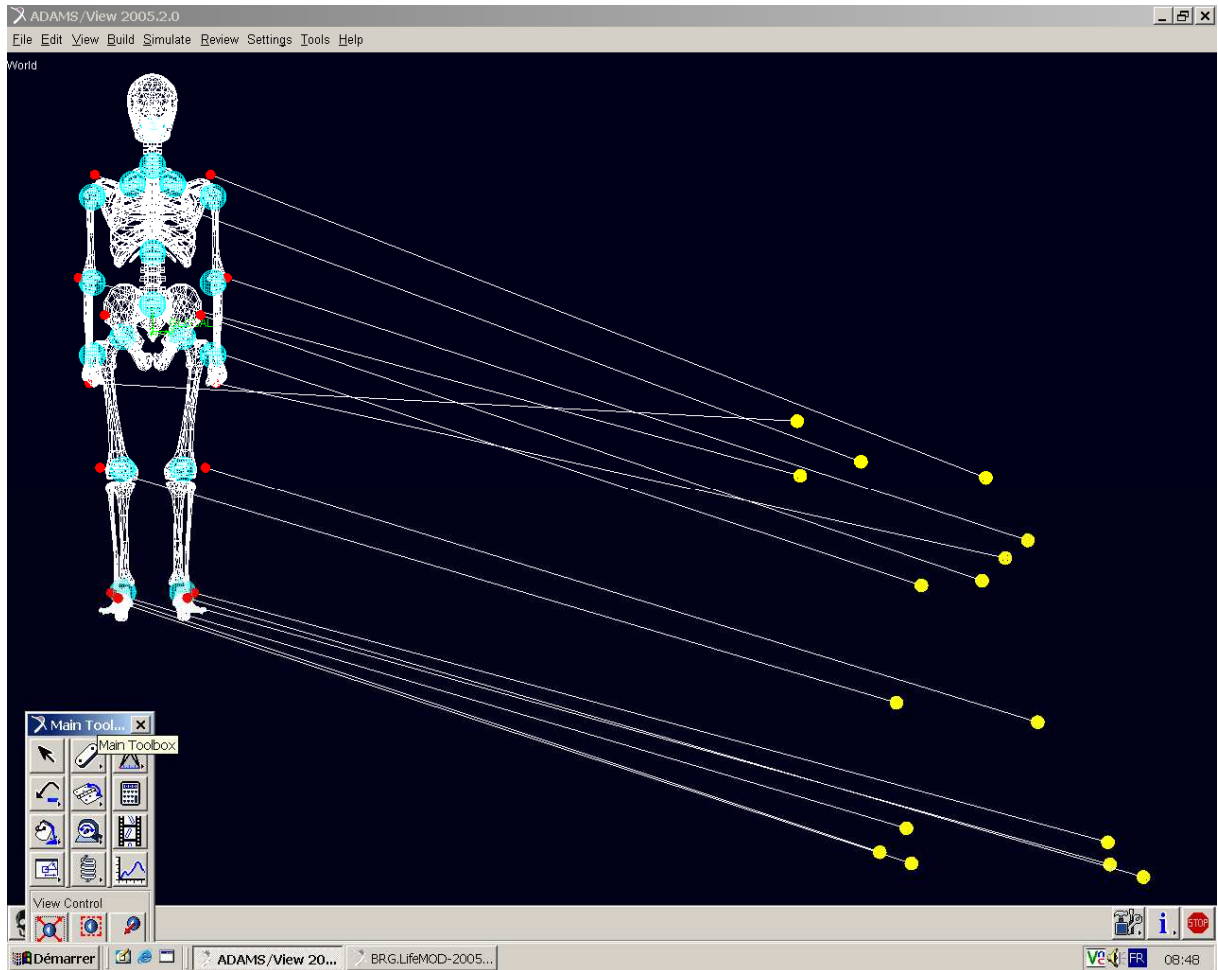


Figure 49 : insertion des 16 marqueurs communs à ceux de Ruby

#### 2.4.2.5.4 Analyse statique du modèle

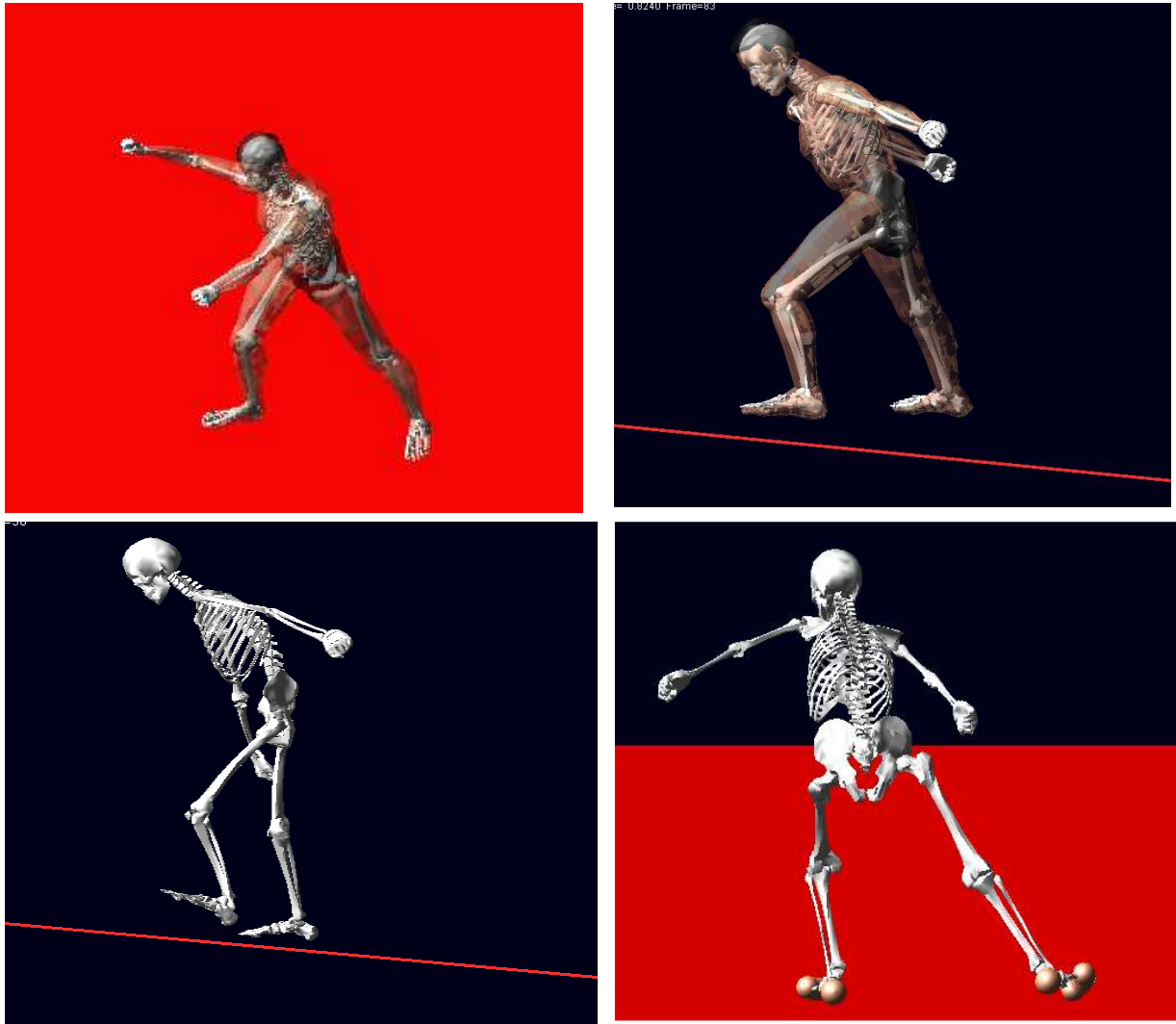
Les coordonnées des points initiaux sont importées du fichier par l'intermédiaire des motion agents. Les motion agents se positionnent en minimisant l'action des liaisons ressort qui lient les paires d'agents.

Le logiciel lance un premier calcul pour que le modèle rejoigne la position de départ, définie dans les données. (Les marqueurs corporels, sphères rouges viennent se confondre avec les marqueurs du mouvement, sphères jaunes.) Dans ce calcul, la gravité n'est pas prise en compte.

L'analyse est de 2 secondes et elle se décompose en 400 pas de temps. Le choix de cette valeur a été réalisé par essais successifs en partant de 100 pas jusqu' à 400 pas. Il s'est révélé être un compromis intéressant entre le temps de calcul et la précision des résultats graphiques (moins d'oscillations).

#### 2.4.2.5.5 Création du sol et des contacts

Nous créons le marqueur du sol en définissant sa position et son orientation afin d'obtenir les 6° de pente. Le sol est une surface plane dont les dimensions sont données. Puis nous choisissons les parties du corps qui sont susceptibles d'interagir avec lui, c'est à dire, les deux pieds du modèle humain, figure 50.



*Figure 50 : modélisation du sol (surface rouge) et des parties du corps en contacts, (3 ellipsoïdes sous chaque pied)*

### 2.4.2.5.6 Simulation dynamique inverse

#### - Principe

Le schéma, figure 51 et le tableau 18, montrent le principe de la simulation dynamique inverse.

Les angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  sont les positions angulaires relatives du mécanisme,  $M_1$  et  $M_2$  sont les moments sur les liaisons

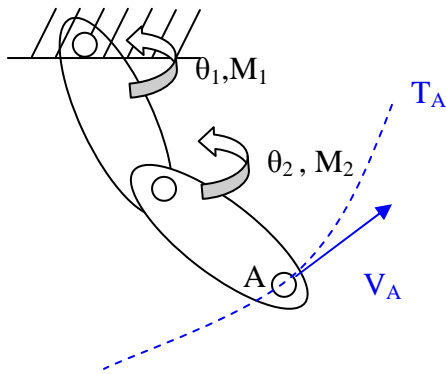


Figure 51 : schéma d'un mécanisme simple

données	Résultats calculés
Trajectoire de A	$\theta_1, \theta_2$
Vitesse de A	Dérivées de $\theta_1, \theta_2$
Force de pesanteur	Moments articulaires,
Conditions de contact	$M_1$ et $M_2$
	Forces de contact

Tableau 18 : tableau définissant les données et les résultats, lors d'une simulation dynamique inverse

#### - Méthodologie

Les conditions de contact étant réalisées, nous lançons une 2<sup>ème</sup> analyse, appelée "simulation dynamique inverse".

Suite à cette analyse, nous obtenons une simulation du geste, le système active le pilotage par l'intermédiaire des "motion agents". La sphère jaune suit le fichier de mouvement et entraîne, par une liaison ressort, la sphère rouge assujettie au segment du corps.

La flexibilité du ressort permet de transformer les motion agents, en agent d'influence du mouvement plutôt qu'en agent de pilotage stricts du mouvement ; ce qui autorise les erreurs de digitalisation.

### 2.4.2.5.7 Création d'un "tracker agent"

Le "tracker Agent" est une liaison bushing, (liaison flexible à six degrés de liberté), située au niveau du bassin du modèle humain qui permet un meilleur maintien lors du déplacement entre le haut et le bas du corps. Des valeurs de raideur et d'amortissement peuvent être choisies. Nous avons laissé par défaut les valeurs du modèle de la marche [57]. Nous avons aussi libéré les mouvements de rotation et celui de translation verticale en Y, afin que le modèle soit réellement en pesanteur. Le tracker agent n'est conduit qu'en X et en Z, c'est à dire lors des mouvements horizontaux et latéraux. Le poids de la skieuse en Y, sur l'axe vertical, agit librement, rendant la modélisation plus proche de la réalité.

### 2.4.2.5.8 Simulation dynamique directe

#### - Principe

Pour illustrer le principe de la simulation dynamique directe, figure 52 et tableau 19, nous prenons à nouveau l'exemple utilisé plus haut.

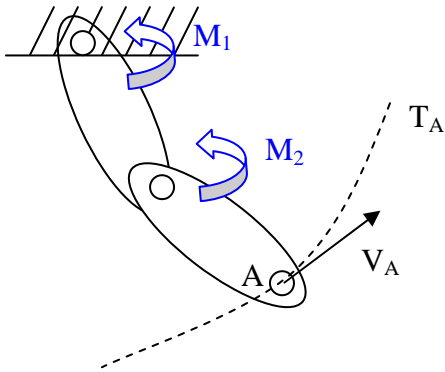


Figure 52 : schéma d'un mécanisme simple

Données	Résultats calculés
$M_1, M_2$	Trajectoire de A Vitesse et accélération de A
Force de pesanteur Conditions de contact	Efforts de contact

Tableau 19 : tableau définissant les données et les résultats lors d'une simulation dynamique directe

#### - Méthodologie

Grâce à la connaissance des moments moteurs, issue du calcul en dynamique inverse le modèle est prêt pour l'analyse dynamique directe.

Lors de cette dernière analyse, ce ne sont plus les motion agents qui guident le modèle mais les moments agissant sur les diverses articulations. La skieuse réagit donc d'une façon autonome avec son environnement, elle n'est plus pilotée cinématiquement, le "tracker agent" rendant son mouvement plus stable. Son poids est pris en compte, les forces de contact également. La qualité du modèle peut alors être jugée.



## 2.5 VALIDATION DU MODELE DYNAMIQUE DU CORPS HUMAIN

La simulation dynamique directe est l'étape finale de la modélisation, la skieuse subit la pesanteur, les flèches blanches représentent les forces de contact (direction et module) exercées par le sol sur la plante des pieds, Figures 53 et 54. Deux points de contact pied droit en phase de propulsion, un seul point pour le pied gauche en début de phase de glisse. Rappelons qu'à ce stade là, la skieuse est sur un sol dur et ne possède ni ski, ni bâton.

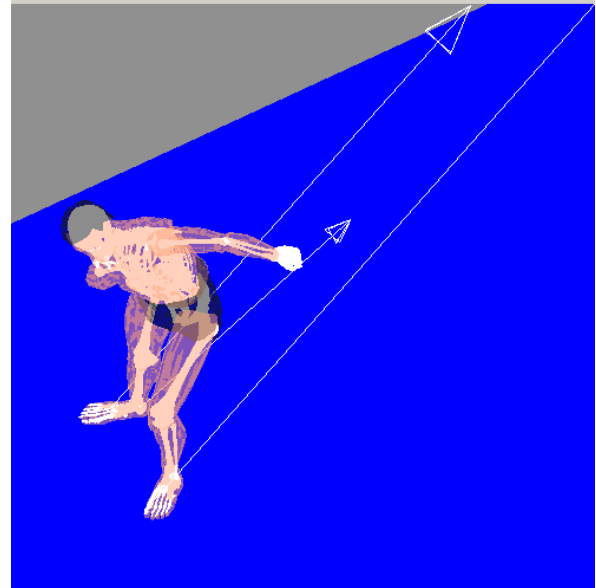
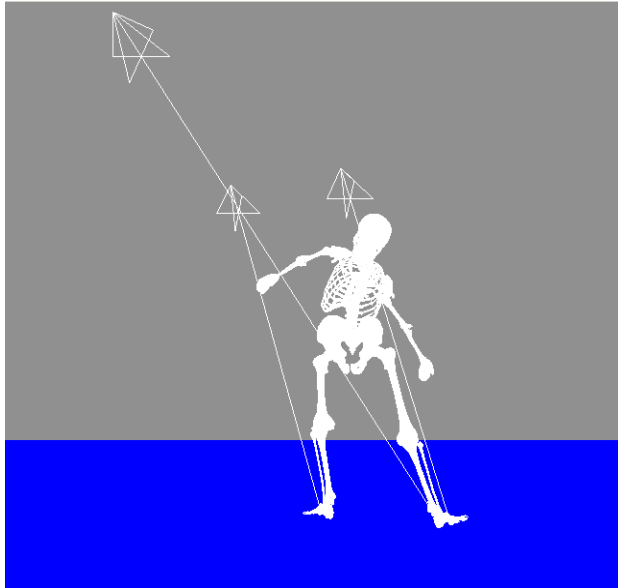


Figure 53 : représentation squelettique du modèle dynamique en vue postérieure

Figure 54 : représentation squelettique et chair du modèle dynamique en vue de 3/4 haut

### 2.5.1 Analyses des résultats du modèle et comparaison avec la littérature.

Rey F. [61]

#### 2.5.1.1 Analyse cinématique

L'observation des courbes de la figure 55, nous permet de situer la fin du cycle à 1.63 s, elle est représentée sur le graphe par la droite verticale. Le repère utilisé est celui défini au paragraphe 1.4.1.5.1.

En X, lors du déplacement latéral, la distance entre les deux pieds varie très peu et les valeurs les plus hautes nous donnent la durée du cycle.

En Y, lors du déplacement vertical, le ramené du pied, lors de la phase aérienne, est proche du sol et le ski s'élève très peu.

En Z, lors du déplacement horizontal, les deux courbes sont en symétrie et se croisent deux fois. Les pieds effectuent une distance identique et sont au même niveau au début du transfert du poids du corps.

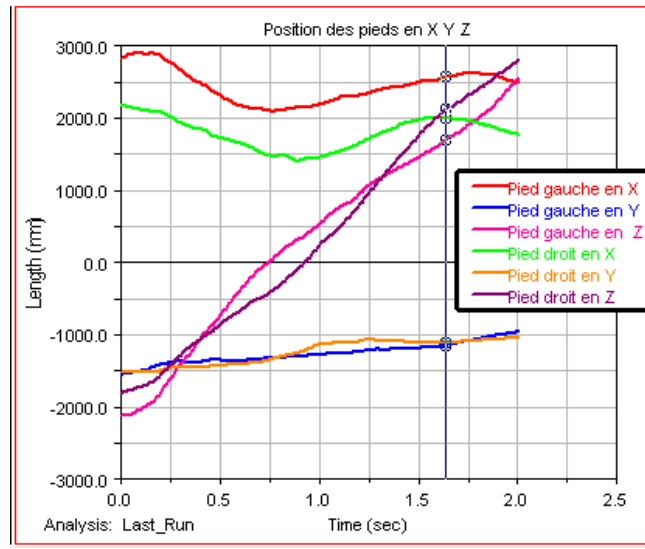


Figure 55 : positions en X Y Z des pieds droit et gauche

Grâce au relevé du déplacement en Z, sur le graphe de la figure 54, nous remarquons que la longueur du cycle de jambe, sur la pente à  $6^\circ$  est de 3.85 m ; la vitesse moyenne de la skieuse est donc de 2.36 m/s pour un temps de cycle de 1.63 s. Smith et al [4] trouvent pour une pente à  $7^\circ$ , une distance de cycle de 3.83 m, une vitesse de 3.23 m/s et un temps de cycle de 1.18 s. Leurs résultats pour une pente à  $10-11^\circ$  sont de 2.99 m pour la distance de cycle, de 2.40 m/s pour la vitesse et de 1.24 s pour le temps de cycle. Pour Bilodeau et al [3], pour une pente de  $5^\circ$ , la distance de cycle est de 5.19 m, la vitesse est de 4.62 m/s et le temps de cycle de 1.12 s. En comparaison avec ces données, le modèle de la skieuse a un temps de cycle beaucoup plus long et parcourt une distance importante pour une vitesse moyenne plus basse. La skieuse pour une longueur de cycle comparable, prend donc plus de temps pour glisser, elle est plus en amplitude qu'en fréquence. Ce geste est compatible avec ceux que l'on peut observer dans la réalité.

### 2.5.1.2 Analyse dynamique

Nous allons prendre l'exemple d'un instant important lors du décalé, celui du transfert du poids du corps d'une jambe sur l'autre. Les images de la simulation figure 56 et 57, nous montrent bien les conditions de contact : deux flèches blanches sous le pied droit et une sous le gauche qui représentent les efforts de contact sol/pied à cet instant précis du cycle. Les flèches pied droit, de même direction et de même intensité, correspondent au niveau moteur, à une poussée simultanée du talon et de la plante, révélatrice d'une prise de carre intérieure. Dans le même temps, il existe aussi une poussée sur le pied gauche, (même sens, direction différente, intensité plus élevée qu'à droite), le pied à plat, caractérisant le début de la phase de glisse.

La force de contact pied droit atteignant un maximum de 2000 newtons, et celle du pied gauche de 1400 newtons, (courbes figure 56), nous pouvons dire que la jambe forte de la skieuse est la droite. Ce qui corrobore les résultats de Smith [4] qui observe des différences entre les jambes lors du décalé "côté fort, côté faible". Après une étude réalisée sur le terrain avec des capteurs embarqués par le skieur, associé à une vidéo, Smith [4] donne une valeur maximale de 1300 newtons pour le centre de pression du ski, côté fort et 1000 newtons, côté

faible pour des conditions comparables. Le logiciel fournit la direction et le module, tandis que la littérature nous donne un module uniquement.

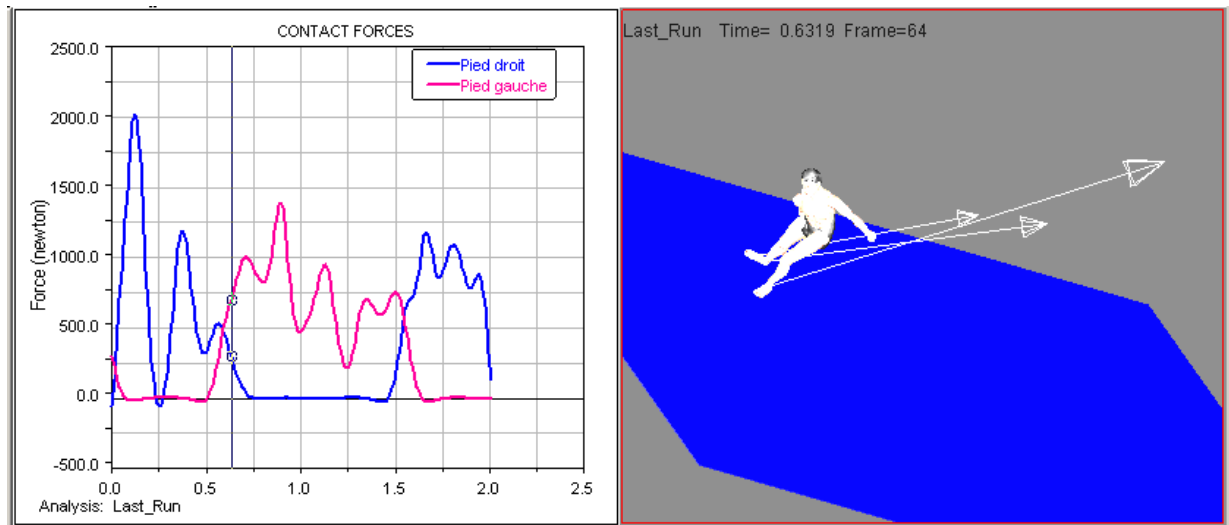


Figure 56 : analyse des forces de contact lors du mouvement.

Le temps de contact au sol de chacune des jambes est différent de celui donné par la littérature (tableau 20).

Toutefois, il existe une similitude pour les pourcentages des phases de double contact : le premier est de 14% et le second de 10,5%. Pour Smith, il est de 14.7%, et pour Bilodeau [3], de 10-11.5%.

Nous pouvons également visualiser, figure 56, les phases de glisse et de propulsion des deux jambes. Nous délimitons le début de la phase de propulsion par une valeur haute de la force de contact, précédée par la valeur la plus basse. Les pourcentages trouvés pour la jambe gauche, côté faible, Tableau 20, sont en adéquation avec ceux trouvés par Bilodeau [3]: 75% pour la phase de glisse et 25% pour la phase de propulsion.

Les valeurs maximales des forces, associées au temps de contact au sol, reflètent toutefois le style du décalé. La skieuse prend une sorte d'impulsion courte et puissante, sur la jambe droite et laisse glisser longtemps, en appui, sur sa jambe gauche. Ce geste illustre une dissymétrie importante entre les deux jambes, ce qui est propre à cette technique pour pouvoir lutter contre la pesanteur en côte. La skieuse conserve une phase de glisse, nécessaire pour garder sa vitesse moyenne constante.

	Jambe forte		Jambe faible	
	Glisse	Propulsion	Glisse	Propulsion
Smith et al (7°)	37%	53%		
Street (7°)	10%	90%		
Bilodeau (5°)	56.6%		53.4%	
	73%	27%	74.5%	25.5%
Smith	57.1%		59.7%	
Modèle étudié	35%		65%	
	52%	48%	75%	25%

Tableau 20 : comparaison des pourcentages de phases

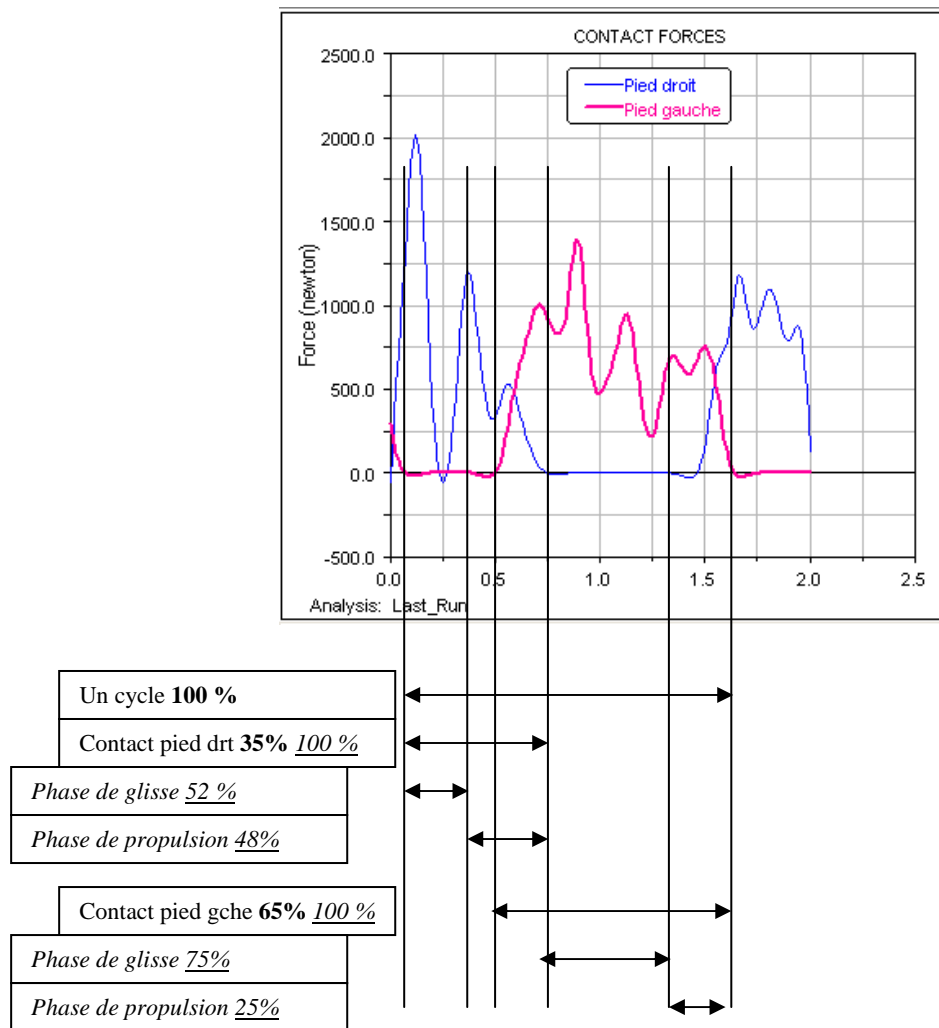


Figure 57 : pourcentage des phases lors d'un cycle.

### 2.5.1.3 Bilan énergétique

Dans un premier temps, le calcul analytique de l'énergie potentielle nous donne 227 Nm (la masse de la skieuse et celle du matériel sont pris en compte).

Nous l'avons ensuite comparée avec le calcul numérique donné par le logiciel qui est de 251 Nm, figure 58. Les deux paliers de la courbe reproduisent l'abaissement du centre de gravité lors du transfert du poids du corps d'un pied sur l'autre.

Pour l'énergie cinétique figure 59, nous avons additionné les courbes des énergies cinétiques de chaque partie du corps et nous avons trouvé une valeur moyenne de 180 Nm.

Pour le modèle de la skieuse, le calcul numérique de la somme des énergies potentielle et cinétique est de 431 Nm.

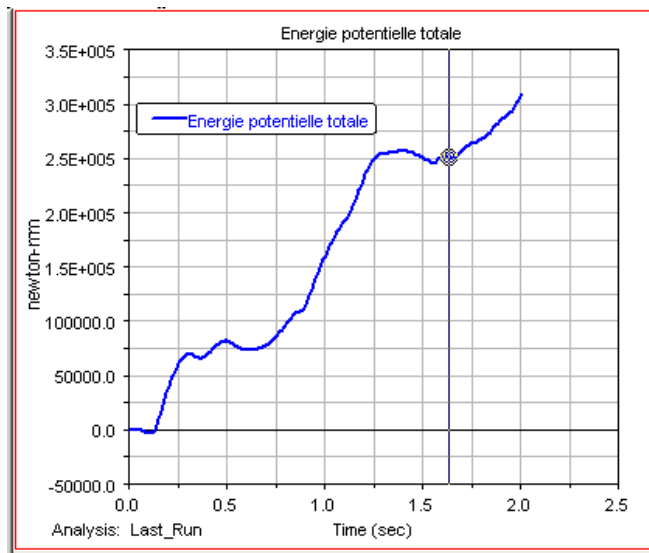


Figure 58 : énergie potentielle du corps de la skieuse

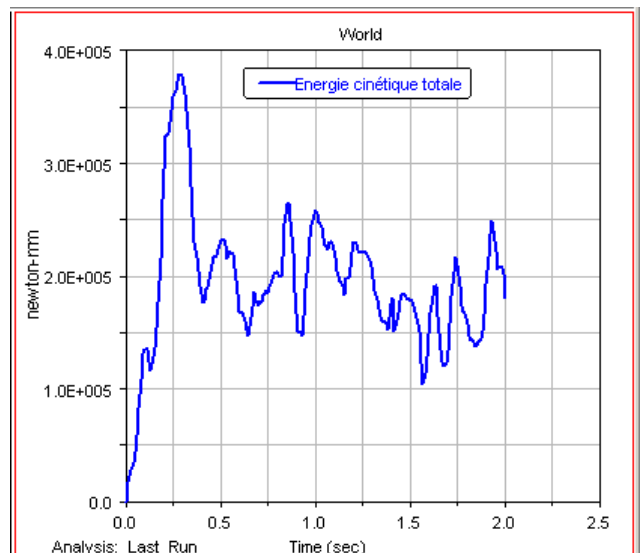


Figure 59 : énergie cinétique du corps de la skieuse

## 2.6 CONCLUSION

L'analyse cinématique et dynamique de ce modèle nous ont permis de recueillir la longueur et la durée du cycle de jambe et de distinguer les diverses phases composant le cycle. Nous avons également relevé les forces de contact des deux pieds sur le sol ainsi que l'énergie cinétique et potentielle de la skieuse. Les résultats sont proches de ceux de la littérature et ils valident la simulation du corps humain, étape importante qui justifie la poursuite de notre étude.

Toutefois, ce modèle sans musculature et sans matériel reste un modèle simplifié. De plus, les données expérimentales manquent de précision et engendrent des mouvements parasites.

La cinématique de ce modèle demande à être affinée, la skieuse est trop penchée en avant, les mouvements de la tête et du haut du corps sont parfois saccadés. Nous allons améliorer la modélisation du corps humain de la skieuse en générant tous les muscles de son squelette. Nous fluidifions également son mouvement par ajout de motion agents et par filtrage des données. Ces améliorations sont décrites dans le chapitre suivant.

Enfin, l'environnement est créé et le corps humain est équipé. Le modèle complet interagit alors avec son environnement, sa description fait l'objet du chapitre III, intitulé : "modèle dynamique de la skieuse dans son environnement".



# MODELE DYNAMIQUE DE LA SKIEUSE DANS SON ENVIRONNEMENT

## 3.1 INTRODUCTION

La validation du modèle dynamique du corps humain de la skieuse, réalisée dans le chapitre précédent, nous permet de passer à l'étape suivante. Il est maintenant nécessaire de mettre le corps humain en interaction avec son environnement.

Ce chapitre décrit le processus de création du modèle dynamique de la skieuse dans son environnement : matériel et neige. Nous décomposons la procédure en trois étapes.

Dans la première, nous améliorons le corps humain de la skieuse. Nous enrichissons sa représentation, en générant tous les muscles proposés par le logiciel, afin de recueillir leurs actions lors de l'analyse des résultats. Nous fluidifions le mouvement, en créant de nouveaux marqueurs permettant de prendre en considération toutes les données de Ruby [11] et nous filtrons également les trajectoires des marqueurs.

La seconde étape fait référence à l'environnement : modélisation des bâtons, des skis et de la neige.

La dernière, est consacrée à l'interaction du corps humain avec l'environnement. Nous créons les liaisons au niveau des mains et des pieds puis les contacts skis et bâtons avec la neige. La simulation dynamique inverse nous permet de recueillir des résultats cinématiques et dynamiques qui nous servent à ajuster les paramètres de bushing et de contact. La simulation dynamique directe, après plusieurs itérations nécessaires à la mise au point des paramètres de calculs, a abouti à un modèle stable proche de la réalité.

La description de ces étapes sur le logiciel apparaît en annexes 6,7 et 8.

Pour clore ce chapitre, nous dressons un bilan de la modélisation et nous décrivons les difficultés rencontrées.

## 3.2 L'AMELIORATION DU CORPS HUMAIN

Le modèle dynamique précédent étant constitué du squelette de la skieuse réalisant le pas du décalé sur un sol incliné à  $6^\circ$ , nous utilisons le travail réalisé sur les données cinématiques et construisons un autre modèle de corps humain, de type musculaire, ayant une gestuelle plus précise. Il est piloté par toutes les données que nous possédons (quatre supplémentaires). Les trajectoires de tous les marqueurs sont filtrées lors de leur importation. La posture de départ est également améliorée à l'étape de l'analyse statique.

### 3.2.1 Génération des muscles

Le logiciel permet la réalisation d'un modèle musculaire. Il offre la possibilité de visualiser les muscles lors du geste, mais aussi, grâce à la dynamique inverse, d'appréhender les muscles en tant que forces internes du modèle humain. Le logiciel utilise le modèle de Hill en définissant la force musculaire comme suit :

$$F = (F^{CE} + F^{PE}) \cdot p\%$$

F : force du muscle

$F^{CE}$  : force active

$F^{PE}$  : force passive

p% : pourcentage de la participation du muscle à l'action

$$F^{CE} = A(t) \cdot F_0 \cdot f_1(l) \cdot f_2(v)$$

A(t) est la loi d'activation du muscle, varie en fonction du temps entre 0 et 1

$f_1(l)$  est une fonction de la longueur relative du muscle

$f_2(v)$  est une fonction de la vitesse relative d'allongement du muscle

$$F^{PE} = \sigma \cdot pCSA$$

$\sigma$  est la contrainte du muscle

pCSA est la section droite du muscle

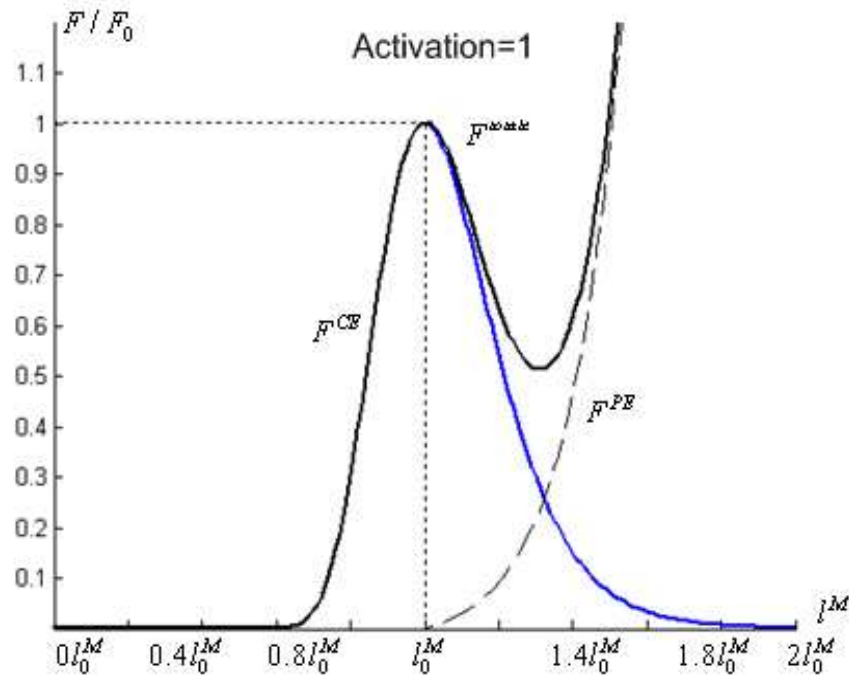


Figure 60 : force relative d'un muscle en fonction de son allongement relatif



La figure 60, montre qu'à une longueur de muscle ( $l_0^M$ ) correspondant à la longueur du muscle au repos, est associée une force maximale ( $F_0$ ), sommet de la courbe de la force active ( $F^{CE}$ ). Quand le muscle se raccourcit, la force active décroît rapidement. Lorsque le muscle s'allonge, une force passive apparaît ( $F^{PE}$ ) qui s'ajoute à la force active.

Lors de la phase de relevé des résultats, nous pourrions donc relever les intensités et les étirements musculaires pendant la durée totale du geste.

Le logiciel peut modéliser 56 muscles, ceux-ci sont répertoriés en annexe 5. L'étape de leur génération se situe après celles de génération du squelette et des articulations.

Nous intégrons au modèle tous les muscles dont dispose le logiciel. Nous pourrions donc avoir des résultats sur chacun d'eux, toutefois, compte tenu de la spécificité du geste, nous nous limiterons aux plus actifs. Il sera intéressant d'analyser les actions motrices du haut du corps lors de la poussée décalée sur les bâtons et de les comparer avec celles du bas du corps. En effet, la poussée des bras est souvent minimisée par rapport à celle des jambes. L'analyse des actions musculaires intervenant lors des phases de glisse et lors des phases aériennes du cycle, quadriceps, abducteurs, adducteurs et fléchisseurs du pied, peut révéler des actions motrices dues à une technique spécifique : dissymétrie corporelle, prise de carre, ...

Les planches anatomiques qui suivent, figures de 61 à 66, font un parallèle entre la représentation anatomique des muscles et la modélisation utilisée par LifeModeler. Elles permettent de visualiser les corps musculaires, les tendons et les insertions de chaque muscle.

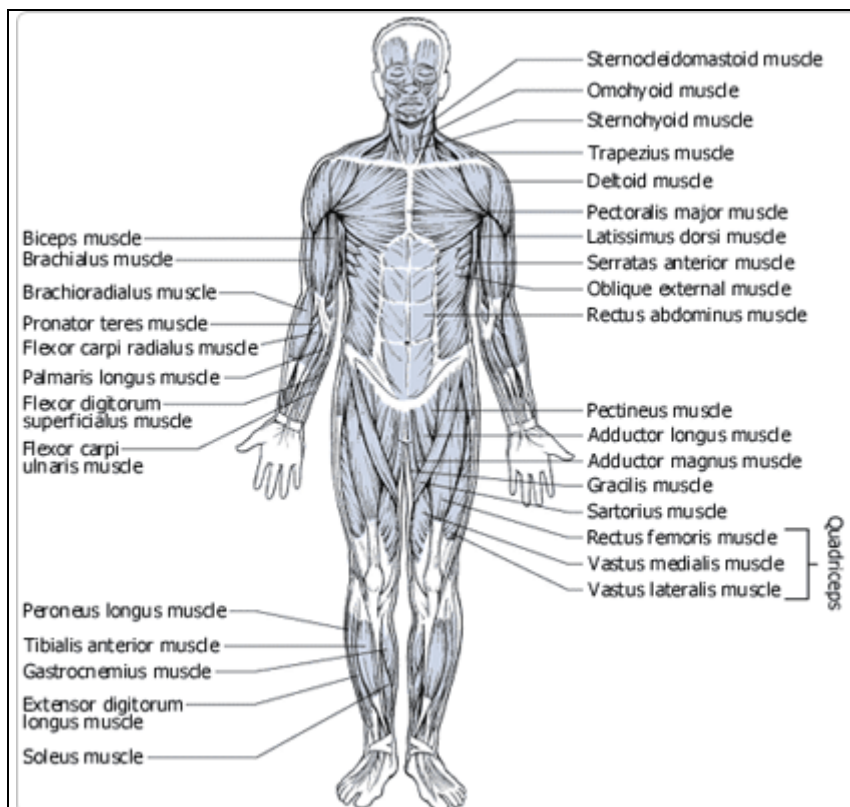


Figure 61 : anatomie musculaire vue antérieure

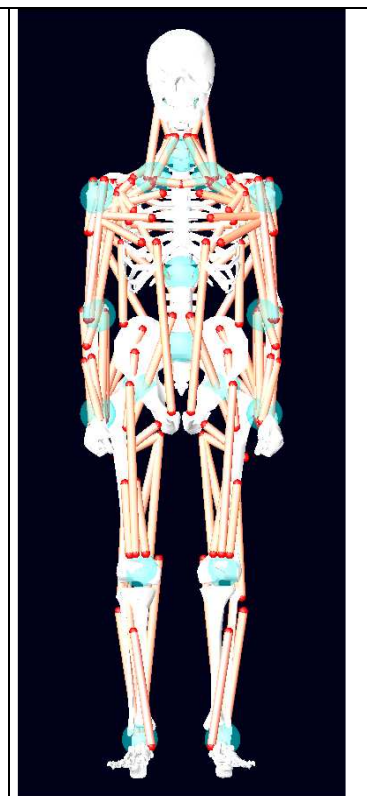
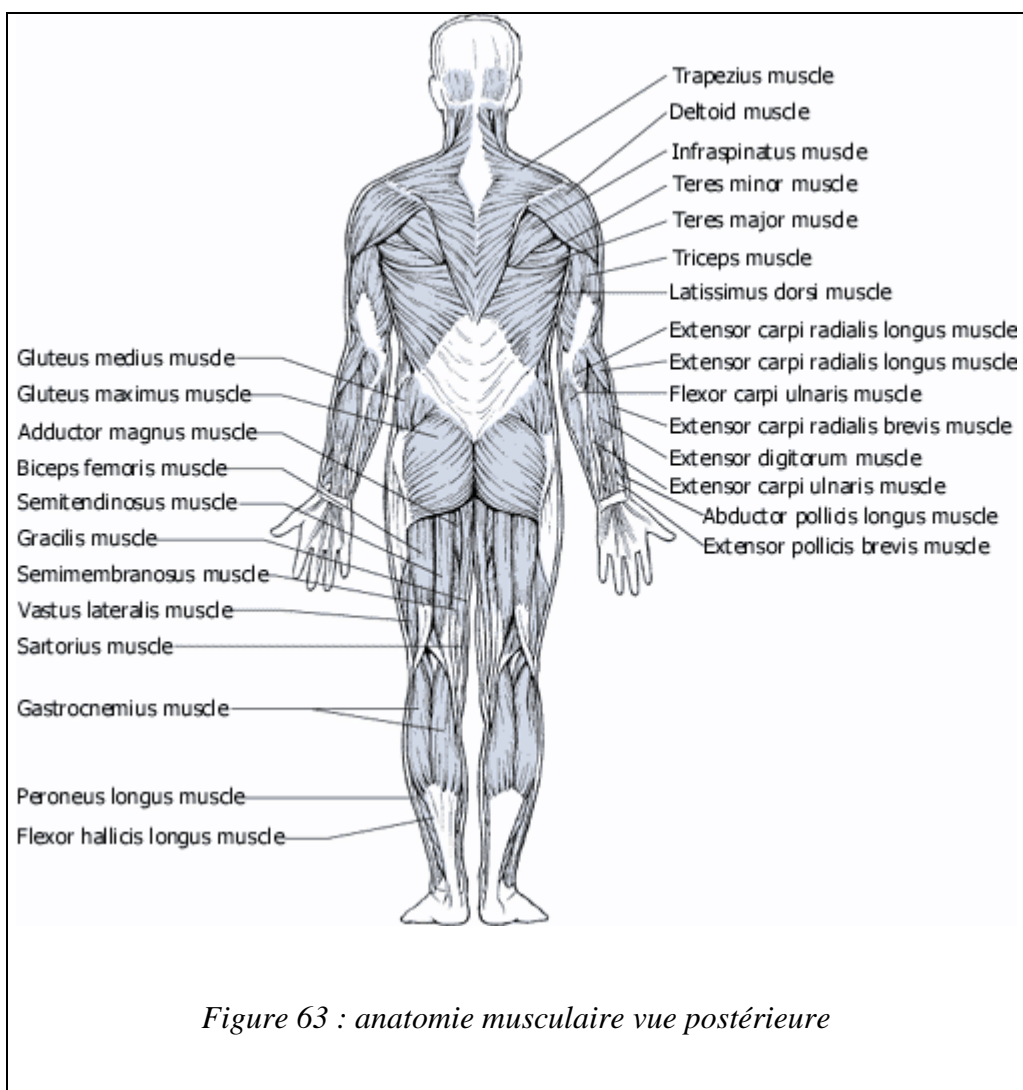
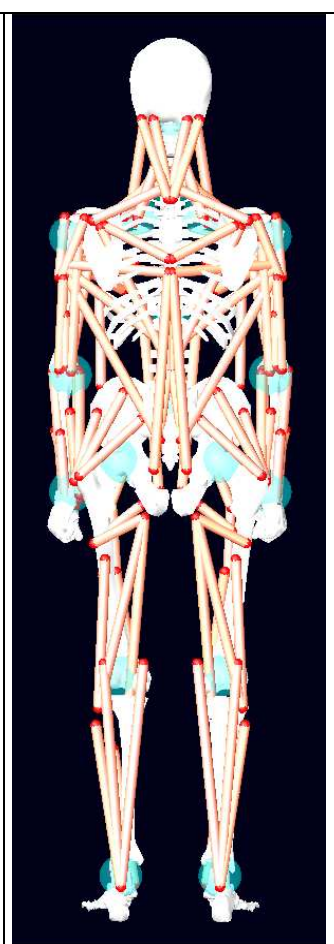


Figure 62 : modèle musculaire vue antérieure



*Figure 63 : anatomie musculaire vue postérieure*



*Figure 64 : modèle musculaire vue postérieure*

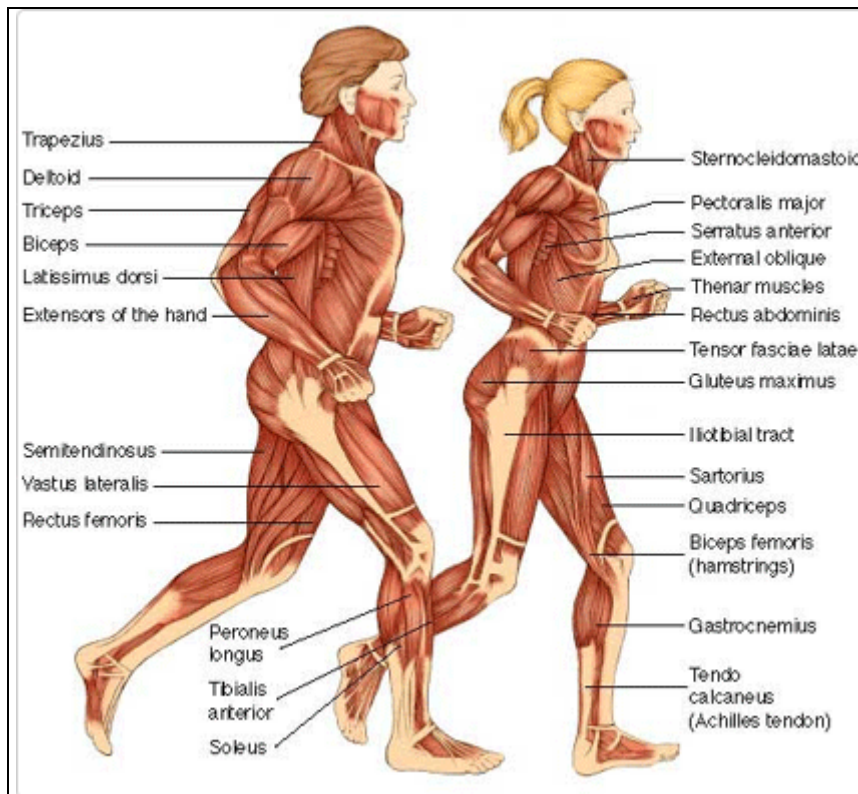


Figure 65 : anatomie musculaire vue de profil

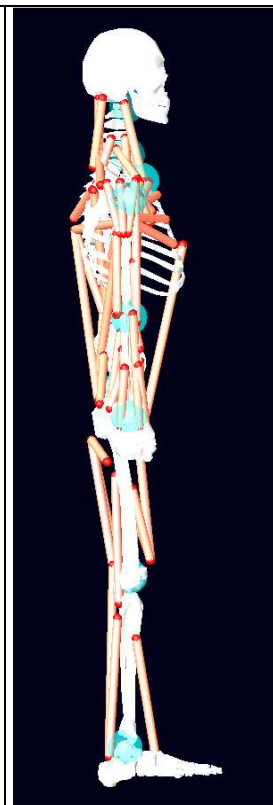


Figure 66 : modèle musculaire vue de profil

### 3.2.2 Génération des 20 motion agents

Le logiciel crée un modèle de corps humain qui peut être inséré dans un environnement physique, ou système, pour subir des interactions dynamiques. Comme nous l'avons vu précédemment, il existe plusieurs étapes de création du modèle sur le logiciel.

Notre travail lors de cette étape reste centré sur le modèle humain.

Afin de guider le mieux possible le corps de la skieuse, nous avons utilisé toutes les acquisitions vidéo de Ruby [11]. Pour cela, nous avons créé des motion agents supplémentaires et nous les avons insérés au modèle existant, annexe 5.

Nous insérons d'abord les marqueurs communs à ceux de Ruby [11] et à ceux proposés par LifeModeler [1] : 16 points de la skieuse.

Une commande du logiciel permet de créer de nouveaux motion agents. La démarche consiste à indiquer l'endroit précis du marqueur sur le corps et sa trajectoire. Nous pouvons donc ajouter deux marqueurs situés sur la tête de la skieuse ainsi que deux marqueurs sur la colonne vertébrale, ce qui permet un guidage du haut du corps plus fin et plus proche de la réalité.

N'ayant pas la possibilité d'insérer dans le fichier tous les marqueurs corporels issus de la thèse de Ruby [11], nous avons utilisé une autre méthode pour les créer.

La méthode tableau 21, consiste à indiquer l'endroit précis du marqueur sur le corps et sa trajectoire.

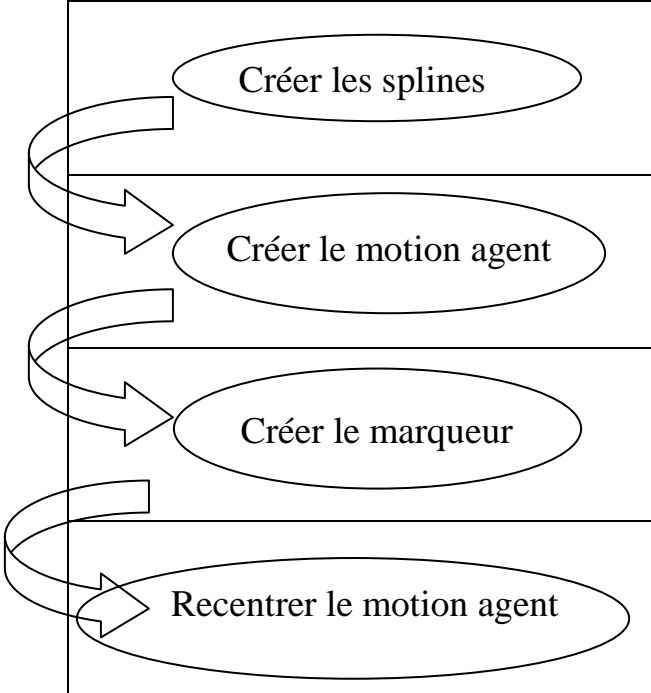
 <p>Créer les splines</p>	Créer le mouvement de nouvelles parties du corps
<p>Créer le motion agent</p>	Création de l'objet qui va permettre de guider le mouvement du modèle.
<p>Créer le marqueur</p>	Placer cet objet à un endroit précis du squelette
<p>Recentrer le motion agent</p>	Relier l'objet de guidage à l'endroit que l'on vient de préciser.

Tableau 21 : méthode de création d'un motion agent

Le modèle du corps humain est donc guidé par toutes les données cinématiques disponibles, figures 67 et 68.

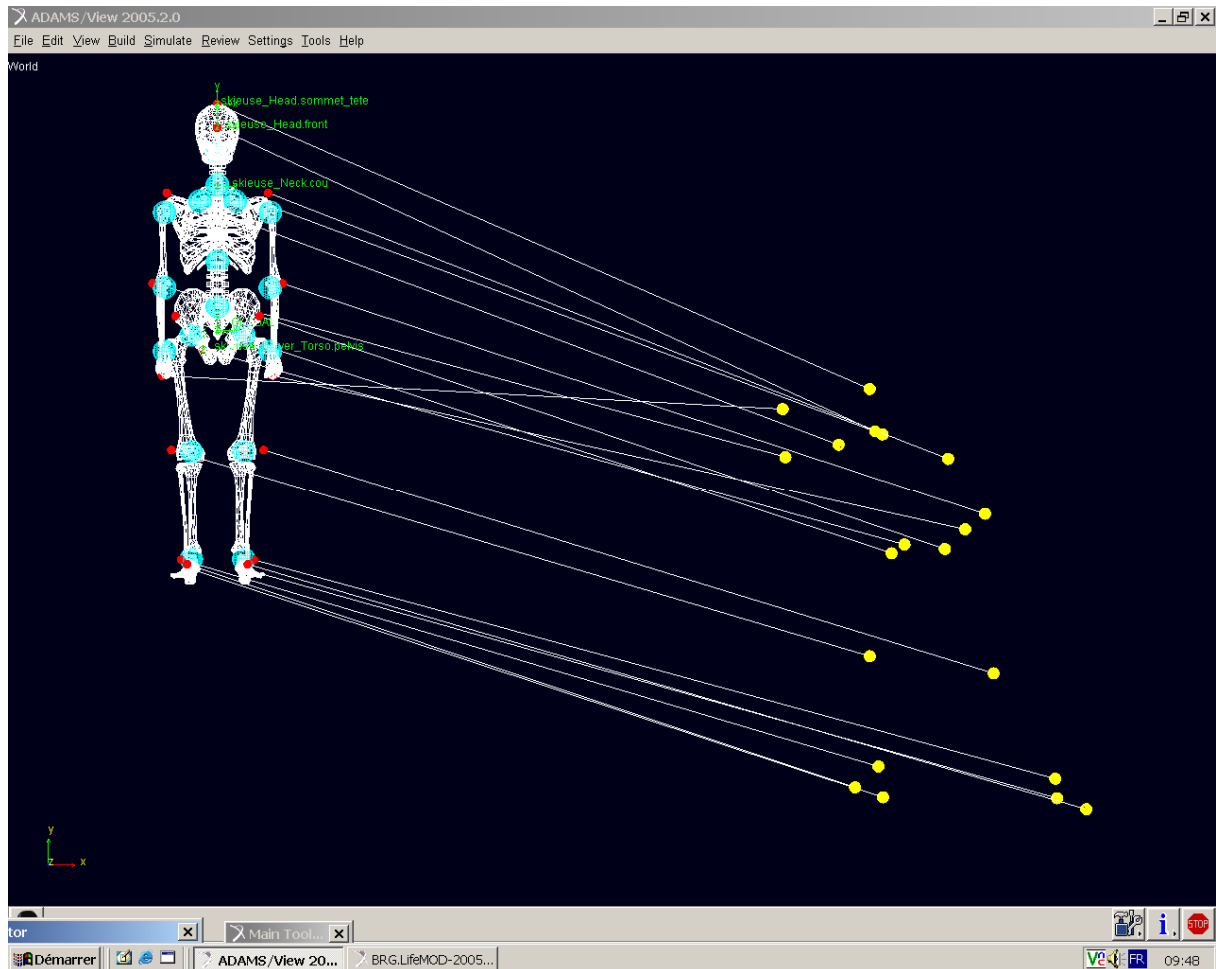


Figure 67 : génération des 20 motion agents

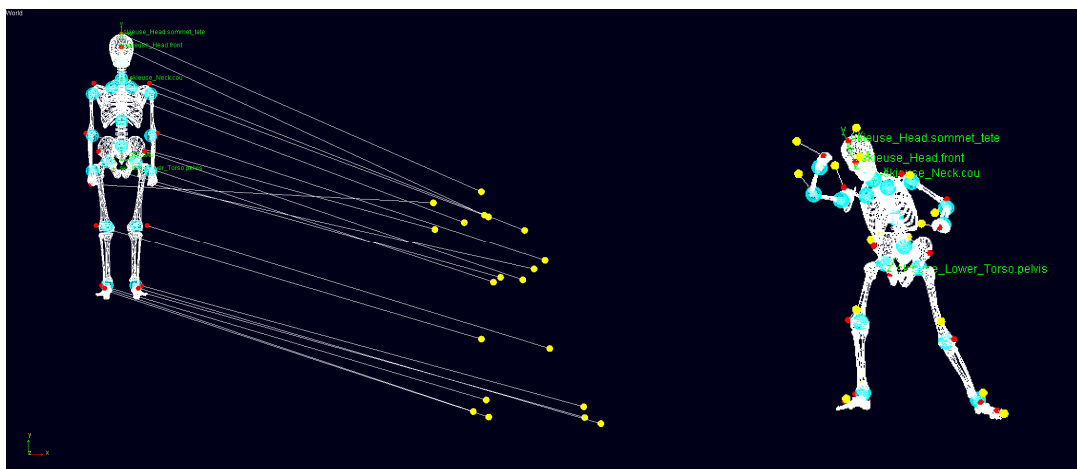


Figure 68 : position des agents à leur création et position des agents après l'analyse statique

### 3.2.3 Filtrage des données

A ce stade de la conception du modèle, la cinématique importée n'est pas encore satisfaisante car des mouvements parasites apparaissent. Ce problème est traité dans le paragraphe 3.6.1.2. Pour les atténuer, tout en conservant des mouvements corrects, nous utilisons une fonctionnalité de Lifemodeler : le filtrage des données importées.

Les paramètres du filtre disponibles sont les suivants :

- Le type **passé haut** ou **passé bas**.

Le premier est utilisé pour accentuer les irrégularités (hautes fréquences) alors que le second sert à lisser les courbes, en gommant ces irrégularités. C'est ce dernier qui nous intéresse car il atténuera les mouvements parasites en créant un mouvement continu, moins saccadé, plus proche de la réalité du geste.

- La **fréquence de coupure**.

Elle correspond à la fréquence à partir de laquelle le filtre s'active. C'est un paramètre très important, qu'il faut choisir judicieusement.

Après une étude attentive des courbes des trajectoires des segments du corps de la skieuse, la valeur retenue est de 25 Hz.

- **L'ordre**.

Il amplifie l'effet du filtre. Sur un filtre passé bas, plus il augmente, plus la courbe filtrée est adoucie. Comme l'objectif principal est de ne pas trahir le mouvement, après études comparatives, traitées au paragraphe 3.6.1.2, la valeur retenue est de 1.

### 3.2.4 Posture de départ

La posture de départ est importée dans le fichier. Toutefois, il est préférable de l'ajuster pour améliorer le mouvement.

Il serait fastidieux de la changer dans le fichier, alors qu'il existe une fonction de Lifemodeler pour choisir la posture de départ. Nous avons relevé les données initiales et nous les avons corrigées en faisant une étude comparée de photos à ce moment précis du cycle sous différents angles de vue. L'ajustement de la posture est décrit au paragraphe 3.6.1.1. La position ainsi obtenue est satisfaisante et entraîne une amélioration du geste lors de la simulation sur un cycle. Les mouvements parasites sont devenus négligeables.

### 3.2.5 Conclusion

Les différentes étapes de la réalisation du corps humain ont été décrites. Elles n'ont pu se réaliser qu'après validation de la méthode lors de la construction du modèle dynamique du corps humain de la skieuse. Suite à des améliorations et à des ajustements, notre travail a abouti au corps humain de la skieuse tel qu'il apparaît figure 69. Cependant, ce modèle reste à l'étape de l'analyse statique, il doit encore être lié à son environnement (le matériel et la neige) et entrer en interaction avec lui.

L'un des objectifs de notre étude étant l'analyse dynamique des skis et des bâtons sur la neige, notre travail va se poursuivre par la modélisation de l'environnement, par la création des liaisons spécifiques des chaussures avec les skis et des bâtons avec les mains.



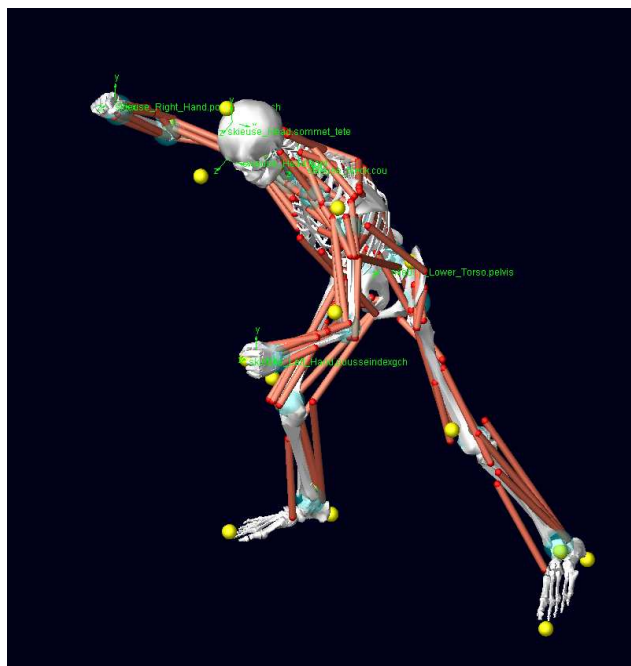


Figure 69 : synchronisation des agents corporels avec les agents de locomotion

### 3.3 L'ENVIRONNEMENT

L'environnement physique est défini par tout objet extérieur qui interagit avec le modèle. Le travail de modélisation des bâtons, du bloc neige, des skis et des contacts est réalisé avec le logiciel ADAMS. C'est un fichier que nous importerons dans celui du corps humain de la skieuse à l'étape de l'analyse statique.

#### 3.3.1 Modélisation des bâtons

Les bâtons entrent en jeu lors de la propulsion du skieur. Ils sont sollicités en compression principalement, mais aussi forcément en flexion du fait des liaisons complexes que constituent, d'une part la pointe qui s'enfonce dans la neige jusqu'au panier en pivotant, et d'autre part la main qui serre plus ou moins le bâton, retenu par la dragonne. Plusieurs prototypes ont été réalisés afin de respecter au mieux les caractéristiques observées.

##### 3.3.1.1 Modélisation de la poignée du bâton

Sa modélisation est inhérente à l'intégration future du bâton au modèle humain. Le bâton doit être piloté par le point qui sera en contact avec la main. Nous créons donc une poignée scindée en deux cylindres, de part et d'autre d'un marqueur global, représentée figure 70. Ce marqueur, associé avec un marqueur situé au niveau de la pince de la main, créera une liaison proche du maintien du bâton dans la réalité.

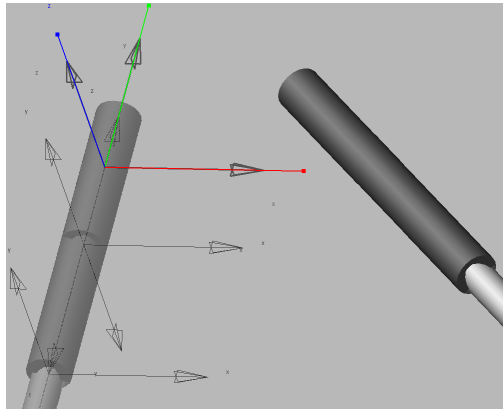


Figure 70 : modélisation de la poignée du bâton

### 3.3.1.2 Modélisation du panier du bâton

Nous avons simplifié la forme du panier et l'avons modélisée par un disque dont le centre est au centre de la tige, figure 71. Dans la réalité, le panier a une forme plus hexagonale et dissymétrique par rapport à la tige.

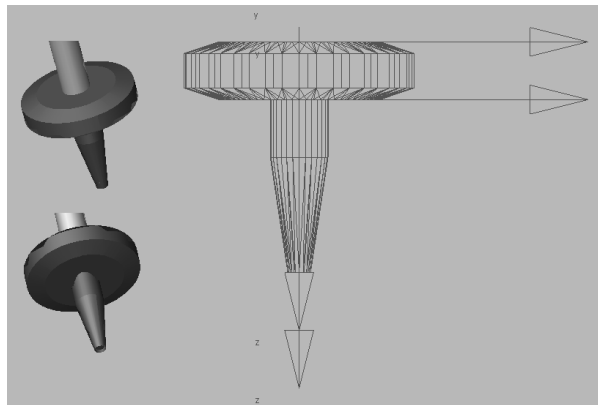


Figure 71 : modélisation du panier et de la pointe du bâton

### 3.3.1.3 Constitution et dimensions du bâton

Les bâtons de ski de fond sont relativement grands, habituellement ils doivent mesurer 10cm à 15cm de moins que la taille du skieur. La skieuse mesurant 166 cm, nous prenons une longueur totale de bâton de 150 cm. Le bâton est constitué par une succession de 5 cylindres basiques. Il est représenté figure 72, ses dimensions sont définies tableau 22 et ses caractéristiques apparaissent dans la fenêtre d'information du logiciel, figure 73.

D'après les références industrielles, un bâton de ski de fond pèse 90 grammes par mètre. Il est majoritairement fait en fibres de carbone, de part leur excellente résistance mécanique et leur faible masse volumique ( $1500 \text{ kg/m}^3$ ).

La masse d'un bâton de 150 cm, serait donc de 135 grammes.

Nous avons créé un matériau avec les propriétés de la fibre de carbone mais avec une densité moindre. En effet, ce sont des bâtons " pleins ", et non tubulaires, que nous pouvons uniquement modéliser.



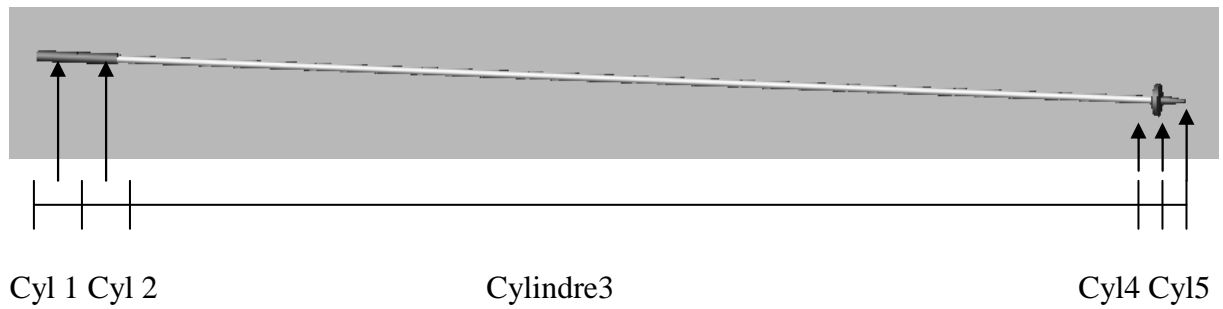


Figure 72 : modélisation du bâton

		Dimensions (mm)	
		Diamètre	Longueur
Poignée	Cylindre 1	14	50
	Cylindre 2	14	50
Tige	Cylindre 3	10	1315
Panier	Cylindre 4	60	10
Pointe	Cylindre 5	10	40

Tableau 22 : dimensions du bâton

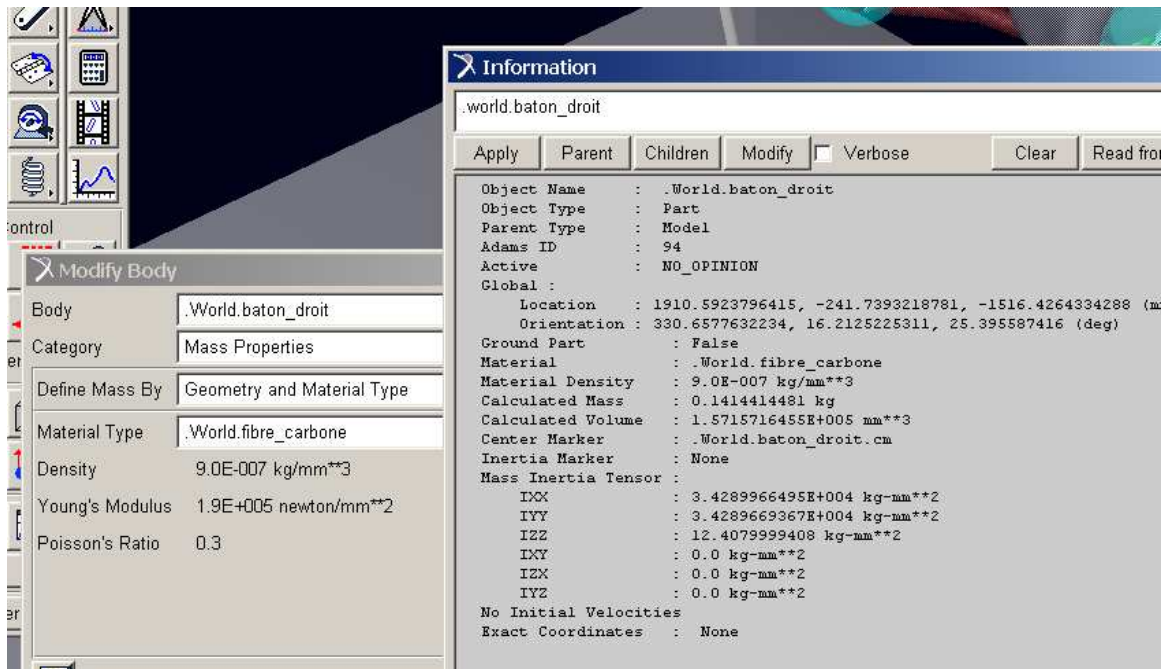


Figure 73 : fenêtre d'information de LifeModeler sur les caractéristiques du bâton droit

### 3.3.2 Modélisation du bloc neige

L'analyse de la neige, annexe 2, nous a permis de montrer le rôle important de la nature de la neige lors des courses : le type de cristal de neige, les conditions climatiques, vent, température.... Toutefois, nous avons simplifié sa modélisation car les variations, dues à cette nature du sol sont avant tout retranscrites lors des contacts.

Sur LifeModeler, le bloc de neige est un corps rigide. Le comportement du bloc neige lors du passage du ski est défini par l'élément de contact ski-neige que nous détaillerons plus loin.

Le bloc de neige est relié au marqueur du sol et il reste fixe.

Il présente le profil suivant, figure 74 (dimensions en millimètres) :

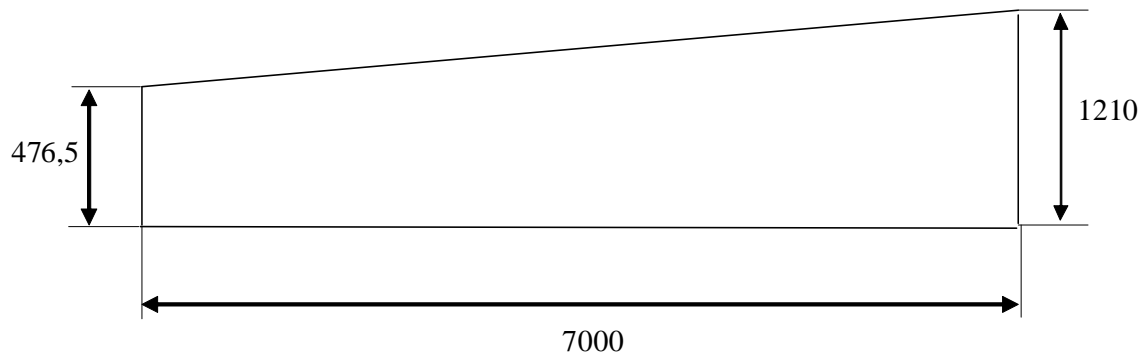


Figure 74 : dimensions du bloc de neige (mm)

La pente du bloc de neige est de  $6^\circ$ , elle correspond aux données de Ruby.

### 3.3.3 Modélisation des skis

Le ski modélisé doit répondre aux caractéristiques propres d'un ski de skating, c'est à dire être solide, souple et léger (chapitre I, paragraphe 1.4.3.2). La solution retenue est l'association de solides rigides et flexibles.

Le ski est considéré comme étant constitué d'un matériau isotrope et homogène. Cette hypothèse simplificatrice est suffisante pour notre étude qui s'intéresse avant tout au comportement de la skieuse. La masse volumique du ski qui nous a servi lors des tests est de  $440.2 \text{ kg/m}^3$ .

Afin de modéliser aussi fidèlement que possible, les caractéristiques de souplesse et d'amortissement du ski, nous avons utilisé la possibilité offerte par le logiciel qui consiste à pouvoir intégrer des éléments flexibles dans la structure. Ainsi, le ski est construit à partir d'éléments rigides et d'éléments flexibles. Les éléments rigides représentent la spatule, le patin et le talon, ils sont reliés entre eux par des éléments flexibles, deux éléments intermédiaires avants et deux éléments intermédiaires arrières.

Les propriétés que l'on peut attribuer à un élément flexible sont : le type de liaison aux points d'attaches (flexible, rigide ou libre), la raideur et le coefficient d'amortissement (*Damping Ratio*). Il a donc été nécessaire de discrétiser le ski en un nombre de tronçons suffisants, sept exactement, représentés figure 75 et définis dans le tableau 23, pour obtenir un comportement correct du ski. Une discrétisation plus fine, amènerait davantage de précision mais cela se ferait au détriment du temps de calcul. Comme nous voulons étudier le comportement de la skieuse et non le ski lui-même, nous avons trouvé, grâce à quelques essais, un compromis satisfaisant.

La modélisation du ski n'est pas symétrique, la fixation est décalée vers l'avant, comme sur un ski de skating.

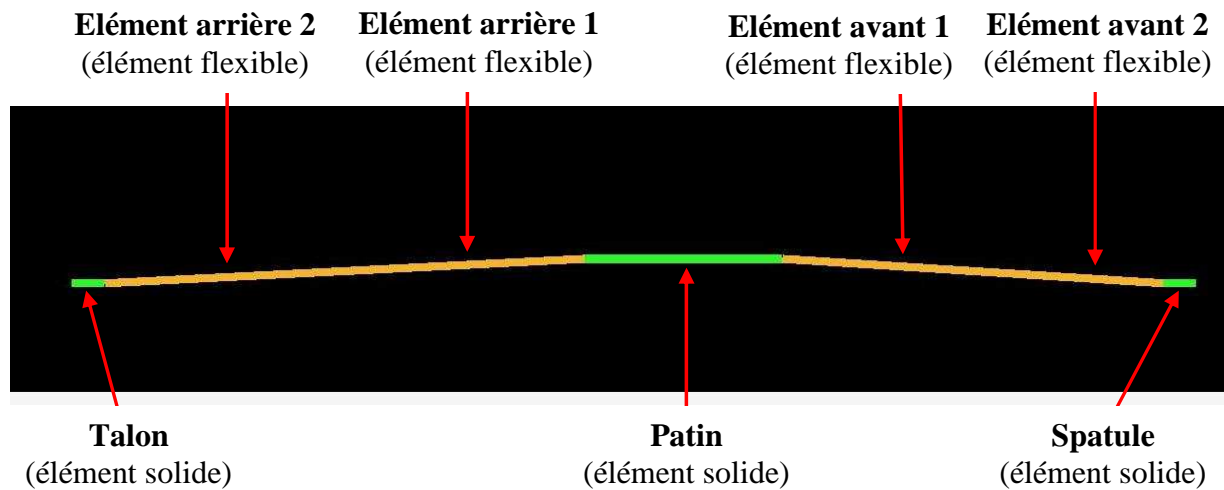


Figure 75 : modélisation du ski

### 3.3.3.1 Dimensions et poids du ski

Les caractéristiques du ski sont regroupées dans le tableau 23 :

Nom de l'élément	Longueur	Largeur	Epaisseur	Poids
Spatule	50 mm	44 mm	15 mm	2.9 g
Patin	300 mm	44 mm	15 mm	162.7 g
Talon	50 mm	44 mm	15 mm	2.9 g
Eléments intermédiaires avants	El.1 : 365.7 mm El.2 : 365.7 mm	44 mm	El.1 : 15 mm El.2 : 15 mm	El.1: 77.9 g El.2: 134.6 g
Eléments intermédiaires arrières	El.1 : 290.8 mm El.2 : 290.8 mm	44 mm	El.1 : 15 mm El.2 : 15 mm	El.1: 107 g El.2: 62.0 g

Tableau 23 : dimensions et poids du ski

### 3.3.3.2 Tests de souplesse

Le ski doit posséder une souplesse adéquate et ne pas vibrer sous l'effet des sollicitations auxquelles il est soumis usuellement.

En utilisant un ski de skating, pour une force appliquée correspondant au poids de la skieuse modélisée (300 N par ski soit 600 N de poids total) nous avons trouvé une flèche de 37 mm.

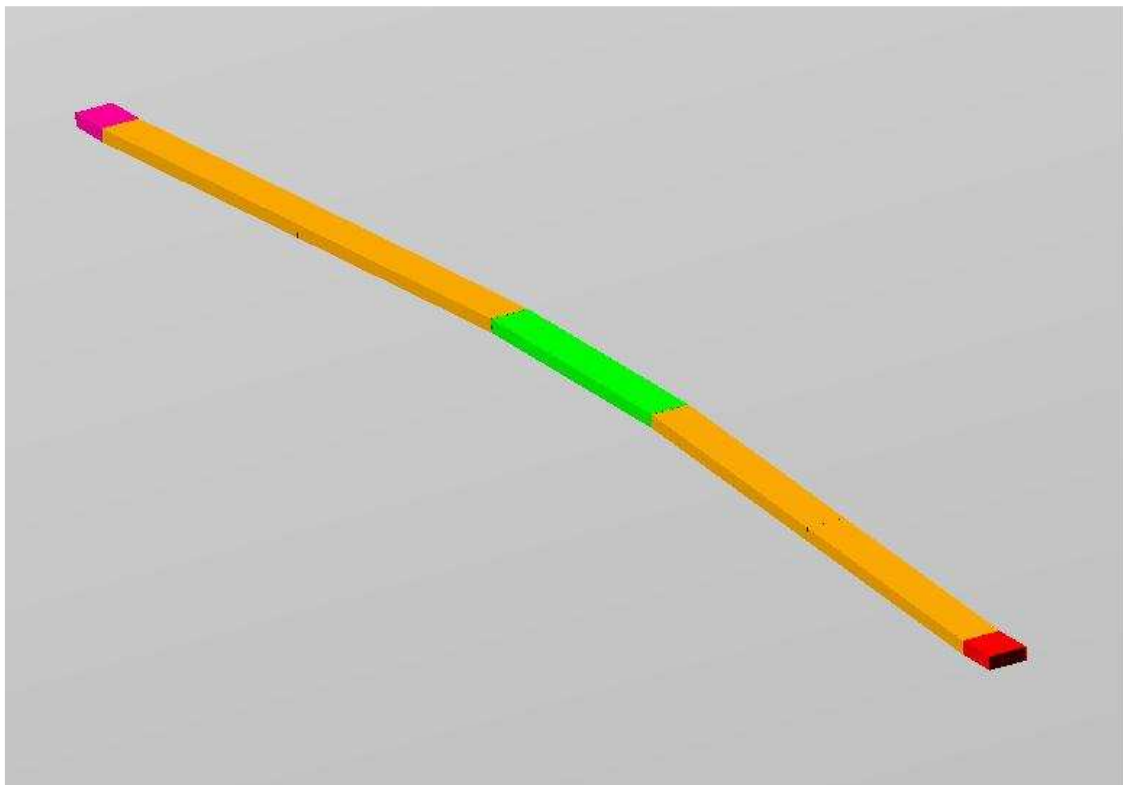
Nous avons ensuite réalisé des essais sur le logiciel, et tenté d'obtenir les paramètres qui permettent d'avoir une souplesse et un amortissement les plus proches possibles de ce que nous pouvons constater visuellement du comportement du ski.

**Le taux d'amortissement** peut être réglé entre zéro et un. La valeur zéro correspond à l'absence d'amortissement et un, correspond à l'amortissement le plus grand, permis par le logiciel. Pour régler cette valeur, nous avons simulé une chute du ski sur le sol, qui devrait engendrer des vibrations très vite amorties. La valeur retenue est de **0,3**.

Le tableau 24 résume les valeurs que nous avons retenues comme étant un bon compromis ; la figure 76 montre l'allure du ski :

<b>Paramètres</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unités</b>
Taux d'amortissement	0.3	/
Masse volumique	440	kg/m <sup>3</sup>
Epaisseur du ski	15	mm

*Tableau 24 : caractéristiques du ski*



*Figure 76: modélisation du ski sous ADAMS*

## **3.4 LES INTERACTIONS DU CORPS HUMAIN AVEC L'ENVIRONNEMENT**

Le bâton, le sol et le ski étant modélisés, nous allons dans un premier temps les lier au modèle du corps humain de la skieuse qui est resté au stade de l'analyse statique. Nous importons le bâton, nous créons les contacts et nous utilisons les motion agents pour leur mouvement. La procédure pour les skis est différente, car il nous a paru plus opportun de positionner les skis sur le bloc de neige et de créer les contacts, avant de les importer vers le fichier de la skieuse. Dans un second temps, une fois que le matériel est correctement positionné, nous lions les mains et les pieds de la skieuse respectivement aux bâtons et aux skis par des liaisons bushings. Pour finir, nous continuons les étapes de la modélisation par la simulation dynamique inverse et la préparation du modèle pour la simulation dynamique directe. Après plusieurs itérations nécessaires à la mise au point des paramètres de calculs, nous aboutissons à un modèle stable proche de la réalité.

### **3.4.1 Les liaisons du corps humain avec l'environnement**

#### **3.4.1.1 Données du matériel**

L'intégration d'objets susceptibles d'interagir avec le modèle créé par LifeModeler, se fait par le biais d'une fonction qui permet de fusionner deux modèles. Il apparaît important de prendre en compte l'intégration future au modèle pendant la conception du matériel. En effet, on ne peut piloter l'objet importé que par la position et l'orientation de son marqueur global.

#### **3.4.1.2 Importation du bâton**

La technologie de la dragonne ayant récemment évolué, le confort et l'ergonomie ont poussé les concepteurs à simplifier la liaison. Il existe maintenant un seul point d'attache, fixe et facilement localisable, aussi bien du côté de la poignée que de la main du skieur.

Grâce à la conception de la dragonne, qui serre les articulations du poignet et du pouce, figure 7, la poignée du bâton est saisie facilement lors de la phase de poussée et elle est lâchée lors de sa phase aérienne, ce qui permet un relâchement musculaire lors du retour du bras.

Le bâton étant importé dans LifeModeler, il faut maintenant le placer au niveau de la main. Sa modélisation permet de le piloter par le marqueur de la poignée que nous faisons coïncider avec celui de la main, créé préalablement, figure 77. Les coordonnées du marqueur de la main sont directement accessibles sous LifeModeler car celui-ci est situé entre le pouce et l'index, au niveau de la pince.

L'intégration au mouvement nécessite l'exploitation des données de RUBY [11] concernant les motion agents qui vont piloter les bâtons. Pour cela, nous avons généré les fichiers de commande qui permettent de créer les trajectoires dans LifeModeler. Les marqueurs 11 et 15 de RUBY ont donc été ajoutés ; ils correspondent respectivement aux paniers gauche et droit. L'orientation initiale des bâtons a été obtenue en faisant correspondre les paniers aux motion agents déjà positionnés dans l'espace.

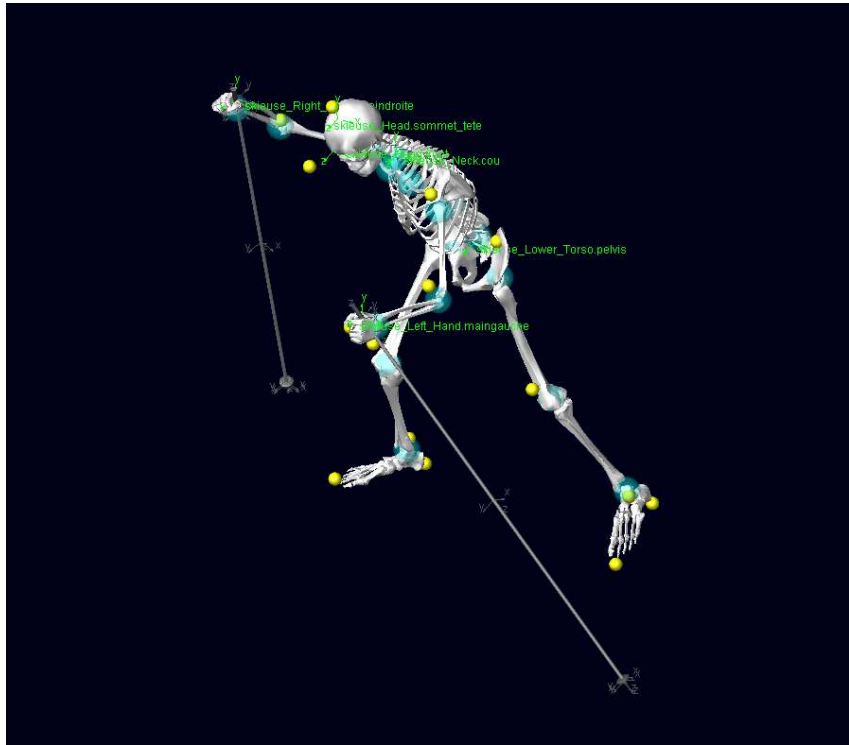


Figure 77 : positionnement des bâtons dans la main du modèle

### 3.4.1.3 Importation du bloc de neige et des skis

L'intégration au modèle des skis est plus complexe que celle des bâtons. En effet, nous pouvons considérer que ce sont les mains et le contact au sol qui déterminent l'orientation du bâton, mais le ski a un degré de liberté (axe de rotation de la fixation) qui n'est pas contrôlé directement par le pied, mais par la fixation elle-même. Les efforts développés dans cette liaison sont le résultat d'un équilibre dynamique complexe avec les effets d'inertie du ski.

Nous avons expérimenté pour les skis, la méthode utilisée pour les bâtons, mais elle n'a pas donné de résultats probants. De plus il ne nous paraissait pas pertinent de piloter les skis avec les marqueurs des trajectoires des skis, donnés par RUBY [11] car nous voulons que se soit le modèle qui agisse sur les skis.

Pour plus de facilité dans la modélisation, nous avons positionné les skis sur le bloc neige et nous avons créé les contacts au niveau du ski. Nous avons utilisé les marqueurs de Ruby [11] pour l'orientation des skis lors de la position initiale, uniquement pour avoir un repère visuel. Ainsi, lors de l'importation, les skis avec leurs contacts sont déjà placés et seule la liaison au pied doit être créée. Le modèle du bloc de neige et des skis avec les contacts, figure 78, est donc directement mis en position, les deux marqueurs globaux se confondent.

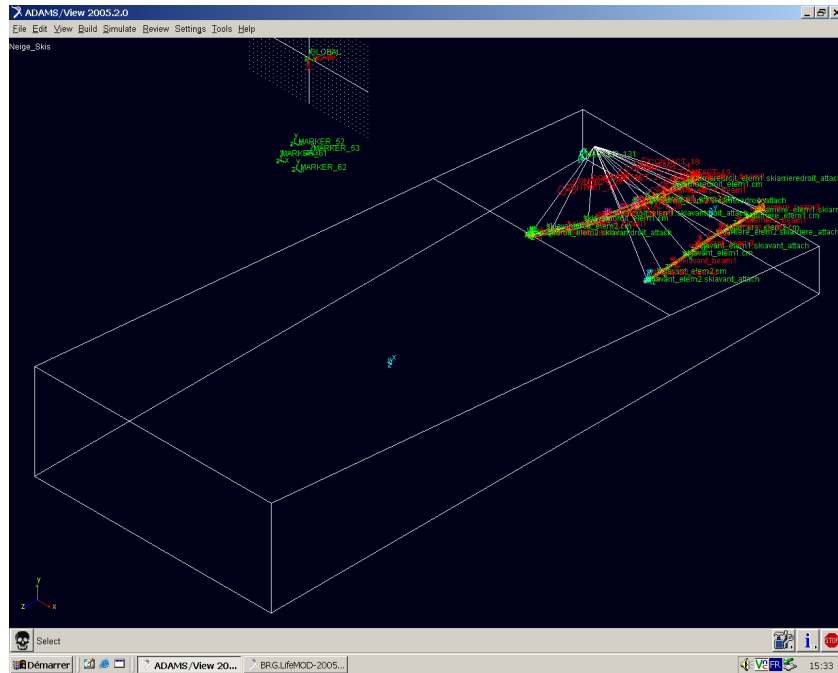


Figure 78 : représentation visuelle du bloc de neige (translucide), des skis (oranges) et des contacts (lignes blanches)

### 3.4.2 Les contacts

Le logiciel propose plusieurs types de modélisation : un contact "Solide/Solide", "Courbe/Courbe", "Point/Point", "Point/Plan", "Courbe/Plan", "Sphère/Plan" et "Sphère/Sphère".

Compte tenu des données initiales du ski et de la neige et de leur modélisation en tant que solides, nous choisissons un contact "Solide/Solide" avec "impact".

#### 3.4.2.1 Type de contact utilisé : impact

C'est le type le plus approprié car il permet aux deux solides choisis de rentrer en contact, puis de maintenir le contact ou de le supprimer à tout moment. Les forces de contact sont alors modélisées comme suit, figure 79 :

$$F = k x^n + c dx/dt$$

Avec  $k$  = raideur du matériau  
 $x$  = profondeur de pénétration  
 $n$  = coefficient de pénalité choisi expérimentalement  
 $c$  = coefficient d'amortissement

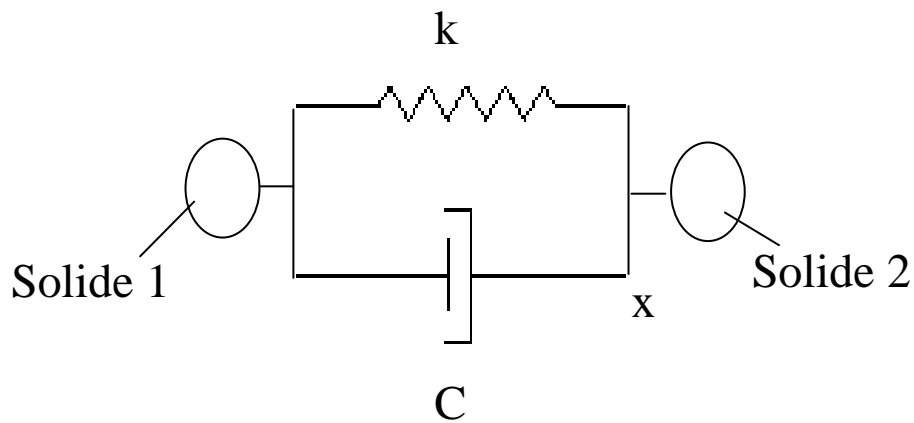


Figure 79 : schéma de la force de contact sous LifeModeler

Les divers paramètres du contact servent à régler l'intensité de la force avec laquelle les solides se repoussent. La profondeur de pénétration ne correspond pas à la pénétration maximale admise, en effet la pénétration dépend du coefficient d'amortissement qui n'est pas constant ni linéaire, il varie selon une loi cubique, figure 80.

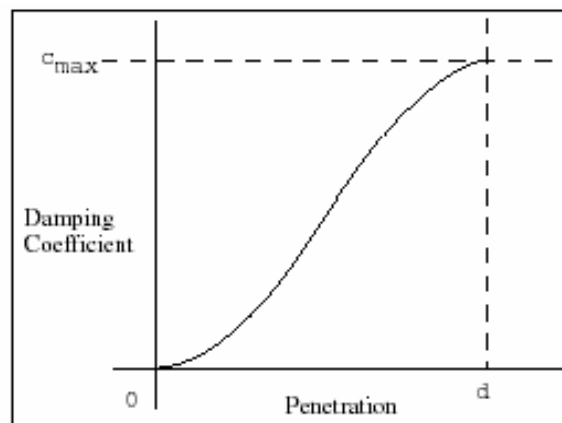


Figure 80 : fonction du coefficient d'amortissement

La commande "contact" permet aussi d'ajouter des conditions de frottements entre les deux solides que l'on veut mettre en contact.

La semelle du ski étant en polyéthylène farté, les coefficients de frottement sont très faibles, de l'ordre de 0.02 à 0.05 lors de la phase de glisse, (Voir chapitre I). Ces conditions s'appliquent à l'ensemble des parties en contact de chaque solide et sont caractérisées sur le logiciel par des coefficients statique (Cs) et dynamique (Cd) faibles dans le cas d'un ski bien farté sur la neige.

Les paramètres de profondeur, du coefficient statique et dynamique, les valeurs de transition en adhérence et celles en frottement de glissement, émanent de la littérature (chapitre I).

Par ajustement, nous avons identifié des paramètres préférentiels pour la raideur, l'amortissement et le coefficient de pénalité n.



L'exposant  $n$  correspond à un "coefficient de pénalité" qui caractérise la force de pénétration. Comparé à un ressort, le contact devient rigide si  $n$  est supérieur à 1 et il est mou si  $n$  se situe entre 0 et 1. Pour un sol dur, une valeur de 1.5 ou plus, est nécessaire.

### 3.4.2.2 Localisation des contacts

Les conditions de contact et frottement, sont attribuées aux sept tronçons constituant la semelle du ski. Le contact se réalise de solide à solide, le premier étant le bloc de neige et le second étant chacune des parties du ski. L'origine du repère de calcul des contacts est sur le marqueur du bloc neige d'où ils partent tous. Leur terminaison étant au centre de l'élément au niveau de son marqueur, figures 81, 82 et 83.

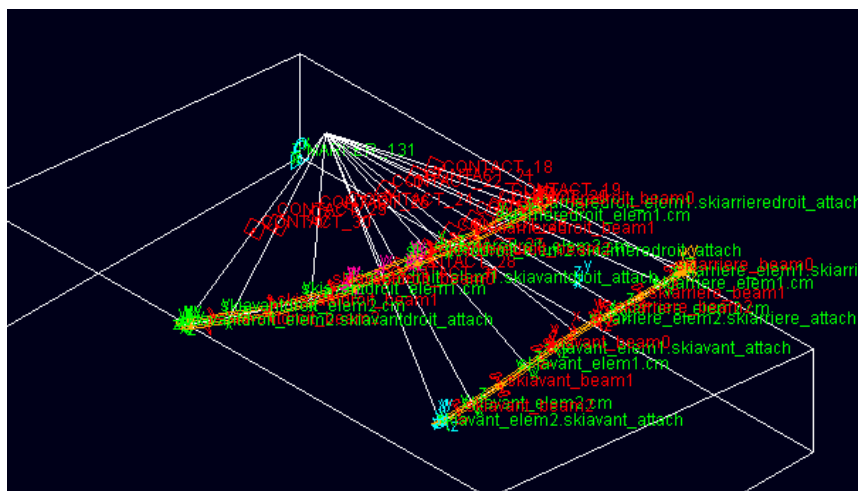


Figure 81 : représentation des contacts skis-neige

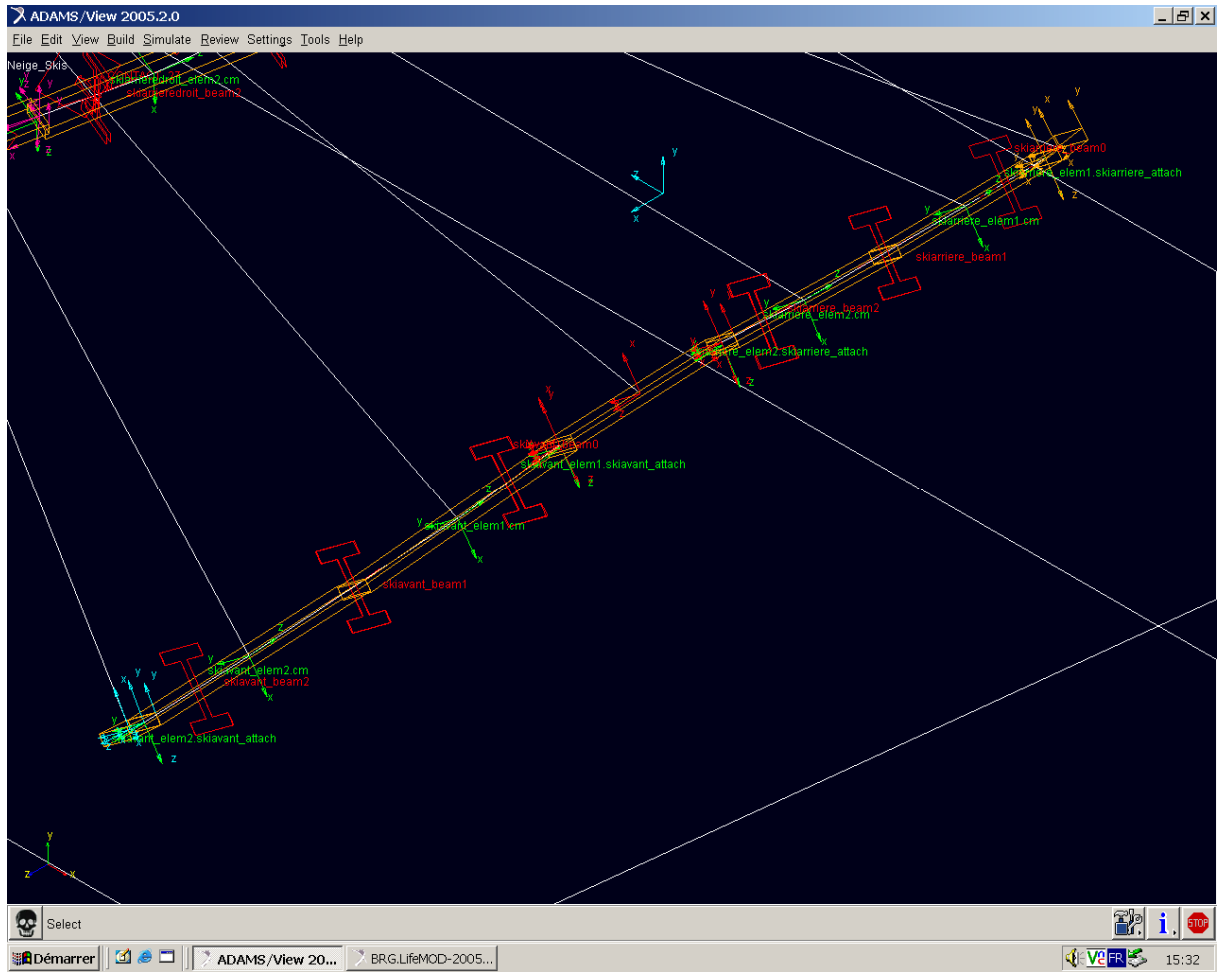


Figure 82 : localisation des 7 contacts sur le ski vue de dessus

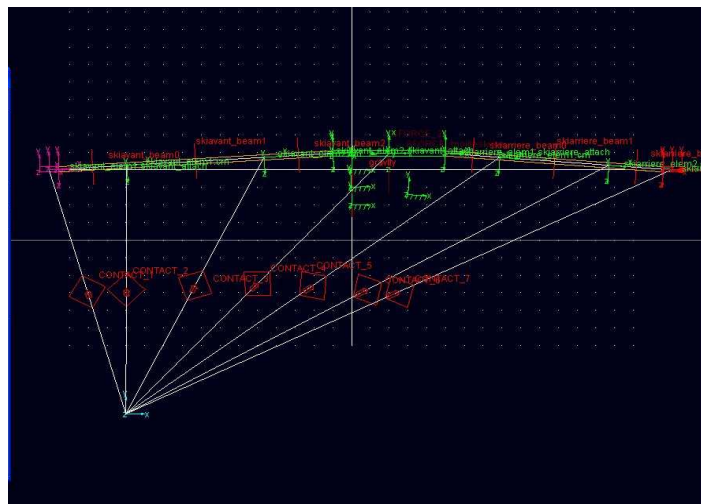


Figure 83 : profil droit de la localisation des 7 contacts sur le ski

### 3.4.3 Type de liaison utilisé entre le matériel et le modèle humain : liaison bushing

L'environnement physique importé du fichier d'Adams vers le fichier LifeModeler est positionné dans la database du modèle humain. Ce dernier se trouve dans la position du départ. Cette étape consiste, à lier le modèle humain, au matériel par des liaisons spécifiques, afin de fusionner les deux modèles. La liaison bushing est préférée à une liaison mécanique classique type pivot ou rotule, car le blocage complet des translations peut créer des instabilités, voire même, des divergences lors de la simulation.

Un bushing est une liaison flexible à six degrés de liberté entre deux marqueurs. Il est nécessaire de paramétrer 6 ressorts et 6 amortisseurs (respectivement 3 en translation et 3 en rotation).

Cette liaison est la plus appropriée au modèle car tout comme les motion agents, elle autorise les petites erreurs inévitables dues à la digitalisation des trajectoires relevées, qui, sans cela, bloqueraient les calculs de la simulation. Cependant, elle a l'inconvénient de devenir rapidement instable si les paramètres sont mal choisis.

Lors du geste, dans la phase aérienne du ski, celui-ci dans son mouvement de rotation par rapport au pied, s'éloigne du talon mais ne touche pas la neige. Quant au bâton, il est lâché par la main lors du retour du bras. Or, le logiciel ne nous donne pas cette possibilité d'action. Le choix de la simulation est fixé dès le départ de la modélisation : main ouverte ou fermée.

Dans un premier temps, les valeurs des bushing des mains et des pieds ont été choisies, de façon à respecter la cinématique du mouvement ; plus elles augmentent, plus l'objet est bloqué à la partie du corps. Dans un second temps, nous avons ajusté ces valeurs, afin que les forces de contact soient proches de celles relevées dans la littérature. Plus le bushing était "lâche" moins l'intensité de la force de contact était élevée et plus l'appui était décalé dans le temps.

#### 3.4.3.1 Liaison bushing de la main

Cette liaison est illustrée figure 84.

Un marqueur est créé entre le pouce et l'index (marqueur I), il est associé au marqueur du centre de la poignée du bâton (marqueur J). Les valeurs de raideur et d'amortissement sont transcrites dans les tableaux 25 et 26 ci-dessous, elles sont identiques pour les deux mains.

MOUVEMENT DE TRANSLATION	VALEUR		
	X	Y	Z
Raideur N/mm	1.0 E+004	1.0 E+004	1.0 E+004
Amortissement N/mm/s	1.0 E+006	1.0 E+006	1.0 E+006

Tableau 25 : valeurs de raideur et d'amortissement en translation du bushing de la main

MOUVEMENT DE ROTATION	VALEUR		
	X	Y	Z
Raideur N.mm/rd	1000	1000	1000
Amortissement N.mm/rd/s	1.0 E+005	1.0 E+005	1.0 E+005

Tableau 26 : valeurs de raideur et d'amortissement en rotation du bushing de la main

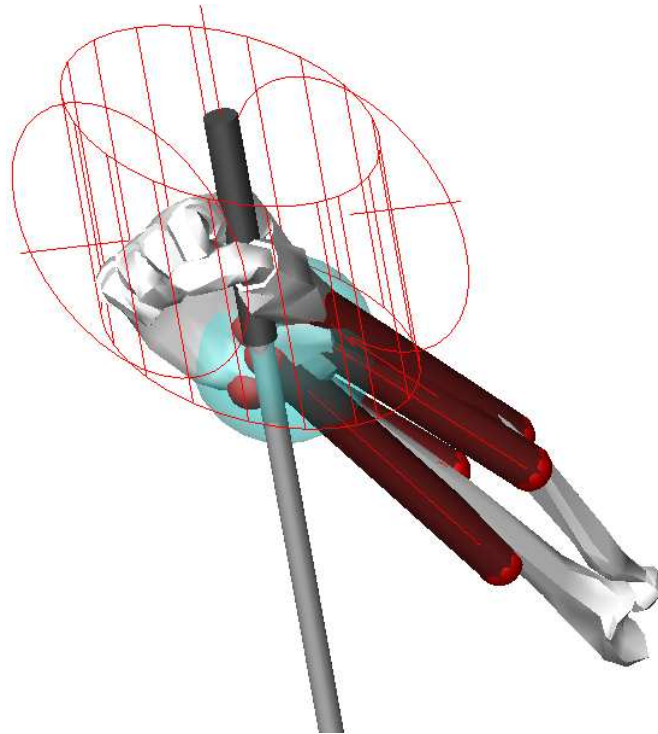


Figure 84 : la liaison bushing de la main droite schématisée sur LifeModeler

### 3.4.3.2 Liaison bushing du pied

Cette liaison est illustrée figure 85.

Un marqueur est créé au niveau du gros orteil, il est associé au marqueur de l'extrémité avant de la partie centrale du ski, au niveau du premier point de fixation d'une chaussure de skating. Les valeurs de raideur et d'amortissement sont transcrites dans les tableaux 27 et 28, elles sont identiques pour les deux pieds. La spécificité de la liaison bushing permet de simuler les divers types de fixation. La modélisation de la fixation à deux points aurait été inutile (création du deuxième point de fixation et de la butée avant comme dans la réalité) car la liaison bushing limite les rotations frontales sagittales et transversales.

MOUVEMENT DE TRANSLATION	VALEUR		
	X	Y	Z
Raideur N/mm	10	100	150
Amortissement N/mm.s	10	15	15

Tableau 27 : valeurs de raideur et d'amortissement en translation du bushing du pied

MOUVEMENT DE ROTATION	VALEUR		
	X	Y	Z
Raideur N.mm/rd	1000	1000	100
Amortissement N.mm/rd/s	100	1000	10

Tableau 28 : valeurs de raideur et d'amortissement en rotation du bushing du pied

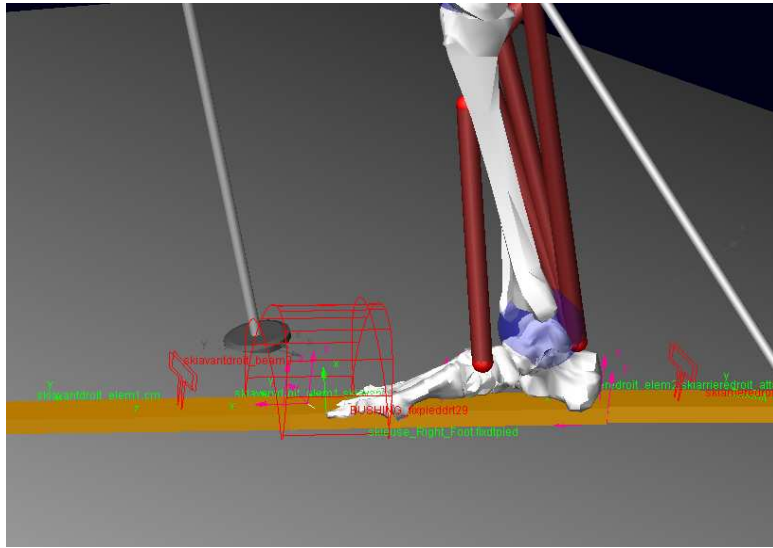


Figure 85: visualisation profil gauche de la liaison bushing du pied droit

### 3.4.4 Simulation dynamique inverse

Contrairement à la modélisation du corps humain de la skieuse qui ne comporte que des moteurs articulaires, ce modèle musculaire est redondant, le nombre de muscles est supérieur au nombre de degrés de liberté, il existe alors une infinité de solutions pour effectuer un déplacement. Le modèle dynamique inverse est résolu par une technique d'optimisation afin de trouver une solution optimale au problème. Cette technique d'optimisation consiste, à calculer les efforts qui produisent le mouvement désiré en minimisant une fonction coût judicieusement choisie.

Des résultats ont été relevés dès cette étape, contrairement à la modélisation du corps humain de la skieuse où il fallait réaliser toutes les étapes jusqu'à la simulation dynamique directe pour obtenir des résultats cinématiques et dynamiques. Le fait d'avoir réalisé les contacts sur le logiciel ADAMS, nous a permis de recueillir des résultats dès la simulation dynamique inverse et d'ajuster certains paramètres.

Dans un premier temps en restant à cette étape, nous avons affiné les paramètres de "bushing" et de "contact" par feed back.

Dans un second temps, ce sont les résultats émanant de l'analyse dynamique directe qui nous ont permis d'ajuster les paramètres de calcul lors de cette étape.

#### 3.4.4.1 Ajustement des paramètres des motion agents

Les paramètres de cette liaison peuvent être modifiés pour optimiser la modélisation. Face à un comportement inapproprié du modèle lors de la simulation dynamique directe, nous les faisons varier, dans une plage très large, de 1 à 100, figure 86.

Les facteurs globaux des motion agents permettent de faire varier la capacité qu'a le modèle à suivre les données cinématiques.

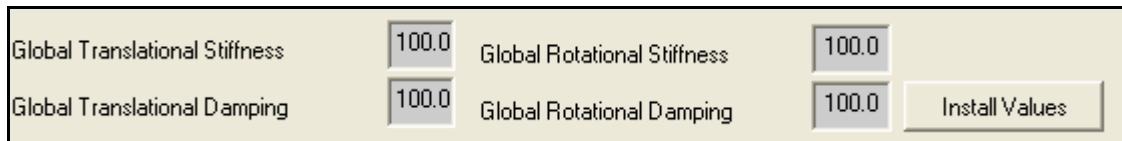


Figure 86 : valeurs de raideur et d'amortissement de la liaison des motion agents

### 3.4.4.2 Ajustement des paramètres musculaires

Lors de l'analyse directe, le modèle glissait et manquait de robustesse (la skieuse chutait sur le côté ou vers l'avant). La musculature appropriée à la marche (valeurs recueillies dans le tutorial [57]) ne l'était plus pour le skating qui est une activité physique plus intense et plus demandeuse en énergie. Il a donc été nécessaire de trouver les bons paramètres musculaires. Nous avons donc fait varier les gains proportionnels et différentiels des muscles.

LifeModeler modélise les muscles par la force qu'ils peuvent fournir. Lors de la simulation dynamique inverse, la longueur des muscles  $L_{\text{souhaitée}}$  est enregistrée à chaque pas de temps. La vitesse de contraction des muscles  $\dot{L}_{\text{souhaitée}}$  est également déduite de ces informations. Ces longueurs et vitesses servent ensuite aux muscles qui agissent comme des vérins pour reproduire le mouvement lors de la simulation directe. Les muscles produisent donc une force  $F_1$  dans le but de minimiser l'erreur à l'instant  $t$  entre la longueur souhaitée et la longueur réelle ou entre la vitesse souhaitée et la vitesse réelle.

$$F_1 = \begin{cases} F_0 & \text{si } F_1 \geq F_0 \\ P_{\text{gain}} \cdot (L_{\text{souhaitée}} - L_{\text{réelle}}) + D_{\text{gain}} \cdot (\dot{L}_{\text{souhaitée}} - \dot{L}_{\text{réelle}}) & \text{si } F_1 \leq F_0 \\ 0 & \text{si } L_{\text{souhaitée}} \geq L_{\text{réelle}} \end{cases}$$

$$F_i = F_{\text{filtre}}(F_1) \quad \text{avec } 0 \leq F_{\text{filtre}} \leq 200\%$$

Les propriétés physiologiques de chaque muscle sont transcrites par les paramètres suivants :  

pCSA = physiological cross sectional area : section droite du muscle (donnée par la database) annexe 5.

$M_{\text{stress}}$  = contrainte maximale du muscle (donnée par la database)

$F_{\text{filtre}}$  = Force output filter : réglage de l'intensité de la force déployée par le muscles en %

Ces propriétés permettent d'établir pour chaque muscle la force maximale qu'il peut développer, traduite par l'équation suivante :  $F_0 = \text{pCSA} * M_{\text{stress}}$

L'algorithme précédent permet de calculer  $F_1$  à partir des longueurs  $L_{\text{souhaitée}}$  et des vitesses  $\dot{L}_{\text{souhaitée}}$

Les différences entre ce qui est souhaité et le réel sont corrigées par le gain proportionnel  $P_{\text{gain}}$  et le gain différentiel  $D_{\text{gain}}$ .

Si  $F_1$  est supérieure à la limite physiologique du muscle  $F_0$ , alors  $F_1 = F_0$ .

Si  $L_{\text{souhaitée}} > L_{\text{réelle}}$ , alors  $F_1 = 0$ .

Enfin,  $F_1$  est la force totale pour réaliser un mouvement, le filtre  $F_{\text{filtre}}$  est réparti en fonction des pourcentages d'activité de chaque muscle, la force produite par chaque muscle est  $F_i$ .

Les gains proportionnels et différentiels ne sont pas considérés comme des paramètres mais comme des correcteurs.

Par ajustement avec la simulation dynamique directe, les valeurs optimales trouvées pour les gains sont :  $P_{\text{gain}} = 100$  et  $D_{\text{gain}} = 100$

Suite aux ajustements des motion agents et des muscles, une animation peut être lancée, dans laquelle le modèle est piloté par les motion agents. Les figures de 87 à 90, montrent une image de l'animation, suite à la simulation dynamique inverse, dans laquelle les forces de contact sont matérialisées par des flèches rouges.

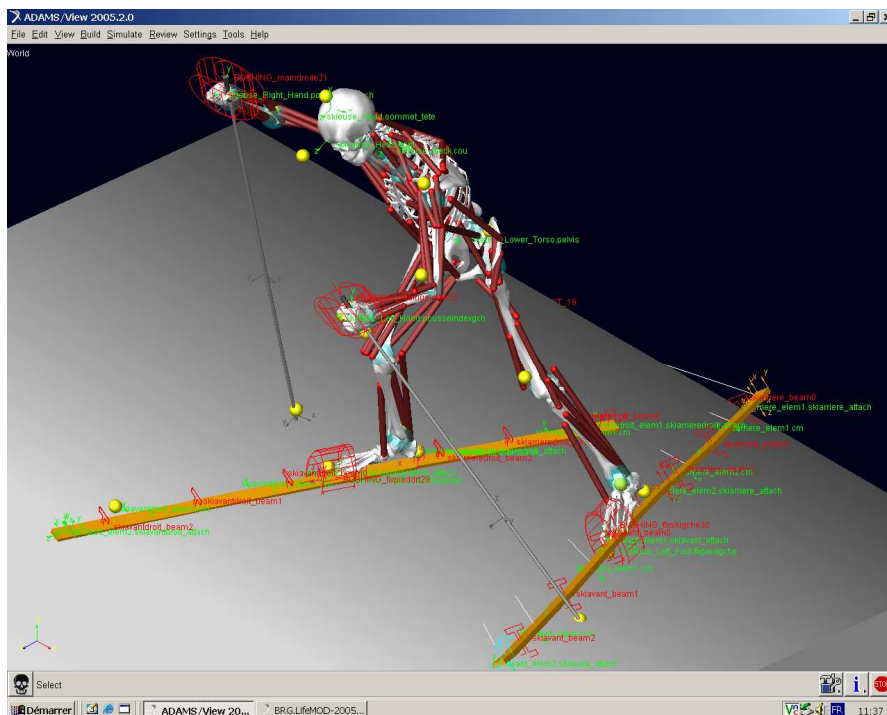


Figure 87 : position de départ lors de la simulation dynamique inverse

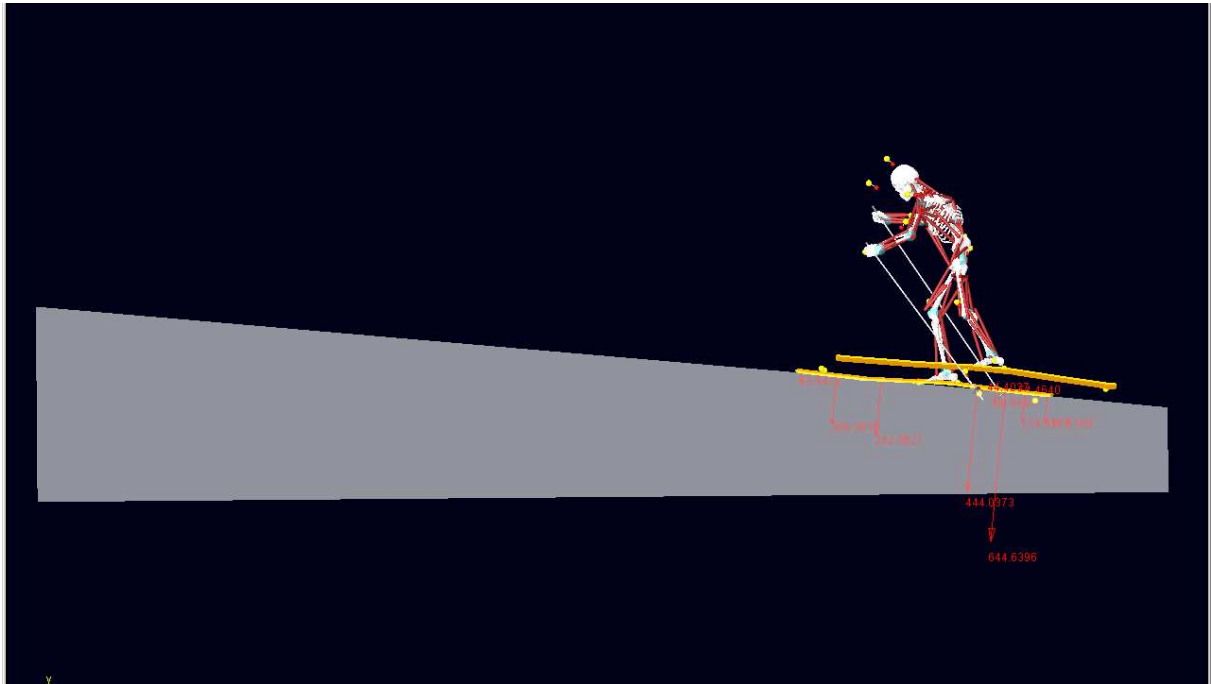


Figure 88 : modèle animé, les forces et leur valeur sont modélisées par les flèches rouges

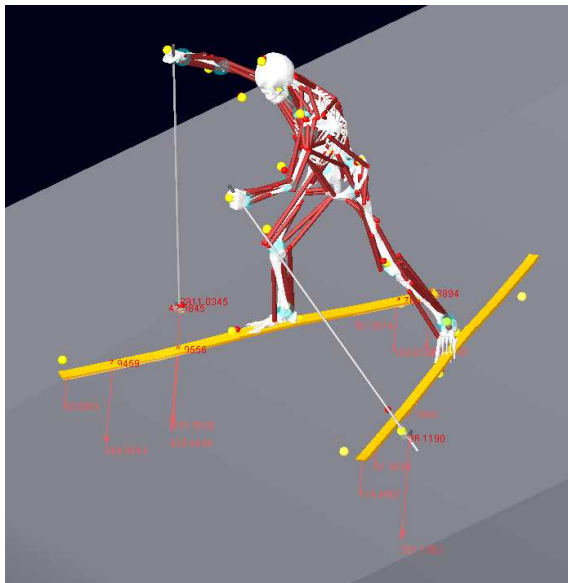


Figure 89 : vue de ¾ de l'animation cinématique

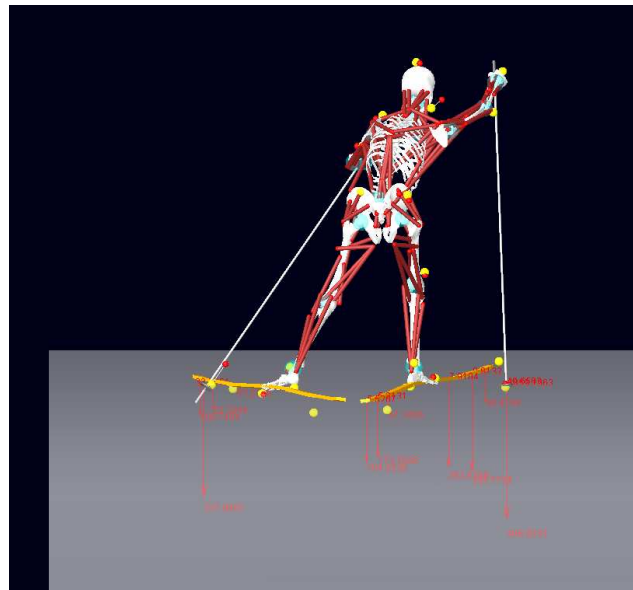


Figure 90 : vue postérieure de l'animation cinématique

### 3.4.5 Préparation du modèle à la simulation dynamique directe

Les informations sur l'historique des angles articulaires et des contractions musculaires recueillies lors de la simulation dynamique inverse, permettent de procéder à une simulation dynamique directe. Par calcul, le logiciel transcrit ces informations en éléments moteurs : création de couples dans les articulations et de forces dans les muscles, annexe 8. Ce ne sont plus les motion agents qui guident le modèle mais les rotations des diverses articulations et les



contractions des différents muscles. Nous créons également un "tracker agent" comme dans la modélisation du corps humain de la skieuse, annexe 8. Par contre, nous donnons au modèle une vitesse initiale afin qu'il corresponde le plus possible à la réalité.

### Vitesse initiale du modèle

La posture de départ du modèle n'est pas un cycle de départ, elle révèle un mouvement déjà amorcé se déroulant lors d'une course.

Lors de la simulation dynamique directe, il se pourrait que le comportement de la skieuse ne soit pas fidèle à la réalité, du fait d'une vitesse initiale nulle.

La vitesse de la skieuse est une donnée connue, elle est de 3.85 m/s.

Elle est appliquée à un marqueur situé au niveau du bassin. Elle est projetée sur les axes y et z.

La vitesse étant de 3.85 m/s, la vitesse projetée sur l'axe Y est de 2722 mm/s et également sur l'axe Z de 2722 mm/s, ces deux dernières valeurs sont entrées dans le logiciel, figure 91.

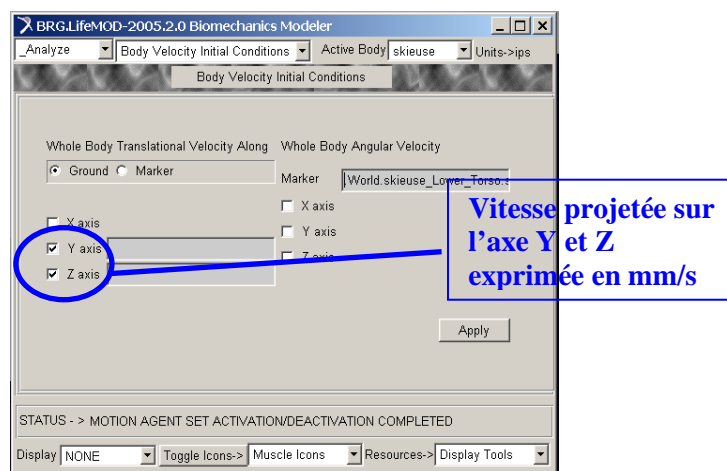


Figure 91: création de la vitesse initiale du modèle

### 3.4.6 Simulation dynamique directe

Lors de cette dernière analyse, ce ne sont plus les motion agents qui guident le modèle mais les contractions des différents muscles et les rotations des diverses articulations à partir de l'historique d'enregistrement effectué lors de la simulation dynamique inverse.

Ce sont les résultats émanant de l'analyse dynamique directe qui permettront une analyse dynamique réaliste car c'est le modèle de la skieuse avec son matériel qui agit seul sur la neige, sans être piloté, figures 92 à 94.

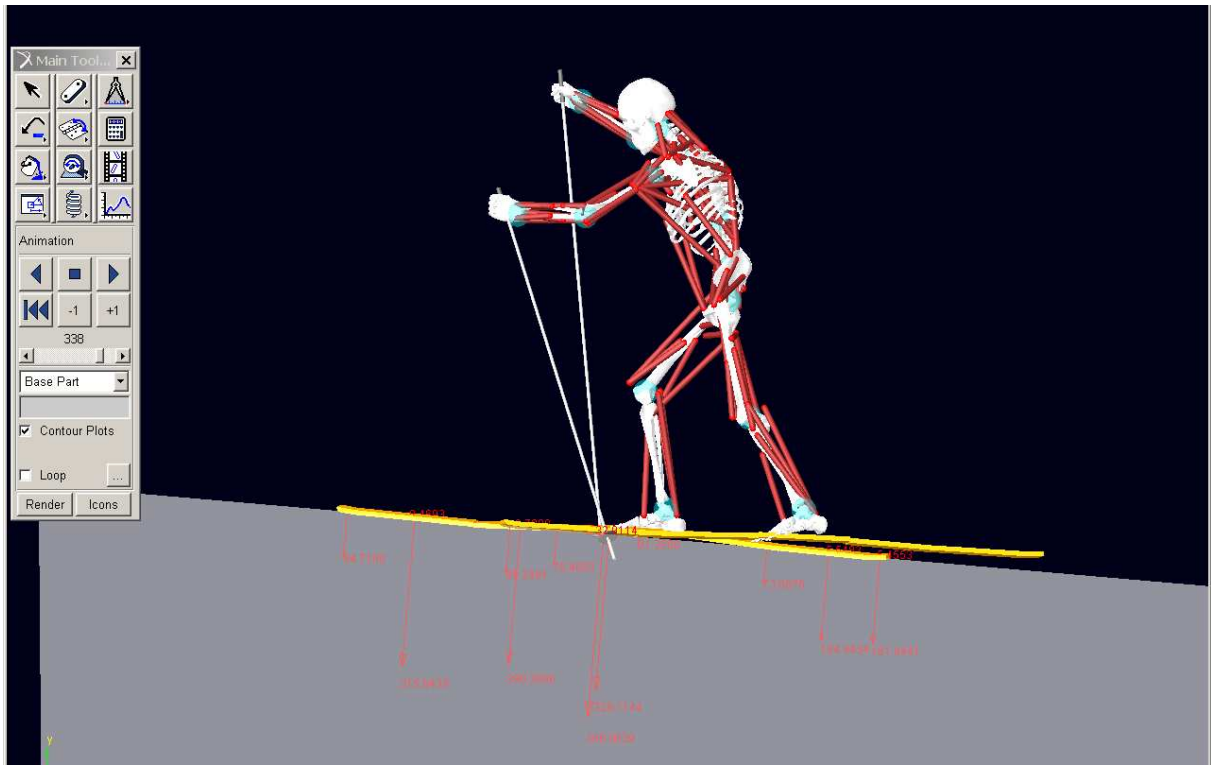


Figure 92 : profil gauche lors de la simulation dynamique, les forces exercées par la skieuse sont visualisées par les flèches rouges

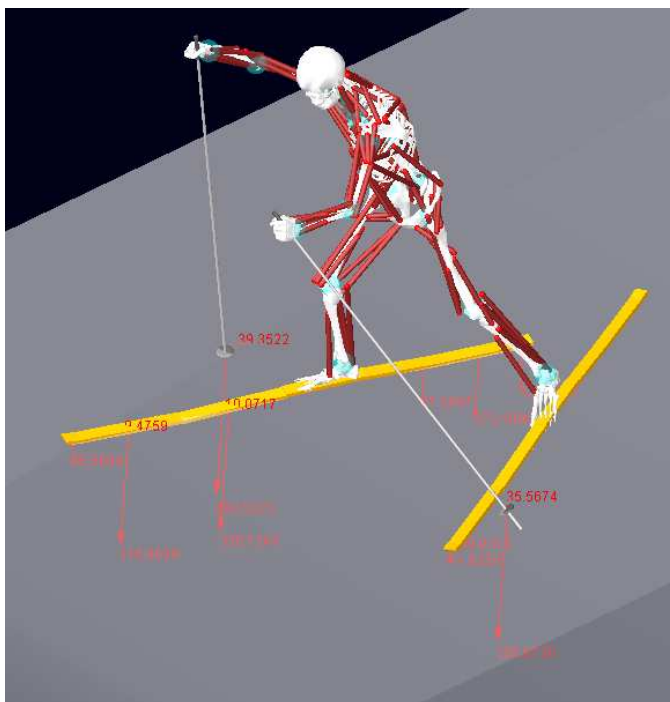


Figure 93 : vue de 3/4 lors de la simulation dynamique

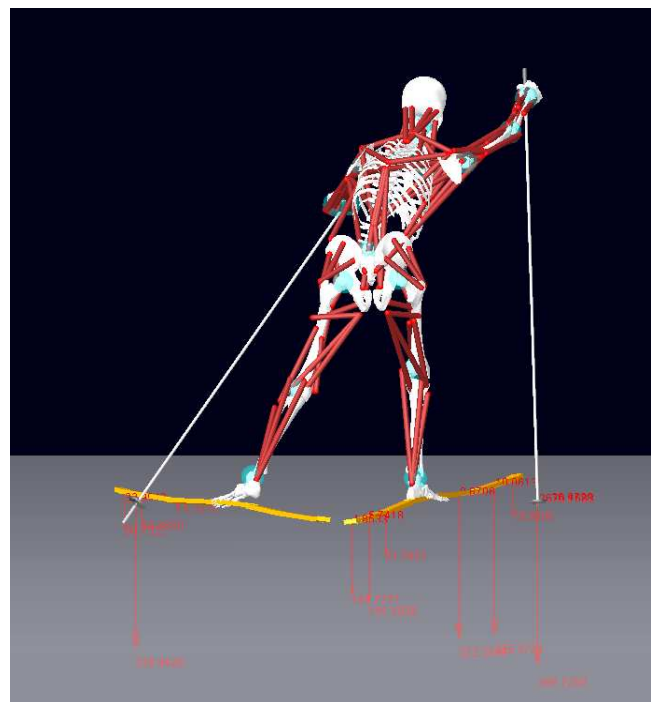


Figure 94 : vue postérieure lors de la simulation dynamique

### **3.5 BILAN DE LA MODELISATION**

La cinématique du modèle et les résultats dynamiques, ont permis par "feed back", d'améliorer certaines étapes de la modélisation afin d'optimiser le modèle dynamique de la skieuse dans son environnement. Grâce aux données extraites de la littérature, ces "feed back" ont été nombreux et ils ont entraîné de multiples corrections, portant plus sur la modélisation du corps humain et sur celle des interactions que sur celle de l'environnement proprement dit. Nous les développerons dans le paragraphe 3.6 qui traite des difficultés rencontrées.

Nous n'avons pas obtenu un rendu très fidèle de la réalité, l'objectif de la modélisation étant l'étude biomécanique du geste, nous avons préféré un modèle se rapprochant plus de la réalité dynamique, même si la cinématique reste encore imparfaite. Des instabilités apparaissent au niveau du ski droit et des bâtons, mais les résultats mécaniques sont proches de ceux de la littérature. La cinématique et la dynamique du bas du corps est correcte suite à l'analyse dynamique directe. Toutefois, nous n'avons pas pu résoudre le problème du mouvement et des contacts des bâtons suite à l'analyse dynamique directe (maintien trop fort des mains qui les amènent à la verticale) mais, nous pouvons recueillir des résultats cinématiques et dynamiques lors de l'analyse dynamique inverse. Nous n'avons pas pu faire varier le coefficient de frottement du ski sur la neige en fonction de l'angle de carre car cette tâche nécessite un long travail de développement. Les efforts relevés paragraphe 4.3 lors de l'analyse dynamique ne correspondent donc pas à la réalité du geste, lors de la prise de carre.

En perspective, nous pourrions améliorer la précision du modèle, en effectuant une capture vidéo avec des caméras plus sensibles et avec des moyens de recueil de données plus modernes. Ainsi, les données cinématiques pourraient être affinées afin d'obtenir une gestuelle plus proche de la réalité, mais les procédures expérimentales seraient très lourdes à mettre en place pour capter ce geste avec précision, et nous n'avons pas eu les moyens de les réaliser (en temps et équipement).

Un travail plus approfondi sur les contacts skis /neige et bâtons/neige permettrait une analyse dynamique se rapprochant d'avantage de la réalité de l'action de glisse.

### **3.6 DIFFICULTES RENCONTREES LORS DE LA MODELISATION**

La modélisation de la skieuse dans son environnement décrit au paragraphe 3.5 a pu être réalisée grâce à des corrections et à de nombreuses itérations. Ce paragraphe présente, en premier lieu, les difficultés rencontrées au niveau de la modélisation du corps de la skieuse, lors de sa position de départ. Le squelette était mal positionné lors de l'analyse statique, le bras gauche entraînait dans le thorax, entraînant une torsion du corps. Lors de son mouvement, le geste manquait de fluidité. Des problèmes sont également apparus au niveau de la conception du matériel et particulièrement au niveau de l'interaction du corps humain avec celui-ci (liaisons et contacts).

Quant-aux modélisations obtenues suite à la simulation dynamique directe, elles sont à l'origine de nombreuses mises au point de paramètres.

Ce paragraphe montre comment nous avons résolu certaines difficultés. D'autres se sont soldées par des échecs qui ont pu tout de même faire progresser la modélisation en tant que "mauvaise piste".

### 3.6.1 Au niveau de la modélisation du corps humain

#### 3.6.1.1 Défauts de placement de segments lors de l'analyse statique

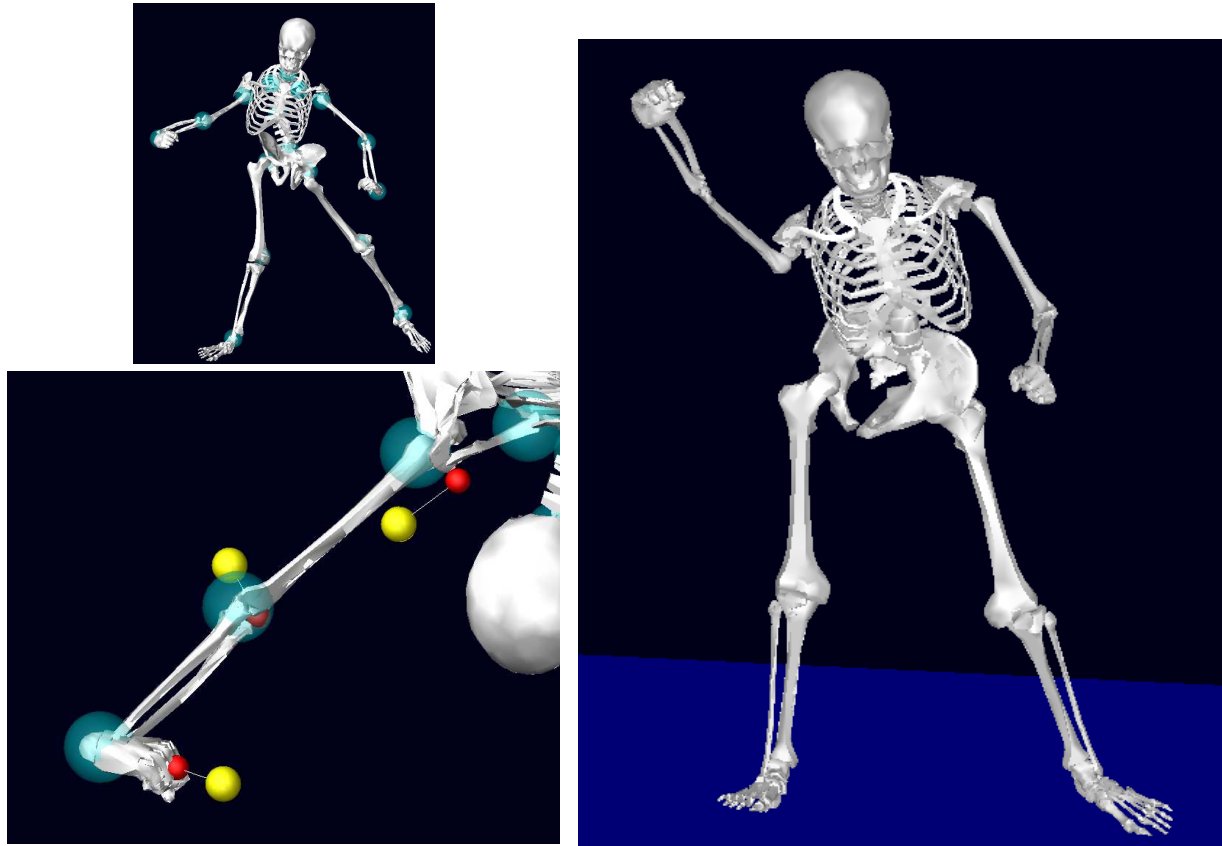


Figure 95 : défauts de placement du bras droit et de la colonne vertébrale

Le modèle, lors de l'analyse statique, réalise une rotation inverse du bras droit entraînant lors de la position initiale et lors des simulations, un bras qui entre dans le thorax avec une main inversée et un bassin pivotant vers la droite, figure 95.

Face à ces problèmes, nous avons émis l'hypothèse que les causes pouvaient être dues :

- aux données cinématiques de la capture vidéo : le calcul de la distance entre les points aux extrémités de chacun des os, a révélé des variations de l'ordre de 100 à 200 mm,
- à la mauvaise transcription du recueil des données,
- au traitement des données, problèmes dans le fichier de pilotage

Nous avons résolu en partie le problème, en attribuant à certains marqueurs plus de poids qu'à d'autres.

Les marqueurs ont été choisis en étudiant des images émanant de vidéos ou de photos issues de compétitions internationales, afin de sélectionner les points qui guident le mouvement.

En observant les photos, figures 96 et 97, nous remarquons que le mouvement du bras est "guidé" par le poignet au moment où le bras passe la verticale de l'épaule et par l'épaule lors du retour du bras. Pour avoir une amplitude maximale du bras, le skieur a le bras tendu à la fin de la poussée sur le bâton. Le mouvement de la jambe est aussi "guidé" par le genou lors de la phase de glisse.



*Figure 96 : retour des bras, phase de glisse de la jambe gauche*



*Figure 97 : mouvement vers l'avant du bras gauche, début de la phase de glisse de la jambe gauche*

Nous avons donc renforcé l'influence des agents des poignets, des épaules et des genoux en leur attribuant un coefficient 9.

L'amélioration obtenue est satisfaisante, sauf pour la main droite. Elle est toujours inversée (le pousse en bas), figure 98. La cause est peut être un problème de ciblage des marqueurs lors du pilotage, la main est peut être pilotée par les coordonnées du poignet.

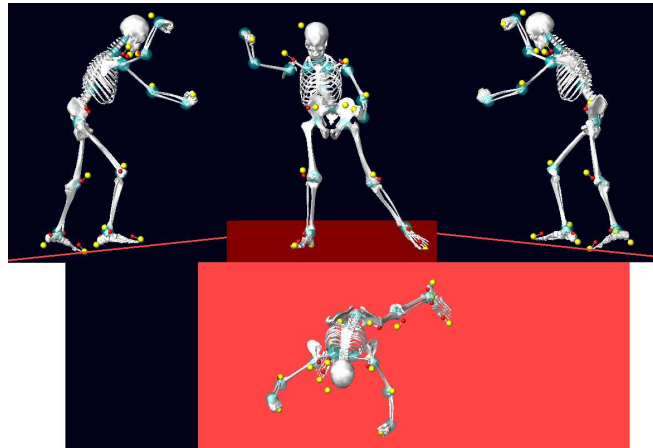


Figure 98 : résultat après le changement du poids des agents lors de la simulation dynamique inverse

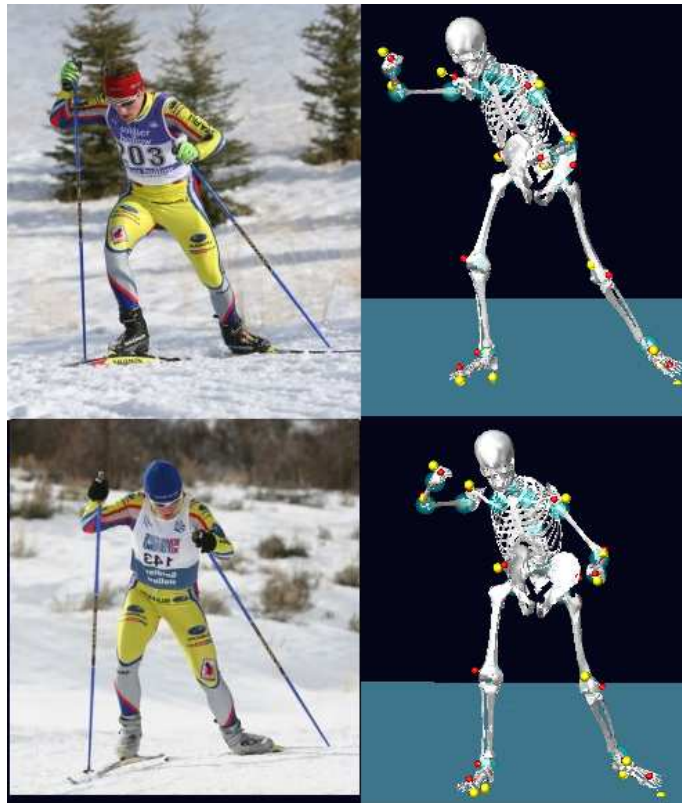
Le rôle joué par la main dans le mouvement est important, il est à l'origine d'une poussée du bâton efficace, surtout côté droit, le côté fort de la skieuse.

Dans le but d'améliorer cette position de la main, nous avons exploité la fonction de LifeModeler sur la posture de départ. Cette commande permet de définir les angles de rotation sur le plan sagittal, transverse et frontal de chaque articulation du modèle.

Grâce à l'observation de différentes prises de vue à partir de films et de photos, nous avons déduit les rotations associées à chaque articulation. Les données du poignet, du coude, de l'épaule, mais aussi du bassin, ont été corrigées, figure 99. La position ainsi obtenue est réaliste. L'amélioration observée, lors de la simulation sur un cycle entier, est importante. Les articulations fonctionnent d'une façon cohérente, figure 100.

BRIQ LifeMOD-2003.1.1 Biomechanics Modeler															
Posture				Configure BASE Model				Active Body skieuse				Units->mmks			
Adjust BASE Joint Posture (angles)															
RIGHT BODY SIDE				BODY CENTER				LEFT BODY SIDE							
Adjust	Sag	Trans	Front	Adjust	Sag	Trans	Front	Adjust	Sag	Trans	Front				
Scapular	0.0	20.0	-34.0	UpperNeck	-10.0	10.0	0.0	Scapular	0.0	-20.0	-15.0				
Shoulder	-80.0	30.0	-60.0	LowerNeck	12.0	-2.0	-5.0	Shoulder	-55.0	0.0	60.0				
Elbow	-50.0	-30.0	0.0	Thoracic	10.0	-10.0	10.0	Elbow	-60.0	20.0	0.0				
Wrist	10.0	0.0	10.0	Lumbar	40.0	0.0	20.0	Wrist	0.0	0.0	0.0				
Hip	-20.0	-6.0	-5.0	Load Current Joint Angles				Hip	55.0	-35.0	35.0				
Knee	50.0	0.0	5.0	Store New Posture				Knee	10.0	0.0	-10.0				
Ankle	-5.0	-10.0	5.0					Ankle	10.0	75.0	-20.0				
Library Stepping Left Foot    Apply    SLF Filename athieu\Données\skieuse.sl    Read															
STATUS ->															
Display   SKELETAL    Toggle Icons->    Muscle Icons    Resources->    Display Tools															

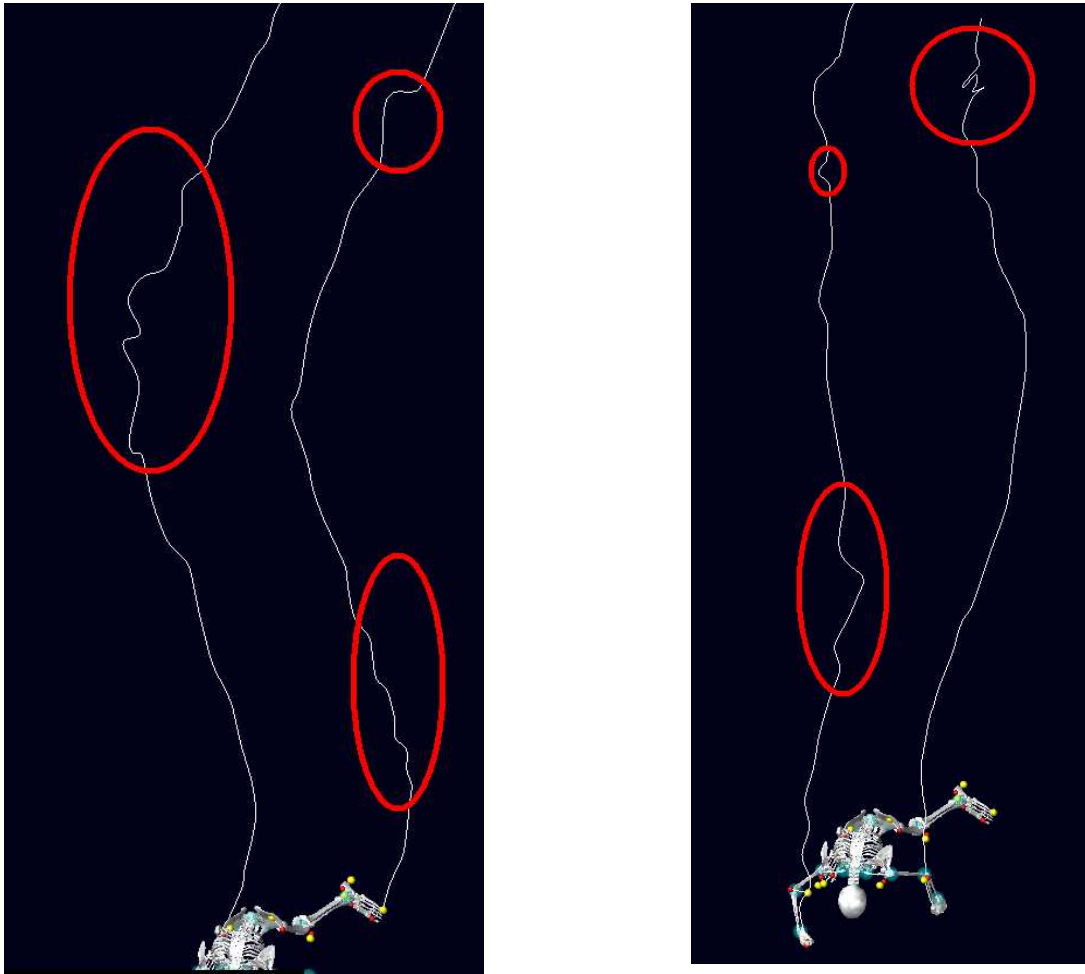
Figure 99 : commande des rotations en 3D de chaque articulation de la posture de départ



*Figure 100 : comparaison photographique de la posture de départ du modèle avec l'image d'un skieur*



### 3.6.1.2 Fluidité du modèle du corps humain lors du mouvement



*Figure 101 : vue de haut des traces des pieds et des mains du modèle cinématique*

La fonction "trace marker" de LifeModeler dessine les trajectoires du marqueur que l'on souhaite observer. Les traces des trajectoires des mains et des pieds permettent d'identifier les imperfections lors de la simulation dynamique inverse, figure 101. Des tremblements et des oscillations apparaissent, perturbant la fluidité du mouvement.

Pour atténuer ces mouvements parasites, nous avons filtré les données importées, en utilisant la fonction "Filter Tools" de LifeModeler, figure 102.



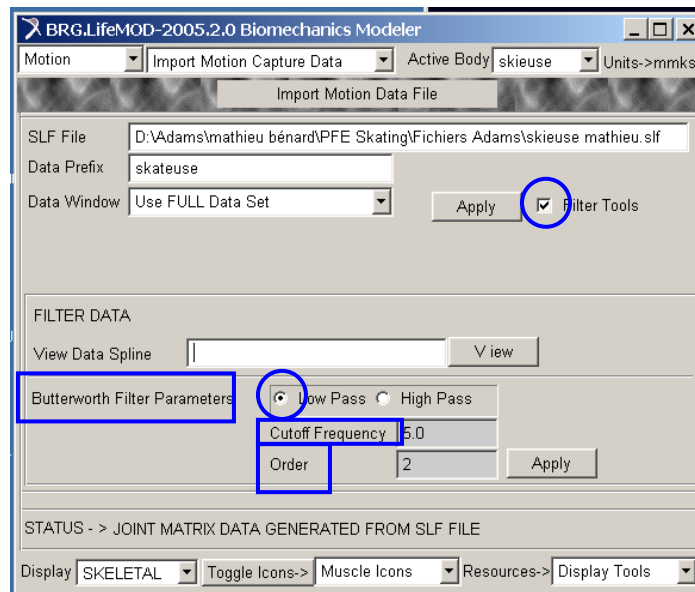


Figure 102 : commande de filtrage des données

Toutefois, la prudence s'impose lors de l'utilisation de ce type d'outils. En effet, notre but est d'atténuer les mouvements parasites, tout en conservant les mouvements fonctionnels. Si les données sont trop filtrées le mouvement risque d'être dénaturé. Le choix des valeurs des paramètres du filtre, doit donc être fait après plusieurs vérifications et comparaisons.

Le logiciel propose comme type de filtre : le filtre passe haut ou le filtre passe bas. Nous utilisons le filtre passe bas et définissons la fréquence de coupure et l'ordre par comparaison de profil de courbes.

- La fréquence de coupure

Elle correspond à la fréquence à partir de laquelle le filtre s'active. C'est un paramètre très important, qu'il faut choisir soigneusement. Pour cela, nous avons étudié avec précision la courbe de la main gauche qui est caractéristique du phénomène. Nous avons relevé la pseudo période des oscillations les plus petites. Elle correspond à trois intervalles de temps utilisés lors de la capture de mouvement, qui comporte 34 intervalles de temps pour 2 secondes.

La pseudo période est donc de :

$$T = 3 \times 2/34 = 0.1765 \text{ secondes}$$

Soit une fréquence :

$$F = 1/T = 1/0.1765 = 5.66 \text{ Hz}$$

Nous nous fixons donc comme limite minimale de la fréquence de coupure 5 Hz.

- L'ordre :

Il amplifie l'effet du filtre. Sur un filtre passe bas, plus il est grand, plus la courbe filtrée est adoucie. Comme l'objectif principal est de ne pas trahir le mouvement, nous commençons par la plus faible valeur, soit 1.

Les résultats suivants ont été obtenus pour le marqueur de la main gauche, figure 103. La première série compare les fréquences de coupure de 15, 20, 25 et 30, avec pour ordre de 1. La deuxième montre l'effet de l'ordre du filtre, figure 104 (ordres 3,2,1).

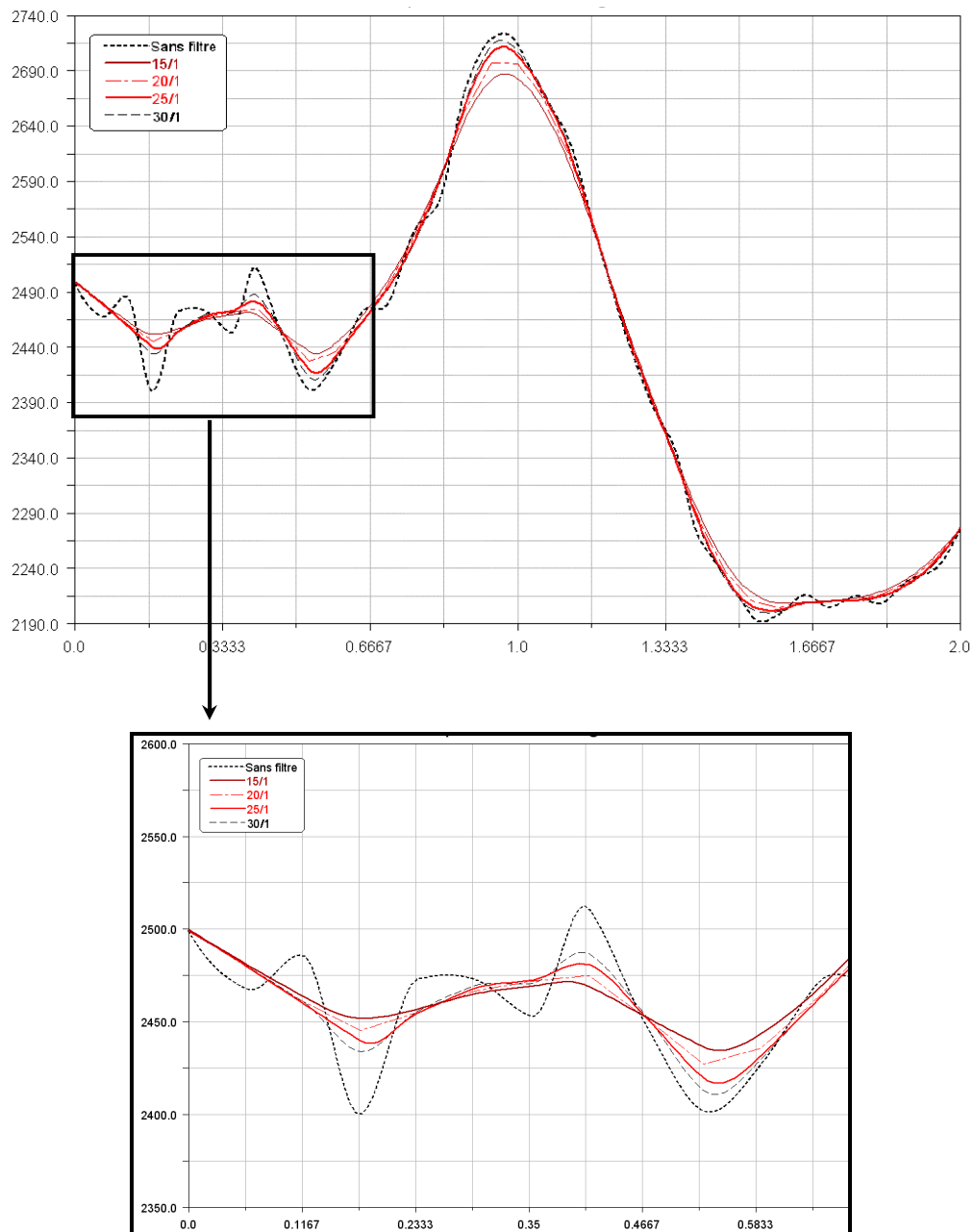


Figure 103 : comparaison des fréquences de coupure avec un ordre de 1 pour la trajectoire du marqueur de la main gauche

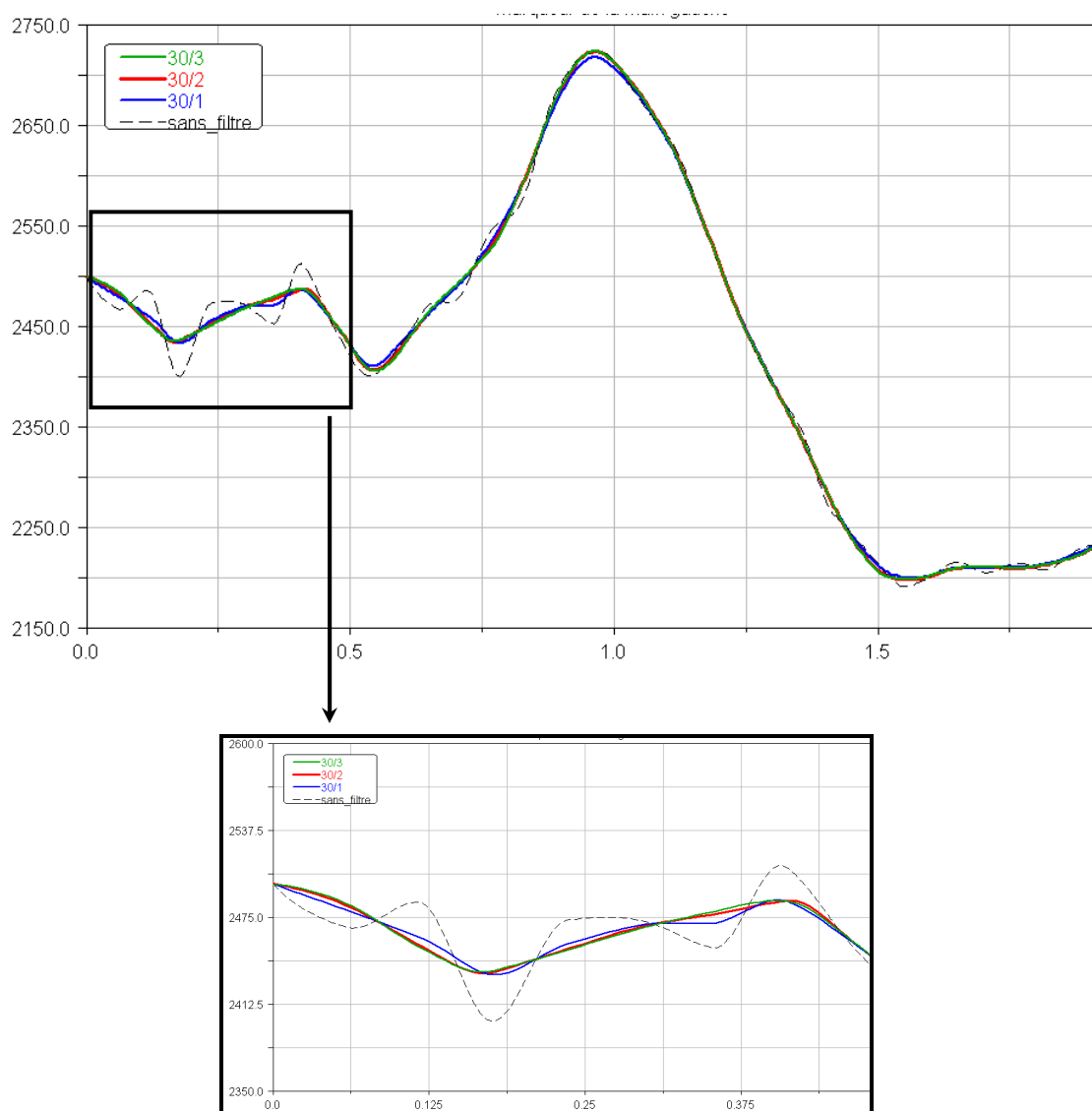


Figure 104 : comparaison des ordres avec une fréquence de coupure de 30 pour la trajectoire du marqueur de la main gauche

Face à la représentation graphique des profils de courbe, et par comparaison avec les données de la littérature, les valeurs les plus appropriées au niveau de la cinématique du mouvement ont été obtenues pour les paramètres suivants : 25 Hz pour la fréquence de coupure et 1 pour l'ordre.

En effet, la cinématique est satisfaisante, la plupart des tremblements ont disparus. La simulation inverse est concluante. Les modifications apportées ont eu l'effet escompté, le mouvement est fluide et correspond aux postures observées sur les photos et vidéos.

Ces résultats ont été comparés avec ceux des études menées par SMITH en 1989 [6], où il est montré que, pour cette technique, le centre de gravité du corps a un débattement vertical maximal de 15 cm et une inclinaison du haut du corps n'excédant pas les 25°.

Les résultats obtenus avec cette modélisation, concordent avec la théorie, le haut du corps à un déplacement vertical de 130 mm au maximum (courbe rouge). On voit bien les mouvements des mains, avec quasiment un mètre de débattement pour la main droite (courbe rose), figure 105.

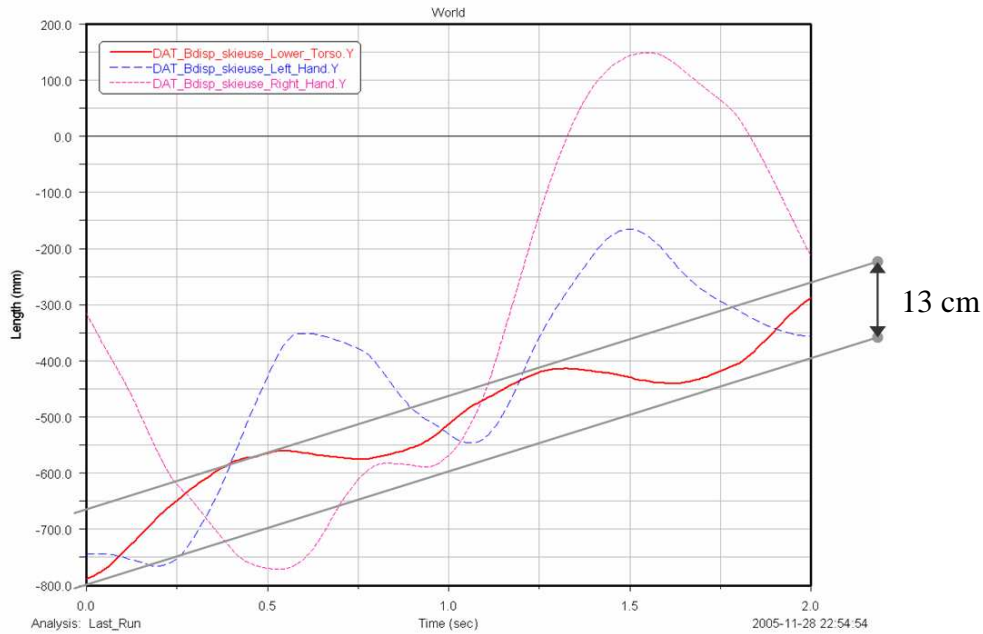


Figure 105 : amplitude verticale du bassin lors du mouvement

### Comparaison graphique du modèle du corps humain de la skieuse à 16 puis à 20 motion agents

Sur le graphique, figure 106, qui traduit la rotation avant du haut du corps lors du mouvement, on peut noter l'amélioration du modèle au cours du temps : la courbe bleue est obtenue avec 16 marqueurs, la rose avec 20, et la rouge avec toutes les améliorations récentes apportées au modèle. Alors que sur les deux premières courbes le haut du corps se penche jusqu'à plus de 35°, on arrive maintenant à des résultats proches de ceux de Smith (25°), avec une inclinaison maximale de 20°.

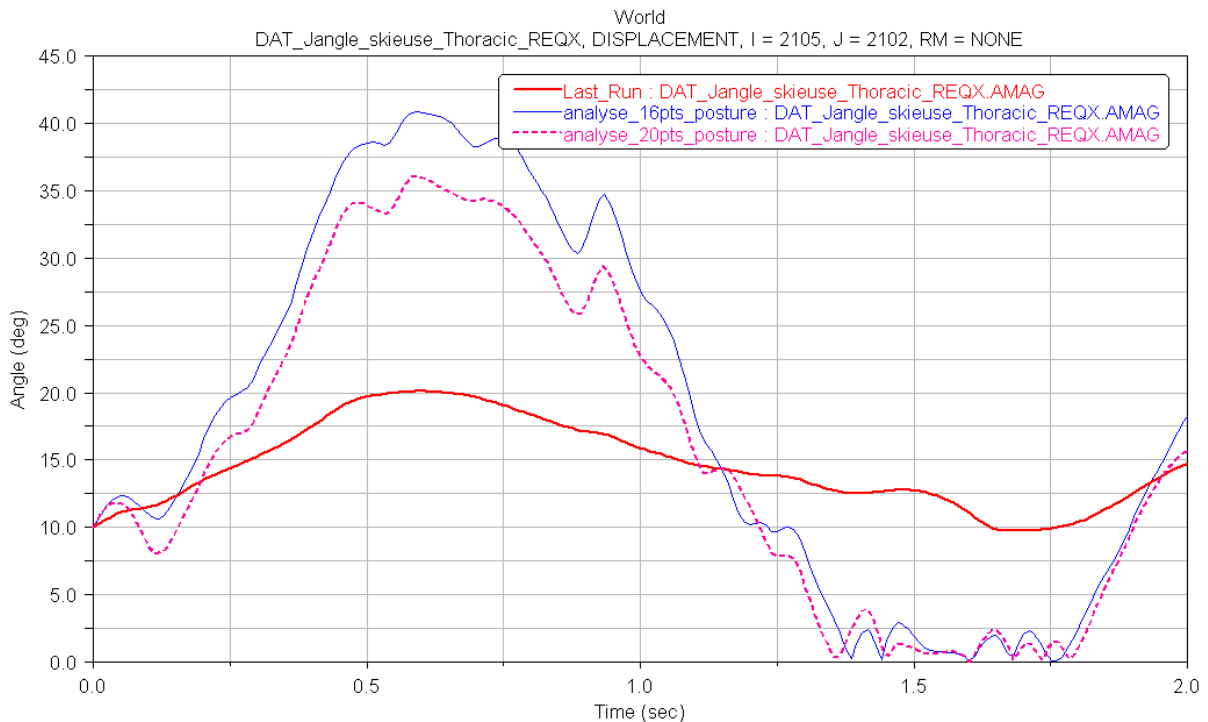


Figure 106 : rotation avant du haut du corps lors du mouvement

La comparaison de ces résultats entérine le choix des valeurs du filtre.

Le calage du modèle est une étape importante de la conception de celui-ci car elle clôt la modélisation cinématique du corps humain, tout en la validant pour la suite du travail.

## 3.6.2 Au niveau de la modélisation du matériel

### 3.6.2.1 La modélisation du bâton

La première modélisation du bâton a été inspirée par le matériel de compétition en carbone car nous voulions des bâtons flexibles pour se rapprocher de la réalité. Pour s'approcher des propriétés du carbone, nous avons créé sur le logiciel Adams, un bâton constitué par trois solides, figure 107 :

- la poignée est constituée de deux cylindres de part et d'autre d'un marqueur global, pour pouvoir piloter le bâton par le point associé à la main.
- l'ensemble pointe et panier est constitué par deux cylindres collés.
- la tige est réalisée avec un élément flexible du même type que celui utilisé pour les skis.

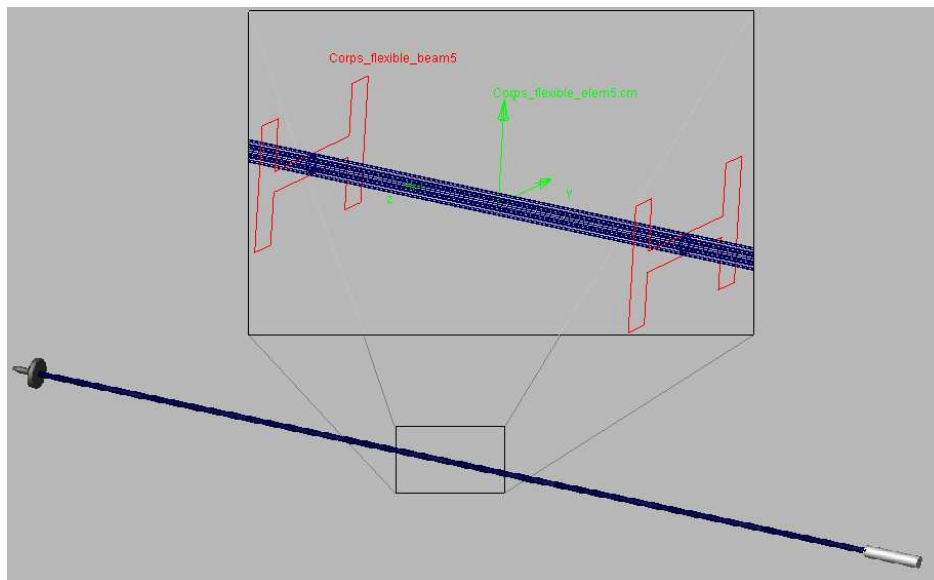


Figure 107 : conception de la tige du bâton flexible

Le modèle est ainsi dynamiquement satisfaisant. Cependant, l'intégration d'un objet composé de plusieurs parties différentes, flexibles ou non, entraîne des problèmes lors du mouvement car chaque partie se déplace indépendamment des autres, même en groupant toutes les pièces constituant le bâton.

Compte tenu des difficultés engendrées par ce modèle de bâton, nous avons dû opter pour un modèle simplifié complètement rigide.

### **3.6.2.2 La modélisation du ski**

La modélisation du ski avec le logiciel ADAMS, a été source de nombreuses difficultés. Nous ne voulions pas construire un ski rigide, puisque la souplesse est le principe essentiel d'un ski de skating.

La première possibilité était de créer un solide rigide et de lui donner de la souplesse par l'adjonction de ressorts. Cependant, cette solution a été abandonnée car pour créer un ressort avec ce logiciel, il est nécessaire de fournir deux points entre lesquels s'exerce le ressort, dans notre cas, entre le ski et le sol.

Nous avons alors tenté de réaliser l'ensemble du ski en éléments flexibles. Le ski était partagé en trois zones, chacune étant divisée elle-même en huit éléments. Chaque élément était flexible l'un par rapport à l'autre. Le problème est que le logiciel génère des erreurs. En effet, sous l'action d'une force, par exemple, les éléments se déforment et pénètrent les uns dans les autres.

Finalement, nous avons opté pour une modélisation associant des solides rigides et flexibles. La spatule, le patin et le talon sont des solides rigides. Les liaisons entre ces zones sont modélisées par des solides flexibles. Il n'y a que deux éléments flexibles par solide. Cette conception très simplifiée par rapport à la réalité, donne des résultats dynamiques corrects, nous avons donc adopté cette conception pour le modèle final.

### **3.6.3 Au niveau de la liaison pied/ski**

Il existe deux types de fixation sur un ski de skating, présentés dans l'introduction :

- une fixation simple à un point de fixation correspondant à une liaison pivot en bout de pied dont l'axe est perpendiculaire au ski.
- une fixation à deux points de fixation décrite dans le chapitre I.

Pour modéliser la fixation du ski, nous avons fait plusieurs essais sur le type de liaison à adopter.

#### **3.6.3.1 Essai d'une fixation simple en liaison pivot**

Nous avons tout d'abord simplifié le ski en le modélisant en éléments rigides.

Le ski est un parallélépipède de 1760 mm de longueur, 44 mm de largeur et 15 mm d'épaisseur. La partie avant du ski par rapport à la fixation est plus courte que la partie arrière, figure 108.

Toutefois, le logiciel considère les éléments rigides comme indéformables quelque soit l'importance des forces appliquées dessus. Cette conception n'a donc pas été retenue mais elle a permis de faire plusieurs essais de liaisons pour optimiser la modélisation de la fixation.

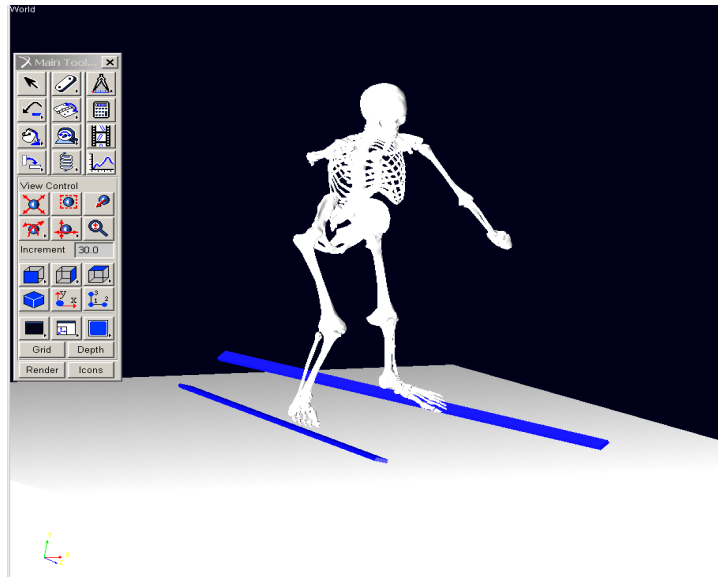


Figure 108 : skis rigides pour l'étude du choix de la fixation

Pour créer une liaison pivot, il faut choisir deux pièces, un emplacement et un axe de liaison. Afin que le talon du skieur se soulève, nous modélisons une liaison pivot d'axe horizontal à la pointe du pied perpendiculaire aux orteils, figure 109.

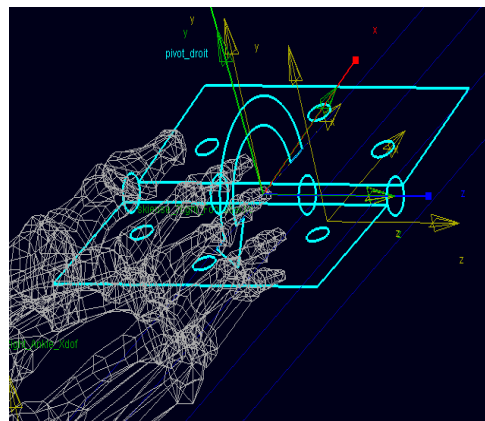


Figure 109 : localisation de la liaison pivot en bout de pied

#### - Résultats et Analyse

La modélisation se révèle mauvaise car très instable. Plusieurs phénomènes parasites interagissent rendant la simulation inexploitable. La liaison pivot donne trop de liberté au ski : celui-ci oscille très facilement et donc entre en contact alternativement avec la neige par la spatule puis par le talon et ainsi de suite. La rigidité des skis donne en plus, un effet propulsif au skieur qui s'élève, perdant le contact avec le sol. Les skis se mettent alors à tourner à 360° autour du pied sous l'effet de la gravité, figure 110.

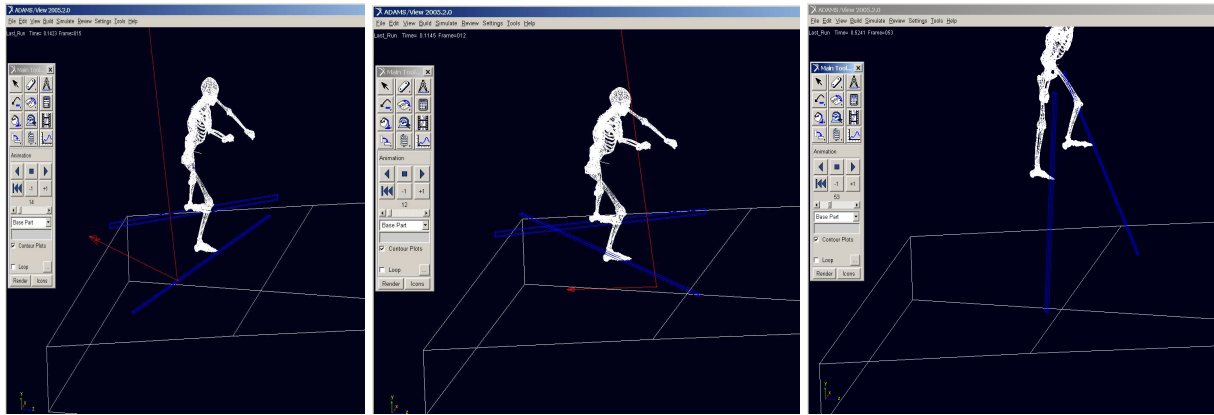


Figure 110 : résultat de la fixation en liaison pivot

- Ajout de frottement sur la liaison pivot  
 Face à ces résultats, nous ajoutons un couple de frottement sur la liaison pivot, figure 111.

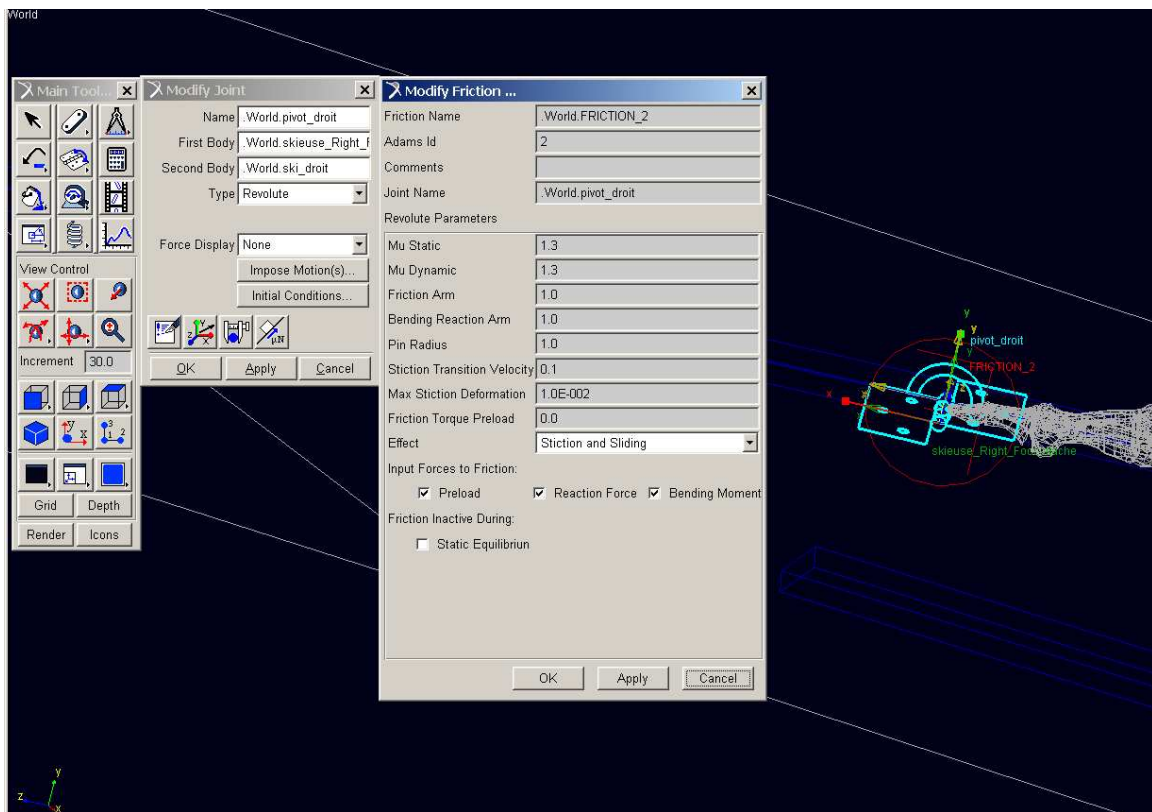


Figure 111 : ajout d'un couple de frottement sur la liaison pivot

- Résultat et Analyse

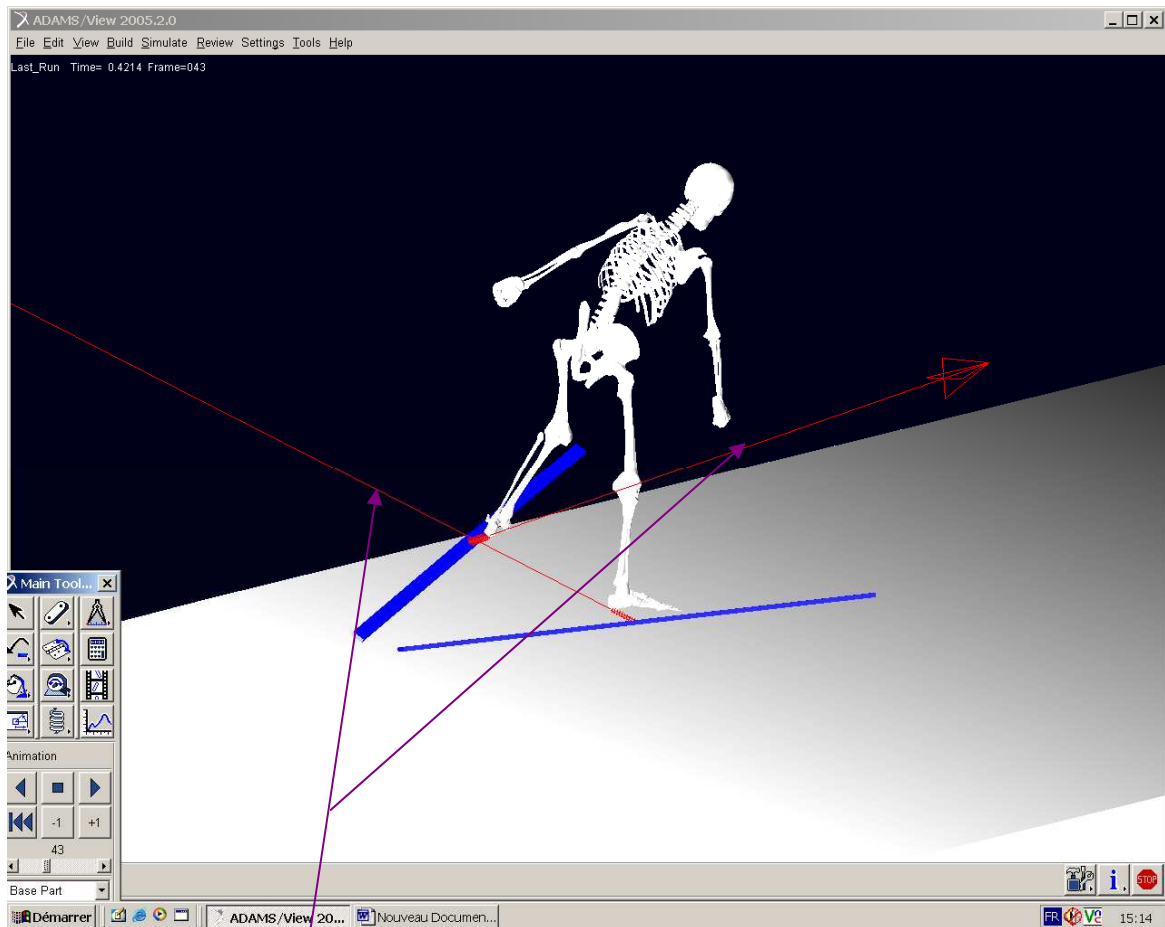
Le couple de frottement n'a pas fondamentalement changé la modélisation. Le ski finit toujours par se soulever en fin de simulation.

### 3.6.3.2 Essai d'une fixation à deux points d'encrage : liaison pivot avec ressort

Afin que le talon se soulève moins de la fixation, nous avons ajouté un ressort entre le talon et le ski, créant ainsi une force de rappel ramenant le talon vers le ski, figure 112.



En réglant correctement la raideur, nous pensions pouvoir obtenir un comportement proche de la réalité correspondant au système de barrette à deux points de fixation.



La poussée des ressorts finit par propulser le skieur

*Figure 112 : ajout d'un ressort au talon*

#### - Résultats et analyse

Si l'effet escompté s'est bien réalisé à la montée du talon, à sa descente, le ressort comprimé exerce une force de poussée sous le talon incompatible avec le mouvement. Au tout début de la simulation, le ski était plutôt stabilisé, avant de devenir rapidement instable à cause des forces croissantes exercées par le ressort. Malgré de nombreux essais sur la valeur de raideur du ressort, le phénomène a toujours eu lieu et les simulations étaient donc inexploitables.

#### **3.6.3.3 Essai d'une fixation en liaison bushing**

Abandonnant l'idée du ressort, nous avons essayé une liaison bushing qui semblait plus prometteuse pour la liaison pied-ski.

Ce type de liaison permet d'associer des ressorts et des amortisseurs entre deux solides dans les six directions de l'espace. L'instabilité constatée avec un ressort seul est bien plus facile à maîtriser avec une liaison bushing, par sa possibilité de régler l'amortissement et la raideur en

translation et en rotation. Une recherche sur les valeurs à utiliser dans le paramétrage de l'élément bushing, a permis d'obtenir des résultats corrects.

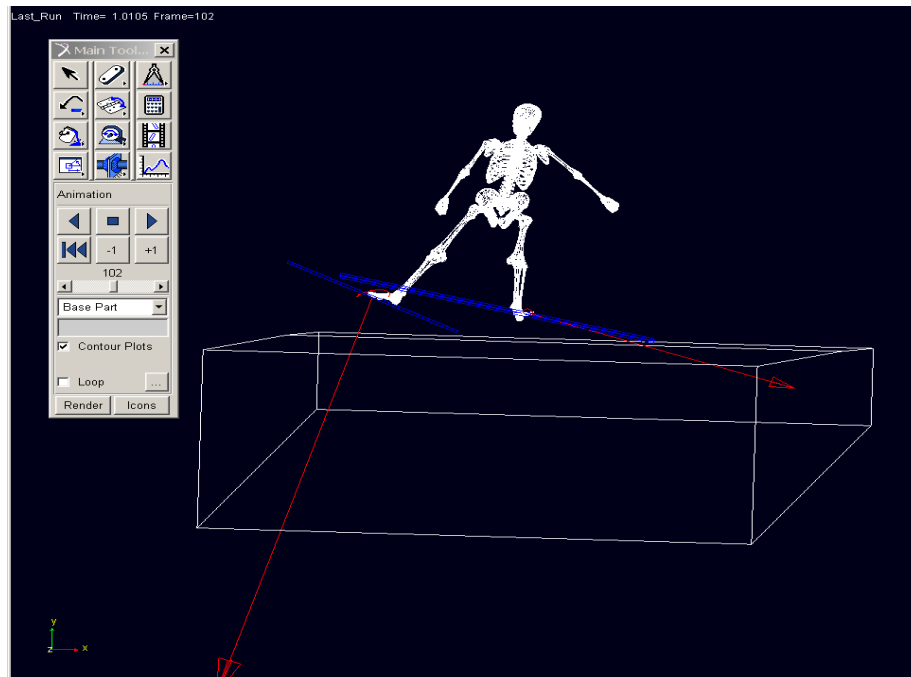


Figure 113 : fixation en liaison bushing

#### - Résultats et Analyse

Le résultat cinématique s'est nettement amélioré. Le talon se soulève correctement de la fixation et la skieuse reste plus longtemps en contact avec le bloc de neige. Toutefois, en fin de simulation, le ski droit finit par se mettre en travers, au moment où il accroche le sol, figure 113. Ces défauts sont certainement imputables à la rigidité des skis qui restituent les efforts normaux de contact. De plus, lorsque la spatule accroche le bloc de neige, elle entraîne tout le ski latéralement car il n'y a aucune flexibilité.

Ces divers essais ont montré l'incapacité du modèle à agir sur des skis rigides mais ils ont permis de déterminer la liaison la plus réaliste, compatible avec les fonctionnalités du logiciel. La paramétrisation des valeurs du bushing avec des skis flexibles, associée à la paramétrisation des valeurs de contact a abouti au modèle de la skieuse dans son environnement.

### 3.6.4 Au niveau de la simulation dynamique directe

Nous avons eu d'importantes difficultés à obtenir une simulation dynamique directe correcte. La simulation dynamique inverse donnait de bons résultats tant d'un point de vue cinématique que dynamique, mais, lorsque nous lançons la dernière analyse, la skieuse se déséquilibrait en avant et chutait. Notre recherche s'est alors portée sur les paramètres de calcul des pas de temps, des motion agents et des muscles ; le problème a été principalement résolu.

#### 3.6.4.1 Variation de l'incrément de calcul

Afin d'obtenir un temps de calcul acceptable sans compromettre la précision du geste, nous avons augmenté peu à peu le nombre de pas par seconde lors de la simulation inverse. Nous

avons démarré à 100 pas/seconde. Nous travaillons à une valeur deux fois supérieure à ce pas puisque notre simulation est de 400 pas pour 2 secondes.

L'augmentation du nombre de pas, fait apparaître une amélioration au niveau de la simulation dynamique inverse mais lors de la simulation dynamique la skieuse continue de chuter.

### 3.6.4.2 Variation des paramètres globaux

Le calage des paramètres globaux va améliorer considérablement la modélisation.

#### 3.6.4.2.1 Variation des paramètres des motion agents

Les facteurs globaux des motion agents, permettent de faire varier la capacité qu'a le modèle à suivre les données cinématiques. C'est en réglant les paramètres de raideur et d'amortissement en translation et en rotation de la liaison entre les motion agents que nous avons obtenu une simulation satisfaisante, figure 114.

La skieuse propose enfin un comportement stable et continu, elle ne chute plus.

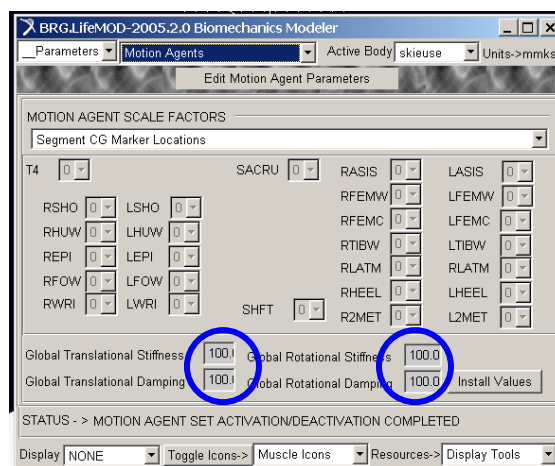


Figure 114 : changement des valeurs de paramètres pour les motion agents

#### 3.6.4.2.2 Variation des gains proportionnels et différentiels des muscles

Ces gains, par défaut, sont réglés pour une activité telle que la marche à pied. Le ski de fond demande une activité physique beaucoup plus importante. En faisant varier les gains proportionnels et différentiels des muscles, nous sommes parvenus à une motricité plus stable du modèle humain. La démarche a consisté à faire varier les gains correcteurs des muscles jusqu'à obtenir un comportement correct de la skieuse lors de la simulation directe, figure 115.

Les valeurs optimales trouvées pour les gains sont :  $P_{gain} = 100$  et  $D_{gain} = 100$

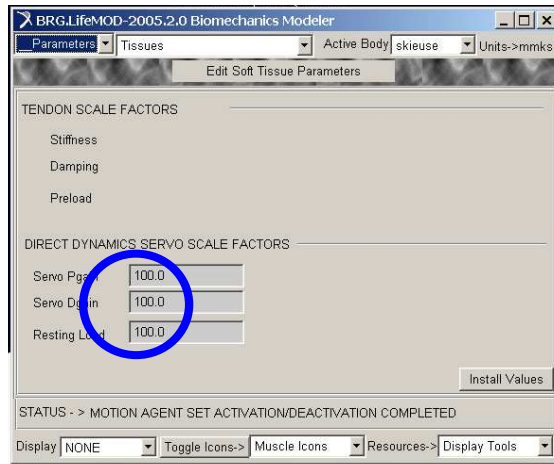


Figure 115 : changement des valeurs de paramètres pour les muscles

### 3.7 CONCLUSION

Ce chapitre décrit les différentes étapes de la modélisation de la skieuse dans son environnement. Le modèle, de type musculaire 3D, possède son équipement ski, bâton, et se déplace sur un sol ayant les caractéristiques de la neige.

Nous avons présenté le processus de création en trois étapes. Elles concernent l'amélioration du modèle du corps humain, la modélisation de l'environnement et les interactions de la skieuse dans l'environnement. Ces étapes ont abouti au modèle dynamique. Nous avons ensuite dressé un bilan de la modélisation et nous avons décrit les difficultés rencontrées.

Certaines tentatives n'ont pas abouties, mais elles ont permis de progresser dans notre recherche, nous révélant la direction à suivre pour la poursuite du travail, tout en améliorant notre méthodologie.

Le modèle dynamique ainsi obtenu a une cinématique encore imparfaite mais il s'approche d'avantage de la réalité dynamique. L'analyse des résultats réalisée au chapitre suivant, va répondre aux attentes de la modélisation, en la validant d'un point de vue cinématique et dynamique.

### ANALYSE DES RESULTATS

#### 4.1 INTRODUCTION

La construction du modèle dynamique de la skieuse dans son environnement a été une suite d'opérations visant à améliorer les simulations dynamique inverse et dynamique directe. Afin d'optimiser le modèle, plusieurs pistes de recherche ont été abordées conduisant à de nombreux bilans sur le comportement de la skieuse.

Étape par étape, avec quelquefois une démarche empirique, nous avons poursuivi ce travail de mise au point afin d'aboutir à la modélisation dynamique en 3D d'une skieuse de haut niveau réalisant le pas du décalé. La représentation du modèle étant une représentation squelettique et musculaire dans un environnement dynamique, nous allons pouvoir, dans ce chapitre, apprécier le mouvement du modèle et ses interactions avec l'environnement.

La validation de ce modèle, par l'analyse des résultats et par comparaisons aux données expérimentales de la littérature, pourra engendrer d'autres analyses, plus fines, nouvelles, permettant certaines interprétations.

Nous réalisons, dans un premier temps l'analyse cinématique des résultats. Grâce à la position des deux pieds, des angles des skis et des kinogrammes du modèle suite aux simulations dynamique inverse et directe.

Dans un second temps, l'analyse dynamique nous apportera des informations sur les forces de contact, les forces musculaires et le bilan énergétique.

## 4.2 ANALYSE CINEMATIQUE

Des imperfections visuelles apparaissent dans la simulation. Des mouvements parasites se traduisent par des oscillations au niveau des skis. Ce phénomène semble dû au manque de précision des données originelles.

Toutefois, les phases du cycle et leur pourcentage correspondent aux données de la littérature.

### 4.2.1 Position des deux pieds en XYZ

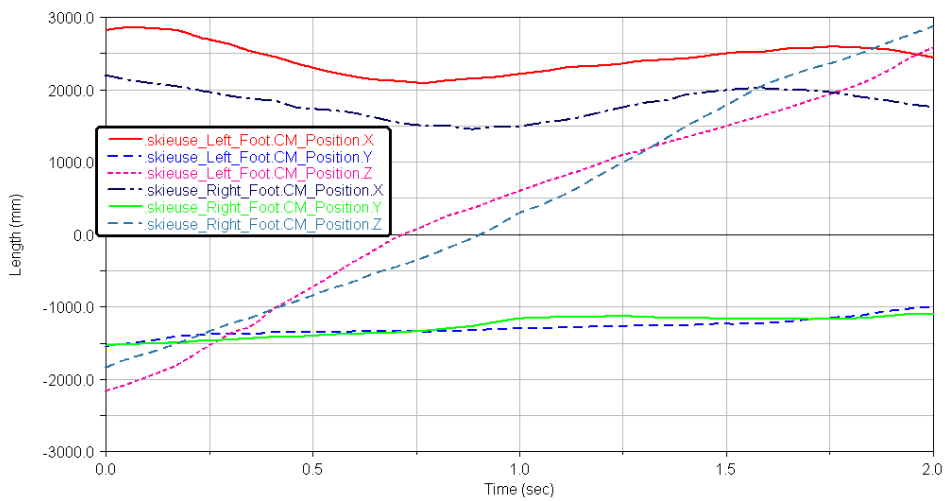


Figure 116 : position des deux pieds en XYZ du modèle suite à la simulation dynamique inverse

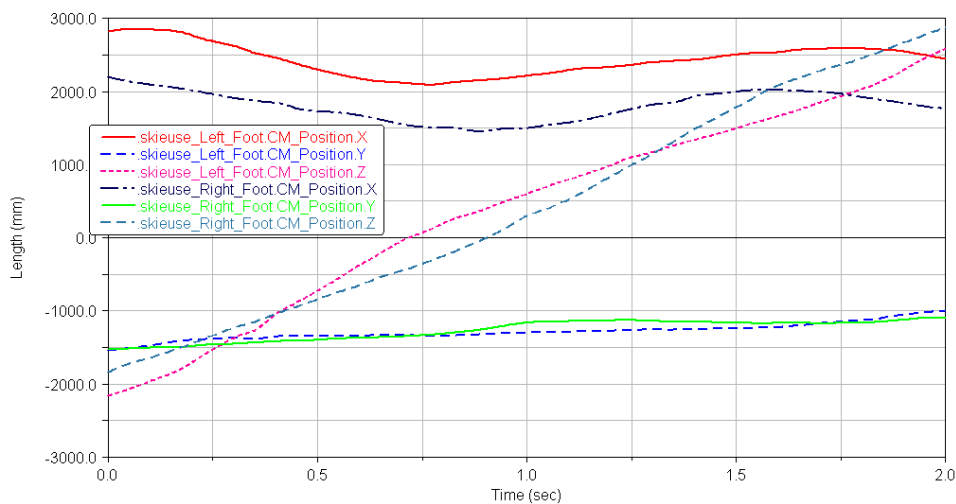


Figure 117 : position des deux pieds en XYZ du modèle suite à la simulation dynamique directe

Les graphes de la figure 116 et 117 sont quasi-identiques à ceux relevés lors de la validation du premier modèle dynamique du corps humain de la skieuse, figure 44, les valeurs et les jonctions des courbes sont les mêmes. La modélisation du corps humain ne subit aucun changement de comportement lors des diverses étapes de modélisation. Seules, les courbes sont plus lissées dans les graphes du modèle de la skieuse dans son environnement, compte tenu de l'étape supplémentaire du filtrage des données.

Le dernier modèle a une cinématique correcte qui correspond aux données de la littérature. Nous les résumons ci-dessous et arrivons aux mêmes conclusions que celles tirées des observations lors de la validation du modèle dynamique du corps humain de la skieuse.

La skieuse a un temps de cycle long et parcourt une distance importante pour une vitesse moyenne basse. Le cycle réalisé est plus en amplitude qu'en fréquence.

Longueur du cycle : 3.85 mètres

Temps du cycle : 1.63 secondes

Vitesse moyenne de la skieuse lors d'un cycle : 2.36 mètres par seconde

## 4.2.2 Angles de rotation des skis

La cinématique du modèle dynamique de la skieuse dans son environnement est identique à celle de la première validation. Il faut quand même analyser le mouvement des skis afin de le vérifier.

Le schéma de la figure 118, montre la réalisation d'une prise de carre intérieure du ski droit. Le ski tourne autour de Z pour accrocher la neige avec son bord intérieur, la carre gauche pour le ski droit.

Le logiciel permettant des mesures particulières, nous avons relevé la mesure des angles de rotation du ski en utilisant le marqueur du centre de masse de la partie centrale du ski, "le patin". Les marqueurs sont représentés pour le pied droit, figure 119 et pour le pied gauche, figure 120.

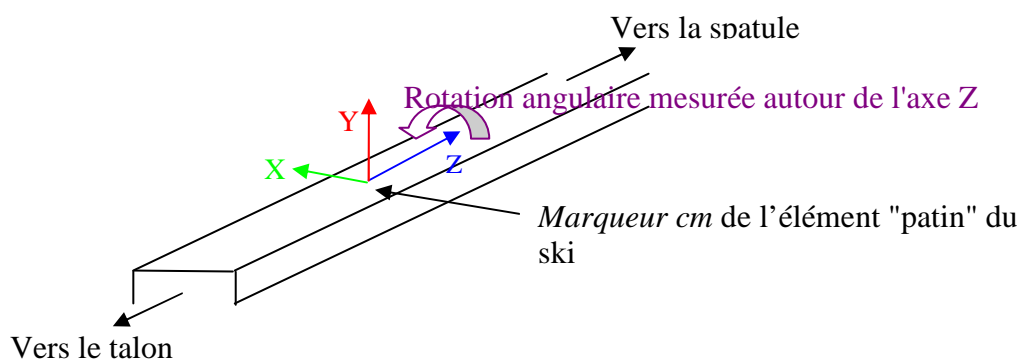
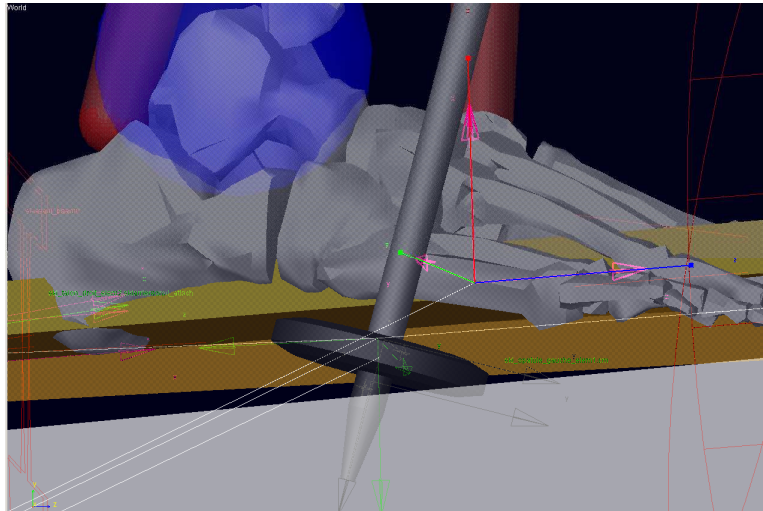
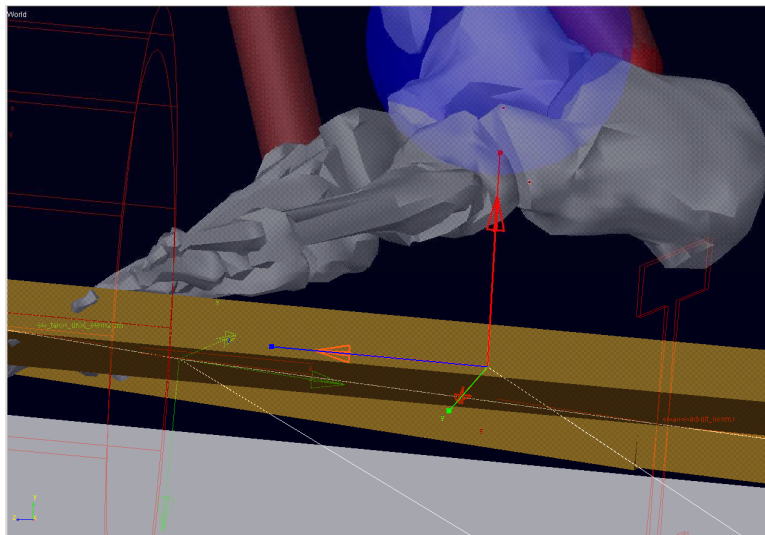


Figure 118 : repère pour la mesure de l'angle de prise de carre du ski droit



*Figure 119 : marqueur du centre de masse du patin droit*



*Figure 120 : marqueur du centre de masse du patin gauche*

Nous relevons la variation de l'angle de prise de carre des skis, autour de l'axe sagittal Z, mais aussi autour de l'axe transversal X, et autour de l'axe vertical Y, en fonction du temps lors du mouvement, figures 121 à 126. Ces trois rotations d'un même ski, comparées simultanément en fonction du temps et en fonction des phases du geste vont nous révéler précisément la cinématique du ski.



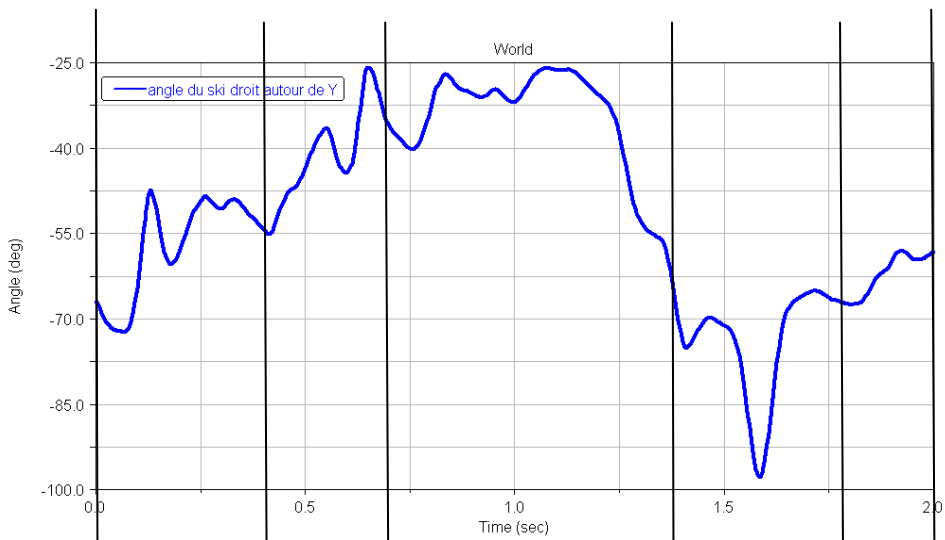


Figure 121 : angle de rotation du ski droit autour de Y

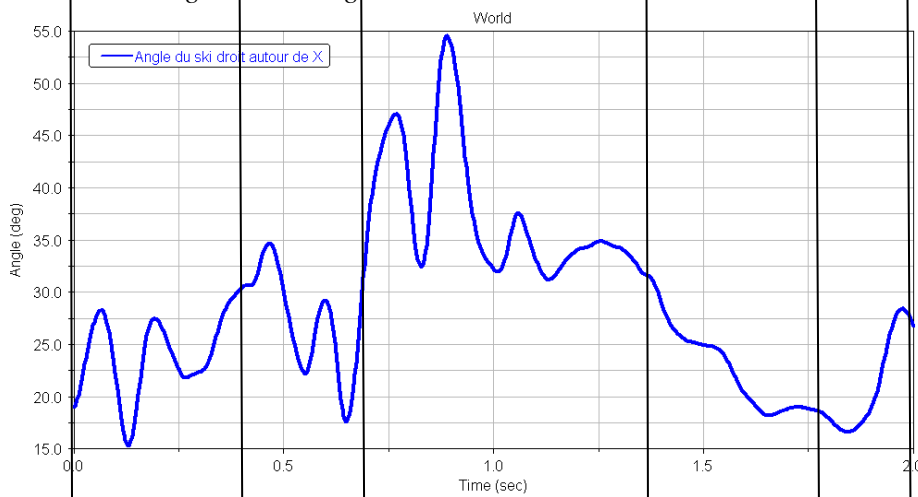


Figure 122 : angle de rotation du ski droit autour de X

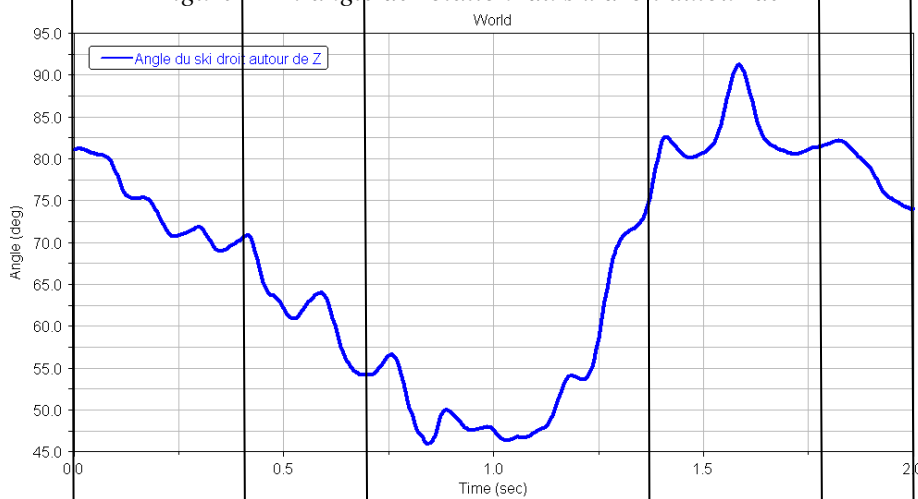
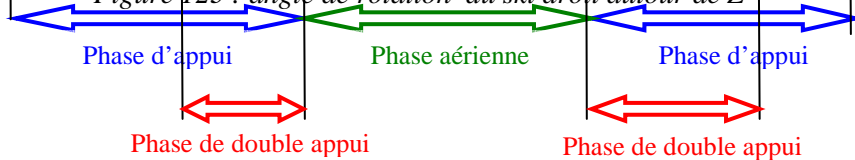


Figure 123 : angle de rotation du ski droit autour de Z



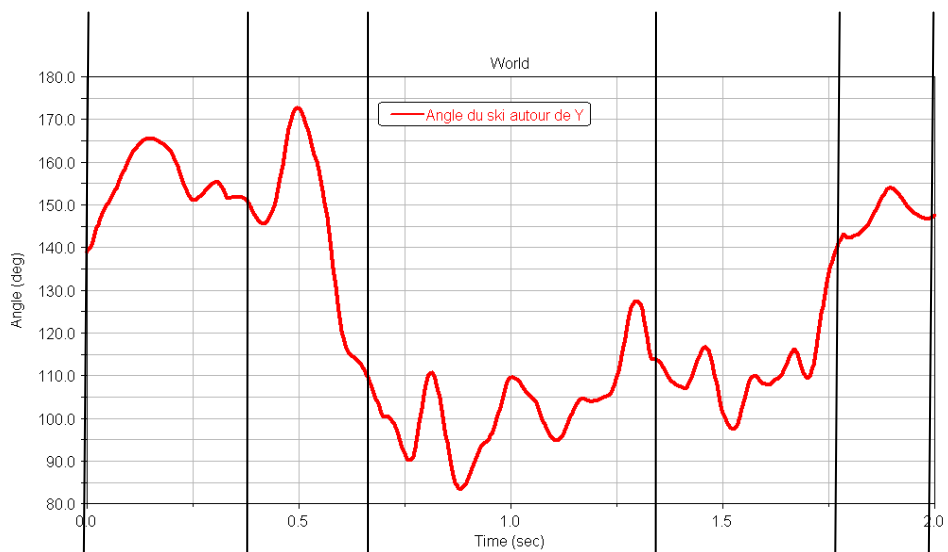


Figure 124 : angle de rotation du ski gauche autour de Y

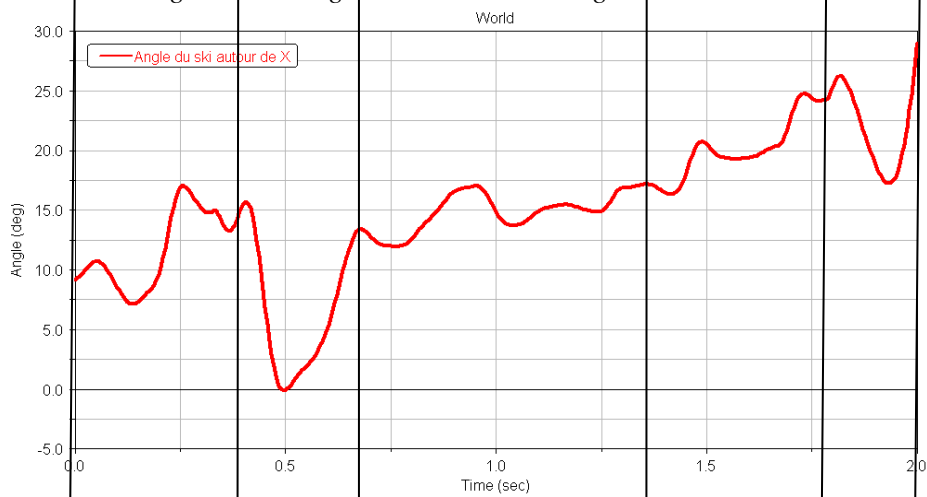


Figure 125 : angle de rotation du ski gauche autour de X

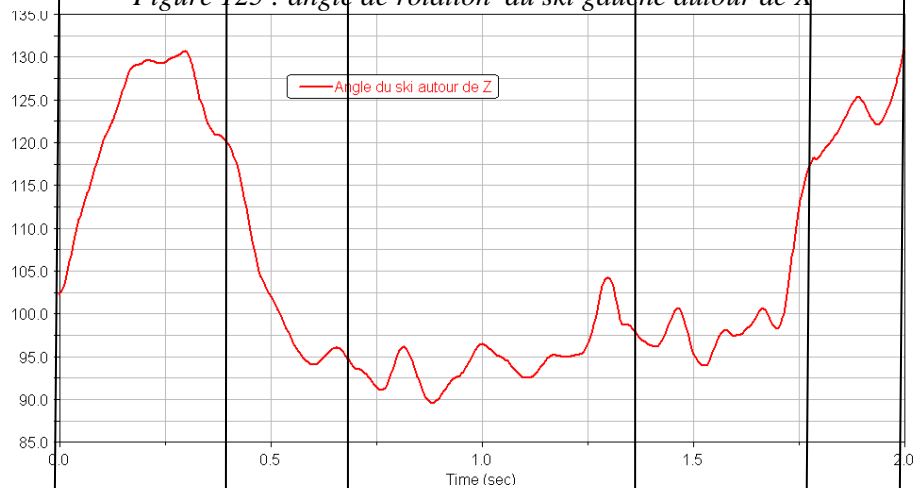
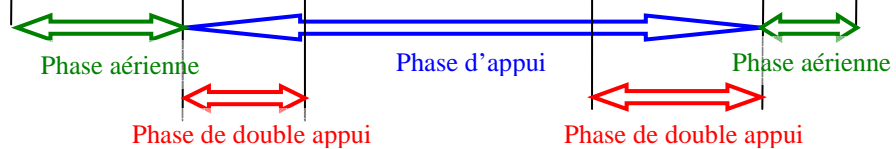


Figure 126 : angle de rotation du ski gauche autour de Z



La comparaison de toutes les courbes, nous montre que la variation angulaire la plus grande pour les deux skis, est celle qui se réalise autour de l'axe transversal (X) sur le plan antéro-postérieur, particulièrement sur le ski gauche où le débattement est de 70° (ski droit 45°).

Les différences les plus importantes entre les deux skis sont :

- Autour de l'axe Z, les variations en phase d'appui sont de 30° pour le ski droit et de 10° pour le ski gauche ; elles sont inversées pour la phase aérienne (10° pied droit, 30° pied gauche). Elles nous permettent d'identifier le côté faible, jambe gauche où pendant la phase de glisse, le ski est le plus à plat possible sur la neige et le côté fort, qui réalise une prise de carre pour accrocher la neige ce qui se traduit par une impulsion afin de transférer le poids du corps du skieur sur l'autre jambe. Le profil de ces courbes apparaît cyclique, signifiant que les variations d'angle de prise de carre sont très précises, le changement d'orientation se réalisant en milieu de phase aérienne. La skieuse semble stabiliser cette rotation qui déterminerait la qualité de l'appui.

- Autour de l'axe Y, les variations en phase d'appui sont de 15° pour le ski droit et de 5° pour le ski gauche ; en phase aérienne, elles sont de 20° pour le ski droit et pour le ski gauche, elles sont de 17° lorsque le mouvement de la jambe est l'abduction et de 7° lorsque c'est l'adduction (ramené de la jambe). Ceci signifie que lors de la phase d'appui, le ski gauche s'ouvre peu et moins que le ski droit par rapport à l'axe sagittal. La variation d'angle est quasi identique à l'abduction pour les deux skis, par contre, elle est moindre lors du ramené pour le ski gauche, ceci renforce le fait que la prise de carre du ski gauche à la fin de la phase d'appui n'existe quasiment pas.

- Autour de l'axe X, les variations en phase d'appui sont quasi identiques (45° pour le ski droit et 40° pour le gauche) par contre en phase aérienne elles sont de 15° pour le ski droit et de 70° lors de l'abduction et 45° lors de l'adduction pour le ski gauche. Le profil de ces courbes montre de nombreux pics surtout en phase d'appui, ce qui traduit des oscillations antéro-postérieure. Ce résultat peut être croisé avec celui de Smith [4] qui observe une migration du centre de pression sous le pied sur l'axe médian horizontal du ski (paragraphe 1.4.1.1).

Ces résultats corroborent globalement ceux de la littérature (chapitre I) et permettent de valider la cinématique des skis. Le logiciel, grâce à sa fonction de création de mesure, nous donne la possibilité de réaliser une lecture plus fine du mouvement. La variation des angles du ski et notamment la prise de carre peuvent être un critère important de la performance. Cette analyse chez un skieur peut induire des changements au niveau technique mais aussi au niveau de son matériel. Par exemple, adopter une fixation à deux points, qui limite plus efficacement les débattements du ski sur les trois plans et particulièrement sur le plan antéro-postérieur.

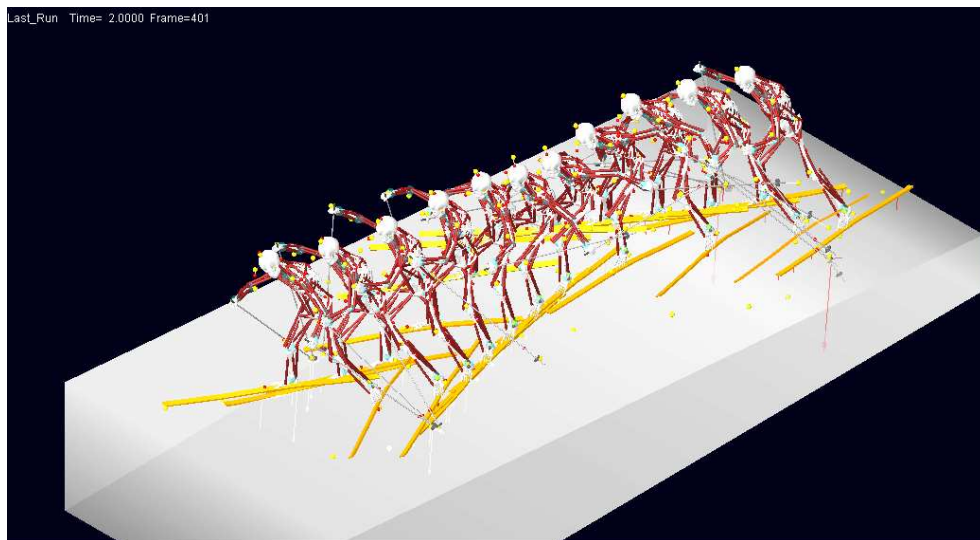
### 4.2.3 Kinogrammes

Lors de l'animation du modèle, une fonction du logiciel "superimpose", permet la réalisation de kinogrammes. Nous pouvons choisir l'intervalle de temps entre deux images. Nous figeons onze images pour avoir un rendu correct de l'action.

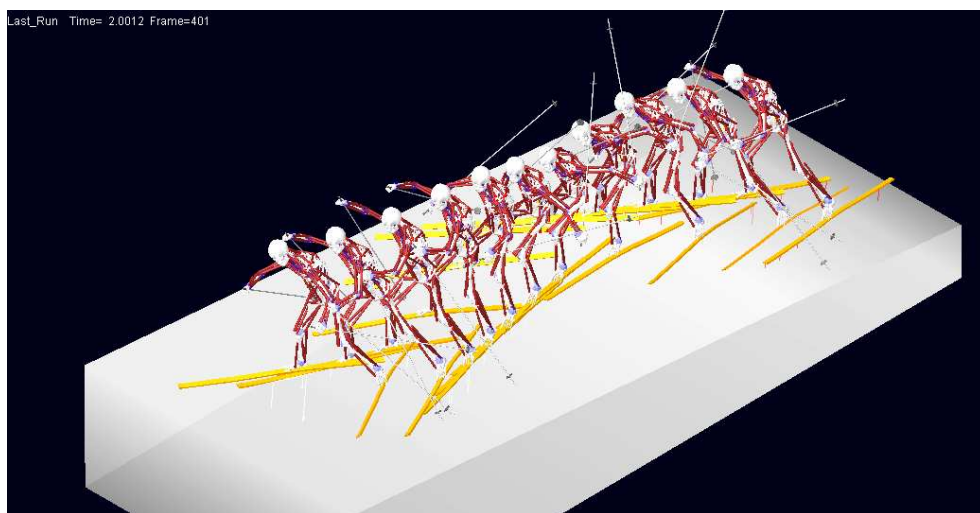
Les kinogrammes relevés sont ceux de la skieuse dans son environnement, suite à la simulation dynamique inverse figures 127 et suite à la simulation dynamique directe figure 128. Nous avons choisi une vue de trois quart, pour visualiser le mouvement dans sa globalité. Leur comparaison montre une différence frappante au niveau du mouvement des bâtons. Après le contact, dans le kinogramme du modèle figure 128, la réaction au sol est telle, qu'ils montent à la verticale, se croisent et redescendent. Alors que le kinogramme du modèle Figure 127, reflète bien la réalité, les mouvements des bâtons ne dépassant pas l'horizontale.

Sur le terrain, le skieur, après la poussée des bâtons, les lâche ; ceux-ci sont retenus par la dragonne, et grâce à la forme de la dragonne et à la pesanteur, ils reviennent directement dans les mains pour une autre poussée.

Le mouvement des jambes et des skis sont similaires sur les deux kinogrammes. Le mouvement sinusoïdal du corps humain, lors du cycle, est bien repérable.



*Figure 127 : kinogramme du modèle suite à la simulation dynamique inverse, vue de 3/4*



*Figure 128 : kinogramme du modèle suite à la simulation dynamique directe, vue de 3 /4.*

## 4.2.4 Conclusion

Les analyses cinématiques précédentes, celle de la position des deux pieds en XYZ, celles des angles de rotation des skis et celle des kinogrammes, vérifient bien la cinématique du mouvement du bas du corps du modèle dynamique. Les mouvements du haut du corps ne pourront être analysés que sur le modèle de la simulation dynamique inverse. En effet, malgré les variations des paramètres du bushing main-bâton, associées à celles des paramètres de contact, le résultat n'est pas satisfaisant. Nous n'avons pas pu transcrire le mouvement du bâton au modèle de la simulation dynamique directe, que ce soit dans la liaison main-dragone où au niveau du contact. La résolution de ce problème aurait nécessité beaucoup plus de temps. Toutefois, ceci est peut-être dû à la spécificité du logiciel dans le choix de la fonction initiale : "main ouverte, main fermée", qui bloquerait l'articulation des doigts lors du mouvement lorsque la main est fermée, pour l'instant ce problème reste ouvert.

L'analyse dynamique qui suit va nous permettre une étude plus approfondie du décalé.

## 4.3 ANALYSE DYNAMIQUE

### 4.3.1 Les forces de contact des bâtons et des skis et comparaison avec la littérature

Les recherches de Smith [4], sur l'analyse biomécanique des techniques du ski de fond, ont abouti à de multiples mesures sur les efforts développés lors des cycles de skating. Par la combinaison d'analyses vidéos et la pose de capteurs de forces positionnés entre le ski et la fixation et aux extrémités des bâtons, il illustre figure 129, l'évolution des forces de contact des skis et des bâtons lors d'un cycle complet de la technique du décalé. La population étudiée est de niveau régional.

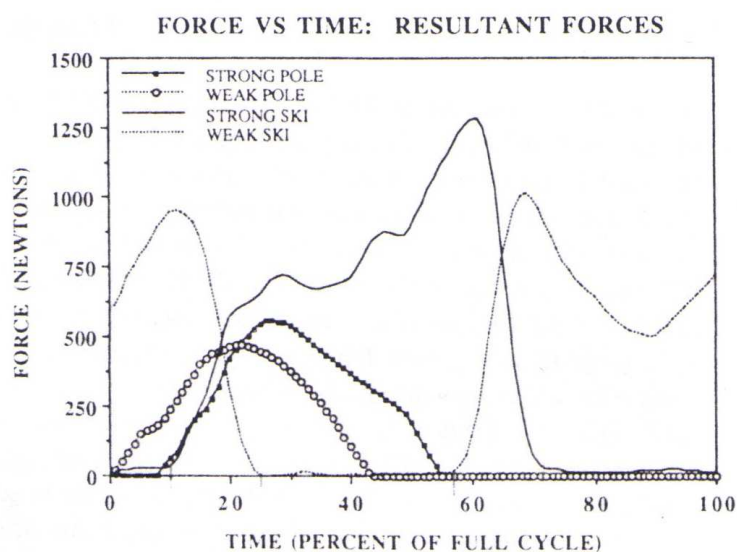


Figure 129 : forces de contact des bâtons et des skis en décalé, Smith [4]

Les graphes de la figure 130 montrent que le ski fort atteint une force maximale d'environ 1300 N et le ski faible d'environ 1000 N. Le bâton fort est planté légèrement en retard par rapport au bâton faible et décolle de la neige plus tard que ce dernier (caractéristique du décalé). En ce qui concerne les valeurs des forces maximales de contact des bâtons, elles sont de 600 N pour le fort et 400 N pour le faible.

Smith déduit de ses études, les forces maximales moyennes en rapport du poids du corps du skieur : de 1.2 à 1.6 fois le poids du corps pour les forces maximales moyennes des skis et de 0.5 à 0.6 fois pour les forces maximales moyennes des bâtons.

Pour la modélisation, la skieuse ayant une masse de 60 kg, les forces maximales moyennes doivent avoisiner pour les skis 941 N et pour les bâtons 353 N.

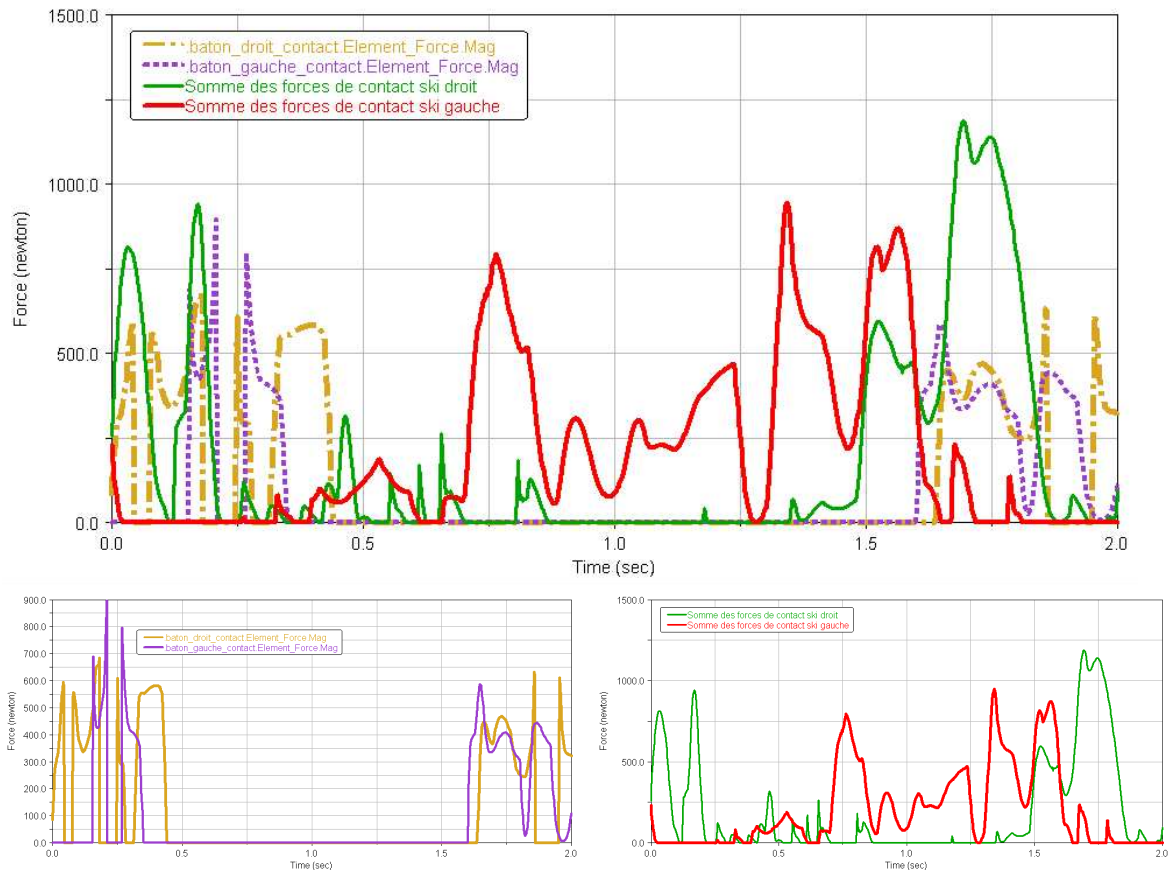


Figure 130 : forces de contact des bâtons et des skis issues de la simulation dynamique inverse. Forces des contacts bâtons à gauche, force des contacts skis à droite.

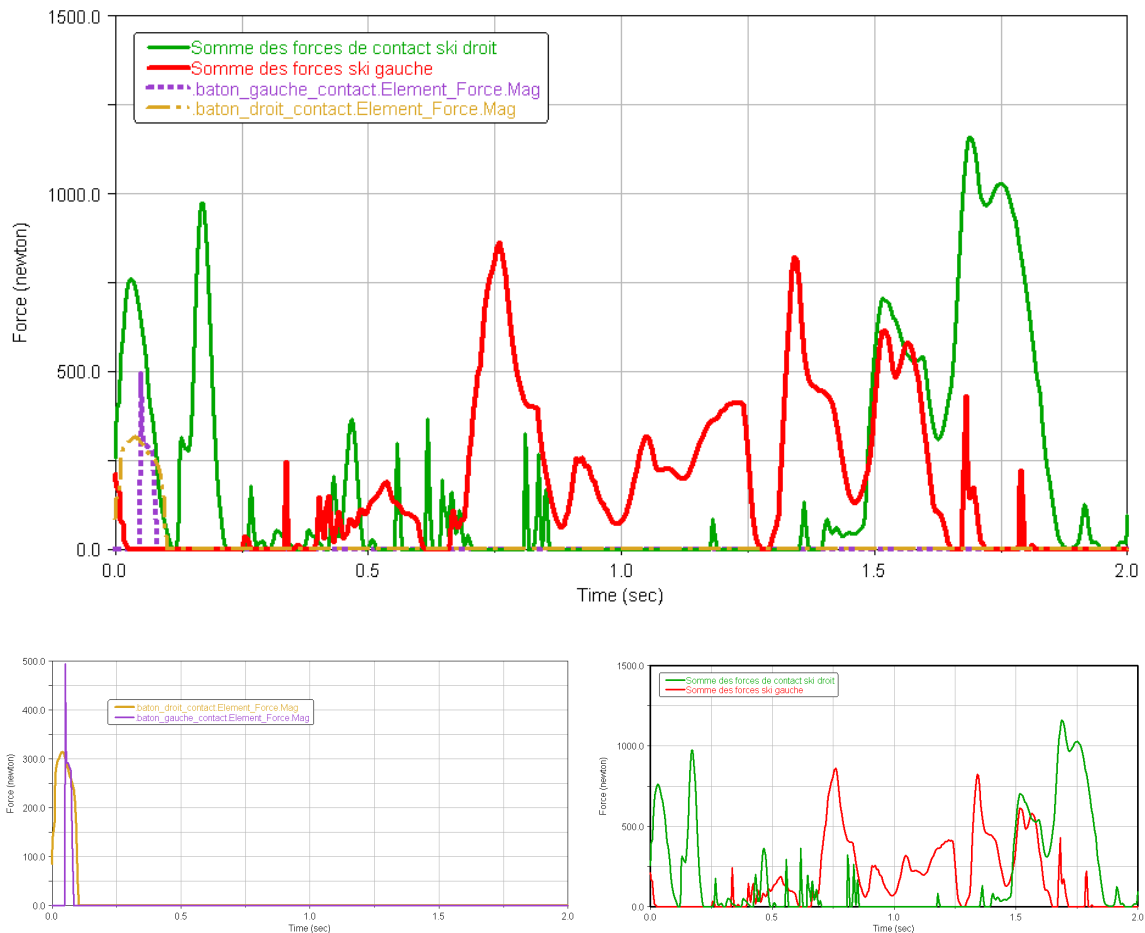


Figure 131 : forces de contact des bâtons et des skis issues de la simulation dynamique directe. Forces des contacts bâtons à gauche, force des contacts skis à droite.

#### 4.3.1.1 Les forces de contact des bâtons

Les forces de contact des bâtons du modèle, figure 131, ne reflètent pas totalement la réalité. En effet, lors du geste, les bâtons sont retenus par les dragonnes au moment du retour aérien. Il nous a été difficile de modéliser le mouvement des bâtons et lors de la simulation, la skieuse tient constamment les bâtons dans ses mains, les amenant à la verticale après la poussée, comme nous avons pu le visualiser sur le kinogramme figure 128.

Si nous faisons varier le bushing des mains pour rendre le mouvement cohérent, c'est le modèle de la simulation dynamique inverse qui devient incorrect. Nous avons donc préféré garder une cinématique satisfaisante.

Le contact des bâtons dans la simulation dynamique directe, apparaît en début de cycle mais le retour aérien s'effectue difficilement, ce qui empêche le deuxième contact des bâtons avec la neige.

Nous analyserons donc la force de contact des bâtons lors de la simulation dynamique inverse.

L'allure de leurs courbes respecte la fréquence et l'amplitude de celle de la littérature.

Le bâton faible est le bâton gauche du modèle, sa force de contact est représentée en violet dans la figure 130. Le bâton fort est le bâton droit et son effort est en jaune. Le bâton faible se plante en premier, suivi dans un petit laps de temps par le bâton fort ; il quitte la neige en

premier suivi par le bâton fort dans un laps de temps plus important. Les courbes comportent de nombreuses oscillations et ne sont pas continues comme dans le graphe de Smith. Toutefois, leurs valeurs moyennes maximales sont proches des valeurs prévues par le rapport du poids du corps de Smith (353 N).

L'intensité de la force de contact du bâton faible est de 350 N en moyenne, avec des pics à 800 N, celle du bâton fort est de 400 N en moyenne avec des pics à 600 N.

#### 4.3.1.2 Les forces de contact des skis

Le profil des courbes des forces de contact des skis sur la neige du modèle de la simulation dynamique inverse et dynamique directe, reflète assez bien celui du graphe de SMITH [4], figure 129. Nous observons les mêmes variations d'intensité au cours du cycle des deux skis. La force de contact du ski fort, courbe scindées en deux sur les graphes des deux modèles, figure 130 et 131, courbe centrale sur le graphe de Smith [4], figure 129, augmente progressivement avec un large palier pour arriver à un maximum puis s'effondrer. La force de contact du ski faible augmente une première fois, diminue puis augmente une dernière fois créant deux pics quasi identiques. L'allure générale des courbes des forces de contact des skis est correcte, malgré plusieurs fluctuations qui prouvent que le contact n'est pas encore parfait. La comparaison des deux graphes montre un profil semblable des courbes, hormis des oscillations beaucoup plus importantes, en début et en fin de cycle, lors de la simulation dynamique directe. La pesanteur semble entraîner plus d'instabilité, particulièrement lors du double appui : ski fort - ski faible. L'autre double appui : ski faible - ski fort, semble moins perturbé. En milieu des phases d'appuis, nous observons un profil identique entre les deux modèles. Les valeurs moyennes maximales atteintes par les courbes sont légèrement plus grandes que celles prévues par le rapport du poids du corps de Smith (941 N), c'est-à-dire, pour le ski fort 1300 N et pour le ski faible 900 N.

La spécificité du pas de patineur est de se réaliser dans les trois dimensions de l'espace. Si la force propulsive semble primordiale à l'avancement, les deux autres composantes, peu étudiées dans la littérature, et plus particulièrement la composante latérale, peuvent être déterminantes dans l'efficacité du geste. Nous relevons donc les forces sur les skis du modèle issu de la simulation dynamique directe sur les trois axes de déplacement X, Y et Z.

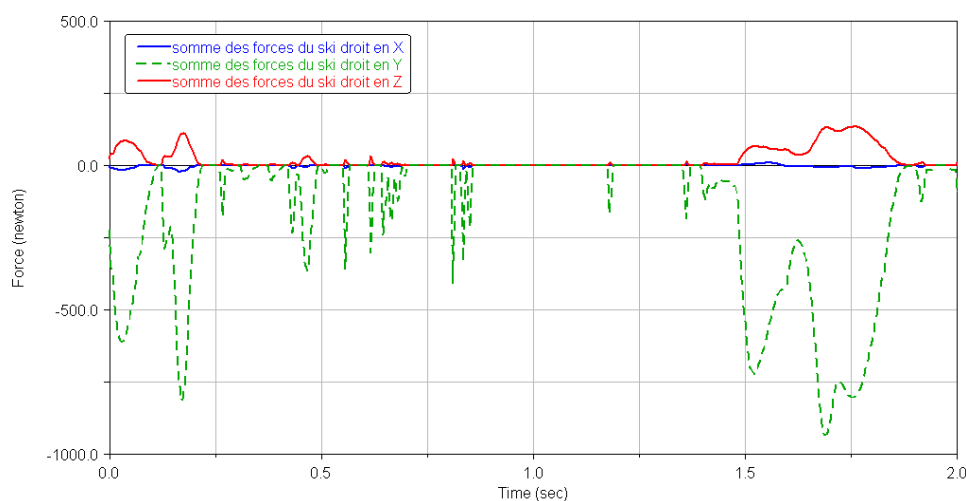


Figure 132 : somme des forces de contact du ski droit en X, Y et Z



Nous observons figures 132 et 136, que la composante verticale des forces des skis, est beaucoup plus importante que la composante horizontale. Quand à la composante latérale, ses valeurs sont moindres mais son profil est intéressant, il s'inverse en début et fin de cycle, figures 133 et 137.

Pour une meilleure lecture des courbes, nous relevons les valeurs des composantes de la force de contact en X, Y et Z du ski droit, tableau 29, et du ski gauche, tableau 30, par rapport à des moments spécifiques du cycle où il apparaît des pics importants sur les courbes. Nous avons retranscrit les pics inversés des courbes dans une case scindée par une diagonale avec chaque valeur extrême.

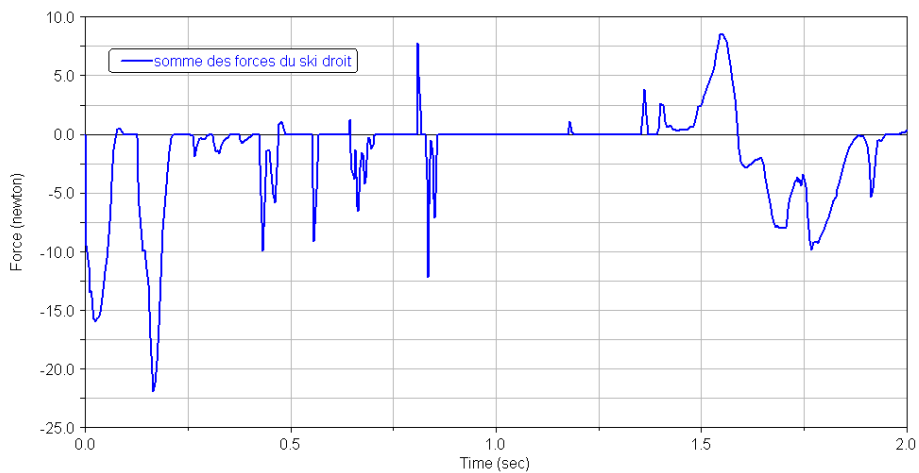


Figure 133 : somme des forces de contact du ski droit en X

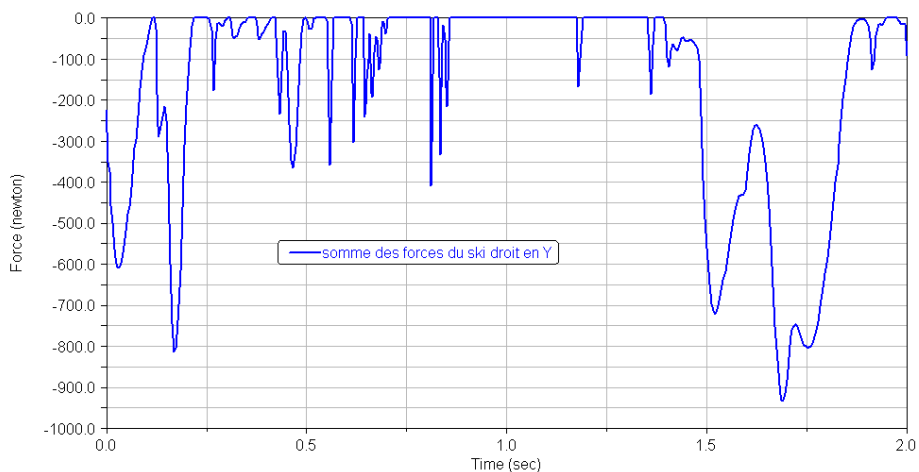


Figure 134 : somme des forces de contact du ski droit en Y

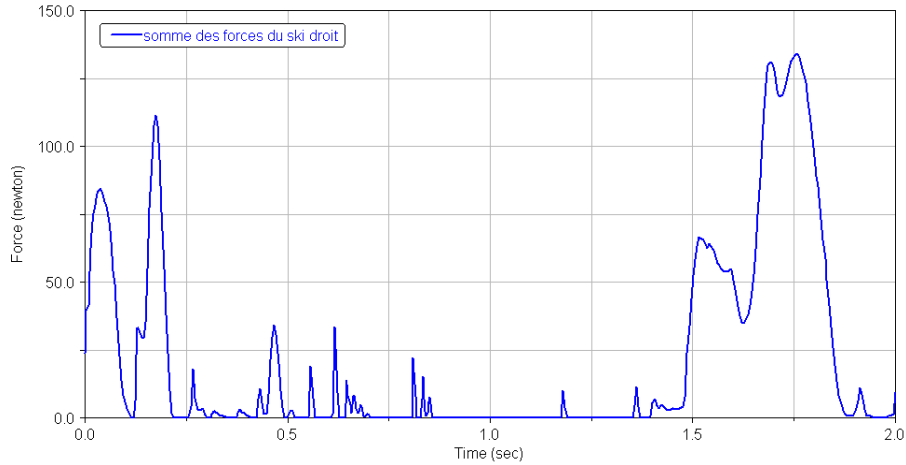


Figure 135 : somme des forces de contact du ski droit en Z

Temp (s)	0,06	0,13	0,38	0,62	0,8	1,5	1,75
Axes							
X	- 16	- 22	- 10	- 9	8 / - 12	8	- 10
Y	- 610	- 810	- 360	- 360	- 400	- 720	- 940
Z	80	115	35	35	20	65	135

Tableau 29 : valeurs (N) des composantes latérale (X), verticale (Y) et horizontale (Z) de la force de contact du ski droit à des instants précis du cycle (s)

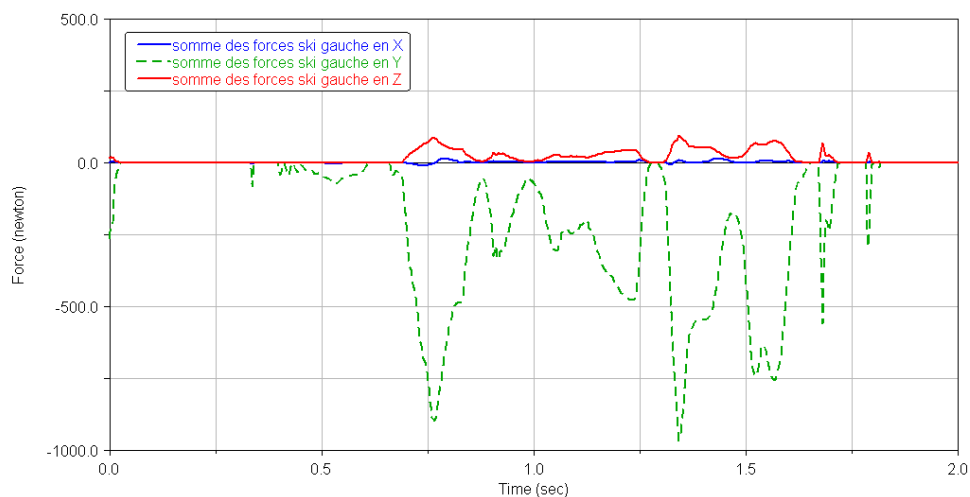


Figure 136 : somme des forces de contact du ski gauche en X, Y et Z

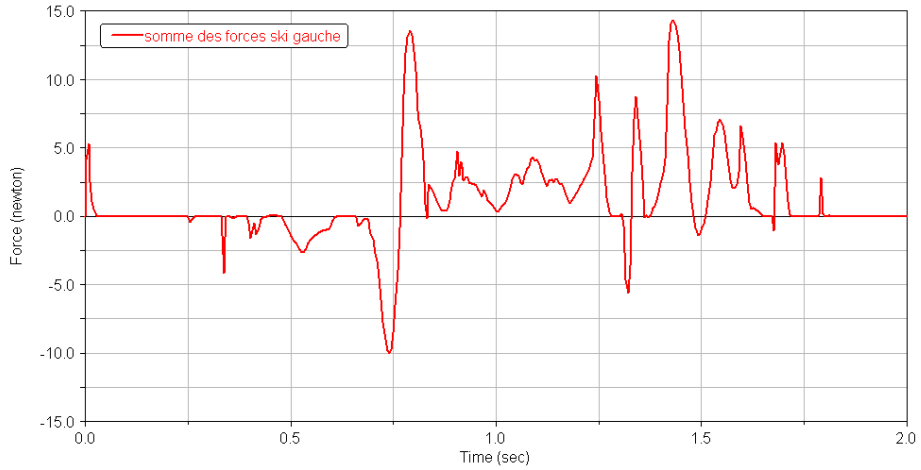


Figure 137 : somme des forces de contact du ski gauche en X

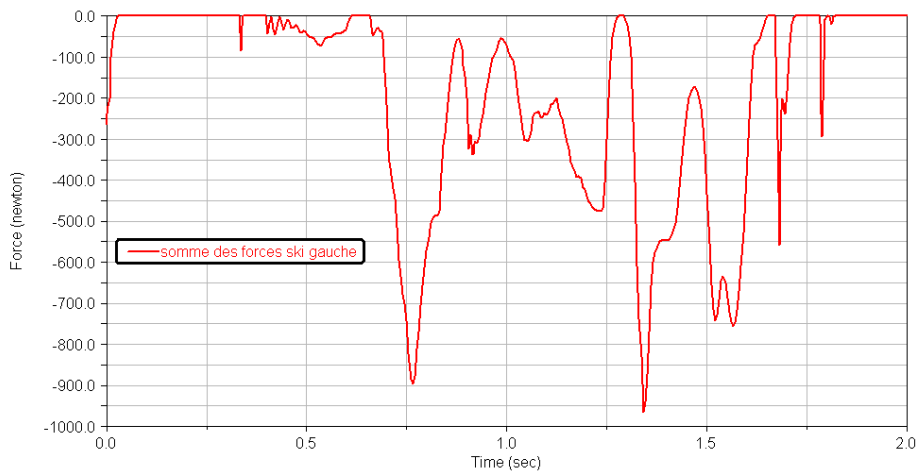


Figure 138 : somme des forces de contact du ski gauche en Y

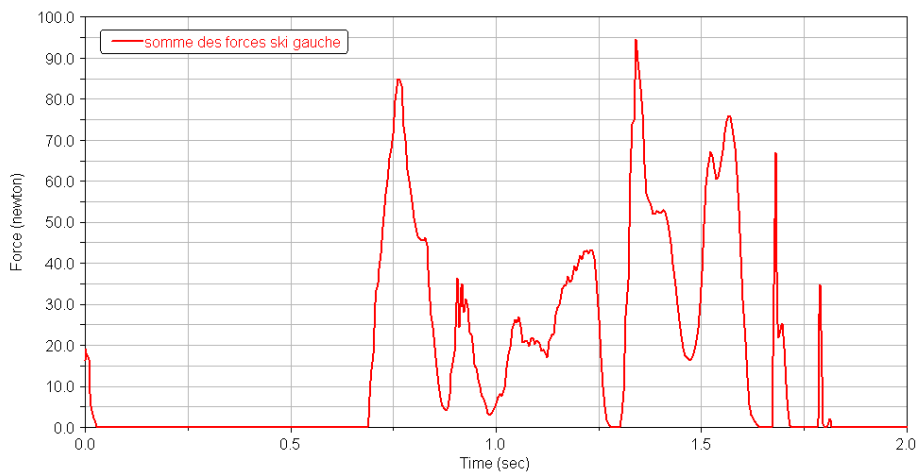


Figure 139 : somme des forces de contact du ski gauche en Z

Temps (s) \ Axes	0,75	0,9	1,1	1,25	1,35	1,60	1,7	1,8
X	- 10 13	5	4	10 - 6	15	7	5	3
Y	- 900	- 340	- 300	- 470	- 970	- 750	- 560	- 300
Z	85	36	26	44	95	76	67	35

Tableau 30 : valeurs (N) des composantes latérale (X), verticale (Y) et horizontale (Z) de la force de contact du ski gauche à des instants précis du cycle (s)

Pour chacune des composantes des forces de contact, les valeurs les plus importantes sont aux mêmes instants, pour les composantes verticale et horizontale, leur profil de courbe est identique à celui de la force de contact du ski, par contre le profil de courbe de la composante latérale montre des pics inversés en début et en fin de cycle d'appui. Ceux-ci pourraient correspondre à des prises de carre, d'une part, le fait que la force latérale s'inverse en passant par zéro à un instant donné, signifierait une recherche d'accroche du ski en début du cycle jambe gauche par exemple ; d'autre part, le profil décroissant de la courbe, traduirait également un ralentissement et une accroche, en fin et en début de cycle jambe droite et en fin de cycle jambe gauche.

L'intensité de la force de contact serait donnée en majorité par la composante verticale puis horizontale, la composante latérale ne serait importante que pour la précision du geste.

#### 4.3.1.3 Les pourcentages du cycle du modèle de la simulation dynamique inverse

Compte tenu du problème rencontré lors de la conception du modèle au niveau des bâtons, nous analysons les phases du cycle, grâce au graphe des forces de contact des bâtons et des skis du modèle de la simulation dynamique inverse.

Les phases de double contact sont assez bien respectées, 15% du temps de cycle, ainsi que les phases d'équilibration et de propulsion des bâtons et les phases de glisse et de propulsion des skis, figure 140 et 141.

Pour déterminer les diverses phases nous nous sommes basés sur les fluctuations des forces de contact qui nous paraissaient significatives.

- pour les bâtons, le palier en début de courbe est plus sujet à une équilibration et les divers pics à une propulsion
- pour les skis l'augmentation de la courbe puis sa diminution est caractéristique de la phase de glisse, son dernier sommet et sa chute révèlent la phase de propulsion. L'observation de la simulation dans le temps a aussi permis de vérifier cette dichotomie.

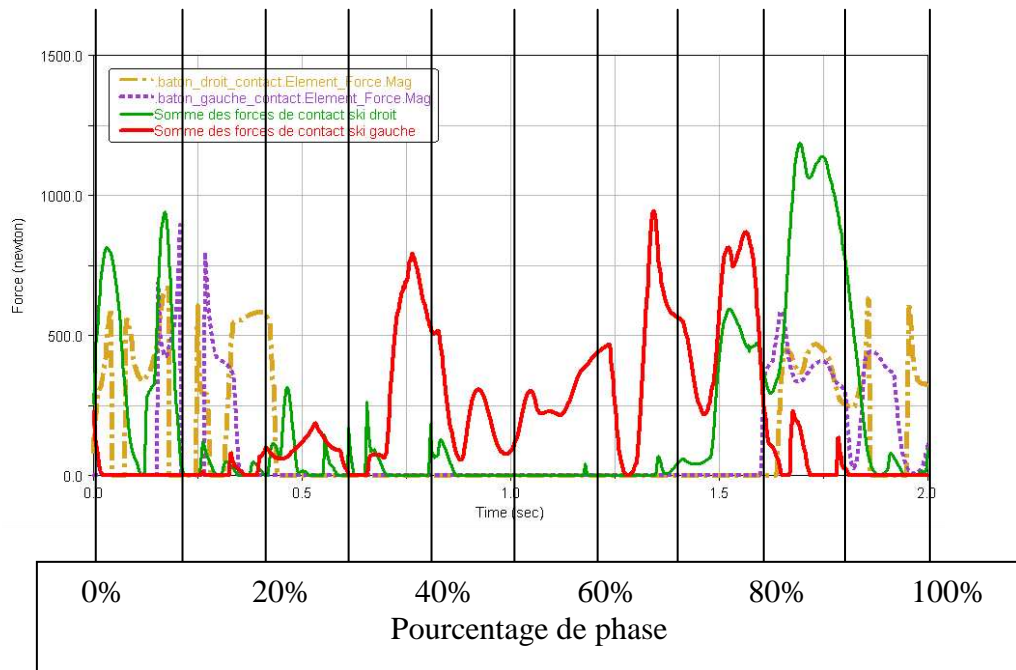


Figure 140 : forces de contact des bâtons et des skis issues de la simulation dynamique inverse en fonction du pourcentage de phase

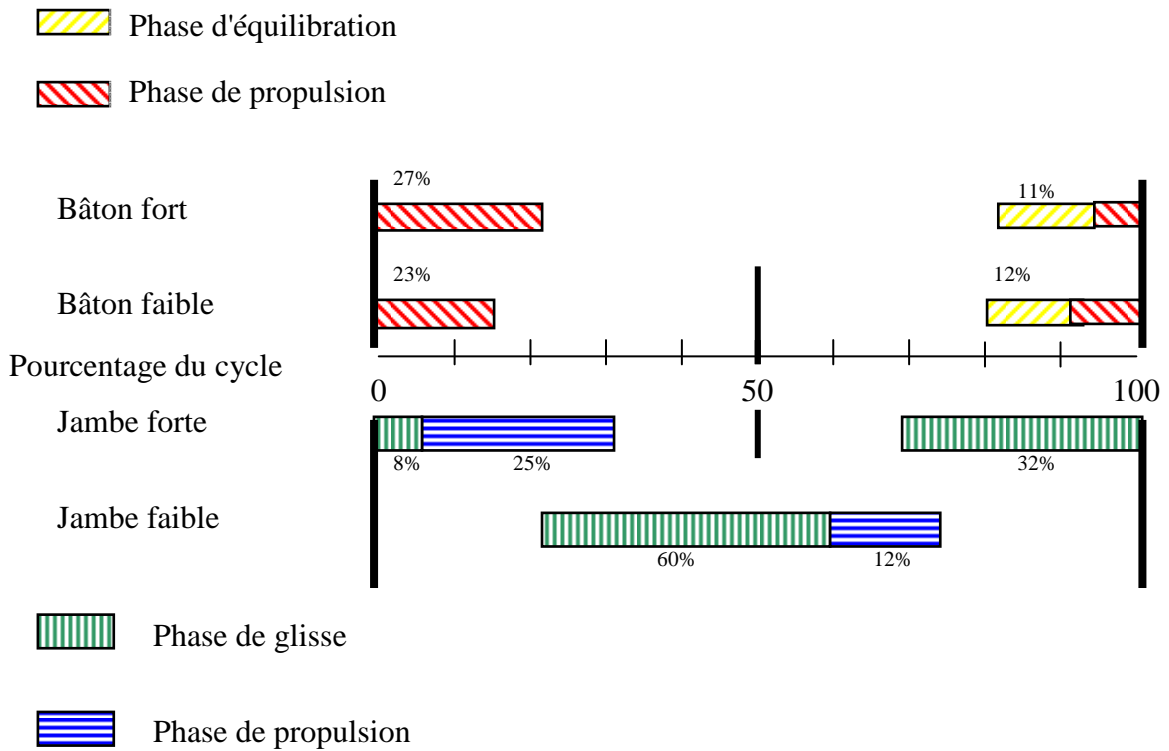


Figure 141 : pourcentage de phase des bâtons et des jambes issues de la simulation dynamique inverse

	<b>Bâtons</b>			
	<b>Faible</b>		<b>Fort</b>	
	<b>Equilibration</b>	<b>Propulsion</b>	<b>Equilibration</b>	<b>Propulsion</b>
Bilodeau	28,8%		35,4%	
Smith	48%		49,4%	
Modèle cinématique final	35,0%		38,0%	
	34,3%	65,7%	29%	71%

Tableau 31 : comparaison du pourcentage des phases des bâtons du modèle cinématique avec la littérature

	<b>Skis</b>			
	<b>Côté fort</b>		<b>Côté faible</b>	
	<b>Glisse</b>	<b>Propulsion</b>	<b>Glisse</b>	<b>Propulsion</b>
Smith et al (7°)	37%	53%		
Street (7°)	10%	90%		
Bilodeau (5°)	56.6%		53.4%	
	73%	27%	74.5%	25.5%
Smith	57.1%		59.7%	
Modèle cinématique final (6°)	65%		72%	
	61,5%	38,5%	83,3%	16,7%

Tableau 32 : comparaison du pourcentage des phases des skis du modèle cinématique avec la littérature

La comparaison des pourcentages du modèle cinématique avec ceux d'autres études est assez probante quant à la qualité du modèle. Toutefois, il apparaît quelques différences :

- Au niveau des bâtons, tableau 31, leurs phases d'appui est de 35% à 38% du cycle, la différence entre les deux n'est que de 3%. Concernant les pourcentages des phases d'appui des bâtons, les résultats trouvés par Smith et Bilodeau sont divergents. Ceci peut montrer la difficulté de mesure et/ou la multiplicité des paramètres physiques propres à l'individu qui préfère s'organiser d'une façon personnelle pour réaliser un geste technique précis. En effet, suivant sa morphologie, sa technique, sa condition physique du moment, le sportif préférera avoir une action plus ou moins longue des bras lors du cycle. Concernant la phase d'équilibration, les avis dans la littératures sont aussi contradictoires : pour Bilodeau, il semblerait que toute la phase d'appui soit une phase de propulsion et pour Smith qu'il y ait 66 % en force propulsive contre 20 % en équilibration . La phase d'équilibration des bâtons du modèle est importante : 29% côté fort et 34,3% côté faible, quant à la phase de propulsion elle est de 71% côté fort et 65,7% côté faible. Ceci pourrait être expliqué par le fait que le bâton côté faible est plus incliné vers l'avant que le bâton côté fort pendant la phase de planté.

- Au niveau des skis, tableau 32, leurs phases d'appui est plus longue avec une proportion plus importante pour le modèle de 7 %, pour Smith de 2,6% et pour Bilodeau de -3,2 %. Les phases de glisse sont plus longues que les phases de propulsion, particulièrement pour la jambe faible du modèle.

Un parallèle des pourcentages de phases des bâtons et des skis peut être fait par rapport aux côtés. Le côté fort a un pourcentage de propulsion plus important que le côté faible qui a un pourcentage de glisse plus important.

La skieuse aurait une technique très dissymétrique avec des appuis jambes longs et des appuis bras courts. Elle favoriserait d'avantage l'action des jambes et plus particulièrement la phase de glisse de la jambe faible lors de ce cycle.

En conclusion, l'analyse du modèle de la simulation dynamique directe donne des résultats qualitatifs et quantitatifs proches de ceux donnés dans les analyses faites dans la littérature. La comparaison des deux modèles, nous permet également de vérifier la modélisation dynamique directe, sauf pour le mouvement et les forces de contact des bâtons. Les forces de contact des skis étant identiques après les deux simulations, nous révélons des résultats au niveau énergétique et musculaire. Toutefois, les résultats liés aux bâtons peuvent être relevés sur le modèle de la simulation dynamique inverse, en sachant que ce modèle est piloté et qu'il a une cinématique correcte.

### 4.3.2 Les efforts musculaires

Le modèle, grâce à l'analyse dynamique directe, permet d'obtenir les efforts musculaires. Le logiciel donne les forces de tous les muscles qui composent le modèle. Pour connaître la modélisation des muscles et l'anatomie du modèle, se référer au paragraphe 3.2.1.7. Génération des muscles.

Plusieurs caractéristiques peuvent être mesurées par leurs composantes et par leur intensité (Mag), figure 142 : la force, le couple, l'allongement, les déplacements en rotation, la vitesse et l'accélération en translation, la vitesse et l'accélération angulaire.

Pour notre étude, nous analysons la force et l'allongement de certains muscles qui devraient confirmer ou infirmer l'action mécanique précise, dans un temps donné, de la skieuse. Toutefois, cette analyse ne peut se réaliser qu'au niveau du modèle issu de la modélisation dynamique directe. Ce modèle n'étant pas encore abouti, particulièrement, lors de la poussée des bras, nous restons prudents quant à l'interprétation des résultats. Les intensités sont pour certains muscles négligeables, nous commenterons donc les instants de sollicitation et les longueurs d'étirement du muscle.

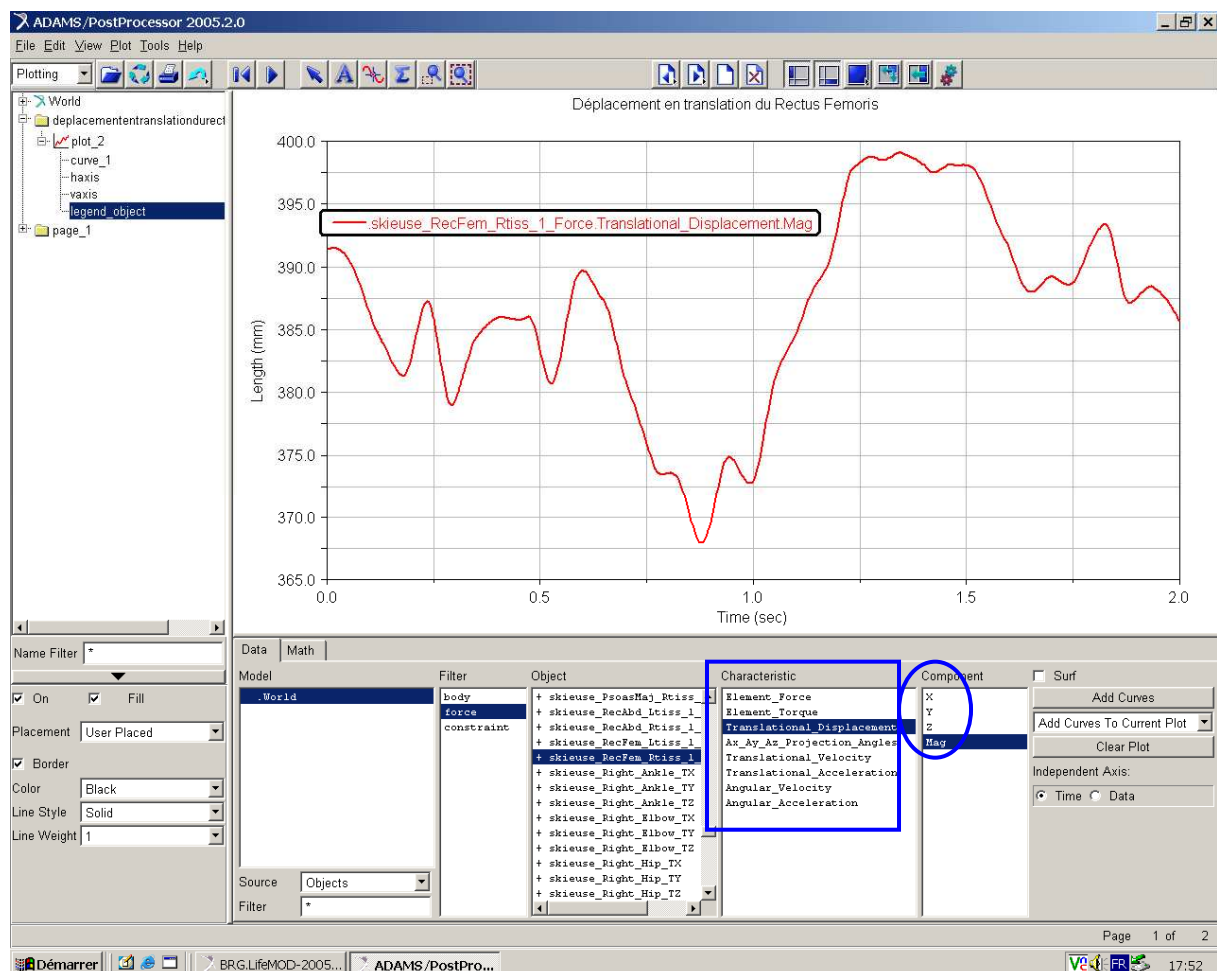


Figure 142 : exemple de mesures musculaires du Rectus Femoris proposées par le logiciel



Quelques généralités sur les muscles suivent dans cet encadré :

En général, les muscles se fixent par une extrémité à un os et par l'autre à un second os articulé sur le premier directement ou indirectement, de manière à ce que ces os puissent se mouvoir l'un sur l'autre. Dans l'exécution d'un mouvement déterminé, l'un des os devient fixe, de telle façon que l'une des extrémités du muscle ne puisse se déplacer, c'est alors que la contraction produit son effet sur l'autre os qui se rapproche en fonction du raccourcissement du muscle ; ce raccourcissement peut être de moitié, deux tiers, trois quarts, parfois même cinq sixièmes de la longueur du muscle dans sa plus grande extension.

Un muscle ne développe de force qu'en se contractant, de sorte qu'après avoir rapproché l'une de ses extrémités de l'autre, en se relâchant, il permet l'éloignement des points d'attache. Ce mouvement inverse doit être exécuté par un autre muscle antagoniste du premier. L'action d'un muscle dépend, entre autres choses, du nombre de ses fibres, mais non de leur longueur ; celle-ci n'a d'influence que sur l'étendue du mouvement. D'ailleurs, la contraction ne peut pas durer longtemps, elle est essentiellement intermittente. Vandewalle 1992 [62], indique que la vitesse de contraction dépend essentiellement du type de fibres et de la longueur du muscle alors que la force maximale est davantage liée à la section transversale du muscle. Weineck 1997 [63], rappelle toutefois que l'augmentation de la force maximale aurait des effets positifs sur la vitesse de contraction.

#### 4.3.2.1 Exemple du Rectus Femoris

Le Rectus Femoris aussi appelé droit antérieur, figure 143, fait partie de la loge antérieure de la cuisse (muscles rassemblés par un tissu conjonctif, formant un groupe) et forme le plan superficiel du quadriceps. Il est souvent sollicité lors du pas du patineur car il permet l'extension de la jambe sur la cuisse et aussi la flexion de la cuisse sur le bassin. Son origine est constituée par trois tendons sur l'os iliaque et le fémur. Sa terminaison est sur la base de la rotule et ses fibres superficielles vont constituer le plan superficiel du tendon rotulien.

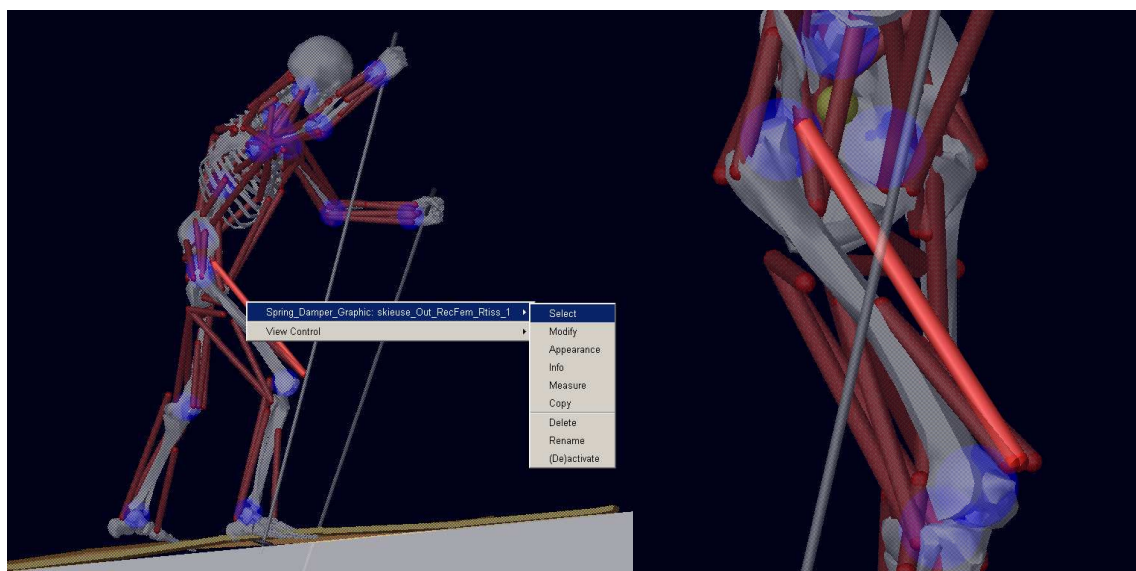


Figure 143 : vue de profil du Rectus Femoris droit du modèle

Nous prenons l'exemple du Rectus Femoris, dont la fonction apparaît lors de la flexion – extension du bassin, de la cuisse et de la jambe. Notre hypothèse de départ est qu'il travaille

plus que les adducteurs utilisés dans les mouvements de latéralité interne des deux jambes et qu'il existe une différence suivant le côté fort ou faible auquel il appartient.

Les graphes suivants, figure 144, 145, 146, montrent en effet une différence importante entre l'action du Rectus Femoris droit et gauche. Les courbes des forces exercées par les muscles sont filtrées par le logiciel, la fréquence de coupure est de 5 Hz et l'ordre de 2.

Alors que le côté fort de la skieuse est le côté droit, c'est le Rectus Femoris gauche qui paradoxalement, a une force et un allongement plus élevés, 55 N et 46 mm, contre 45.67 N et 31 mm pour le Rectus Femoris droit. La force s'exerce juste avant la pose du ski, pour le gauche et en fin de retour aérien, pour le droit, le pic de force de ces deux muscles apparaît au même instant.

Par contre, ces muscles se raccourcissent avant l'appui du pied, pour s'étirer à la pose du pied, puis pour se raccourcir progressivement pendant l'appui. Ils ont un raccourcissement maximum à la fin de la poussée de la jambe, lorsqu'elle est quasi-tendue et en tout début du retour aérien.

La courbe de la longueur du Rectus Femoris droit, figure 146, a de petites variations, presque stabilisées lors du retour aérien du membre inférieur droit.

Ces graphes montrent la complexité du mouvement, car ce muscle s'étire lors de la flexion de la jambe sur la cuisse ou de la cuisse sur la jambe, mais se contracte lors de la flexion du bassin sur la cuisse ou de la cuisse sur le bassin. Or, ce muscle s'étire au niveau du genou et il se raccourcit au niveau de la hanche, simultanément, lors du geste. En effet, lors de la pose du ski, il apparaît une flexion du genou et du bassin, suivi en fin de poussée par une extension du genou et du bassin, rapidement relayée par une flexion des deux articulations lors du retour aérien du membre inférieur. L'action similaire de ces deux articulations entraînant pour l'une une contraction et pour l'autre un étirement, peut fausser l'interprétation des résultats concernant les actions du muscle. Les profils des courbes de longueur de ce muscle, répondent différemment aux actions spécifiques des jambes. L'action du bassin semble prépondérante, lorsque le buste fléchit vers l'avant, lors de l'appui gauche, le Rectus Femoris gauche s'étire alors que le droit se raccourcit et lorsque le buste se penche en avant lors de l'appui droit les actions sont inversées. L'allongement le plus important du muscle se réalise lors de la flexion du bassin sur la cuisse.

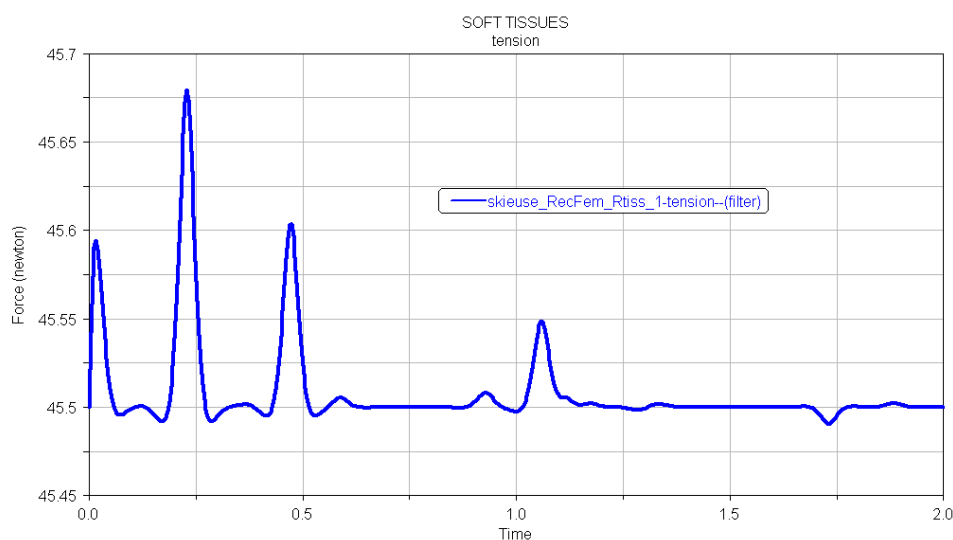


Figure 144 : force du Rectus Femoris droit au cours du cycle

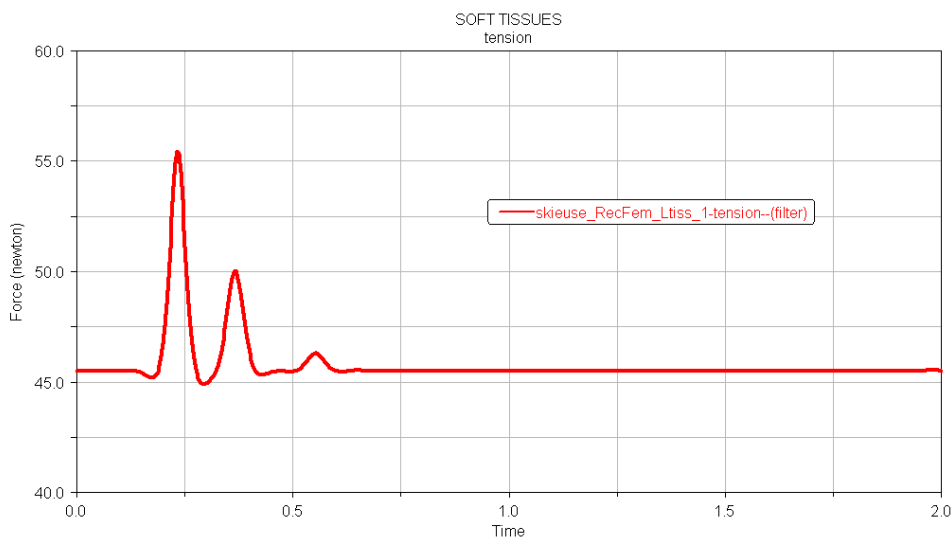


Figure 145 : force du Rectus Femoris gauche au cours du cycle

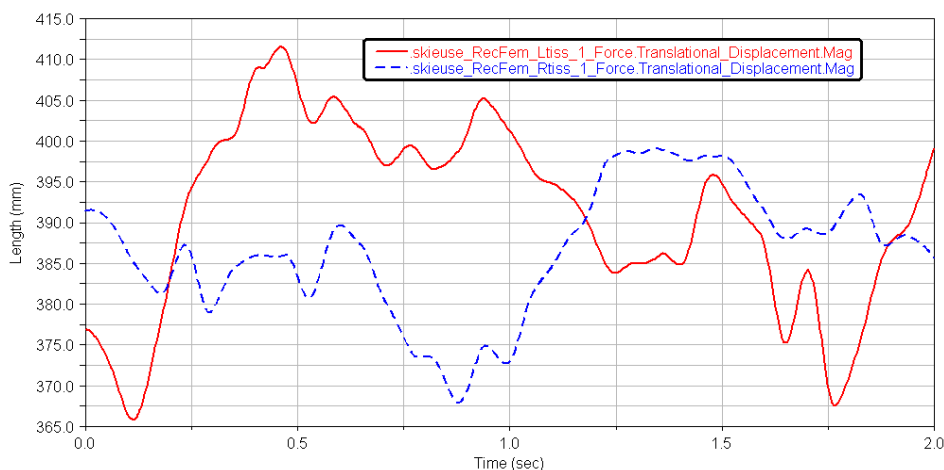


Figure 146 : longueur du Rectus Femoris gauche et droit

En conclusion, l'analyse des Rectus Femoris révèle avant tout la dissymétrie des deux membres inférieurs lors de ce geste technique. Quant-à l'importance de son rôle dans le cycle, la comparaison des groupes musculaires et de leurs actions mécaniques abordée dans le paragraphe suivant, va mieux la mettre en évidence.

#### 4.3.2.2 Comparaison des groupes musculaires de la cuisse et de leurs actions mécaniques

##### 4.3.2.2.1 Description des muscles de la cuisse modélisés par le logiciel

Le mouvement du décalé étant une suite d'actions latérales des membres inférieurs, nous allons nous intéresser aux actions des muscles de la cuisse au cours du cycle. Nous comparons les trois groupes musculaires qui jouent un rôle important lors de ce geste : le groupe musculaire antérieur, interne et postérieur de la cuisse. Les résultats devraient nous dévoiler la participation de différents groupes musculaires lors du mouvement et les muscles qui exercent la force la plus grande.

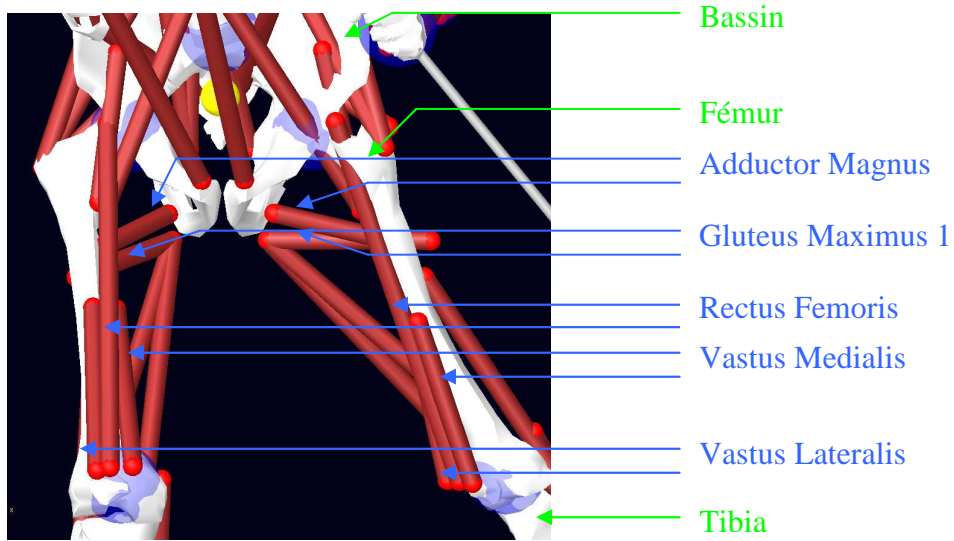
Tous les muscles ne sont pas modélisés, l'anatomie du modèle est simplifiée par le logiciel. Les muscles principaux sont cependant représentés et ce sont leurs actions au cours du geste qui nous intéressent.

L'étude des résultats porte sur les muscles suivants : (figures 147 et 148)

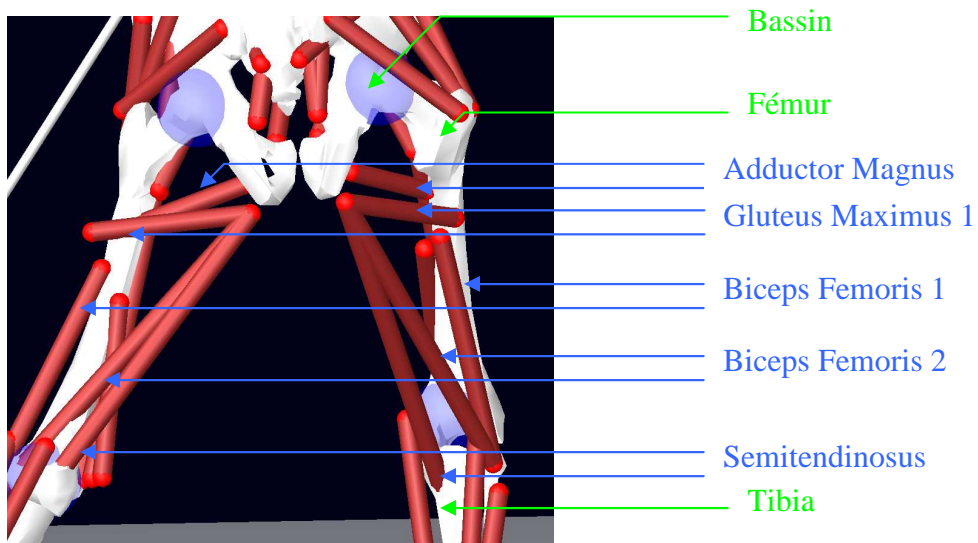
- Les muscles faisant partie de la loge antérieure de la cuisse : le Rectus Femoris, le Vastus Medialis et le Vastus Lateralis.
- Les muscles de la loge interne qui sont représentés par l'Adductor Magnus
- Les muscles représentant la loge postérieure : le Semitendinosus, les Biceps Femoris 1 et 2.

- Le Gluteus Maximus 1 fait partie des fessiers mais il a une action sur la cuisse quasi identique à l'Adductor Magnus, figures 165 et 168. Il fera donc partie de l'étude.

Nous choisissons d'analyser la force et le déplacement en translation des muscles de la cuisse modélisés par le logiciel, car nous pensons que leurs actions sont primordiales lors du cycle de jambe, particulièrement lors des mouvements latéraux.



*Figure 147 : muscles de la cuisse du modèle vue antérieure*



*Figure 148 : muscles de la cuisse du modèle vue postérieure*

### 4.3.2.2 Analyse des résultats

#### 4.3.2.2.1 Résultats des muscles de la loge antérieure de la cuisse

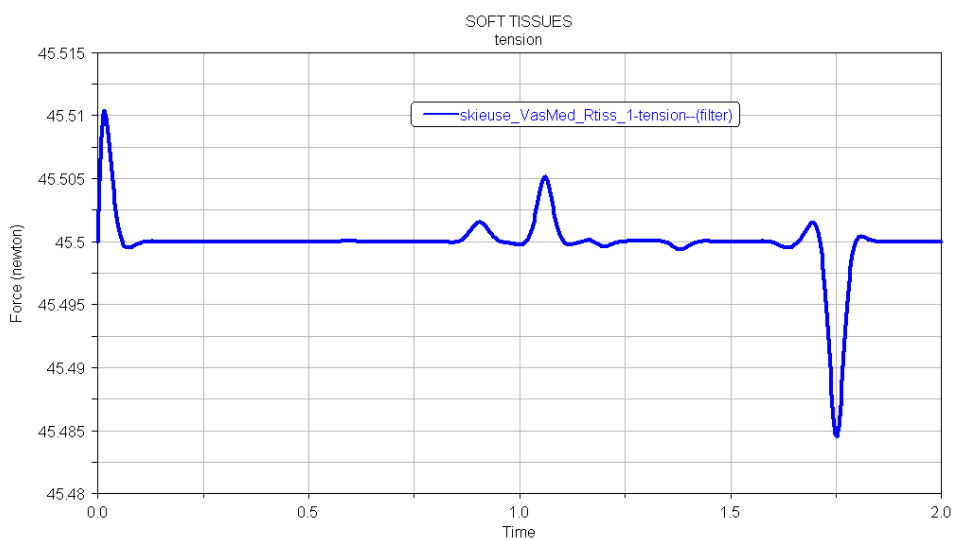


Figure 149 : force du Vastus Medialis droit

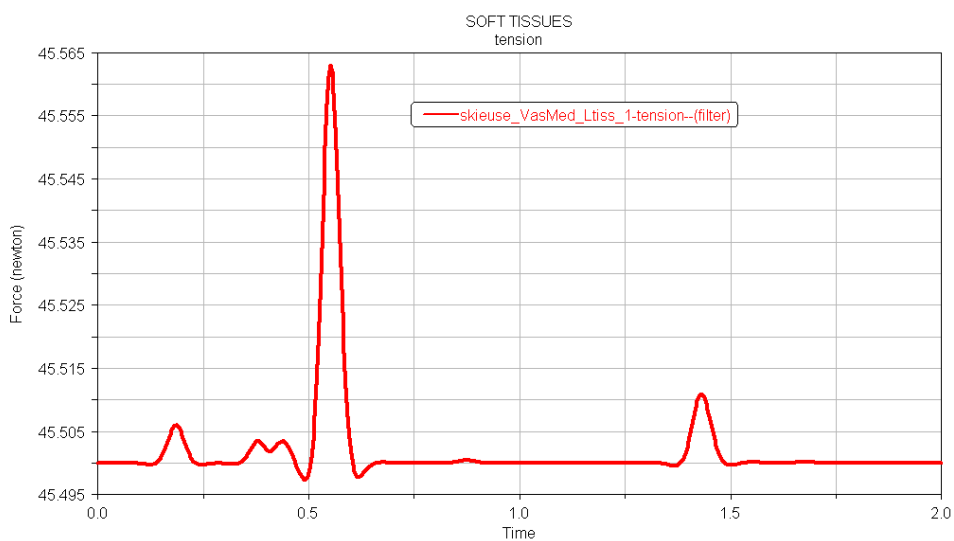


Figure 150 : force du Vastus Medialis gauche

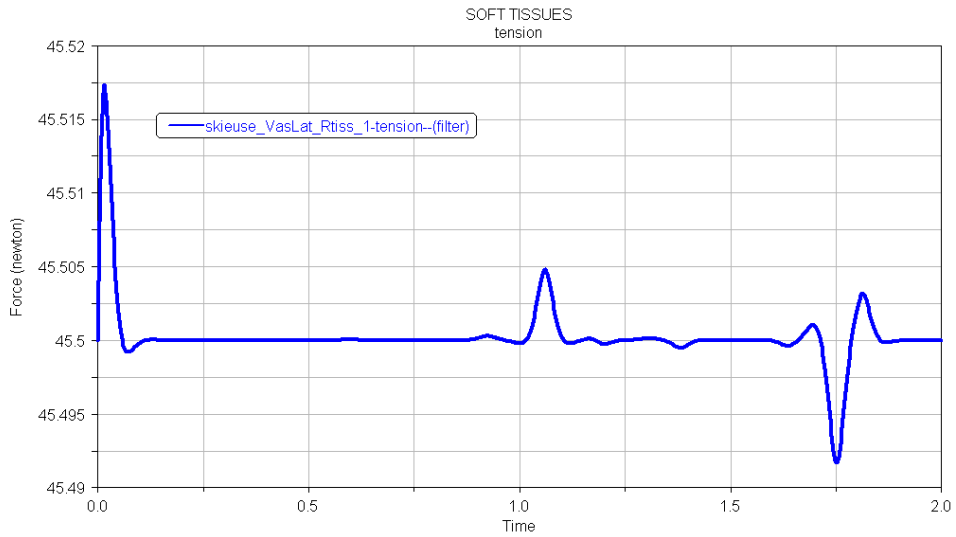


Figure 151 : force du Vastus Lateralis droit

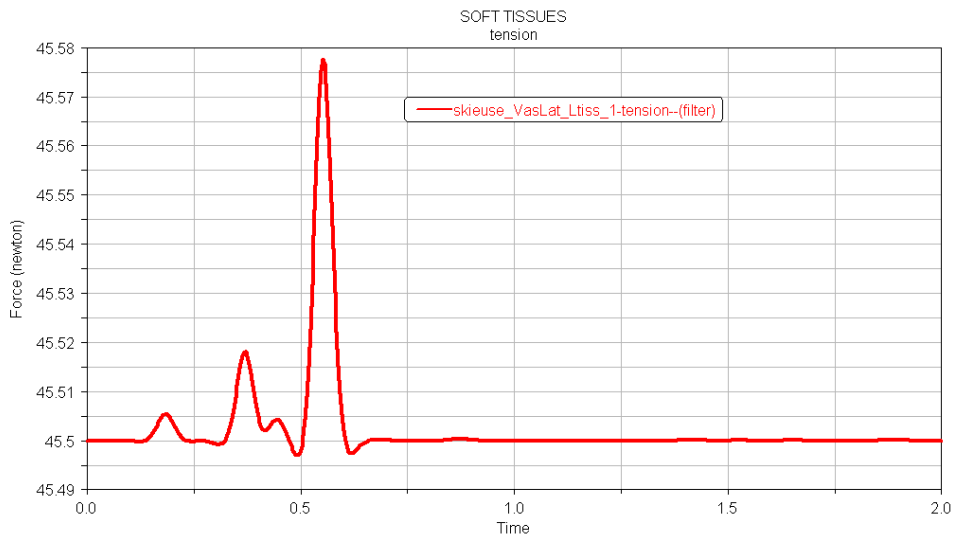


Figure 152 : force du Vastus Lateralis gauche

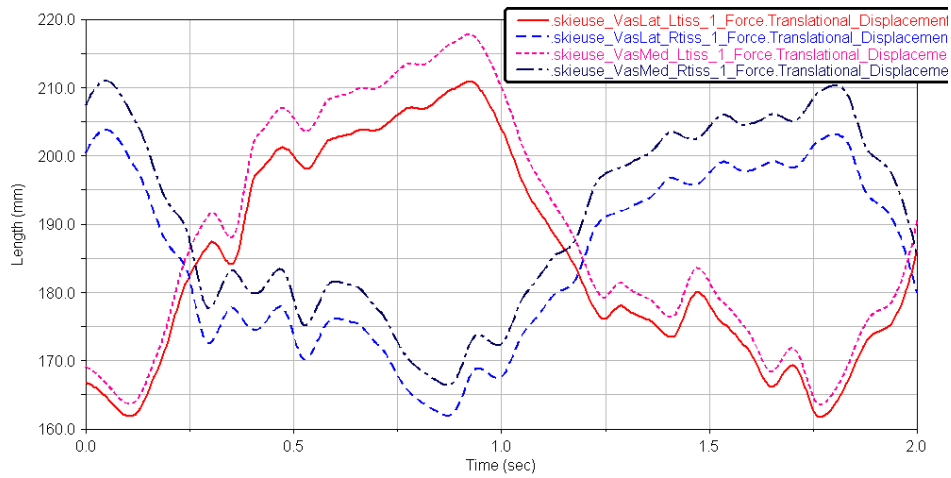


Figure 153 : longueur du Vastus Medialis et du Vastus Lateralis gauche et droit

#### 4.3.2.2.2 Résultats des muscles de la loge postérieure de la cuisse

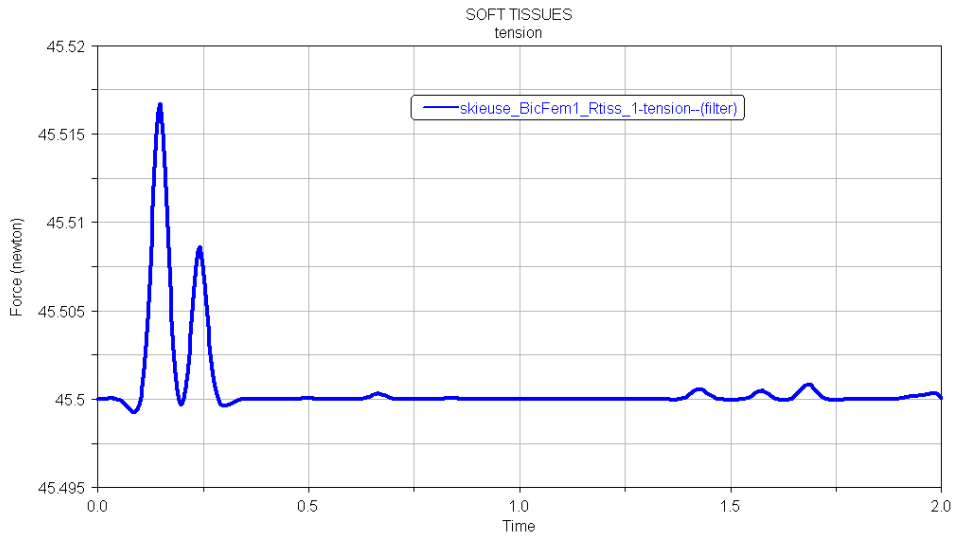


Figure 154 : force du Biceps Femoris 1 droit

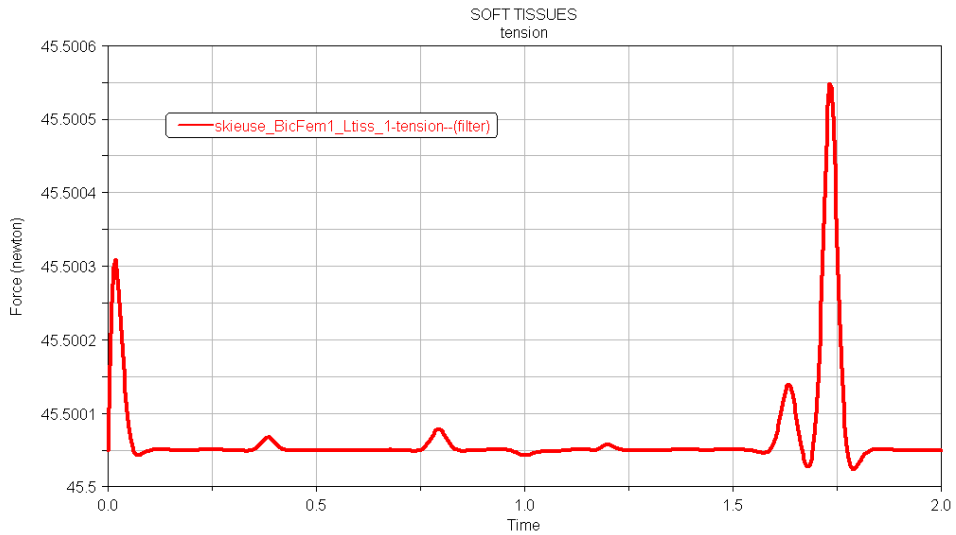


Figure 155 : force du Biceps Femoris 1 gauche

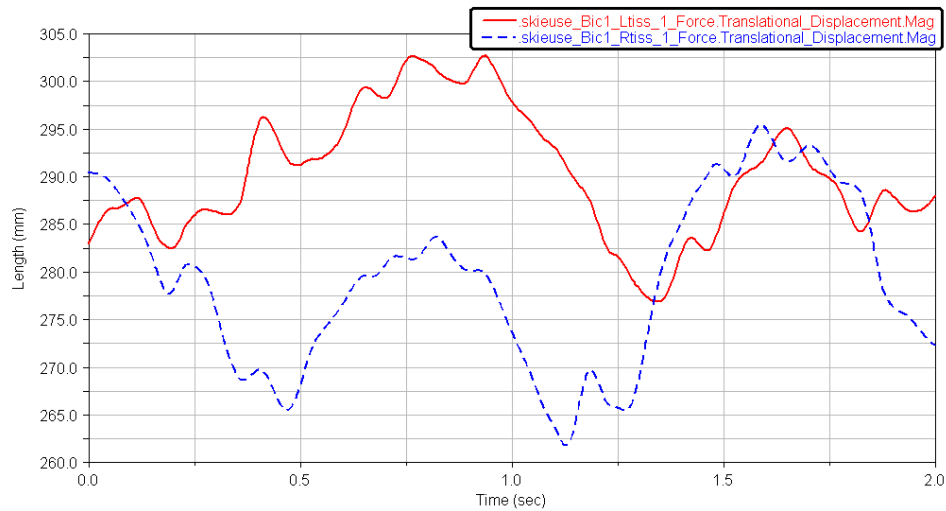
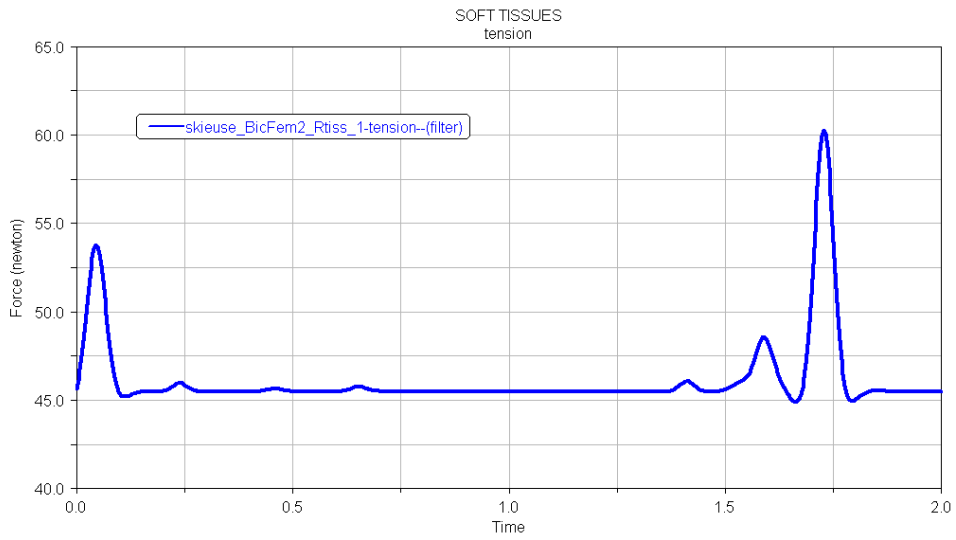
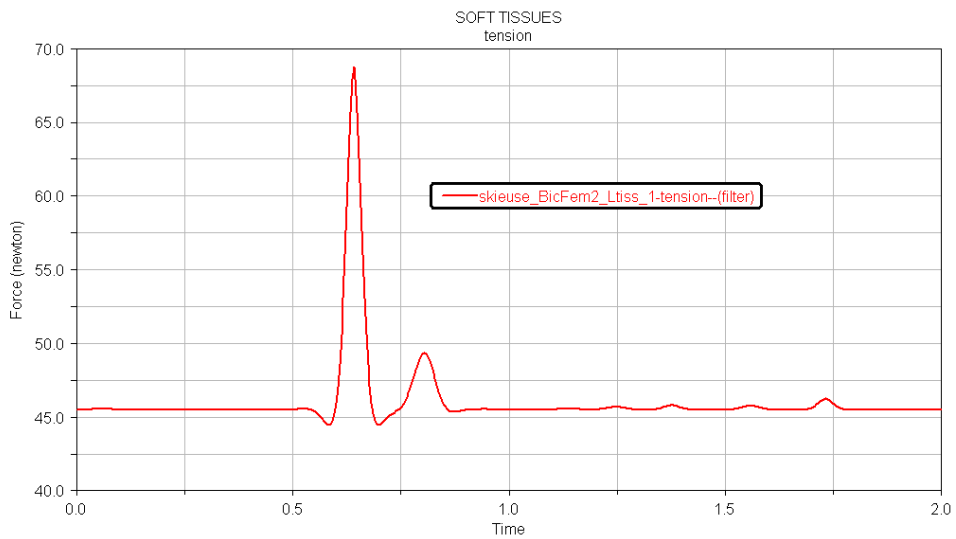


Figure 156 : longueur du Biceps Femoris 1 gauche et droit

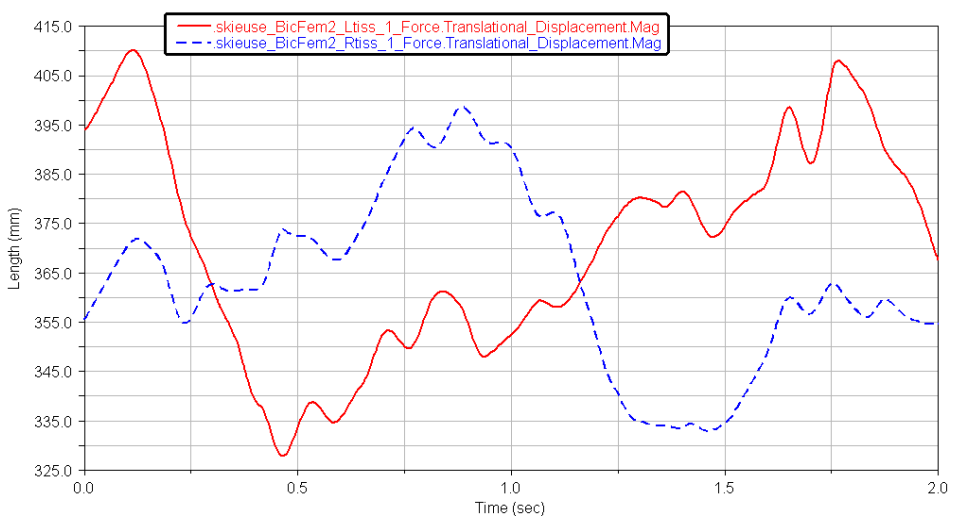




*Figure 157 : force du Biceps Femoris 2 droit*



*Figure 158 : force du Biceps Femoris 2 gauche*



*Figure 159 : longueur du Biceps Femoris 2 gauche et droit*

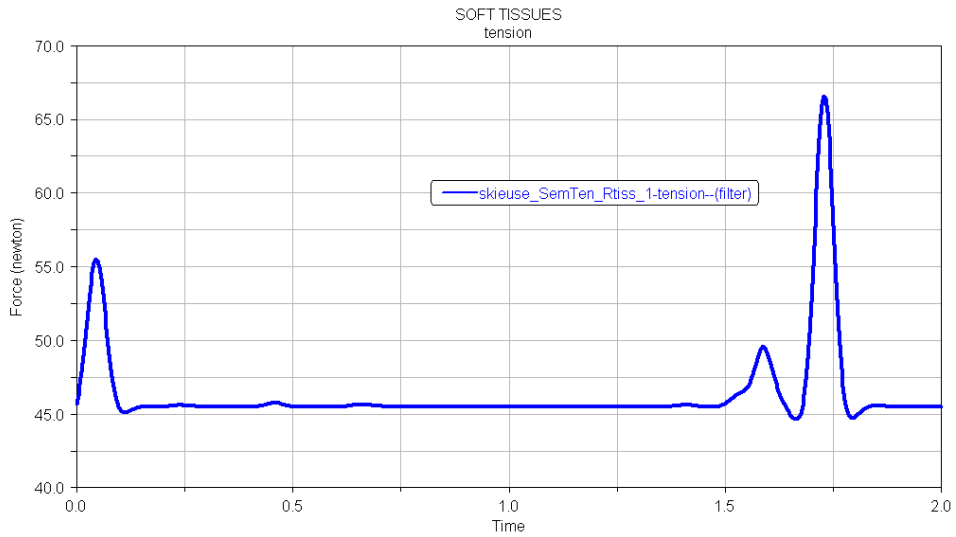


Figure 160 : force du Semitendinosus droit

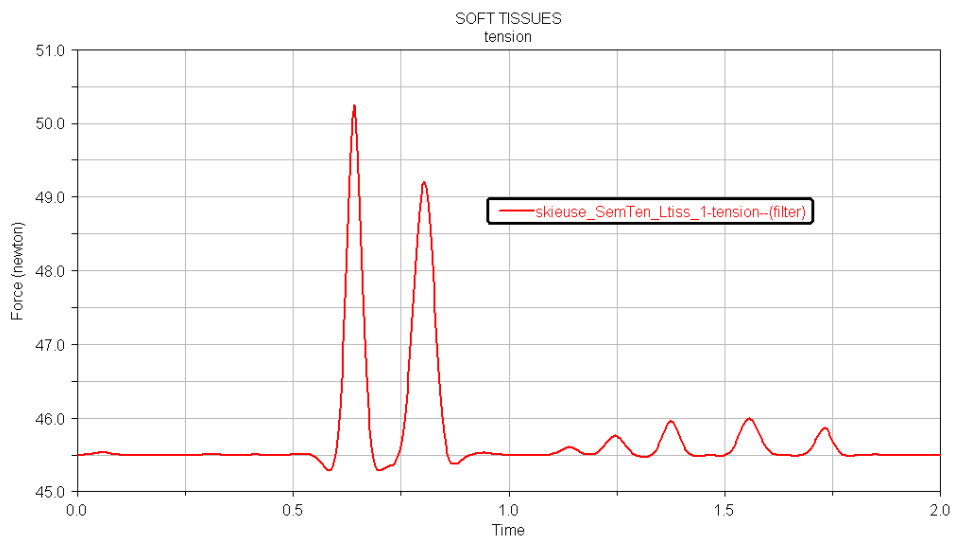


Figure 161 : force du Semitendinosus gauche

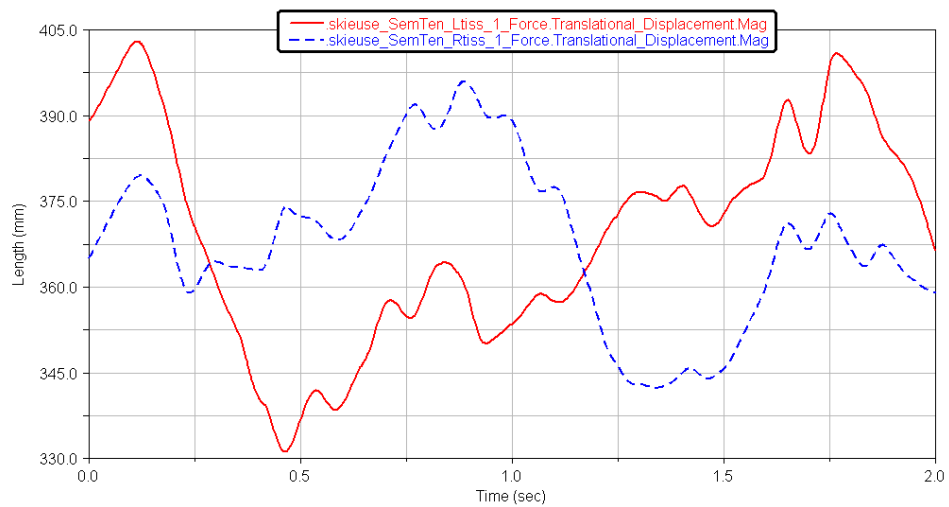


Figure 162 : longueur du Semitendinosus gauche et droit

### 4.3.2.2.3 Résultats des muscles de la loge interne de la cuisse

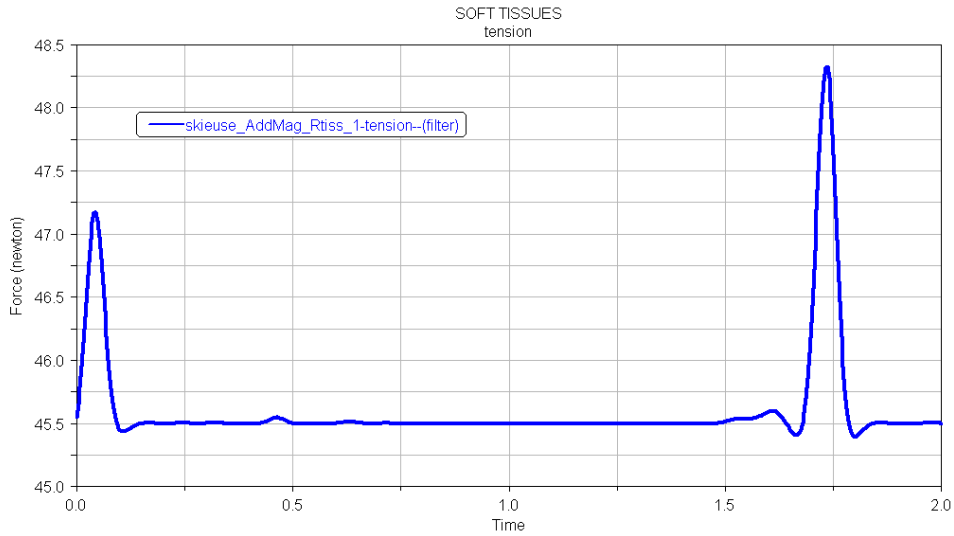


Figure 163 : force de l'Adductor Magnus droit

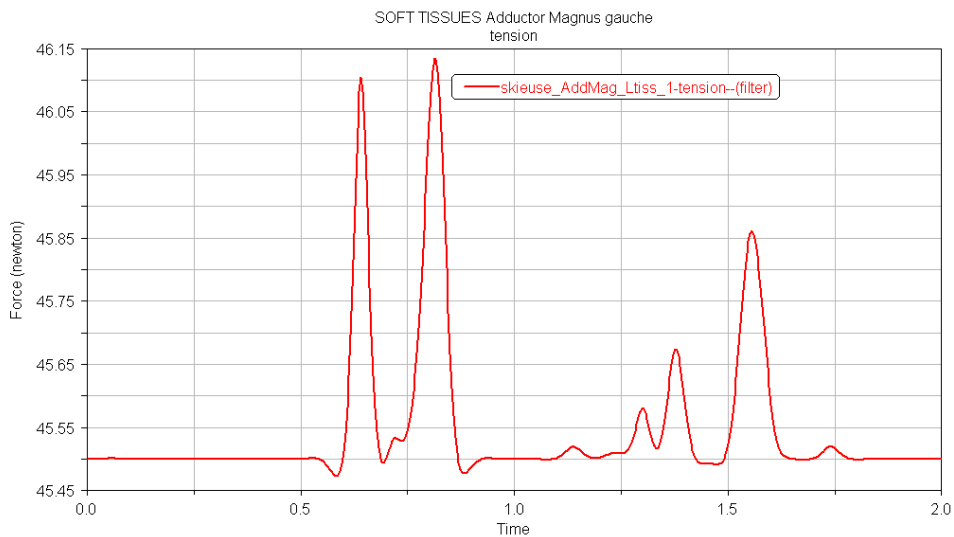


Figure 164 : force de l'Adductor Magnus gauche

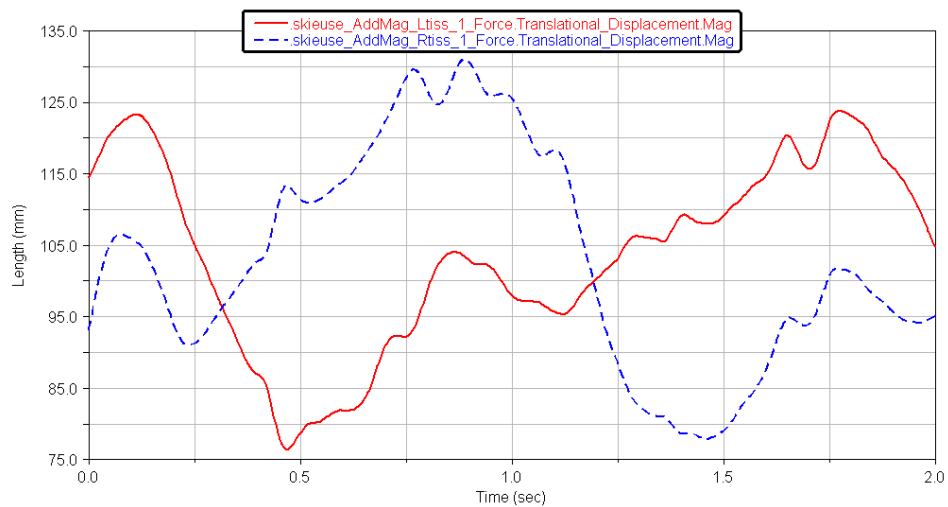


Figure 165 : longueur de l'Adductor Magnus droit et gauche

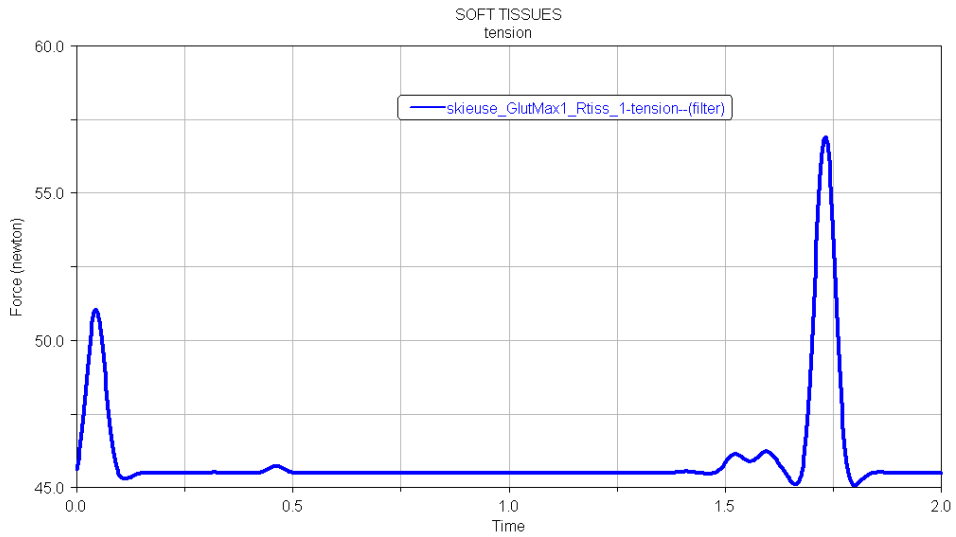


Figure 166 : force du Gluteus Maximus 1 droit

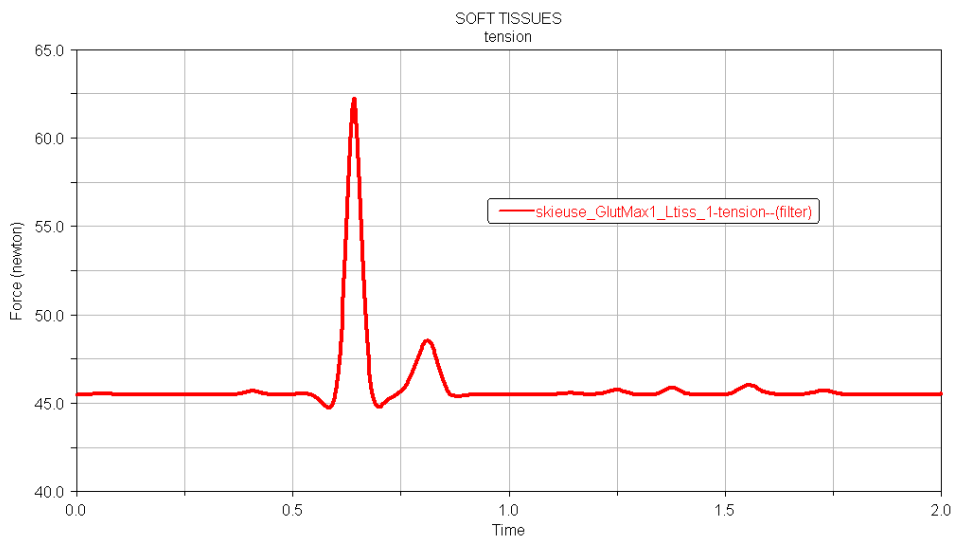


Figure 167 : force du Gluteus Maximus 1 gauche

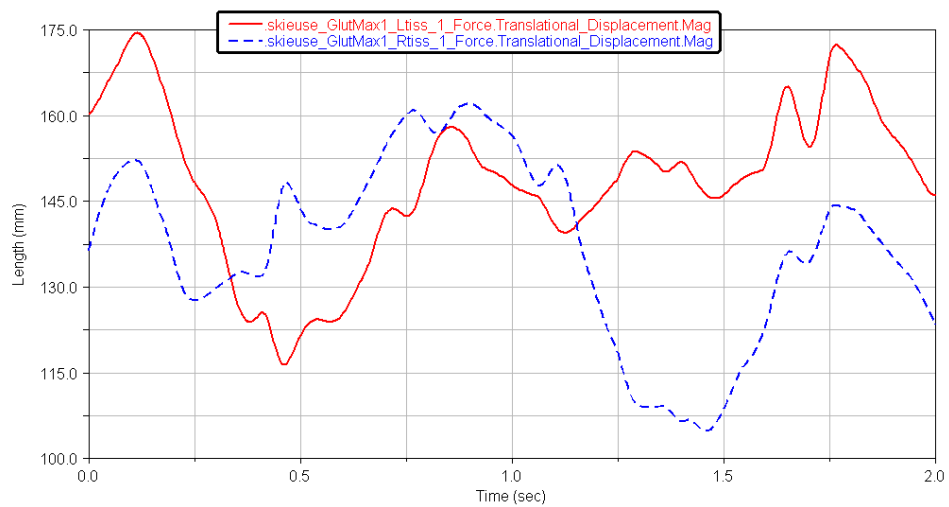


Figure 168 : longueur du Gluteus Maximus 1 droit et gauche

#### 4.3.2.2.2.4 Graphe des fessiers et intégration du Gluteus Maximus 1 aux résultats

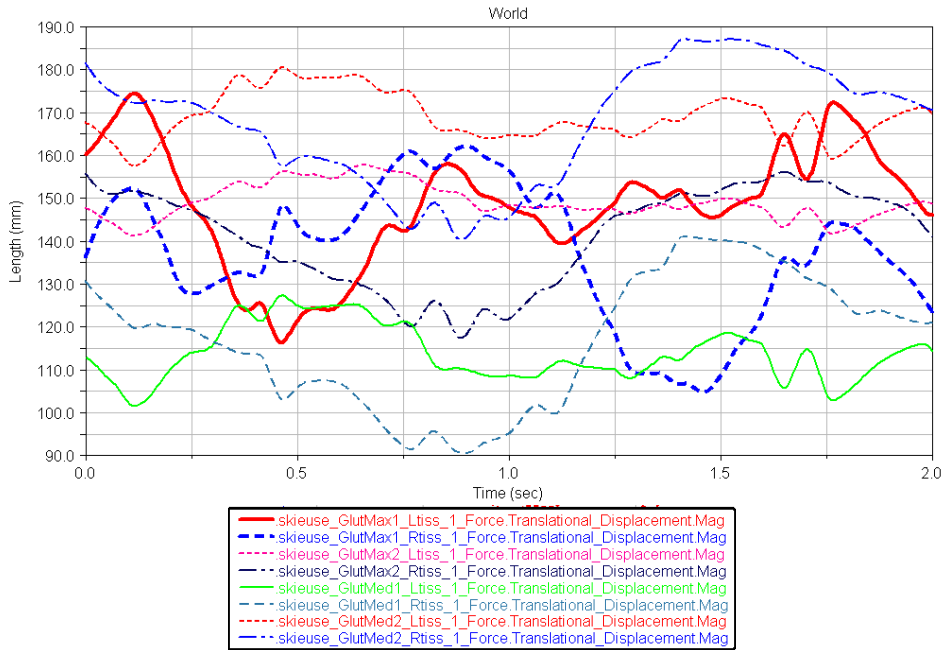


Figure 169 : longueur des muscles fessiers : les Gluteus Maximus 1 et 2 et les Gluteus Medius 1 et 2 gauches et droits.

#### 4.3.2.2.2.5 Analyse et interprétation des résultats

Le graphe de la figure 169, montre que les courbes de longueur des Gluteus Medius et des Gluteus Maximus 2, ont le même profil alors que celles des Gluteus Maximus 1 ont des trajectoires indépendantes.

L'action mécanique des Gluteus Maximus 1 est importante lors du geste car elle intervient dans les mouvements latéraux, lors de l'adduction, figure 170, de la cuisse et dans les mouvements de rotation, rotation interne de la cuisse sur le bassin.

Les autres fessiers, Gluteus Medius et Gluteus Maximus 2 jouent aussi un rôle important car ils stabilisent le bassin en position debout et sur un pied, ils sont aussi extenseurs, abducteurs et participent aux rotations externe et interne. Toutefois, la force qu'ils déploient est moindre par rapport à celle du Gluteus Maximus 1 et de plus, nous préférons nous centrer sur les muscles de la cuisse.

Ainsi, compte tenu de l'action spécifique du Gluteus Maximus 1, nous l'englobons dans notre analyse. La comparaison des figures 165 et 168, montre aussi une similitude lors de son action avec l'Adductor Magnus. Nous considérons donc que ces deux muscles participent aux mouvements d'adduction, figure 170, de la cuisse sur le bassin.

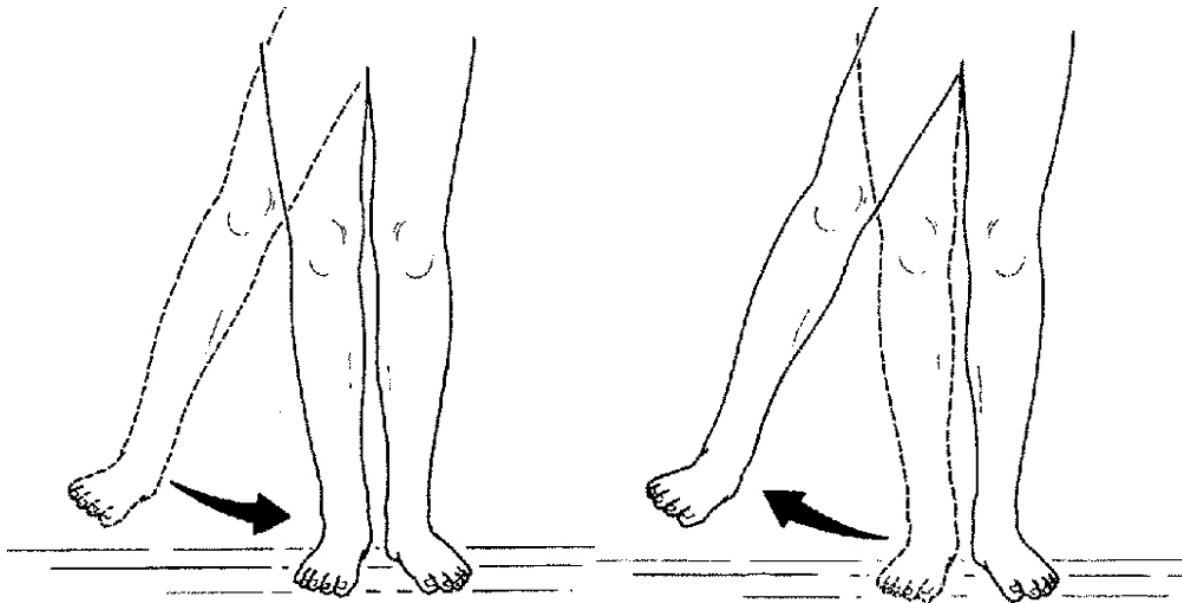


Figure 170 : mouvement d'adduction et d'abduction

Les graphes, figures 153, 156, 159 et 162, montrent que les croisements des courbes de longueur des muscles antérieurs et postérieurs de la cuisse droite avec ceux de la cuisse gauche s'effectuent aux mêmes instants. Ce qui traduit et confirme que les muscles fléchisseurs de la loge antérieure sont antagonistes des extenseurs de la loge postérieure de la cuisse, c'est à dire, qu'ils agissent en sens contraire les uns des autres.

Ce qui est surprenant, est que le Vastus Medialis et le Vastus Lateralis droit, figure 153, aient le même profil de courbe de longueur que le Biceps Fémoris 1 gauche figure 156, et que le Vastus Medialis et le Vastus Lateralis gauche, figure 153, aient le même profil de courbe que le Biceps Fémoris 1 droit, figure 156. Ceci montre une symétrie parfaite entre le côté droit et gauche, lors du geste. Ces muscles agissant sur l'articulation du genou et étant antagonistes traduisent une action mécanique simultanément contraire des genoux. C'est à dire qu'à la flexion d'un genou est associée l'extension de l'autre genou dans des proportions spatio-temporelles identiques. Toutefois, leur force n'est pas exercée au même instant lors du cycle. Celle du Biceps Femoris 1 droit, figure 154, s'exerce avant celle des Vastus Medialis et Lateralis gauches, figure 150 et 152.

Les muscles exerçant la force la plus importante sont, pour la loge antérieure, le Rectus Femoris gauche 55 N, figure 145, pour la loge postérieure, le Biceps Femoris 2 gauche 65,7 N, figure 158, et pour la loge interne le Semitendinosus droit 65,7N, figure 160.

Les actions mécaniques d'une même loge musculaire peuvent cependant différer. C'est le cas pour la loge postérieure de la cuisse où le Semitendinosus et le Biceps Femoris 2 agissent davantage dans les mouvements latéraux et de rotation, comparés au Biceps Femoris 1 qui agit surtout lors des mouvements de flexion extension de la jambe sur la cuisse.

Les insertions musculaires des muscles sont révélatrices de leur fonction. Ainsi, dans un second temps, nous avons préféré comparer leur force en fonction de leur mouvement spécifique, tableau 33. Nous considérons les forces des Vastus Medialis et Lateralis, des Biceps Femoris 1 et des Adductor Magnus comme négligeables (0,05 N à 2,6 N), elles n'apparaissent donc pas dans le tableau, toutefois l'instant de leurs pics de force peuvent être des indicateurs du geste. Ce tableau classe les muscles selon leur fonction et définit leurs pics de force dans le temps du mouvement. Cette dichotomie caractérise mieux les efforts musculaires de la skieuse, il apparaît :

- Une dissymétrie entre les muscles droits et gauches au niveau
  - o de l'intensité de la force
  - o du profil des courbes de force
- Une symétrie temporelle : la force des muscles de l'abduction et de l'adduction du même membre inférieur agit au même moment. La force du Rectus Femoris droit et gauche s'exerce aussi en même temps.

Mouvement	Abduction			Adduction					Flexion extension			
Muscle	Biceps Femoris 2			Gluteus Maximus 1		Semitendinosus			Rectus Femoris			
Intensité des pics de force des muscles droits (N)	53	45,5	61	51	55,4	55,1	50	65,4	45,59	45,68	45,61	45,55
Instant des pics de force des muscles droits (s)	0,1	1,6	1,7	0,1	1,75	0,1	1,6	1,75	0	0,25	0,47	1,05
Intensité des pics de force des muscles gauches	65,7		45,9	62,5	48	50,02	49,02	46	55,1		50	
Instant des pics de force des muscles gauches	0,6		0,8	0,6	0,8	0,7	0,8	1,25 à 1,75	0,25		0,47	

Tableau 33 : force et moment de la force des muscles selon leur action mécanique principale

La force développée par les muscles de l'abduction (Biceps Femoris 2) et de l'adduction (Gluteus Maximus 1 et Semitendinosus) est plus grande que celle développée par les muscles de la flexion et extension (Rectus Femoris), tableau 33.

Le Semitendinosus droit, figure 160, et le Biceps Femoral 2 gauche, figure 158, exercent les forces les plus élevées. Or, le Semitendinosus, sur genou fléchi, est rotateur interne du tibia sur le fémur et le Biceps Femoral 2 qui est la longue portion du biceps crural, sur genou fléchi, est rotateur externe. Ces deux muscles ont d'autres fonctions, mais nous allons nous intéresser à eux, lors des prises de carres, pour analyser leur action mécanique.

Les forces de ces deux muscles apparaissent ainsi :

- Pour l'appui gauche, en début d'appui
  - o Pour le Semitendinosus : deux pics 50,02 N et 49,02 N
  - o Pour le Biceps Femoris 2 : deux pics 65,7 N et 45,9 N

Mais il apparaît aussi de petites variations **en fin** d'appui : 0,5 N
- Pour l'appui droit, en début d'appui :
  - o pour le Semitendinosus : deux pics 50 N et 65,4 N
  - o pour le Biceps Femoris 2 : deux pics 53N et 65,7 N

Mais aussi **en fin** d'appui,

  - o pour le Semitendinosus : un pic 55,1 N
  - o pour le Biceps Femoris 2 : un pic 45,9 N

Sur la phase d'appui du ski droit, la valeur des forces de ces deux muscles qui ont des actions inverses, tendrait à dire que les actions s'annulent et que le pied se pose à plat dans l'axe de glisse. Il semblerait qu'il n'y ait pas de prise de carre franche en début d'appui, par contre contrairement au côté gauche, ces deux muscles forcent en fin de phase d'appui, ce qui signifierait une prise de carre en fin d'appui, côté fort, avant le transfert du poids du corps sur la jambe gauche, côté faible.

Sur la phase d'appui du ski gauche, la force du Biceps Femoris 2 étant beaucoup plus importante que celle du semitendinosus en début de phase, il semblerait qu'à l'appui, le pied s'ouvre vers l'extérieur sous l'action du Biceps Femoris 2, accentuant peut être une prise de carre intérieure, (bord intérieur du ski) ou peut être une carre extérieure. En effet, ce muscle, genou fléchi est rotateur externe sur un plan sagittal, mais ceci n'entraîne pas une rotation externe par rapport à un plan transversal. Pour une telle analyse, il faudrait associer les muscles des pieds. Toutefois, le fait qu'il force peu en fin de phase d'appui et qu'il continue à s'étirer, figure 159, tendrait à dire qu'il n'existe pas de mouvement du pied vers l'extérieur en fin de phase d'appui, donc à annuler une prise de carre, à moins que d'autres muscles prennent le relais pour la réaliser. Son allongement, figure 159, s'effectue par trois paliers successifs qui correspondent à la phase de glisse et à la phase de propulsion, ainsi qu'au retour aérien du membre inférieur gauche. Il se raccourcit uniquement à la pose du pied.

#### 4.3.2.2.2.6 *Limites et conclusion*

Isoler un muscle dénature le mouvement, c'est la combinaison de plusieurs muscles qui crée le mouvement. De plus, un même muscle peut avoir des fonctions différentes selon la position du squelette. Le geste étudié résulte d'une association intermusculaire. Pour les membres inférieurs par exemple, et particulièrement lors de la prise de carre, en plus de l'extension et de la flexion de plusieurs articulations, il existe aussi des rotations externes et internes et des adductions et abductions.

Au niveau de la cuisse, nous avons analysé le Rectus Femoris car à l'observation, nous pensions que son action était majeure dans le mouvement. Une comparaison par rapport à la fonction des muscles de la cuisse nous est alors apparue plus significative et nous avons comparé les muscles fléchisseurs et extenseurs avec les abducteurs et les adducteurs. L'intensité des pics de force des muscles de l'abduction et adduction, est plus importante que celle des pics de force de la flexion extension. Il existe aussi une dissymétrie entre la cuisse gauche et droite.

Nous avons fini par analyser deux muscles rotateurs, le semitendinosus et le Biceps Femoral 2 susceptibles de révéler l'exactitude du geste lors de la prise de carre. En effet, il était intéressant de savoir quels muscles intervenaient et quelles rotations ils exerçaient car à l'observation, la prise de carre est souvent intérieure et peut être le résultat de rotations dans les trois plans de l'espace où les mouvements sur un plan transversal sont réalisés par la cheville et le pied ; mais l'association des mouvements sur les plans frontal et sagittal peuvent être suffire à effectuer le mouvement. Il aurait été pertinent de découvrir s'il y avait un mouvement sur un plan transversal et, dans ce cas, quels muscles intervenaient à sa réalisation. Cette information, aurait pu être un paramètre important à la performance, lors de la prise de carre. Cependant nous savons qu'au niveau des muscles modélisés de la cuisse, aucun n'intervient sur un plan transversal. Par contre, l'étude des abducteurs du pied, tels que l'extenseur commun des orteils (extensor digitorum longus) et l'extenseur propre du gros orteil (hallux), et des adducteurs tel que le jambier postérieur (tibialis posterior) intervenant dans les mouvements transversaux aurait pu donner des informations complémentaires, mais ils ne sont malheureusement pas modélisés par le logiciel.

Un travail exhaustif de la prise de carre passerait par la création de tous les muscles et ligaments intervenant à ce moment précis. Il pourrait se réaliser en perspective, en utilisant le logiciel, mais demanderait un temps conséquent, particulièrement pour la conception de la jambe et du pied. Aussi, dans un premier temps, nous avons préféré nous centrer sur les muscles existants, pouvant être révélateurs de moments spécifiques propres à une technique précise. L'analyse des muscles de la cuisse nous a permis de mieux appréhender le



mouvement par rapport à leurs instants d'intervention lors du cycle, mais aussi par rapport à la force qu'ils exerçaient.

Toutefois, les limites inhérentes à tout modèle numérique, nous poussent à être prudents quant à certaines interprétations de résultats. Nous avons en effet remarqué que lors de l'analyse, le pic de force était en décalage par rapport au raccourcissement du muscle. La modélisation de la force du muscle semble inhérente à la vitesse de déplacement du segment mais cette modélisation est-elle réaliste compte tenu de la complexité des actions musculaires et de la redondance du système? De plus les valeurs d'intensité musculaires sont faibles et sont inhérentes au modèle issu de la simulation dynamique directe qui reste encore à affiner, particulièrement pour les actions du haut du corps.

### 4.3.3 Bilan énergétique

#### 4.3.3.1 Energie cinétique et énergie potentielle de la skieuse

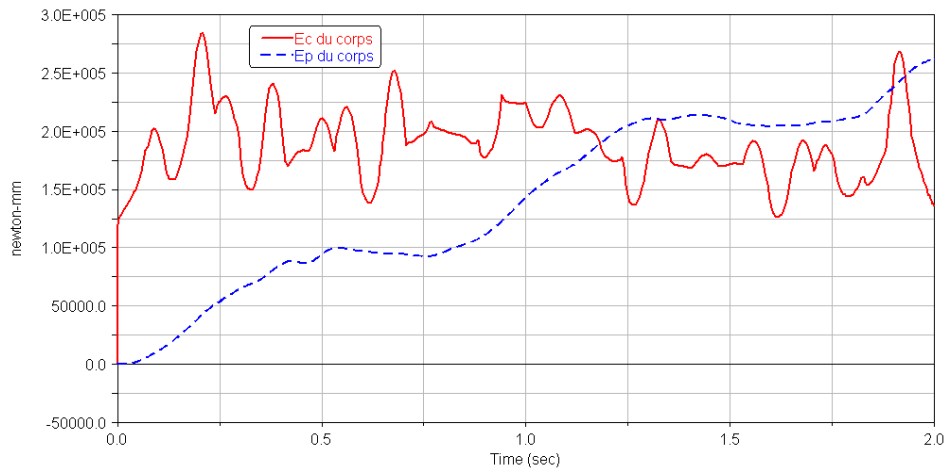


Figure 171 : énergie cinétique et énergie potentielle de hauteur du corps de la skieuse

##### Energie cinétique :

Après avoir additionné les courbes des énergies cinétiques de chaque partie du corps, la courbe de l'énergie cinétique totale de la skieuse, oscille entre 125 N.m et 275 N.m avec une moyenne de 200 N.m.

##### Energie potentielle de hauteur :

L'énergie potentielle totale, somme des énergies potentielles de chaque partie du corps, augmente par deux paliers successifs. Le premier est à 100 N.m et le second à 220 N.m. La skieuse se déplace sur une pente à  $6^\circ$  et les paliers apparaissent lors des doubles appuis. En effet, lors de ce moment spécifique, il y a transfert du poids du corps d'une jambe sur l'autre, entraînant une baisse du centre de gravité.

##### Somme des énergies

Le calcul numérique de la somme des énergies potentielle et cinétique est donc de 420 N.m, à la fin du cycle.

### 4.3.3.2 Vérification du modèle suite à l'analyse dynamique

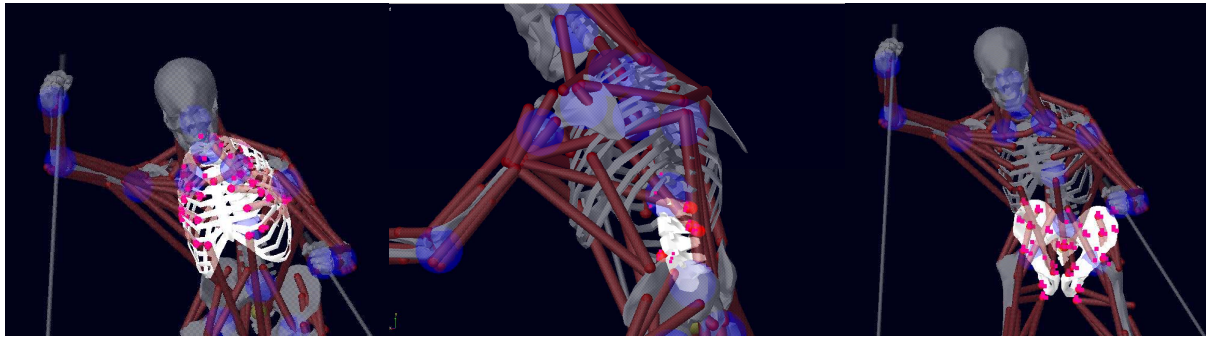


Figure 172 : vue antérieure du thorax (upper torso), vue de ¾ des lombaires (central torso) et vue antérieure du bassin (lower torso)

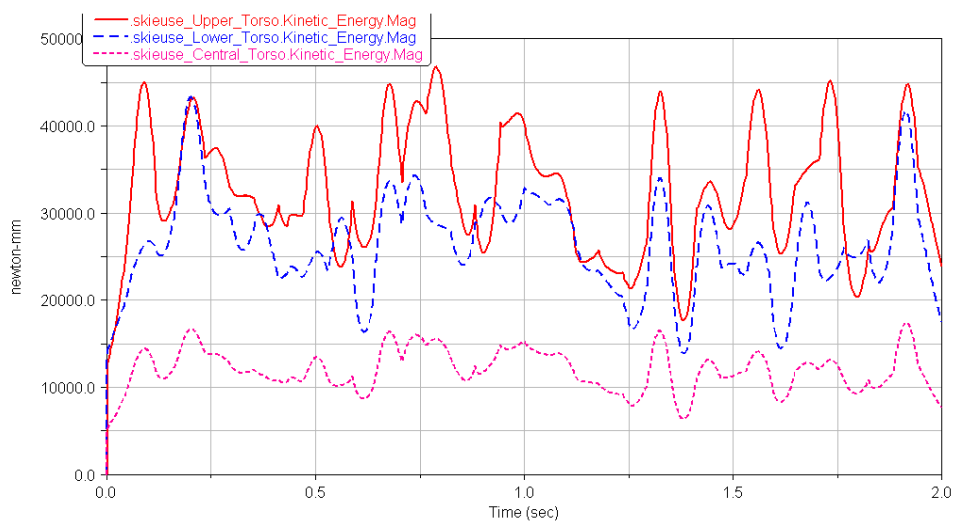


Figure 173 : énergie cinétique du thorax, des lombaires et du bassin du modèle de la simulation dynamique inverse

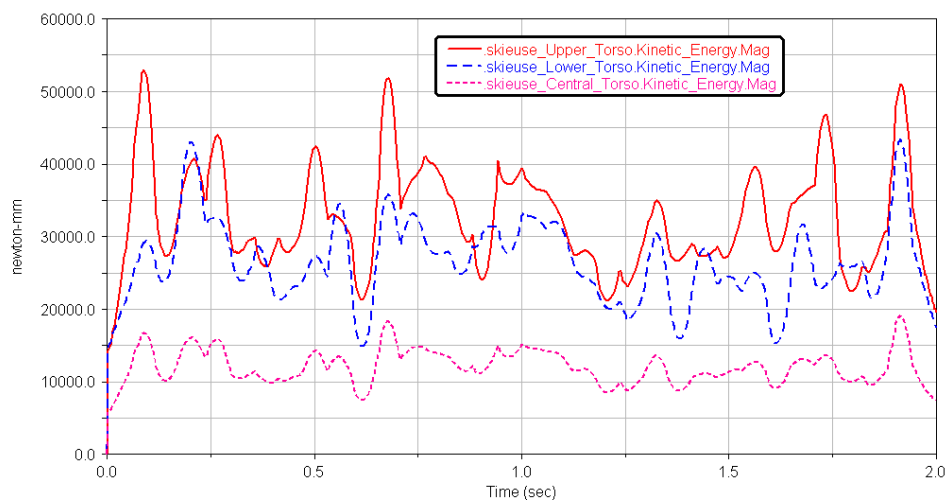


Figure 174 : énergie cinétique du thorax, des lombaires et du bassin du modèle de la simulation dynamique directe

Les courbes de l'énergie cinétique du thorax, des lombaires et du bassin (figure 172) du modèle cinématique et dynamique, sont semblables, figures 173 et 174. La simulation dynamique directe n'a donc pas perturbé le modèle au niveau énergétique.

Le thorax développe l'énergie cinétique la plus importante, en moyenne 35 N.m, le bassin, 26 N.m et les lombaires, 14 N.m.

Ces trois parties centrales du corps ont des énergies cinétiques représentant des courbes de profil quasi identique et avec une relative stabilité lors du cycle. De petites variations apparaissent à la pose des bâtons et à la pose du ski gauche.

L'action du buste est liée aux mouvements des bras et des jambes mais sa propre énergie est importante dans l'action. Il accompagne la poussée des bâtons avec un mouvement de rotation vers l'avant sur l'axe frontal et en légère rotation sur l'axe transverse, à droite sur l'appui droit et à gauche sur l'appui gauche puis il se redresse à la fin de la phase de glisse pied gauche pour se retrouver vertical à la pose des bâtons. Son mouvement est inhérent à la pose des bâtons.

#### 4.3.3.3 Comparaison du haut du corps et du bas du corps

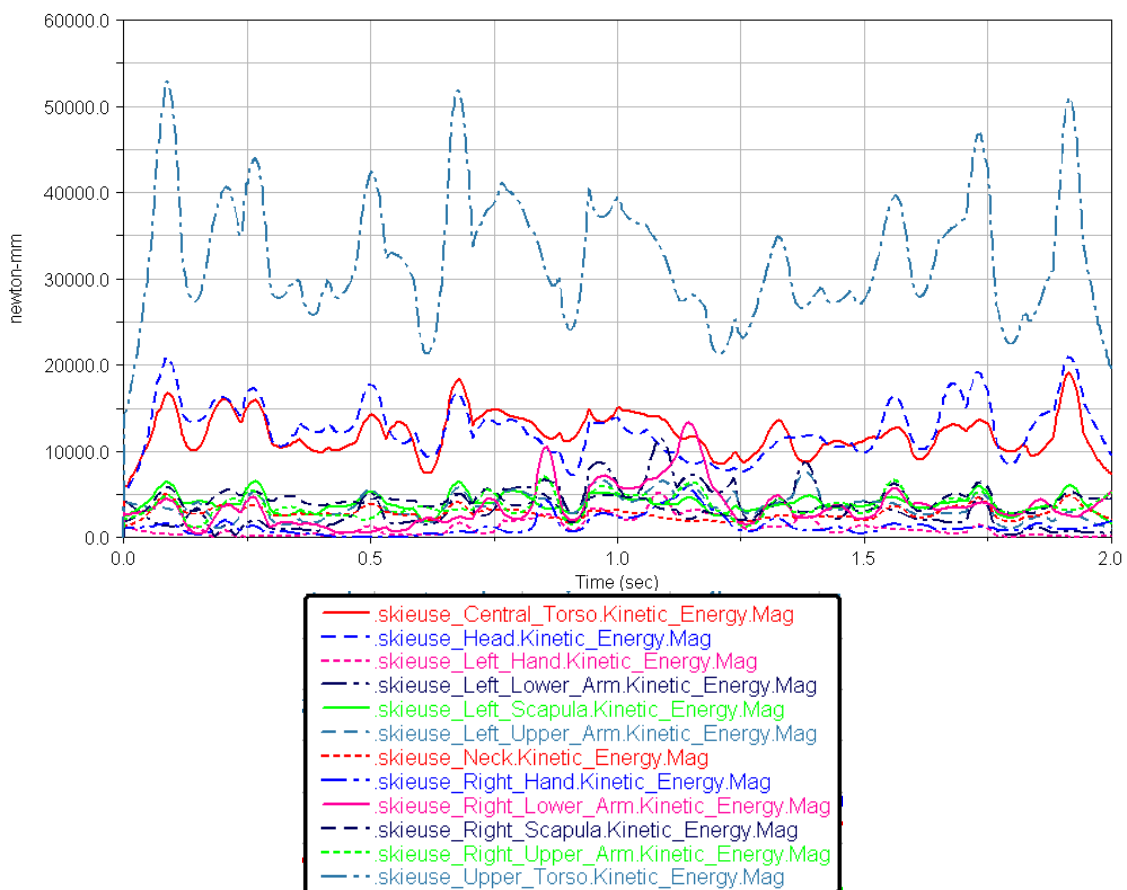


Figure 175 : énergie cinétique des différentes parties du haut du corps de la skieuse

La partie du haut du corps qui développe la plus grande énergie cinétique sur le graphe de la figure 175, est le thorax, une moyenne de 35 N.m puis la tête et les lombaires, 14 N.m et en dessous de 10 N.m : les épaules, l'avant bras, le bras et la main.

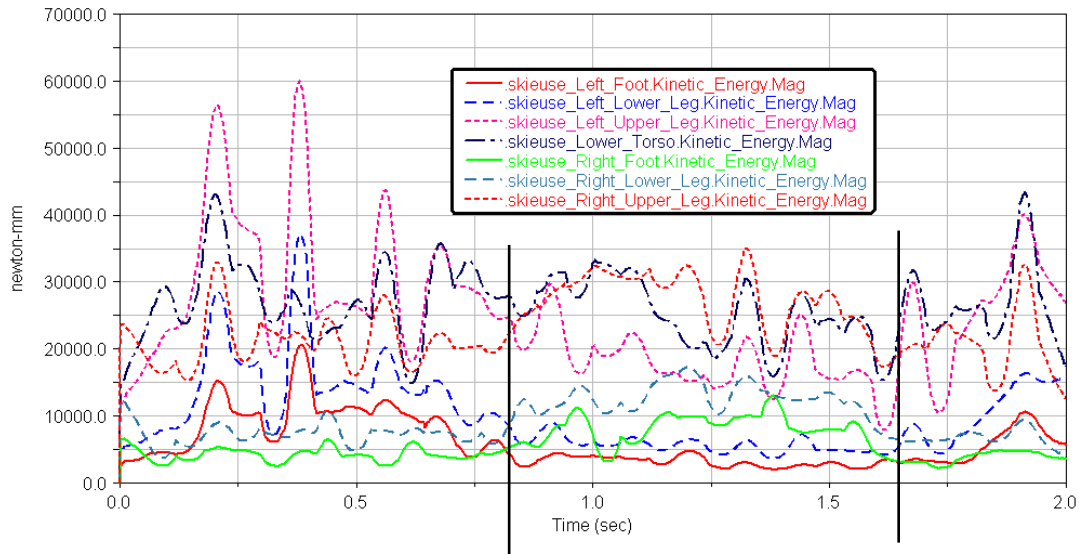


Figure 176 : énergie cinétique des différentes parties du bas du corps de la skieuse

Les parties du bas du corps qui développent la plus grande énergie cinétique, figure 176, sont le bassin en moyenne 26 N.m et la cuisse, 25 N.m. Lorsque l'énergie cinétique de la cuisse gauche diminue, celle de la cuisse droite augmente, il en est de même pour la jambe et pour le pied, leurs courbes se croisent et s'inversent à 0,80 secondes et 1,65 secondes (traits verticaux sur le graphe).

Après avoir fait la somme des énergies cinétiques de toutes les parties du haut du corps, nous obtenons une énergie cinétique du haut du corps ayant une moyenne de 90 N.m, figure 177. La somme des énergies cinétiques de toutes les parties du bas du corps, nous donne une énergie cinétique du bas du corps ayant une moyenne de 110 N.m, figure 177.

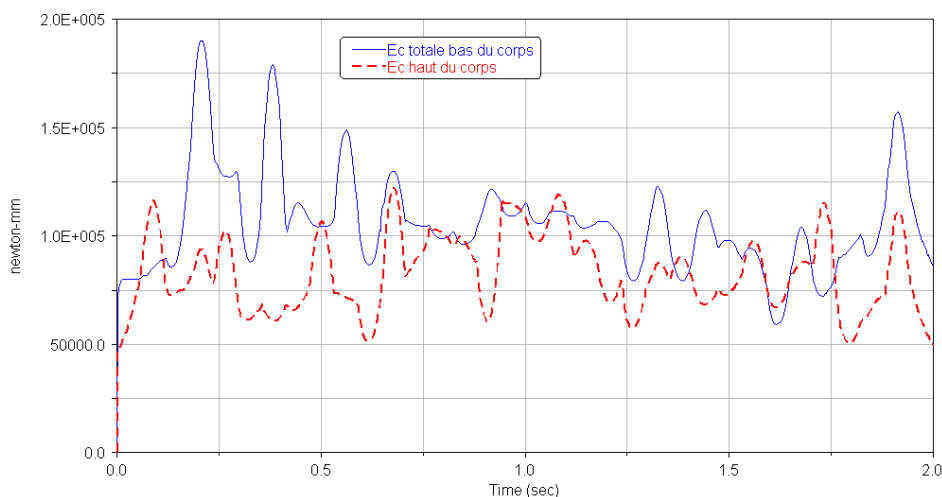


Figure 177 : énergie cinétique du bas et du haut du corps

Les pics d'énergie cinétique du bas du corps, en début de cycle, sont certainement accentués car ils correspondent au moment où la partie arrière du ski frotte sur la neige lors du retour aérien du membre inférieur gauche. Dans la réalité, le sportif de haut niveau évite ce

frottement du ski, de plus, à l'heure actuelle la fixation à deux points de fixation n'autorise pas un tel débattement du ski. Ce problème est toutefois rencontré chez les débutants n'ayant pas ce matériel, créant un ralentissement et un déséquilibre. Pour un sportif, ce contact serait considéré comme une faute technique.

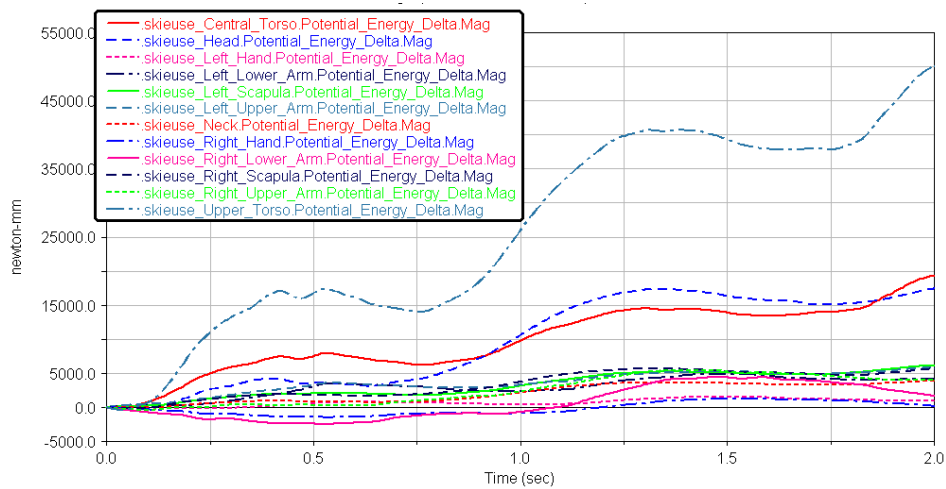


Figure 178 : énergie potentielle du haut du corps

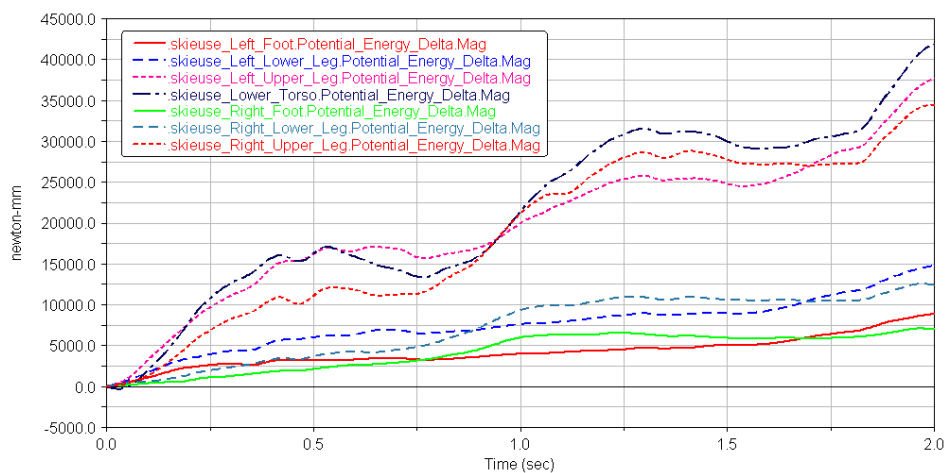


Figure 179 : énergie potentielle du bas du corps

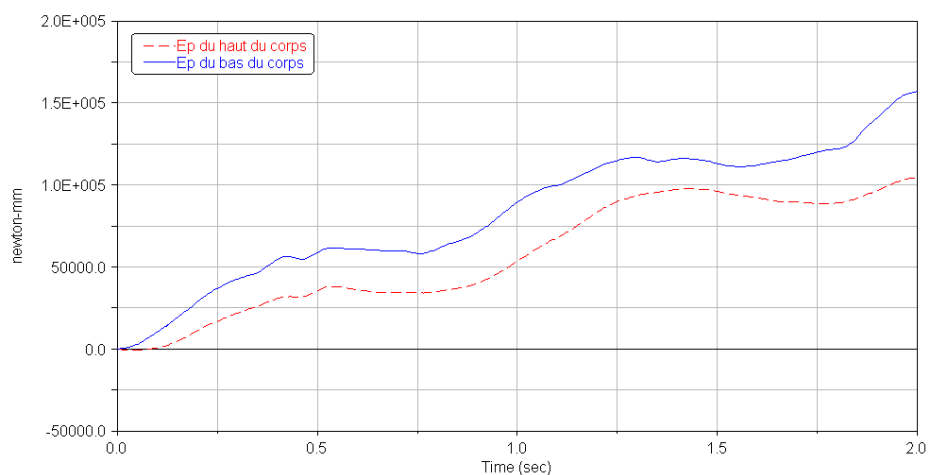


Figure 180 : énergie potentielle du haut du corps et du bas du corps

#### 4.3.3.4 Comparaison des membres inférieurs

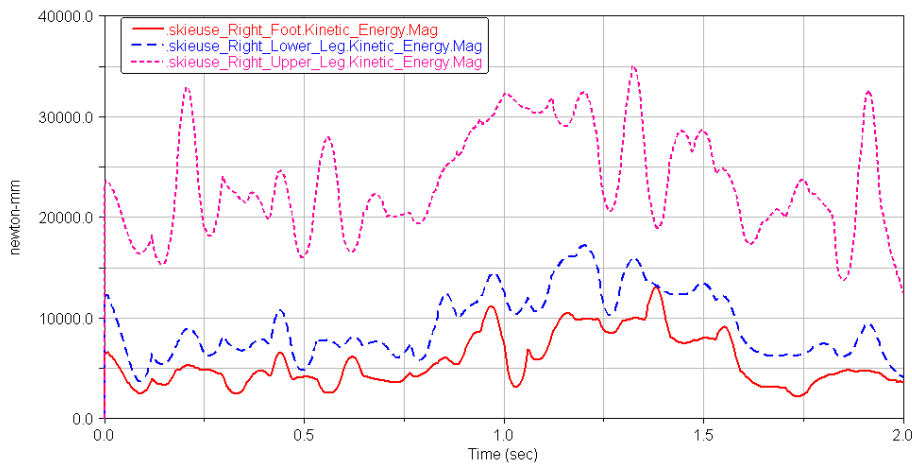


Figure 181 : énergie cinétique du pied, de la jambe et de la cuisse du membre inférieur droit du modèle dynamique

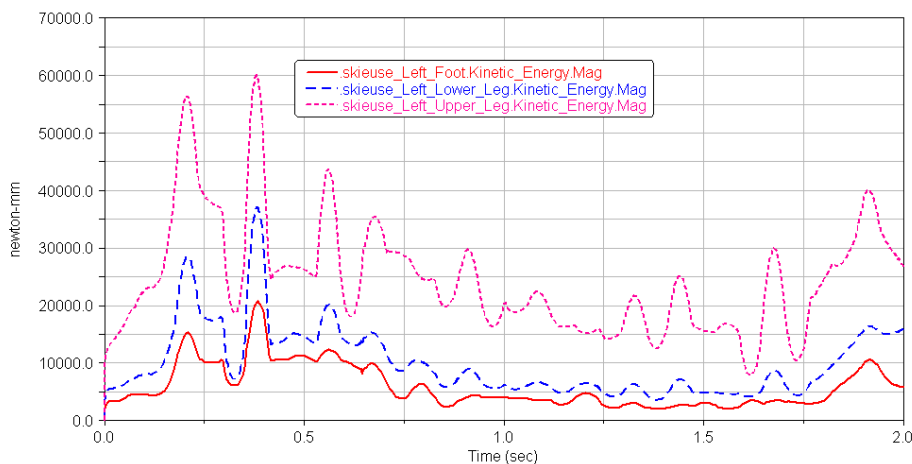


Figure 182 : énergie cinétique du pied, de la jambe et de la cuisse du membre inférieur gauche du modèle dynamique

Les figures 181 et 182 des membres inférieurs montrent que la cuisse a l'énergie cinétique la plus importante, environ une moyenne de 25 N.m, puis la jambe 10 N.m et enfin le pied 5 N.m. Nous retrouvons sur les courbes du membre inférieur gauche, de grandes variations en début de cycle, dues, comme vu précédemment, à l'inertie du ski qui frotte sur la neige lors de la phase aérienne. Les causes de ce frottement peuvent être diverses, dues à des données cinématiques erronées, à la réalité amplifiée par le modèle qui crée des oscillations ou à une modélisation incorrecte de la fixation à deux points de fixation...

Si l'on minimise ces variations, il est intéressant d'observer, figure 184, que lors du retour aérien, les valeurs moyennes d'énergie cinétique des deux membres inférieurs sont identiques, par contre, lors de l'appui et plus précisément lors de la phase de glisse, le membre inférieur gauche, côté faible, a une moyenne d'énergie cinétique plus basse que celle du membre inférieur droit, sa vitesse relative étant plus faible.

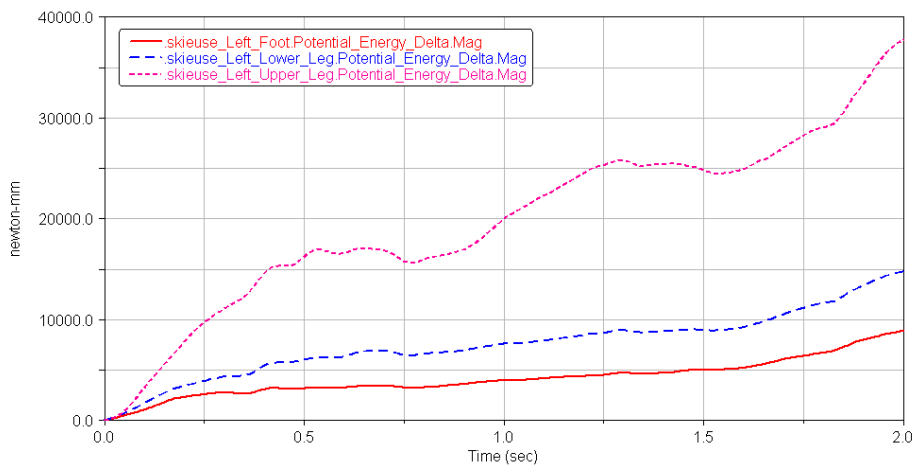
Ceci pourrait signifier que lors des phases de glisse, il se produit une diminution du coût énergétique. La technique du décalé serait donc utilisée pour conserver une phase de glisse

pendant le cycle, nécessaire à une diminution d'énergie cinétique pour une récupération énergétique.

En course, le décalé disparaît souvent au profit du pas de un, lorsque le skieur a le potentiel physique d'enchaîner un mouvement simultané des bras sur chacun des mouvements de jambe. Certains skieurs préfèrent ainsi, réaliser une série "d'impulsions", le pas de un, qu'une "impulsion" sur une jambe et une phase de glisse sur l'autre jambe, le décalé. Le choix du décalé serait donc inhérent au potentiel énergétique du sportif.

Sur le graphe 184, les croisements des deux courbes d'énergie cinétique des deux membres inférieurs, sont légèrement antérieurs dans le temps (0,1 secondes) aux croisements des deux courbes d'énergie potentielle des deux membres inférieurs. Si l'on compare ces courbes avec celles de la force de contact des skis, on s'aperçoit que ces croisements se produisent lorsque les phases de double appui sont terminées, c'est à dire lorsqu'un seul ski est en contact avec la neige.

De plus, la figure 183, montre que l'énergie potentielle de la cuisse génère ces deux paliers et a une valeur plus importante que celles de la jambe et du pied.



*Figure 183 : énergie potentielle du pied, de la jambe et de la cuisse de la jambe gauche du modèle dynamique*



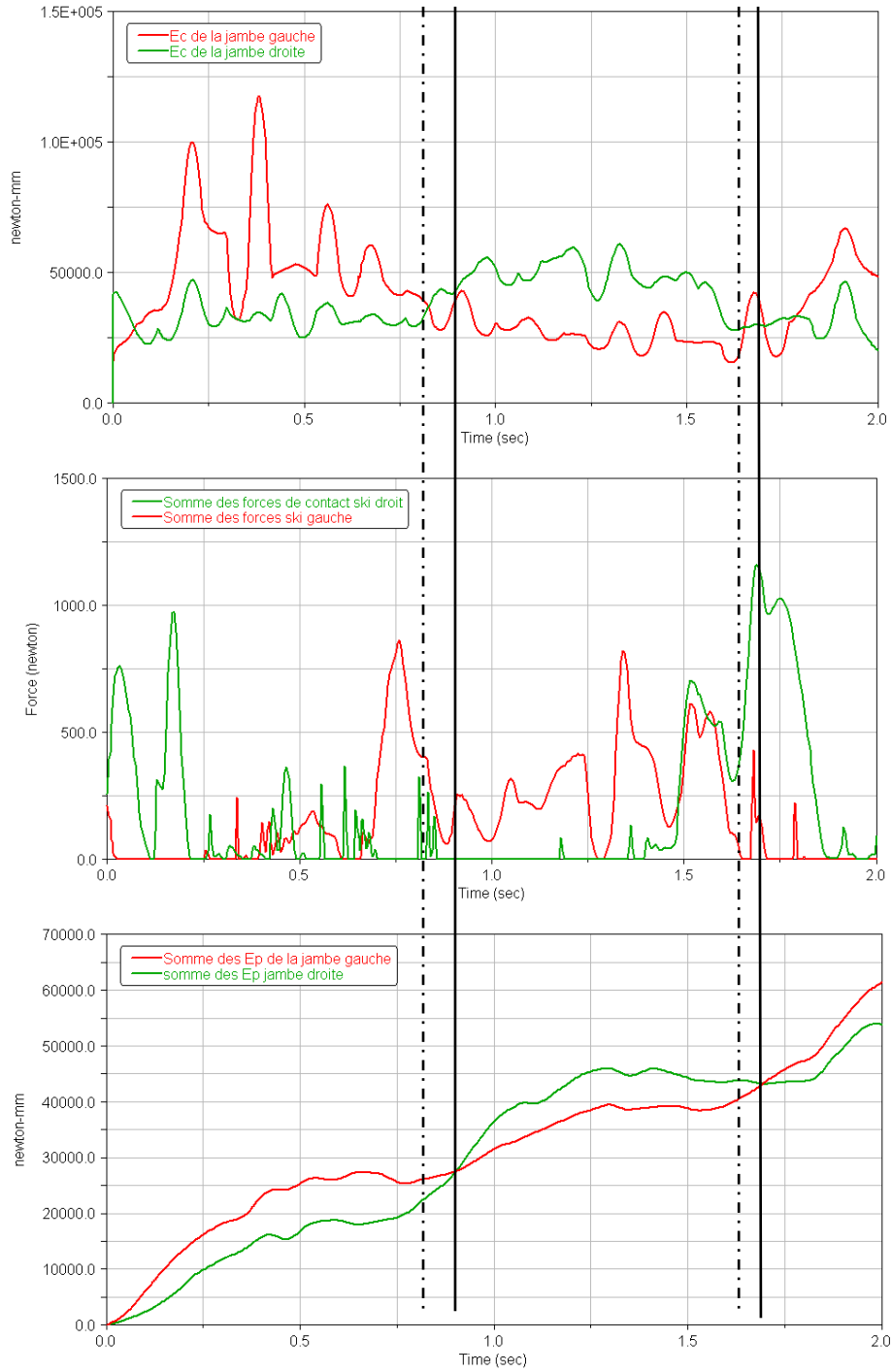


Figure 184 : comparaison de l'énergie cinétique et potentielle des membres inférieurs avec les forces de contact des skis du modèle dynamique

### 4.3.3.5 Comparaison des membres supérieurs

Cette comparaison ne peut s'établir que sur le modèle de la simulation dynamique inverse compte tenu de l'échec de la simulation des mouvements des bras, suite à l'analyse dynamique directe. Le modèle est donc piloté et le mouvement des bras préétabli sans prendre en considération l'action des bâtons et les réactions mécaniques qu'ils entraînent. Ce qui nous intéresse dans ce cas, c'est de vérifier les performances du modèle et d'observer son comportement côté fort et faible.

Nous relevons l'énergie cinétique des membres supérieurs droit et gauche, figures 185 et 186, puis nous faisons la somme des énergies cinétiques de la main, de l'avant bras, du bras et de l'épaule de chacun d'eux, figure 187.

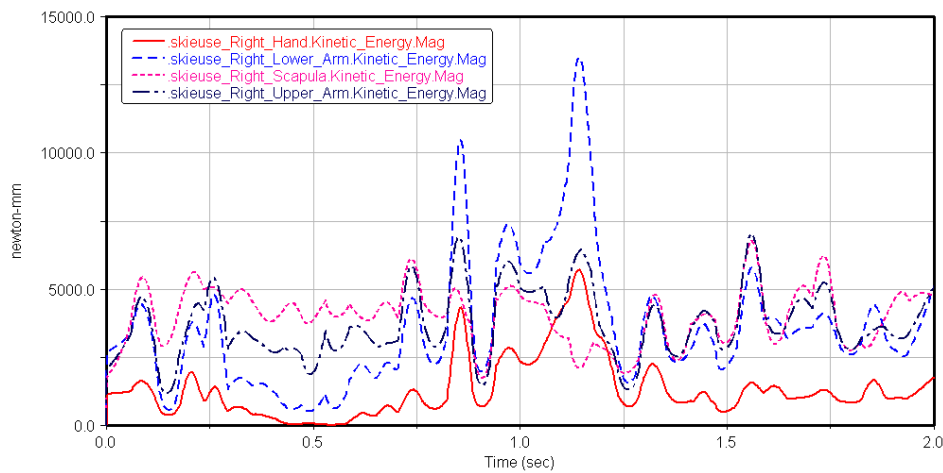


Figure 185 : énergie cinétique du membre supérieur droit

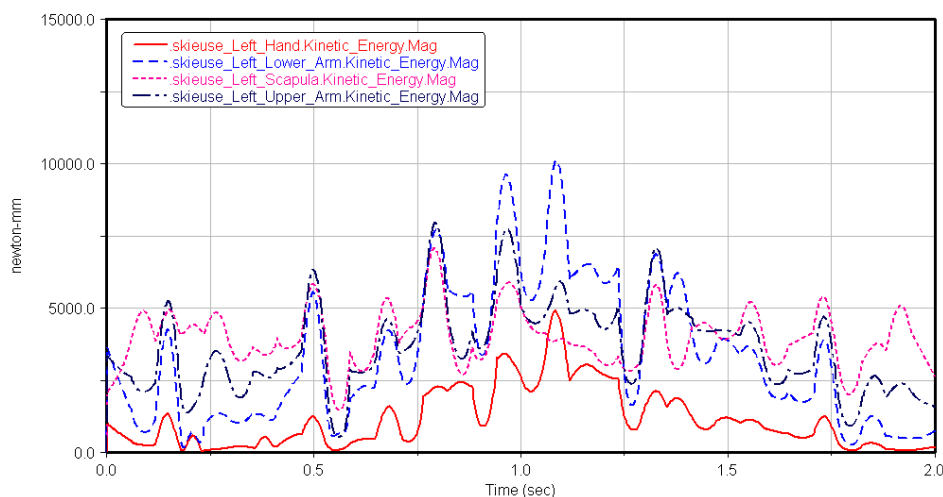


Figure 186 : énergie cinétique du membre supérieur gauche

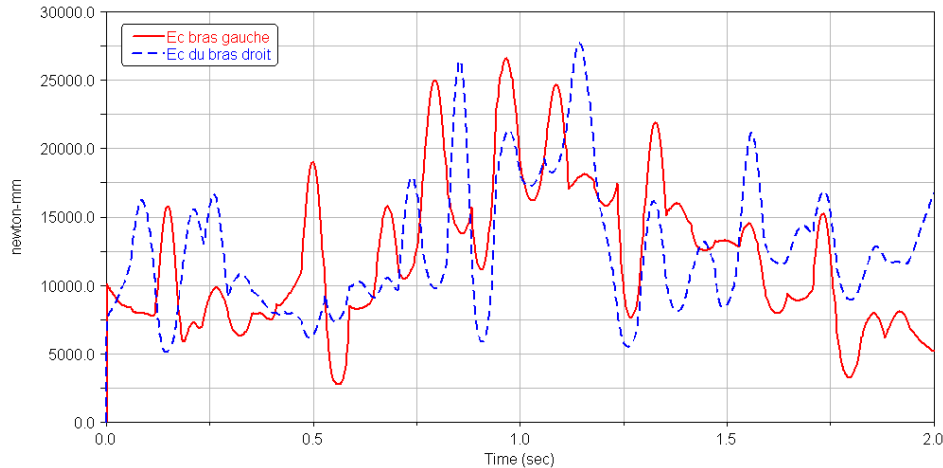


Figure 187 : énergie cinétique du membre supérieur droit et gauche

Nous remarquons que pour chaque membre supérieur, ce sont les énergies cinétiques du bras et de l'avant bras qui subissent le plus de variations, avec un pic de 13 N.m pour la courbe de l'avant bras droit et de 10 N.m pour celle du gauche, correspondant au contact du bâton. Les courbes des énergies cinétiques des épaules (scapula) ont un profil beaucoup plus stable avec une moyenne de 3.5 N.m.

La comparaison des courbes d'énergie cinétique des deux membres supérieurs, figure 187, montre des profils différents, une longue courbe symétrique pour l'énergie cinétique du bras gauche avec un maximum à 26 N.m et une, plus fluctuante, pour celle du bras droit avec trois sommets, le central étant le plus haut avec un maximum à 27.5 N.m.

Le bras droit développe donc une énergie cinétique plus importante que le bras gauche mais avec beaucoup plus de fluctuations.

Il semblerait que le côté faible (gauche) entraîne plus de régularité que le côté fort (droit), plus instable.

#### 4.4 CONCLUSION

La richesse du logiciel Life Modeler, au niveau du recueil des résultats, permet de cibler rapidement une recherche de résultats en fonction d'un objectif donné.

Dans ce chapitre, nous avons essayé de mettre en exergue cette démarche en prenant certains résultats qui nous paraissaient inhérents aux déterminants de la performance en "décalé". Nous avons utilisé les possibilités du logiciel pour approfondir les connaissances au niveau des prises de carre et de la phase de glisse, côté faible. D'autres résultats auraient pu donner d'autres pistes de recherche.

Cependant, notre champ d'investigation est limité par la dynamique du haut du corps qui reflète mal la réalité lors de la simulation dynamique directe. En conséquence, seuls ont pu être pris en considération les résultats issus de la modélisation dynamique inverse.

Toutefois, nous remarquons que la courbe de l'énergie cinétique totale du corps de la skieuse, baisse, du début de la phase de glisse jusqu'au retour aérien du membre inférieur gauche, côté dit faible de la skieuse. Ceci corroborerait les expériences de l'approche écologique de Warren [38], Amazeen et al [46], Laurent et Thomson [47] et signifierait que le patron moteur du décalé ne serait pas une régression comportementale due à la fatigue mais un nouveau patron moteur permettant une diminution du coût énergétique lors de la phase de glisse côté faible ainsi qu'une prise d'informations déterminante.



## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse a consisté à réaliser un modèle musculaire dynamique, dans les trois dimensions de l'espace, d'une skieuse de fond équipée de ses skis et de ses bâtons, avec l'objectif de simuler les mouvements et les efforts mis en œuvre en skating et plus particulièrement lors du pas du décalé. Les résultats, issus des analyses cinématique et dynamique, nous ont permis, de confirmer certaines connaissances : sur la durée des phases constituant un cycle de jambe, sur la dissymétrie entre les jambes et les bras et sur les forces exercées sur le matériel, et d'en interpréter d'autres, dans les domaines écologique, énergétique et musculaire. Ce travail montre que, par l'utilisation d'un outil de simulation moderne et puissant, les efforts produits dans les principaux muscles du skieur de fond peuvent être analysés. Grâce à cet outil, nous calculons l'énergie cinétique de l'ensemble de la skieuse aussi bien que celle d'un de ses membres, ce qui était très difficile à faire jusqu'ici.

Nous avons présenté dans les deux premiers chapitres, l'état de l'art du geste étudié et nous avons identifié et défini quels étaient les paramètres pertinents à prendre en considération, compte tenu des connaissances actuelles, mais aussi dans un but d'amélioration de la performance. La conception du modèle, son évolution, les difficultés rencontrées ont parfois été résolues par une démarche empirique.

A l'heure actuelle, la plupart des modélisations décrites dans la littérature ne prennent en compte que le contour des structures, type mannequins volumiques anthropomorphes, ou seulement les segments lors de représentations filaires. Ce qui a été intéressant lors de cette modélisation, c'est qu'en plus d'analyser les données cinématiques et dynamiques dans les trois dimensions de l'espace, nous avons aussi pu pénétrer la structure grâce à un modèle de corps humain musculaire. Nous avons pu créer un modèle global de skating pouvant répondre à des sollicitations internes : données anthropométriques, cinématiques, musculaires et mécaniques et à des sollicitations externes liées au matériel et à la nature du terrain d'évolution que nous avons modélisé simplement pour une précision suffisante du geste.

Le niveau final du modèle a pu donner lieu à une analyse biomécanique.

Il est évident que plus la qualité du modèle sera grande, plus l'analyse biomécanique sera fine. Or, ceci relève des capacités de modélisation, mais aussi, en amont, de la qualité des données cinématiques initiales du mouvement. Ces différentes étapes demandent une grande rigueur pour valider les mesures. C'est pour cela que la prudence s'impose quant-aux résultats et à leurs interprétations.

Nous avons observé que, si nous voulions des résultats musculaires approfondis sur la prise de carre, par exemple, il était nécessaire de réaliser un autre modèle humain qui prenne en compte tous les muscles et les tendons du membre inférieur.

Nous avons pu aussi remarquer, qu'il serait intéressant de comparer des techniques différentes pour un même modèle ou des modèles différents entre eux, dans une approche biomécanique et écologique.

La modélisation de diverses techniques d'un même skieur pourrait faire émerger des différences avant et après une préparation physique par exemple. Nous pourrions également réaliser divers modèles émanant de populations différentes, niveaux d'expertise allant du néophyte au confirmé. Toutefois, ceci demanderait une logistique lourde pour capturer des informations in situ et un travail de modélisation important.

A l'heure actuelle, les méthodes de relevés cinématiques ont progressé et les champs d'investigation se portent sur des mesures en situation réelle, sans la présence de repères visuels. Ces progrès pourraient faciliter une étude plus fine.

Les constructeurs ont su s'adapter à la technique et pour optimiser le phénomène de glisse, ils ont apporté des modifications au niveau du matériel : ski, fixation et chaussure mais aussi au niveau du fartage. L'influence technologique dans ce sport a induit une motricité précise de plus en plus efficace et performante. L'exploitation de ce modèle peut être intéressante pour l'industriel. Il peut par variation de la nature du matériel, (skis et bâtons) et de la neige (coefficient de frottement et fartage), observer le comportement cinématique et dynamique du skieur.

La méthodologie que nous avons utilisée peut donc être reprise par des utilisateurs pour servir d'aide à un coaching de haut niveau, pour faire ressortir les points utiles importants et les développer. L'étape suivante serait justement d'utiliser cet outil avec un sportif afin de le rendre plus performant d'un point de vue technique, en affinant certains mouvements ou lors d'un programme de musculation par le renforcement de certains muscles, par exemple. Ceci nécessiterait une capture d'image du skieur. Cette étude orienterait l'entraîneur et l'athlète, dans ses contenus d'apprentissage et d'entraînement en le sensibilisant aux phénomènes physiques et biologiques régissant le corps en mouvement. La difficulté réside cependant dans la transmission de données scientifiques en données d'entraînement, car l'efficiencia motrice est multifactorielle. Il faudrait savoir prendre le sportif en tant qu' "entité" évoluant dans un environnement physique et humain.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Biomechanics Research Group, Inc. *LIFEMODELER*, (logiciel). Version BRG. LifeMOD 2005.2.0 Biomechanics Modeler.
- [2] MSC SOFTWARE, *ADAMS*, (logiciel), Using ADAMS/View, Version 12.
- [3] BILODEAU B., BOULAY M.R, ROY B. Propulsive and gliding phases in four cross-country skiing techniques. *Medicine and science in sports exercise*, 1992, vol.24, n° 8, p. 917-925.
- [4] SMITH G.A. Biomechanical analysis of cross-country skiing techniques. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1992, vol.24, n° 9, p. 1015-1022.
- [5] KOMI P.V. Ground reaction forces in cross-country skiing. *International journal of sport biomechanics*, 1987, n° 3, p. 370-381.
- [6] SMITH G.A., NELSON R.C., FELDMANET A., RANKINEN J.L. Analysis of VI skating technique of olympic cross-country skiers. *International journal of sport biomechanics*, 1989, n° 15, p. 185-207.
- [7] SMITH G.A., MCNITT-GRAY J., NELSON R.C. Kinematic analysis of alternate stride skating in cross-country skiing. *International journal of sport biomechanics*, 1988, n° 4, p. 49-58.
- [8] SMITH G.A., HEAGY B.S. Kinematic analysis of skating technique of olympic skiers in the men's 50 km race. *Journal of applied biomechanics*, 1994, n° 10, p. 89-90.
- [9] STREET G.M., GREGORY R.W. Relationship between glide speed and Olympic cross-country ski performance. *Journal of applied biomechanics*, 1994, n° 10, p. 393-399.
- [10] GREGORY R.W., HUMPHREYS S.E., STREET G.M. Kinematic analysis of skating technique of Olympic skiers in the women's 30-km race. *Journal of applied biomechanics*, 1994, n° 10, p. 382-392.
- [11] RUBY Anne. *Contribution à la méthodologie de l'analyse de la performance sportive*. Non paginée. Thèse : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives : Université Claude Bernard Lyon I : 1997 ; N° d'ordre 184-95.
- [12] COULMY Nicolas. *Contribution à l'analyse cinématique et énergétique du pas de patineur en ski de fond*, 196 p. Thèse : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives : Université Joseph Fourier Grenoble I : 2000.
- [13] JUNKA A. *La science des mouvements humains*. (Cédérom). Paris : Science et motricité, 2001.
- [14] DUBOY J., JUNKA A., LACOUTURE P. *Mécanique humaine : élément d'une analyse des gestes sportifs en deux dimensions*, Paris : Revue Education Physique et Sportive, 1994.
- [15] ALLARD P., STOKES I.A.F., BLANCHI J.P. *Three dimensional analysis of human movement*, Windsor : Human Kinetics, 1994.
- [16] VERRIEST J.P. Une méthode simplifiée de simulation du geste du membre supérieur pour mannequin graphique 3D. In : *actes du 15<sup>ème</sup> congrès de la société de biomécanique*, Cluny, 1990, p. 123-124.
- [17] TAVERNIER M., BORSONI G., VERRIEST J.P., BRUNEL N. *Méthode de la détermination du centre de masse d'un sportif pour l'analyse du mouvement par images numérisées. Application au ski alpin et au ski de fond. Modèle CGS13*. Rapport interne FFS/INREST, 1993.
- [18] BILODEAU B., BOULAY M.R, ROY B. A comparison of 3 skating techniques and the diagonal stride on heart rate responses and speed in cross-country skiing, *International journal of sports medicine*, 1991, vol. 12, p. 71-76.

- [19] REY F., FERRAND A., CORBEAU J. Etude d'un geste sportif en biomécanique : le pas de patineur. In : *actes de : IDMME 2002, 4<sup>ème</sup> conférence internationale sur la conception et la fabrication intégrées en mécanique*, (Cédérom), Clermont-Ferrand, France, 2002, 10 p.
- [20] LEPLAT J., PAILHOUS J. Conditions cognitives de l'exercice et de l'acquisition des habiletés sensori-motrices. *Bulletin de psychologie*, 1976, n° 321, p. 205-211.
- [21] NORMAN R., CALDWELL G., KOMI P.V. Differences in body segment energy utilization between world class and recreational cross-country skiers, *Journal of Sport Biomechanics*, 1985, n° 1, p. 258-263.
- [22] NORMAN R., KOMI P.V. Mechanical energetics of world class cross-country skiing, *International Journal of Sport Biomechanics*, 1987, n° 3, p. 353-369.
- [23] LEPLANQUAIS Franck. *Contribution à l'analyse mécanique des allures de la locomotion humaine, caractérisation de tâches corporelles diverses à l'aide des travaux des efforts internes*, 150 p. Thèse : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives : université de Poitier, 1995.
- [24] MINETTI A.E. et al. Individual economy and general mechanics in cross country skiing, in abstracts of 2<sup>nd</sup> *International Congress on Skiing and Science*, St Christoph : Arlberg, 2000, p. 96-97.
- [25] FREDERICK E.C. Estimates of energy cost of rifle carriage in biathlon ski skating. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1987, n° 3, p. 392-403.
- [26] KNAPP B. *Acquisition des habiletés motrices*. Paris : Vigot, 1968.
- [27] SAIBENE F., CORTILI G., ROI G., COLOMBINI A. The energy cost of cross-country skiing and the effect of the friction of the ski. *European journal of applied physiology*, 1989, n° 58, p. 791-795.
- [28] HOFFMAN M.D., CLIFFORD P.S. Physiological aspects of competitive cross country skiing. *Journal of sports sciences*, 1992, n° 10, p. 3-27.
- [29] MILLET G., CANDAU R., ROUILLON J.D. Cycle length and cycle rate in roller skiing : relation ships with performance and maximal lower limb power. *Journal of Human Movement Studies*, 1997, n° 32, p. 267-281.
- [30] HOFFMAN M.D., CLIFFORD P.S. Physiological responses to different cross-country skiing techniques on level terrain, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1990, n° 22, p. 841-848.
- [31] MOGNONI P. et al. Heart rate profiles and energy cost of locomotion during cross country skiing races, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2001, n° 85, p. 62-67.
- [32] Association nationale des professionnels de la neige de culture. *Le site internet de l'association nationale des professionnels de la neige de culture* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.anpnc.com>, consulté le : 14 septembre 2007.
- [33] *Au vieux campeur* [en ligne]. Disponible sur <http://www.au-vieux-campeur.fr>, consulté le 10 décembre 2003.
- [34] DUCRET S., PAILLER-MATTEI C., VARGIOLU R., ZAHOUANI H. Ski de fond, simulation de l'usure sur la glace, *EPS*, 2002, n° 293, p. 40-43.
- [35] SHIMBO M. Friction on snow of ski soles, unwaxed and waxed. In : *Science Study of Skiing in Japan*. Tokyo : The Society of Ski Science, 1971, p. 101-112.
- [36] BRISWALTER J., LEGROS P., DUREY A. Stabilité intra individuelles des paramètres cinématiques et du coût énergétique de la course à pied chez des athlètes spécialistes de moyennes distances. *Science et Sports*, 1994, n° 9, p. 145-153.
- [37] WARREN W.H. Perceiving affordances : visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 1984, n° 10, p. 683-703.
- [38] GIBSON J.J. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1986.
- [39] LEE D.N., ARONSON E. Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception and Psychophysics*, 1974, n° 15, p. 527-532.
- [40] SAVELSBERGH G.J.P., WHITING H.T.A., BOOTSMAN R.J. Grasping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1991, n° 31, p. 1655-1663.
- [41] DE RUGY A., MONTAGNE G., BUEKERS M.J., LAURENT M. Target expansion is used to control locomotor pointing. *Behavioral and Brain Research*, 2001, n° 123, p. 11-15.
- [42] CUTTING J.E. *Perception with an eye for motion*. Cambridge : Bradford Books, 1986.



- [43] CUTTING J.E. Four ways to reject directed perception. *Ecological Psychology*, 1991, n° 3, p. 25-34.
- [44] LAURENT M., MONTAGNE G., DUREY A. Binocular invariants in interceptive tasks : a directed perception approach. *Perception*, 1996, n° 25, p. 1437-1450.
- [45] AMAZEEN E.L., AMAZEEN P.G., POST A.A., BEEK P.J. Timing the selection of information during rhythmic catching. *Journal of Motor Behavior*, 1999, n° 31, p. 279-289.
- [46] LAURENT M., THOMSON J.A. The role of visual information in control of the constrained locomotor task. *Journal of Motor Behavior*, 1988, n° 20, p. 17-37.
- [47] SPARROW W.A., IRIZARRY-LOPEZ V.M. Mechanical efficiency and metabolic cost as measures of learning a novel gross motor task. *Journal of motor behavior*, 1987, vol.19, n° 2, p. 240-264.
- [48] BERNSTEIN N.A. *The co-ordination and regulation of movements*. Oxford : Pergamon Press, 1967.
- [49] KUGLER P.N., KELSO J.A.S., TURVEY M.T. On the concept of coordinative structures as dissipative structures : I. Theoretical lines of convergence. In G.E. Stelmach et J. Requin (eds.), *Tutorials in Motor Behavior*. Amsterdam : North-Holland, 1980, p. 3-47.
- [50] KUGLER P.N., KELSO J.A.S., TURVEY M.T. On the control of coordination of naturally developing systems. In J.A.S. Kelso et J.E. Clark (eds.), *The development of Movement Control and Coordination*. New York : John Wiley, 1982, p. 5-78.
- [51] HOYT D.F., TAYLOR C.R. Gait and energetics of locomotion in horses. *Nature*, 1981, n° 292, p. 239-240.
- [52] STEWART I. *Life's other secret : The New Mathematics of the Living Word*. New York : J. Wiley, 1998.
- [53] BEUTER A., LEFEBVRE R. Un modèle théorique de transition de phase dans la locomotion humaine. *Canadian Journal of Sport Sciences*, 1988, n° 113, p. 247-253.
- [54] DIEDRICH F.J., WARREN W.H. Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 1995, n° 21, p. 183-202.
- [55] FARLEY C. T., BLICKHAN R., MCMAHON T.A., TAYLOR C.R. Mechanics of human hopping, *Journal of Biomechanics*, 1987, vol.20, n° 9, p. 896.
- [56] CHOLLET D., CHALIES S., CHATARD J.C. A new index of coordination for the crawl : description and usefulness. *International Journal of Sports Medicine*, 2000, n° 21, p 54-59.
- [57] SEIFERT L., CHOLLET D., BARDY B. Effect of swimming velocity on arm coordination in front crawl : a dynamical analysis. *Journal of Sports Sciences*, 2004, n° 22, p 651-660.
- [58] SEIFERT L., CHOLLET D., ROUARD A. Swimming constraints and arm coordination. *Human Movement Science*, 2007, n° 26, p 68-86.
- [59] DEMPSTER W.T. Properties of Body Segments based on size and weight, *American Journal of Anatomy*, 1967, n° 120, p. 33-54.
- [60] Biomechanics Research Group, Inc. LifeModeler Bringing Simulation to life [en ligne]. *Clinical Application-Walking*. Disponible sur : [http://www.lifemodeler.com/LM\\_Manual/T\\_gait.html](http://www.lifemodeler.com/LM_Manual/T_gait.html) BRG. LifeMOD Biomechanics Modeler V 2004, consulté le 10 juin 2004.
- [61] REY F., CORBEAU J., FERRAND A. Construction d'un modèle dynamique d'un geste sportif, le pas de patineur. In : 9<sup>ème</sup> Colloque National aip primeca, *Méthode et Modèles Innovants pour la conception de Systèmes Industriel*, La Plagne, France, 5-8 avril 2005, 11p.
- [62] VANDEWALLE H. *Ergométrie*, dans J.R. Lacour, *Biologie de l'exercice musculaire*, Paris : Masson, 1992, p. 123-156.
- [63] WEINECK J. *Manuel d'entraînement*, Paris : Vigot, 1997, p. 577, collection sport et enseignement, n° 65.
- [64] PAHAUT E. Les cristaux de neige et leurs métamorphoses. *Monographie de la Météorologie nationale*, 1975, n° 96.



## ENERGIE MECANIQUE CINEMATIQUE ET POTENTIELLE

Pour calculer l'énergie cinétique, nous utilisons un repère relatif R d'origine G centre d'inertie de la skieuse équipée, en mouvement de translation par rapport au repère terrestre Rg considéré comme galiléen.

En utilisant le théorème de Koenig pour l'énergie cinétique, nous obtenons :

Ec totale est l'énergie cinétique totale du système entre deux instants du geste.

$$\Delta Ec_{totale} = Ec_{ext} + Ec_{int}$$

$$Ec_{ext} = 1/2 m V_{CM/R0}^2$$

$$Ec_{int} = \sum_{n=1}^n 1/2 I_n \omega_{n/R1}^2 + \sum_{n=1}^n 1/2 m_n V_{Gn/R1}^2$$

A chaque instant, l'énergie cinétique totale comprend :

- **L'énergie cinétique externe** ( $Ec_{ext}$ ) du centre de masse (G) de l'ensemble du système, également appelée **énergie cinétique de transport**, ( $1/2 m V_{CM/R0}^2$ ) ou m est la masse de l'ensemble, sujet et matériel, et  $V_{CG/Rg}$  la vitesse du centre de masse du système par rapport au repère galiléen.
- **L'énergie cinétique interne** ( $Ec_{int}$ ) qui est
  - La somme des *énergies cinétique de rotation* des différents segments autour d'axes de rotations transverses passant par chaque centre de masse  $G_n$ ,  $I_n$  étant le moment d'inertie d'un segment par rapport à l'axe de rotation passant par le centre de gravité du segment, et  $\omega_n$  la vitesse angulaire du segment.
  - *L'énergie cinétique pour n segments*, ( $\sum_{n=1}^n 1/2 m_n V_{Gn/R1}^2$ ) ou R1 est un repère passant par le centre de masse CM et est en translation par rapport à un repère inertiel ou  $m_n$  est la masse du segment exprimé en kg et ou  $V_{Gn/R1}$  est la vitesse du centre de gravité du segment par rapport au référentiel lié au centre de masse du système.

A une variation d'énergie cinétique est souvent associée une variation d'énergie potentielle ( $Ep$ ), travail du poids par rapport à un déplacement.

La skieuse étudiée se déplaçant sur une pente ascendante, il faut donc tenir compte :

- de la trajectoire du skieur :

$$\Delta Ep_{mvt} = Ep_{fin\ du\ mvt} - Ep_{début\ du\ mvt}$$

$Ep = mgh$  m est la masse du système (skieur+matériel), exprimée en kg, h la hauteur du centre de masse, exprimée en m et g l'accélération de la pesanteur exprimée en  $m \cdot s^{-2}$

- Mais aussi à la fluctuation du centre de masse par rapport à la trajectoire lors du mouvement:

$\Delta E_{p_{Ci}} = \sum_i (mgh_{i+1} - mgh_i)$ , c'est à dire la variation d'énergie potentielle entre deux moments figurés par les images.

$$\Delta E_{p \text{ totale}} = \Delta E_{p_{Ci}} + \Delta E_{p \text{ mvt}}$$

Nous pouvons dire que l'énergie mécanique totale lors d'un cycle de mouvement est égale à l'énergie cinétique totale du cycle plus l'énergie potentielle totale du cycle.

$$E_{m \text{ totale}} = E_{c \text{ totale}} + E_{p \text{ totale}}$$

### CARACTERISTIQUES MECANO-PHYSIQUES DES DIFFERENTS TYPES DE NEIGE

Avant de s'intéresser aux caractéristiques mécaniques de la neige, nous allons étudier les divers cristaux de neige existants, puisque ce sont eux qui sont à l'origine des différents types de neige. Les divers tableaux et schémas sont issus d'un site internet de l'association nationale des professionnels de la neige de culture ([www.anpnc.com](http://www.anpnc.com)) 2007 [32], la plupart des schémas explicatifs sont issus de l'OMM, l'Organisation Météorologique Mondiale.

#### FORMATION DES CRISTAUX DE NEIGE ET GROSSISSEMENT

Les cristaux de neige, se développent à partir de particules de glace élémentaires, de formes hexagonales, qu'on nomme **germes**. Ces germes proviennent de la congélation de gouttelettes d'eau. Suivant les températures qui régneront pendant son grossissement, certaines parties du cristal verront leurs croissances privilégiées.

Les parties privilégiées :

- Les bases : création de cristaux de type aiguille ou colonne.
- Les faces latérales : type plaquette.
- Les arêtes : type connu de l'étoile.

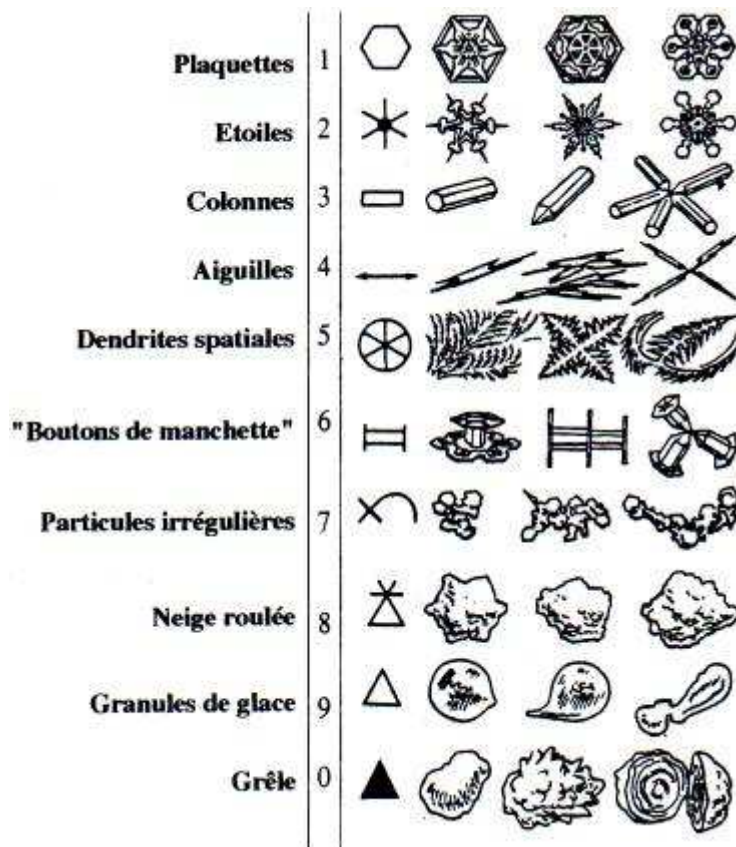
Selon leurs séjours dans une ou plusieurs plages de températures différentes, les cristaux de neige pourront avoir des formes diverses, parfois complexes, dues aux différents types de croissance subis à la suite de séjours dans des zones de températures différentes.

#### LES DIFFERENTS TYPES DE CRISTAUX

Les formes des cristaux obtenus qui dépendent des types de croissance subis, peuvent faire l'objet d'une classification, figure A2.1. Plusieurs existent mais celle établie par l'O.M.M., est la plus utilisée.

Parmi les cristaux de cette classification, le cristal particulier qu'est la neige roulée, fréquente en hiver, nécessite quelques précisions supplémentaires.

Ce type de neige est constitué de cristaux ayant traversé ou séjourné dans des masses nuageuses turbulentes formées de gouttelettes surfondues. Celles-ci, au contact du cristal, se sont congelées, provoquant le givrage du cristal. Si ce phénomène dure assez longtemps, le cristal disparaît complètement sous une gangue de petites particules sphériques de glace opaque et prend l'aspect d'une boule de « mimosa ».



**Figure A2.1** : classification des cristaux de neige fraîche selon l'OMM

*Remarque* : Il existe un autre cristal, non mentionné dans ce tableau : le **givre de surface**.

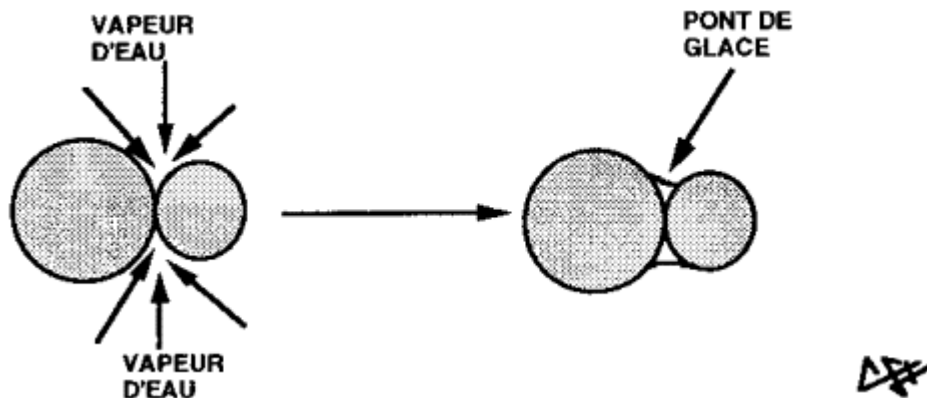
## INFLUENCE DES CONDITIONS ATMOSPHERIQUES AU COURS DES CHUTES DE NEIGE

Lorsque les cristaux de neige agglomérés en flocons sont suffisamment lourds pour vaincre les courants ascendants qui règnent dans le nuage (qq. cm/s à qq. m/s), ils tombent.

Si les températures restent négatives jusqu'au sol, les flocons s'y déposent et persistent pour constituer le manteau neigeux.

Mais lors de leur chute, les flocons vont subir l'influence de deux paramètres météorologiques importants : le vent et la température.

## Action du vent



**Figure A2.2 :** *mécanisme de formation d'un pont de glace entre deux grains*



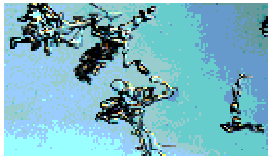

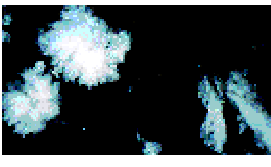
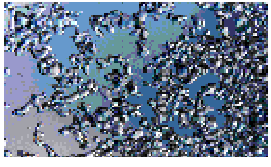
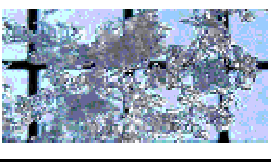
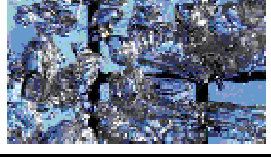

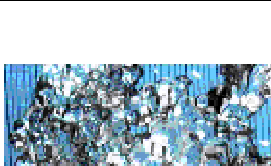
Le vent a une action mécanique importante sur les cristaux. Il augmente en effet, les chocs, donc les cassures et par là même, la destruction des structures fragiles. C'est donc une neige très fragmentée qui se déposera dans les zones de calme. De plus ces petites particules se souderont entre elles par des ponts de glace nombreux, figure A.2.2. La neige ainsi obtenue sera très dense, très compacte, et rigide.

## Actions de la température

Sans vent, avec des températures basses ( $< -5^{\circ}\text{C}$ ), les flocons ne subissent pas de forte transformation au cours de leur chute. C'est donc une neige peu dense qui se déposera au sol. Par contre, lorsque les températures sont proches de  $0^{\circ}\text{C}$ , les cristaux de neige se modifient déjà au cours de la chute, parfois même ils peuvent s'humidifier ( $T_{\text{air}} > 0^{\circ}\text{C}$ ) et la **masse volumique de cette neige peut être importante** (100 à  $200 \text{ kg/m}^3$ ).

## ÉVOLUTION ET METAMORPHOSE DE LA NEIGE AU SOL

Le manteau neigeux est un empilement de strates de neige composées de cristaux. Dans chaque couche les cristaux subissent jusqu'à la fonte finale, une évolution propre qui est fonction des conditions atmosphériques passées et présentes, tableau A.2.1.

<b>NEIGE RECENTE</b>	<b>+</b>	<b>NEIGE FRAICHE</b> Cristaux intacts, facilement identifiables (dépôt non venté)	
		<b>PARTICULES RECONNAISSABLES</b> Fragments de cristaux dont la forme initiale est reconnaissable. Un émoussé des angles vifs et des crêtes peut être observé.	
		<b>NEIGE ROULÉE</b> Particules plus ou moins sphériques de grande dimension (1 à 3 mm) semblables à des boules de mimosas. Elles sont constituées de très petites particules sphériques de glace agglomérées sur un cristal de neige fraîche, parfois encore identifiable.	
<b>NEIGE EVOLUEE</b>	<b>●</b>	<b>GRAINS FINS</b> Petits grains plus ou moins arrondis dont le diamètre est voisin de 0,2 à 0,4 mm. Les formes initiales ne sont plus identifiables.	
	<b>□</b>	<b>GRAINS A FACES PLANES</b> Petits grains anguleux caractérisés par la présence de quelques facettes, lisses ou striées de 0,4 à 0,6 mm.	
	<b>^</b>	<b>Gobelets ou givre de profondeur</b> Cristaux assez gros, pouvant atteindre plusieurs mm. Sans cohésion entre eux. Présence de nombreuses facettes striées présentant une structure en gradins.	
	<b>○</b>	<b>GRAINS ROUNDS</b> Grains dont la surface présente un net émoussé. Leur forme est franchement arrondie. Leur diamètre peut varier de 0,5 mm à 2 mm. Les plus gros éléments se présentent le plus souvent en agglomérats de plusieurs individus.	
	<b>—○</b>	<b>CROÛTE DE REGEL</b> Couche plus ou moins épaisse (de un à plusieurs dizaines de cm) de grains soudés entre eux par des liaisons de glace provenant du regel d'eau liquide. Ces grains plus ou moins arrondis, suivant le degré d'humidification subi avant le regel, peuvent avoir gardé en partie leur forme d'origine. Néanmoins le grain le plus courant est le grain rond.	

**Tableau A2.1 :** les différents grains de neige naturelle tombée au sol et symboles des types de grains fixant les principales étapes.



On distingue deux types de métamorphoses : les métamorphoses de la neige sèche et celles de la neige humide.

### Les métamorphoses de la neige sèche :

Une neige sèche est une neige qui ne contient pas d'eau liquide. Les différences de température dans une couche, conditionnent la neige sèche.

Il existe trois types de métamorphoses de la neige, en fonction des différences de température mesurées dans le manteau neigeux. Ces métamorphoses s'opèrent suivant des seuils donnés en fonction du gradient de température, figure A2.3.

Température neige < 0°C

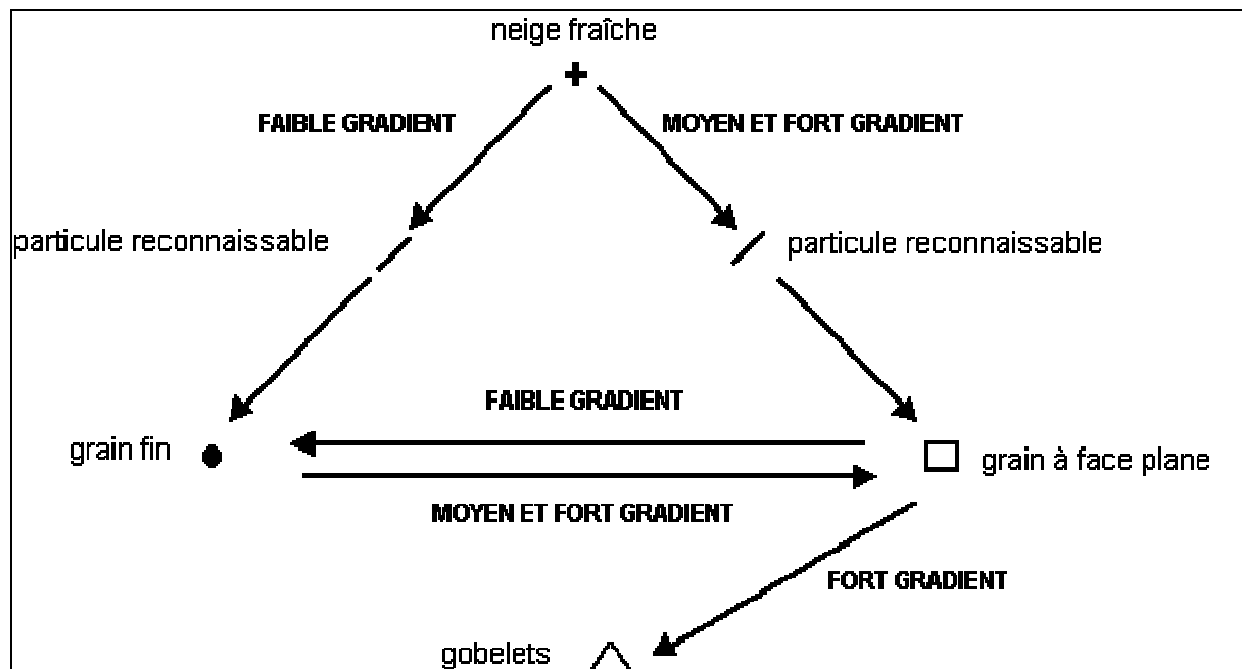


Figure A2.3 : schéma des métamorphoses de la neige sèche

GT = Gradient de Température

FAIBLE GRADIENT	$G_T < 5^\circ\text{C/m}$
MOYEN GRADIENT	$5^\circ\text{C/m} < G_T < 20^\circ\text{C/m}$
FORT GRADIENT	$G_T > 20^\circ\text{C/m}$

### Les métamorphoses de la neige humide

La neige est dite humide lorsqu'elle contient de l'eau liquide. C'est alors un mélange de glace, d'air et d'eau. Quels que soient les cristaux ou grains de neige, lorsqu'ils sont

humidifiés, ils s'arrondissent pour se transformer en « grains ronds », figure A2.4. La rapidité de cette transformation dépend de la quantité d'eau présente.

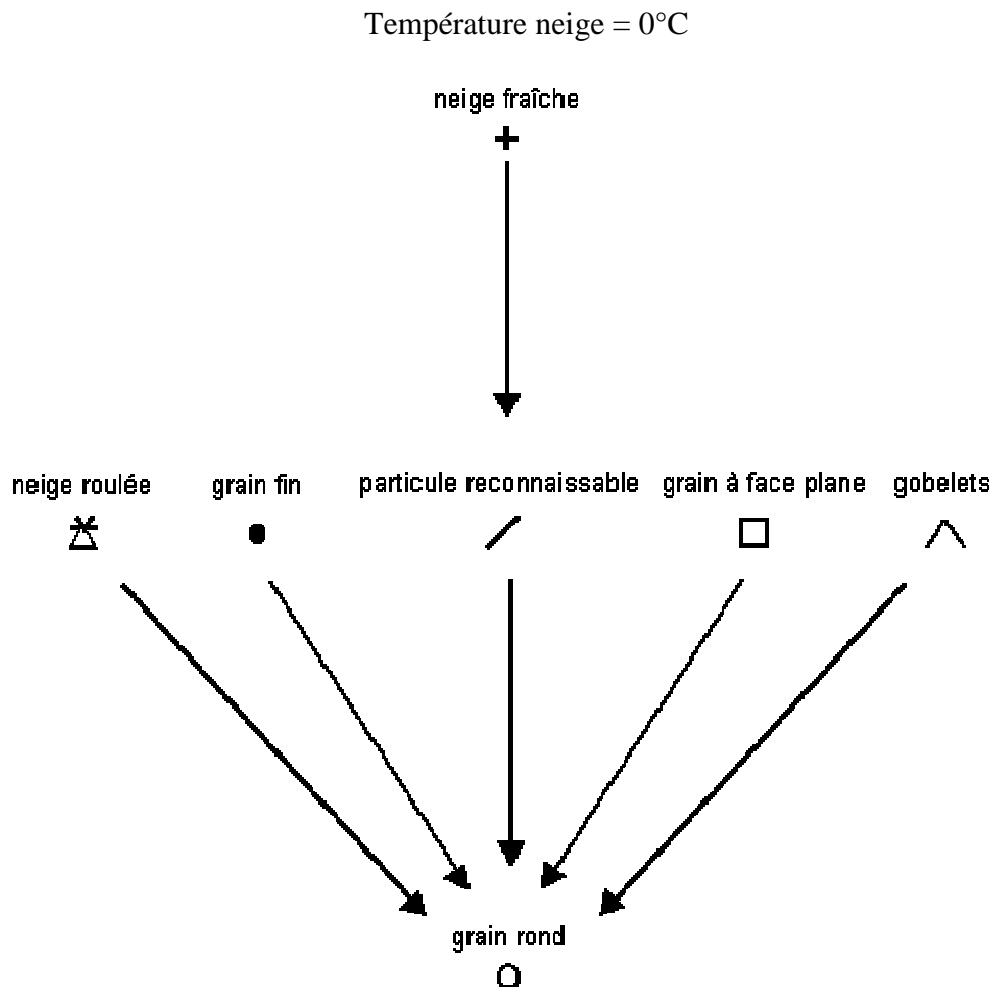
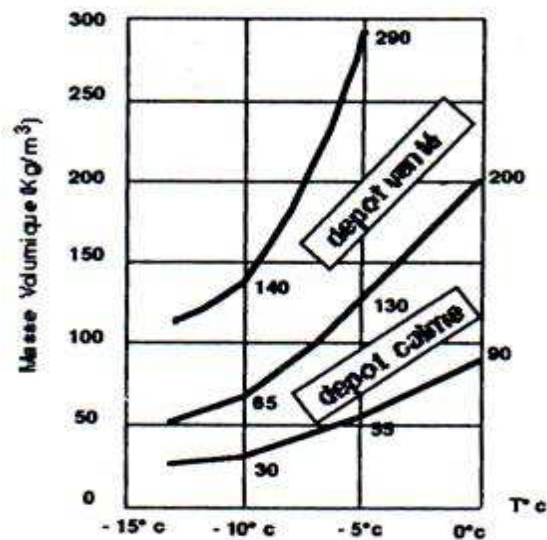


Figure A2.4 : schéma des métamorphoses de la neige humide.

## PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA NEIGE

La neige est un matériau poreux, mélange de glace, d'air et parfois d'eau liquide. Ce matériau possède des propriétés physiques spécifiques.

## Masse volumique de la neige



**Figure A2.5 :** variation de la masse volumique de la neige fraîche selon la température et la vitesse du vent

Masse volumique = masse d'un volume de neige (kg) / volume de neige (m<sup>3</sup>)

Elle dépend au moment de la chute de neige :

- du type de cristal
- pour chaque type, des conditions de vent et de température

Au sol, elle dépend :

- de son degré de vieillissement
- de son humidité

**La masse volumique de la neige peut varier entre 40 kg/m<sup>3</sup>, pour une neige fraîche froide et légère, et 600 kg/m<sup>3</sup> pour une vieille neige de névé.**

La figure A.2.5 représente la variation de la masse volumique de la neige fraîche selon la température et la vitesse du vent. La répartition des masses volumiques selon les types de grains apparaît dans le tableau A.2.2.

$\rho$  = Masse volumique ( Kg / M<sup>3</sup> )

P		$\rho$										
		<50	50 100	100 150	150 200	200 250	250 300	300 350	350 400	400 450	450 500	> 500
+	%	7	33	49	11							
	50											Nombre de cas : 190
^	%		2	19	43	22	14					
	50											68
•	%			2	8	20	22	23	17	7	1	
	50											117
○	%					2	6	14	31	33	11	3
	50											249
^	%					11	33	33	18	5		
	50											63

Tableau A.2.2 : répartition des masses volumiques selon les types de grain, E. Pahaut 1975 [64].

## PROPRIETES MECANIQUES DE LA NEIGE

### La cohésion de la neige

La cohésion de la neige dépend de la qualité des liaisons entre les grains. Il existe quatre types de cohésion, figures de A2.6 à A2.9 :

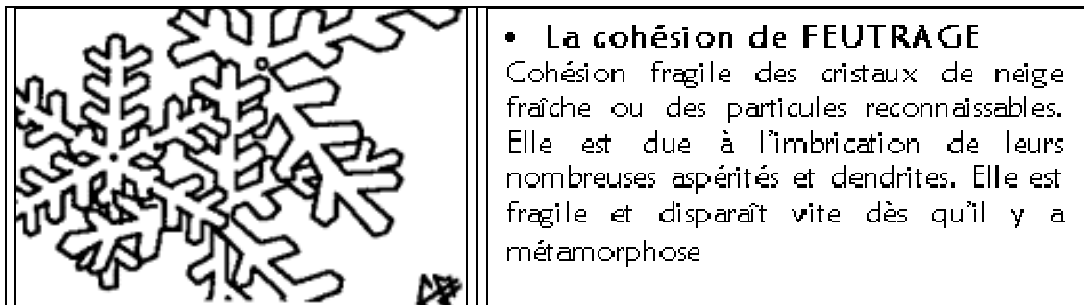
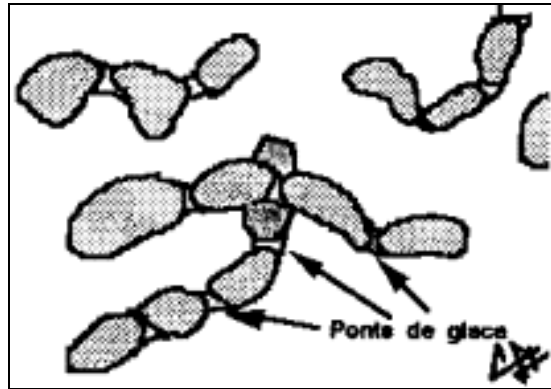


Figure A2.6 : cohésion de feutrage

- **La cohésion de FRITTAGE**

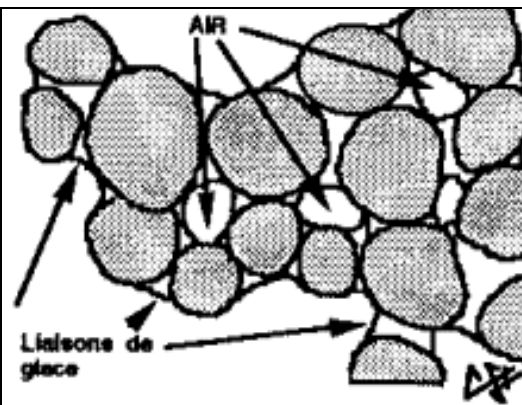
Elle concerne essentiellement les grains fins et particules reconnaissables et se caractérise par la présence de soudures (ou ponts de glace) entre les grains. Ces dernières sont le fruit de la condensation solide de vapeur d'eau aux points de contact entre les grains. Elle est assez bonne mais propice à la propagation des cassures



**Figure A2.7 :** *cohésion de frittage*

- **La cohésion CAPILLAIRE**

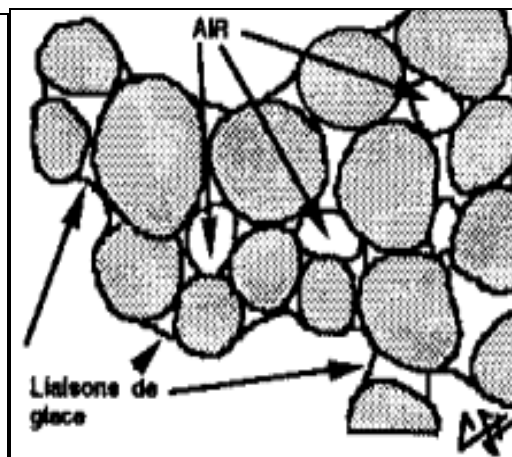
C'est une cohésion obtenue par la présence d'une pellicule d'eau qui entoure les grains et fait la liaison entre ces derniers. Sa qualité dépend de la teneur en eau liquide (T.E.L.). Pour de faibles valeurs elle est assez bonne mais elle diminue rapidement si la T.E.L. augmente. Elle peut concerner tous les types de neiges, mais elle est typique des grains ronds



**Figure A2.8 :** *cohésion capillaire*

- **La cohésion de REGEL**

Lorsqu'il y a gel de l'eau liquide présente dans la neige, les grains se soudent. Cependant, pour ce faire, il faut que la T.E.L. ait été suffisamment importante, ce qui va de paire avec une métamorphose de fonte, même s'ils sont de petites dimensions (0,2 à 0,3 mm), les grains concernés par la cohésion de regel ne peuvent être que des grains arrondis. Cette cohésion est la meilleure



**Figure A2.9 :** *cohésion de regel*

## Compression et traction

La neige résiste assez bien à la compression mais très mal à la traction. Sur les pentes, les zones de convexité sont des zones de traction et les concavités sont des zones de compression. La neige est donc un matériau compressible et ceci, d'autant plus qu'elle est récente et de masse volumique faible.

En compétition, la piste est généralement préparée, c'est-à-dire damée. Dans ce cas, elle est tassée et est comparable à un regroupement de petits grains de glace. Cependant, en fonction de la température, la masse volumique peut changer comme nous l'avons vu précédemment. De même, il peut neiger lors de la course; la neige devient alors fraîche et change de caractéristiques. Enfin, le vent influe également sur les caractéristiques de la neige.

Nous distinguerons quatre types de neige, tableau A.2.3:

Type de neige	Masse volumique
neige fraîche avec température froide à très froide ( $T < -10^{\circ}\text{C}$ )	50 $\text{kg/m}^3$
neige fraîche, température moyenne ( $-5^{\circ}\text{C}$ )	120 $\text{kg/m}^3$
neige dure et froide ( $-10^{\circ}\text{C}$ )	300 $\text{kg/m}^3$
neige molle, température élevée ( $>0^{\circ}\text{C}$ )	400 $\text{kg/m}^3$

**Tableau A.2.3** : *masse volumique selon le type de neige*

Nous utiliserons ces valeurs dans nos modélisations.

Toutefois, la neige est en perpétuelle évolution comme nous avons pu le voir précédemment, de part :

- la structure même de la neige,
- les conditions climatiques qui évoluent constamment
- la structure de la piste par rapport au damage
- la compétition, par rapport aux traces laissées sur la piste, s'il s'agit d'un parcours à une ou plusieurs boucles mais aussi en fonction du classement du skieur dans la course, premier ou dernier.

## Annexe 3

### **Coordonnées cartésiennes en 3D, issues de la thèse de Ruby [11], de 26 points précis situés sur la skieuse et le matériel.**

Nous avons corrigé certaines coordonnées mises en relief par le coloriage de la case (en vert) car le fichier contenait plusieurs erreurs dues à la reconnaissance de caractères utilisée pour le créer, à partir d'un document papier de la thèse. Nous avons aussi mis en millimètre les données qui étaient en mètre.

point 1			point 2			point 3			point 4			point 5			point 6		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-1144	3231	-1561	-2807	2610	-1724	-2039	2904	-1601	-2283	2806	-1564	-2195	2800	-1499	-2019	2594	-1147
-1127	3251	-1559	-2668	2684	-1630	-1957	2946	-1573	-2166	2863	-1545	-2089	2833	-1450	-1913	2591	-1095
-953	3245	-1496	-2645	2671	-1597	-1808	2934	-1528	-2054	2861	-1505	-1978	2829	-1430	-1774	2562	-1056
-777	3258	-1439	-2538	2655	-1564	-1668	2907	-1455	-1908	2813	-1439	-1847	2799	-1390	-1617	2518	-1026
-642	3179	-1442	-2276	2487	-1482	-1461	2824	-1430	-1688	2680	-1410	-1636	2663	-1343	-1411	2459	-1011
-522	3128	-1407	-2117	2353	-1472	-1258	2741	-1417	-1529	2611	-1397	-1422	2583	-1311	-1214	2400	-983
-304	3034	-1403	-1902	2251	-1544	-1199	2578	-1455	-1346	2531	-1437	-1278	2490	-1319	-1072	2341	-957
-128	2927	-1368	-1496	2237	-1422	-870	2537	-1384	-1137	2403	-1376	-1056	2405	-1281	-861	2310	-918
71	2783	-1378	-1346	2148	-1409	-662	2398	-1384	-965	2321	-1384	-882	2325	-1282	-714	2258	-894
298	2660	-1357	-1219	2084	-1447	-449	2336	-1371	-759	2217	-1387	-708	2233	-1289	-566	2222	-881
491	2592	-1365	-1000	1966	-1481	-253	2253	-1166	-554	2145	-1399	-484	2175	-1298	-362	2211	-880
693	2488	-1348	-842	1905	-1463	-61	2201	-1352	-365	2099	-1380	-280	2124	-1284	-226	2174	-859
944	2424	-1348	-710	1903	-1431	153	2167	-1359	-159	2093	-1374	-126	2101	-1287	-51	2151	-849
1136	2427	-1322	-686	1827	-1467	270	2124	-1370	-23	2073	-1395	19	2087	-1288	114	2153	-878
1244	2432	-1321	-480	1893	-1432	438	2175	-1371	103	2105	-1383	166	2105	-1282	271	2152	-873
1370	2493	-1317	-394	1980	-1429	540	2206	-1353	205	2118	-1384	275	2140	-1253	397	2173	-874
1450	2530	-1298	-217	1997	-1418	668	2232	-1345	314	2139	-1367	405	2163	-1258	573	2177	-845
1576	2567	-1300	-63	2032	-1416	776	2272	-1332	461	2204	-1345	521	2193	-1240	669	2195	-847
1660	2586	-1294	42	2106	-1396	862	2311	-1326	609	2243	-1353	646	2231	-1245	790	2203	-829
1796	2660	-1277	84	2063	-1427	1026	2383	-1315	666	2272	-1343	746	2291	-1237	917	2246	-818
1936	2700	-1262	292	2208	-1374	1108	2392	-1309	794	2299	-1336	875	2307	-1224	1025	2262	-818
2054	2717	-1255	368	2194	-1384	1244	2419	-1311	939	2329	-1333	999	2335	-1223	1124	2273	-796
2150	2794	-1250	449	2196	-1375	1363	2499	-1283	997	2361	-1306	1087	2364	-1212	1220	2270	-797
2280	2848	-1228	555	2219	-1380	1437	2508	-1290	1115	2385	-1326	1205	2389	-1221	1356	2287	-796
2312	2818	-1240	617	2249	-1369	1536	2523	-1277	1210	2408	-1304	1289	2405	-1212	1451	2312	-820
2443	2887	-1221	717	2295	-1362	1603	2578	-1266	1297	2451	-1287	1389	2444	-1193	1604	2335	-812
2468	2851	-1231	813	2327	-1344	1723	2611	-1260	1402	2478	-1293	1478	2489	-1196	1699	2351	-817
2628	2925	-1198	872	2372	-1327	1817	2614	-1260	1470	2494	-1282	1593	2493	-1178	1813	2372	-822
2638	2866	-1212	1124	2419	-1330	1888	2672	-1240	1633	2530	-1249	1691	2523	-1148	1870	2383	-828
2619	2755	-1226	1274	2468	-1318	1974	2670	-1239	1745	2531	-1190	1820	2566	-1110	2016	2372	-795
2772	2843	-1211	1328	2526	-1307	2059	2694	-1211	1851	2569	-1181	1941	2570	-1087	2108	2367	-767
2832	2827	-1187	1349	2451	-1321	2169	2680	-1193	1971	2560	-1143	2048	2552	-1067	2267	2349	-751
2953	2810	-1133	1483	2390	-1234	2348	2659	-1131	2122	2542	-1078	2179	2530	-1025	2450	2310	-710
3088	2738	-1106	1696	2337	-1161	2529	2586	-1065	2333	2500	-1064	2375	2466	-979	2620	2276	-679
3304	2724	-1080	2025	2265	-1109	2637	2558	-1041	2495	2408	-1026	2567	2377	-930	2771	2215	-637



point 7			point 8			point 9			point 10			point 11			point 12		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-2041	2431	-732	-1768	2442	-428	-1635	2565	-614	-1391	2499	-666	-1739	3091	-1588	-2052	2296	-717
-1923	2419	-716	-1636	2355	-394	-1531	2508	-577	-1241	2468	-680	-1722	3062	-1589	-1906	2256	-705
-1793	2343	-662	-1439	2291	-386	-1456	2505	-561	-1157	2486	-697	-1750	3087	-1572	-1770	2212	-660
-1654	2302	-624	-1307	2265	-358	-1294	2453	-527	-1040	2400	-712	-1743	3079	-1592	-1660	2199	-621
-1524	2286	-608	-1183	2235	-317	-1217	2426	-519	-1106	2473	-734	-1742	3071	-1578	-1511	2166	-596
-1412	2263	-589	-992	2190	-291	-1111	2402	-476	-1058	2473	-722	-1716	3059	-1562	-1380	2124	-558
-1271	2242	-554	-905	2156	-276	-1034	2389	-427	-1019	2453	-653	-1720	3060	-1571	-1239	2104	-557
-1147	2226	-525	-780	2161	-265	-908	2364	-388	-1038	2511	-593	-1759	3076	-1553	-1107	2065	-516
-985	2179	-538	-625	2143	-265	-800	2316	-321	-978	2448	-505	-1751	3051	-1495	-973	2001	-565
-831	2144	-527	-461	2163	-249	-645	2313	-293	-841	2402	-392	-1775	3047	-1418	-811	1985	-529
-677	2124	-528	-315	2145	-243	-654	2279	-304	-772	2427	-383	-1779	3043	-1343	-647	1988	-542
-571	2106	-542	-215	2180	-252	-499	2319	-294	-695	2471	-391	-1785	2998	-1257	-512	1974	-548
-377	2104	-565	-49	2194	-247	-371	2356	-313	-520	2479	-420	-1518	2989	-1180	-299	1958	-535
-200	2136	-571	89	2232	-249	-214	2400	-320	-411	2544	-407	-1756	2898	-1077	-164	1962	-547
-73	2151	-572	237	2237	-233	23	2429	-346	-186	2573	-461	-1596	2788	-877	12	1986	-517
93	2167	-549	364	2246	-199	162	2479	-360	42	2674	-516	-1367	2833	-745	187	2008	-517
270	2193	-502	473	2297	-185	340	2506	-382	174	2719	-534	-697	2903	-595	256	2030	-491
389	2207	-464	622	2280	-141	569	2544	-380	464	2714	-561	-445	2749	-490	423	2056	-461
555	2205	-440	772	2322	-104	747	2525	-346	750	2668	-544	-562	2786	-434	552	2095	-410
694	2253	-407	890	2345	-60	922	2485	-289	1082	2626	-517	-193	2752	-425	698	2107	-394
821	2239	-375	1066	2332	-27	1099	2501	-227	1320	2542	-426	96	2747	-454	854	2104	-336
949	2268	-350	1164	2342	-3	1261	2461	-169	1556	2463	-301	235	2757	-621	1000	2119	-330
1095	2289	-345	1310	2352	17	1393	2466	-189	1675	2397	-218	628	3022	-705	1135	2136	-316
1229	2276	-346	1423	2326	21	1627	2385	-132	1831	2350	-170	1042	3042	-865	1250	2147	-332
1363	2293	-352	1581	2316	9	1736	2322	-106	2057	2266	-97	1440	3038	-997	1365	2161	-346
1486	2289	-348	1718	2277	3	1928	2297	-100	2171	2232	-68	1778	3031	-1093	1507	2161	-341
1647	2308	-348	1848	2259	-6	2072	2258	-114	2365	2197	-70	2071	2998	-1167	1647	2162	-353
1759	2299	-357	1999	2214	-23	2242	2250	-115	2522	2198	-108	2307	2905	-1195	1795	2162	-346
1883	2227	-362	2150	2171	-29	2354	2232	-151	2651	2216	-173	2363	2879	-1203	1958	2123	-359
2030	2244	-352	2307	2126	-23	2486	2233	-163	2752	2205	-200	2368	2900	-1203	2020	2100	-344
2143	2166	-313	2456	2103	-4	2616	2221	-163	2928	2215	-241	2352	2870	-1245	2215	2049	-321
2302	2135	-287	2582	2063	24	2701	2221	-153	2968	2209	-265	2354	2890	-1202	2325	1970	-293
2423	2098	-264	2718	2018	41	2808	2180	-137	3043	2229	-302	2395	2874	-1223	2430	1956	-271
2597	2092	-228	2900	1996	60	2892	2165	-112	3084	2239	-318	2355	2859	-1217	2604	1950	-227
2670	2035	-227	3007	1984	72	2980	2208	-126	3127	2277	-352	2383	2867	-1194	2730	1926	-216

point 13			point 14			point 15			point 16			point 17			point 18		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-1725	2223	-346	-1531	2198	-336	-1866	1843	-1558	-1525	1889	-262	-1719	1898	-422	-1776	2076	-381
-1615	2184	-344	-1437	2164	-327	-1864	1828	-1566	-1383	1817	-341	-1553	1842	-443	-1694	2048	-418
-1429	2144	-326	-1249	2114	-302	-1854	1848	-1571	-1217	1784	-413	-1405	1811	-459	-1509	1990	-389
-1316	2105	-318	-1069	2075	-288	-1852	1848	-1561	-1171	1753	-489	-1331	1796	-487	-1351	1965	-354
-1174	2058	-289	-982	2068	-260	-1846	1853	-1571	-1062	1655	-614	-1209	1796	-503	-1199	1905	-340
-1041	2035	-275	-830	2004	-260	-1838	1828	-1554	-891	1659	-610	-1096	1823	-488	-1039	1901	-311
-889	2028	-265	-695	1973	-218	-1815	1798	-1571	-815	1697	-697	-1011	1815	-507	-868	1876	-281
-735	1993	-246	-541	1971	-206	-1796	1849	-1574	-739	1717	-761	-906	1806	-508	-735	1860	-277
-601	1993	-258	-366	1956	-205	-1779	1819	-1511	-709	1722	-785	-783	1781	-521	-610	1883	-291
-444	1977	-245	-229	1990	-213	-1758	1789	-1491	-679	1712	-809	-716	1779	-559	-465	1846	-302
-289	1980	-245	-121	1991	-209	-1758	1814	-1537	-674	1716	-800	-563	1777	-536	-300	1870	-302
-162	2009	-235	44	2008	-204	-1767	1809	-1525	-605	1672	-770	-379	1783	-500	-145	1892	-297
3	2041	-242	211	2027	-170	-1801	1859	-1496	-546	1727	-660	-244	1789	-477	-9	1886	-274
152	2072	-208	359	2078	-166	-1721	1815	-1318	-381	1736	-613	-107	1826	-443	158	1934	-251
299	2093	-185	518	2139	-122	-1614	1849	-1162	-246	1742	-585	40	1874	-415	274	1919	-241
448	2130	-158	628	2149	-79	-1331	1823	-933	33	1676	-588	204	1834	-373	423	1956	-214
564	2120	-142	743	2158	-16	-1377	1871	-829	190	1721	-619	370	1857	-362	501	1974	-170
711	2135	-74	882	2180	4	-992	1718	-682	431	1714	-593	554	1872	-308	658	1995	-119
801	2161	-38	982	2188	51	-837	1821	-682	684	1755	-541	680	1855	-292	804	2027	-67
938	2186	1	1135	2219	96	-544	1749	-729	974	1806	-443	826	1872	-228	939	1993	-21
1093	2200	34	1268	2207	129	-166	1729	-783	1289	1776	-290	1007	1868	-173	1019	2044	2
1169	2152	66	1378	2212	140	52	1691	-828	1440	1894	-132	1114	1839	-136	1182	2054	18
1331	2166	76	1477	2179	164	272	1648	-936	1499	1890	-14	1198	1829	-85	1289	2059	37
1476	2164	107	1631	2188	159	820	1555	-1044	1648	1825	101	1378	1769	-27	1430	2043	47
1585	2154	72	1803	2157	148	1249	1464	-1168	1778	1758	149	1556	1774	0	1542	2031	45
1759	2121	74	1918	2132	144	1688	1506	-1159	1919	1780	209	1715	1796	40	1674	2053	29
1872	2127	62	2070	2101	108	2028	1556	-1196	2034	1738	190	1880	1769	61	1773	2006	10
1995	2068	28	2195	2073	100	2243	1595	-1199	2233	1679	236	2060	1718	40	1929	2001	8
2146	2039	22	2332	2023	96	2363	1611	-1224	2407	1648	169	2189	1682	0	2043	1947	14
2303	1992	21	2513	1980	61	2378	1611	-1205	2559	1605	156	2372	1649	-28	2211	1922	-4
2467	1959	46	2625	1978	80	2363	1611	-1224	2709	1626	112	2519	1604	-83	2429	1870	-6
2567	1901	56	2790	1901	109	2339	1582	-1230	2851	1589	78	2637	1580	-125	2531	1841	-14
2731	1871	71	2914	1862	88	2384	1603	-1219	2995	1633	-27	2814	1571	-152	2649	1756	14
2862	1827	60	3041	1792	118	2403	1609	-1194	3113	1578	-98	2911	1544	-200	2832	1713	10
3025	1816	96	3209	1780	154	2391	1582	-1182	3274	1615	-189	3045	1619	-188	2998	1699	24

point 19			point 20			point 21			point 22			point 23			point 24		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-2050	2253	-746	-1804	2180	-1090	-1918	2209	-1458	-1967	2224	-1561	-1703	2131	-1528	-1094	1894	-1476
-1941	2193	-738	-1664	2123	-1069	-1767	2141	-1443	-1830	2179	-1548	-1607	2050	-1529	-1105	1768	-1502
-1777	2134	-715	-1543	2117	-1040	-1712	2098	-1434	-1738	2097	-1548	-1469	2011	-1508	-1027	1860	-1472
-1695	2135	-691	-1441	2087	-1022	-1583	2066	-1435	-1617	2075	-1527	-1377	1947	-1522	-794	1737	-1448
-1519	2073	-652	-1302	2065	-1012	-1444	1998	-1415	-1498	2010	-1502	-1243	1891	-1479	-718	1697	-1419
-1370	2026	-623	-1207	2019	-1001	-1334	1930	-1411	-1379	1947	-1492	-1095	1819	-1481	-360	1443	-1408
-1248	2010	-596	-1066	1972	-975	-1232	1903	-1393	-1272	1904	-1484	-1018	1761	-1461	-251	1476	-1373
-1097	1968	-567	-941	1931	-962	-1085	1855	-1373	-1153	1874	-1472	-896	1735	-1442	-207	1385	-1396
-983	1921	-593	-790	1894	-965	-982	1771	-1364	-1066	1777	-1466	-761	1609	-1455	-17	1280	-1385
-792	1878	-586	-695	1852	-957	-866	1754	-1352	-922	1732	-1444	-625	1610	-1411	-60	1340	-1364
-620	1901	-567	-553	1814	-954	-733	1706	-1322	-799	1706	-1425	-577	1597	-1392	211	1146	-1336
-475	1851	-587	-420	1786	-951	-638	1649	-1329	-686	1615	-1423	-394	1526	-1374	322	1096	-1330
-350	1863	-589	-293	1754	-937	-505	1588	-1312	-582	1565	-1399	-351	1419	-1385	321	1029	-1321
-146	1873	-576	-188	1740	-935	-405	1550	-1306	-431	1545	-1356	-252	1354	-1368	518	974	-1312
-9	1897	-553	-70	1735	-914	-252	1523	-1267	-332	1496	-1380	-95	1411	-1335	683	992	-1267
166	1922	-523	56	1724	-893	-82	1513	-1201	-150	1461	-1279	-36	1329	-1327	739	911	-1281
255	1959	-496	211	1737	-852	73	1524	-1147	2	1470	-1237	161	1406	-1242	960	973	-1199
449	1947	-472	374	1759	-817	218	1546	-1105	155	1525	-1199	450	1362	-1166	1180	909	-1121
587	1980	-415	561	1787	-781	372	1593	-1098	296	1561	-1174	505	1425	-1161	1306	889	-1132
666	2013	-389	757	1814	-778	516	1634	-1103	418	1600	-1192	696	1465	-1146	1489	1015	-1076
811	1999	-355	903	1847	-771	701	1711	-1086	633	1699	-1161	882	1533	-1152	1609	1028	-1089
977	2049	-344	1088	1902	-733	906	1778	-1074	838	1764	-1149	1028	1646	-1122	1815	1122	-1065
1101	2039	-345	1241	1905	-721	1062	1851	-1069	993	1865	-1184	1245	1692	-1141	1981	1193	-1070
1254	2057	-340	1421	1936	-714	1241	1891	-1091	1202	1900	-1196	1444	1742	-1158	2151	1275	-1108
1350	2069	-349	1552	1927	-698	1425	1967	-1089	1384	1988	-1189	1678	1847	-1159	2470	1444	-1092
1492	2081	-351	1709	1959	-695	1605	2002	-1095	1553	2013	-1208	1854	1887	-1171	2415	1607	-1127
1623	2088	-358	1884	1972	-710	1781	2026	-1092	1750	2040	-1213	2014	1934	-1187	2581	1639	-1165
1752	2069	-373	2031	1962	-706	1942	2014	-1120	1926	2053	-1196	2216	1955	-1183	2855	1744	-1134
1897	2040	-382	2167	1973	-699	2081	2011	-1104	2043	2029	-1202	2341	1930	-1170	3062	1666	-1084
2033	2034	-365	2299	1955	-718	2198	2003	-1109	2158	2020	-1214	2436	1906	-1177	3153	1623	-1116
2183	1976	-331	2455	1940	-707	2307	1951	-1109	2242	1982	-1203	2525	1893	-1173	3298	1641	-1105
2311	1901	-336	2600	1917	-698	2406	1889	-1111	2363	1928	-1195	2645	1843	-1162	3377	1540	-1126
2434	1890	-308	2667	1866	-670	2526	1866	-1079	2494	1886	-1170	2786	1779	-1140	3422	1513	-1116
2588	1847	-281	2810	1848	-665	2667	1824	-1032	2633	1841	-1134	2881	1702	-1113	3558	1334	-1038
2723	1833	-227	2908	1809	-655	2790	1782	-1048	2746	1788	-1146	3007	1671	-1114	3773	1373	-1068

point 25			point 26			CM		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-2478	2419	-1674	-1640	2180	-195	-1894	2329	-750
-2280	2285	-1641	-1482	2138	-176	-1776	2288	-739
-2081	2222	-1612	-1349	2096	-157	-1628	2240	-714
-2089	2218	-1635	-1180	2064	-138	-1501	2212	-688
-2080	2279	-1620	-1045	2041	-113	-1354	2167	-667
-1778	1989	-1604	-901	1982	-98	-1205	2129	-645
-1723	2063	-1554	-777	1974	-83	-1080	2098	-623
-1704	2073	-1571	-623	1927	-75	-938	2073	-602
-1465	1898	-1547	-449	1939	-88	-799	2038	-607
-1242	1777	-1542	-302	1950	-89	-648	2010	-600
-1307	1827	-1516	-157	1934	-89	-495	2001	-594
-1146	1744	-1515	-12	1966	-80	-362	1988	-596
-1097	1774	-1495	116	2014	-55	-213	1986	-591
-906	1673	-1491	244	2049	-34	-57	2004	-587
-786	1596	-1473	391	2073	17	84	2013	-573
-661	1557	-1455	530	2106	72	233	2030	-547
-491	1688	-1354	638	2132	98	363	2058	-518
-463	1768	-1312	756	2139	159	517	2065	-483
-256	1795	-1268	887	2168	183	667	2089	-450
-121	1906	-1263	1022	2180	209	802	2114	-421
63	1978	-1276	1158	2180	264	942	2121	-391
263	2077	-1275	1268	2170	276	1085	2147	-367
590	2109	-1279	1380	2157	279	1212	2156	-356
660	2266	-1281	1522	2128	288	1357	2151	-349
872	2228	-1316	1678	2134	270	1485	2157	-351
1227	2185	-1298	1825	2133	262	1625	2165	-351
1301	2193	-1329	1960	2096	237	1759	2162	-359
1451	2248	-1315	2118	2061	214	1899	2147	-367
1567	2175	-1310	2240	2020	220	2024	2116	-371
1652	2090	-1314	2379	1984	194	2168	2104	-368
1697	2091	-1312	2569	1952	203	2314	2066	-351
1854	2029	-1291	2686	1901	206	2441	2028	-343
2023	2028	-1279	2845	1842	207	2568	1989	-321
2238	2032	-1226	3002	1818	220	2730	1958	-301
2323	1900	-1236	3113	1740	228	2852	1928	-295

**Tableau A 3.1 :** feuille Excel indiquant les coordonnées cartésiennes en 3D des 26 points caractéristiques de la skieuse (thèse Ruby)

## Ordre d'apparition des marqueurs

Chemin pour le fichier du tutorial	Marqueurs par ordre d'apparition ds le slf	nombre de marqueurs ON		temps
C:\PATINEUR\SLF\	8	16		0.000
	9			0.05882
	10			0.11765
	18			0.17647
	17			0.23529
	16			0.29412
	7			0.352940
	19			0.41176
	6			0.47059
	5			0.52941
	4			0.58824
	3			0.64706
	20			0.70588
	21			0.76471
	22			0.82353
	23			0.88235
				0.94118
				1.00000
				1.05882
				1.11765
				1.17647
				1.23529
				1.29412
				1.352940
				1.41176
				1.47059
				1.52941
				1.58824
				1.64706
				1.70588
				1.76471
				1.82353
				1.88235
				1.94118
				2.0000

**Figure A4.1** : feuille Excel indiquant l'ordre d'apparition des marqueurs et la base de temps pour le fichier slf



## PROGRAMMATION DU MODELE DYNAMIQUE DU CORPS HUMAIN DE LA SKIEUSE SOUS LIFEMODELER

### Génération des segments

La première fenêtre de commande de LifeModeler est la création des segments du corps humain, figure A.5.1.

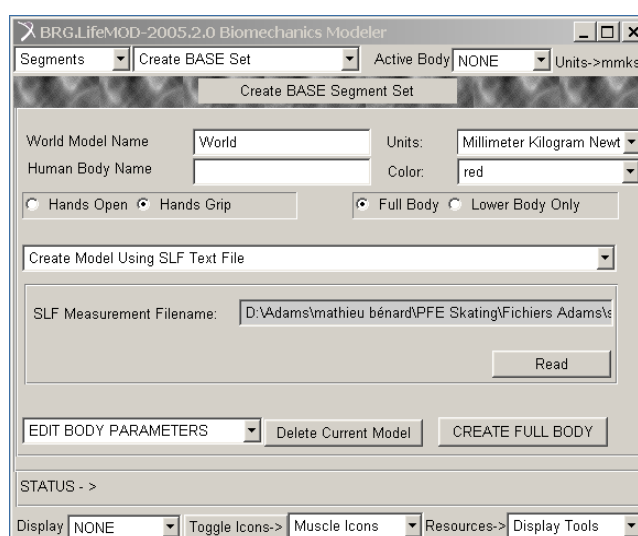
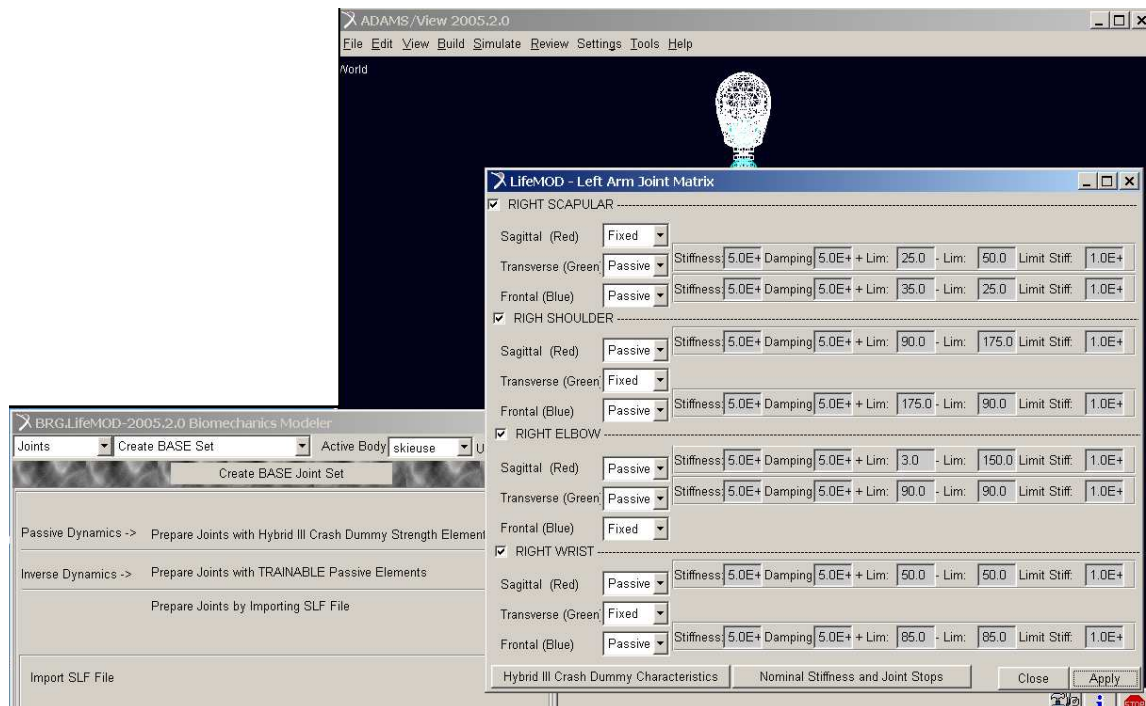


Figure A5.1 : génération des segments

### Génération des articulations

Les articulations du squelette sont définies : chacune d'entre elles peut être mise en *passive*, ou *fixed*, dans chacun des 3 plans de l'espace, sagittal, transverse et frontal, voir figure A5.2 : c'est à dire, lui faire suivre librement les mouvements des membres reliés dans les 3 D, ou alors la bloquer. Si elle est passive sa rigidité peut aussi être modifiée par la raideur "stiffness" et l'amortissement "damping" ainsi que par la limite angulaire. Ces articulations tiennent compte des limites de mobilité réelle (angles mini et maxi de rotation de chaque articulation).

Les données articulaires utilisées sont identiques à celles présentées dans le tutorial de la marche de LifeModeler.



**Figure A5.2 :** *fenêtre définissant la mobilité des articulations de l'épaule, du coude et du poignet*

## Génération des muscles

Tous les muscles du corps proposés par le logiciel, sont modélisés (muscle coché dans la commande).  
 "Force output %" est le réglage de l'intensité de la force développée par le muscle en %  
 pCSA : "physiological cross sectional area" : surface transversale du muscle (donnée par la base de données)  
 Max stress et rest load aussi donnés par la base de données.





MUSCLE	FORCE OUTPUT %	pCSA	MAX. STRESS	REST LOAD
<input checked="" type="checkbox"/> Gluteus Maximus 1	100	1427.2984370	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Gluteus Maximus 2	100	1427.2984370	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Gluteus Medius 1	100	1410.3146143	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Gluteus Medius 2	100	1096.7662048	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Psoas Major *	100	903.41131753	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Adductor Magnus	100	1109.8306555	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Semitendinosus	100	612.72584983	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Vastus Medialis	100	3053.1776518	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Vastus Lateralis	100	4494.1935845	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Biceps Femoris 1	100	668.90326964	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Biceps Femoris 2	100	1881.9436247	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Rectus Femoris	100	2192.8791197	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Iliacus	100	1186.9113924	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Gastrocnemius 1	100	2728.5244163	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Gastrocnemius 2	100	1299.9193994	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Soleus	100	7752.4841783	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Tibialis Anterior	100	1332.5807100	0.15	4.55E-002

\* Psoas Major must be deactivated if a lower body model is used

Close Apply

**Tableau A5.3 :** *muscles de la jambe et de la cuisse modélisés par LifeModeler*

MUSCLE	FORCE OUTPUT %	pCSA	MAX. STRESS	REST LOAD
<input checked="" type="checkbox"/> Pectoralis Major 1	100	174.22300124	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Pectoralis Major 2	100	158.98484026	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Pectoralis Major 3	100	163.69789477	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Pectoralis Major 4	100	174.88222336	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Pectoralis Major 5	100	169.29005906	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Pectoralis Minor 1	100	153.53031575	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Pectoralis Minor 2	100	152.00518545	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Pectoralis Minor 3	100	151.49680471	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Trapezius 1	100	406.70282729	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Trapezius 2	100	412.80339615	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Trapezius 3	100	411.27825393	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Trapezius 4	100	410.76987320	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Latissimus Dorsi 1	100	601.92017295	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Latissimus Dorsi 2	100	599.88669766	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Latissimus Dorsi 3	100	597.85317470	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Deltoideus 1	100	491.60202932	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Deltoideus 2	100	212.50221927	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Deltoideus 3	100	168.27329759	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Biceps Brachii 1	100	79.307055611	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Biceps Brachii 2	100	97.100304007	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Brachioradialis	100	62.022181996	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Triceps Brachii 1	100	311.12767741	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Triceps Brachii 2	100	310.61929667	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Triceps Brachii 3	100	343.15552095	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Pronator Teres	100	203.35141364	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Flexor Carpi Ulnaris	100	21.351898671	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Flexor Carpi Radialis	100	27.960818482	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Flexor Pollicis Longus	100	27.960818482	0.15	4.55E-002

ki   11:03

**Tableau A5.4 :** *muscles du bras et du tronc modélisés par LifeModeler*

MUSCLE	FORCE OUTPUT %	pCSA	MAX. STRESS	REST LOAD
<input checked="" type="checkbox"/> Scalenus Anterior	100	86.569015499	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Scalenus Medius	100	79.909859914	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Scalenus Posterior	100	79.373147083	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Splenius Cervicis	100	77.555440720	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Splenius Capitis	100	81.190853446	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Sternocleidomastioideus	100	79.373147083	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Rectus Abdominis	100	343.54636770	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Obliquus Extremus Abdom	100	908.85281229	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Erector Spinae 1	100	140.56923053	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Erector Spinae 2	100	147.84005598	0.15	4.55E-002
<input checked="" type="checkbox"/> Erector Spinae 3	100	148.44596047	0.15	4.55E-002

**Tableau A5.5 :** *muscles du cou et du tronc modélisés par LifeModeler*

## Génération des Motion Agent

### Notation des marqueurs

Tous les marqueurs du modèle se voient attribuer le coefficient 1 par le logiciel. Toutefois, leur coefficient fluctue selon le mouvement étudié. Pour la marche par exemple, les chevilles, les orteils et les talons ont un coefficient 10 car ils sont à la base du geste. Pour modéliser le décalé, nous avons dû déduire en fonction de nos connaissances, les articulations jouant un rôle important afin de leur attribuer des marqueurs ayant plus de poids. Les agents des poignets, des épaules et des genoux ont été choisis pour avoir une influence renforcée, nous leur attribuons le coefficient 9 dans la base de données. Nous conservons également les coefficients des marqueurs de la marche, vu l'importance des pieds lors du geste, particulièrement lors de la prise de carre, figure A5.6.

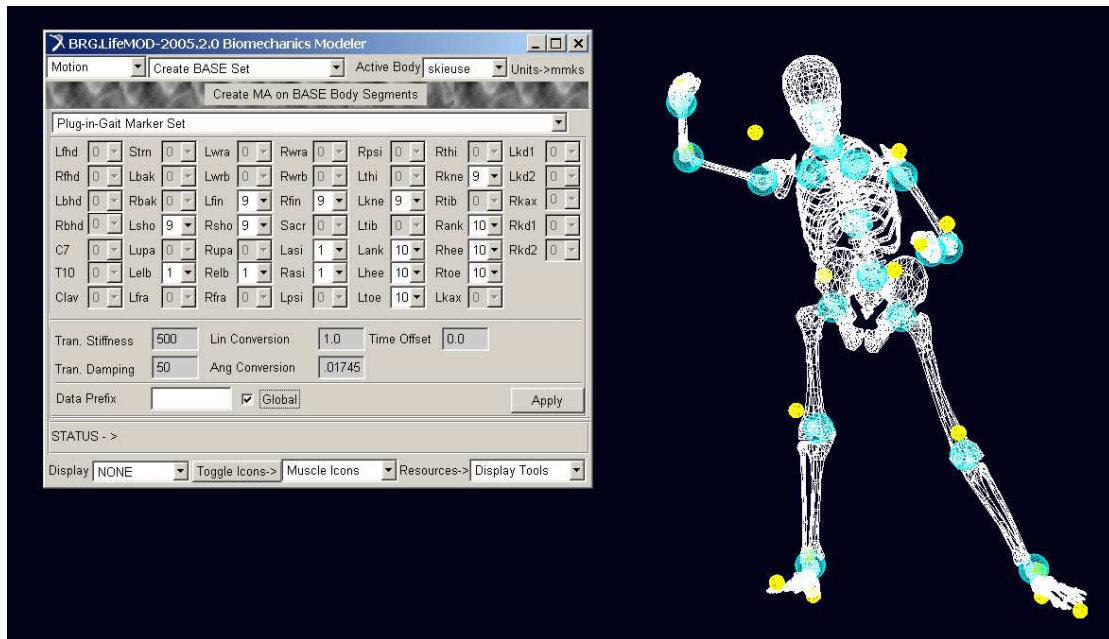


Figure A5.6 : notation des marqueurs

## Création de quatre motion agents supplémentaires

Une commande de LifeModeler permet de créer de nouveaux *Motion Agents*.

Nous ajoutons deux marqueurs situés sur la tête de la skieuse ainsi que deux marqueurs sur la colonne vertébrale, ce qui permet un guidage du haut du corps plus fin et plus proche de la réalité.

## Les splines

Les splines sont les trajectoire du motion agent. Il nous faut créer trois splines pour les coordonnées X, Y et Z en fonction du temps t. Nous transcrivons les coordonnées dans de nouveaux fichiers (.cmd) pouvant être importés par LifeModeler.

nouveaux marqueurs	Nom des nouveaux marqueurs	Nom des Agents	Position dans repère ADAMS
26	.World.skieuse_Head.sommet_tete	Agent26	-1.0343040496, 751.0396433545, 12.5884550254
14	.World.skieuse_Head.front	Agent14	-1.0343040496, 675.6416630117, 69.3793154134
13	.World.skieuse_Neck.cou	Agent12	0.0, 460.064200726, 0.1014683122
12	.World.skieuse_Lower_Torso.pelvis	Agent13	9.4909894012, -91.2524303424, -9.2140655296

Tableau A5.7 : génération des fichiers des splines des nouveaux marqueurs

## Création du motion agent

Une fenêtre du logiciel permet de créer un motion agent, figure A5.9.

Nous allons prendre l'exemple de la création du motion agent du sommet de la tête. Nous spécifions, la partie du corps intéressée et le choix de la position du premier point de la trajectoire : position automatique correspondant au premier point de la trajectoire de la spline ou position manuelle, choisie par l'opérateur.

Les trajectoires de translation en X, Y et Z sont importées grâce à la "commande navigator" figure A5.8, outil d'ADAMS, qui permet de lire les fichiers des splines, les rotations sont laissées libres.

Sur la figure A5.10, il apparaît une sphère jaune, sphère du mouvement au premier point de la trajectoire, la sphère rouge, marqueur du motion agent, sphère du segment, est à l'intérieur de la jaune.

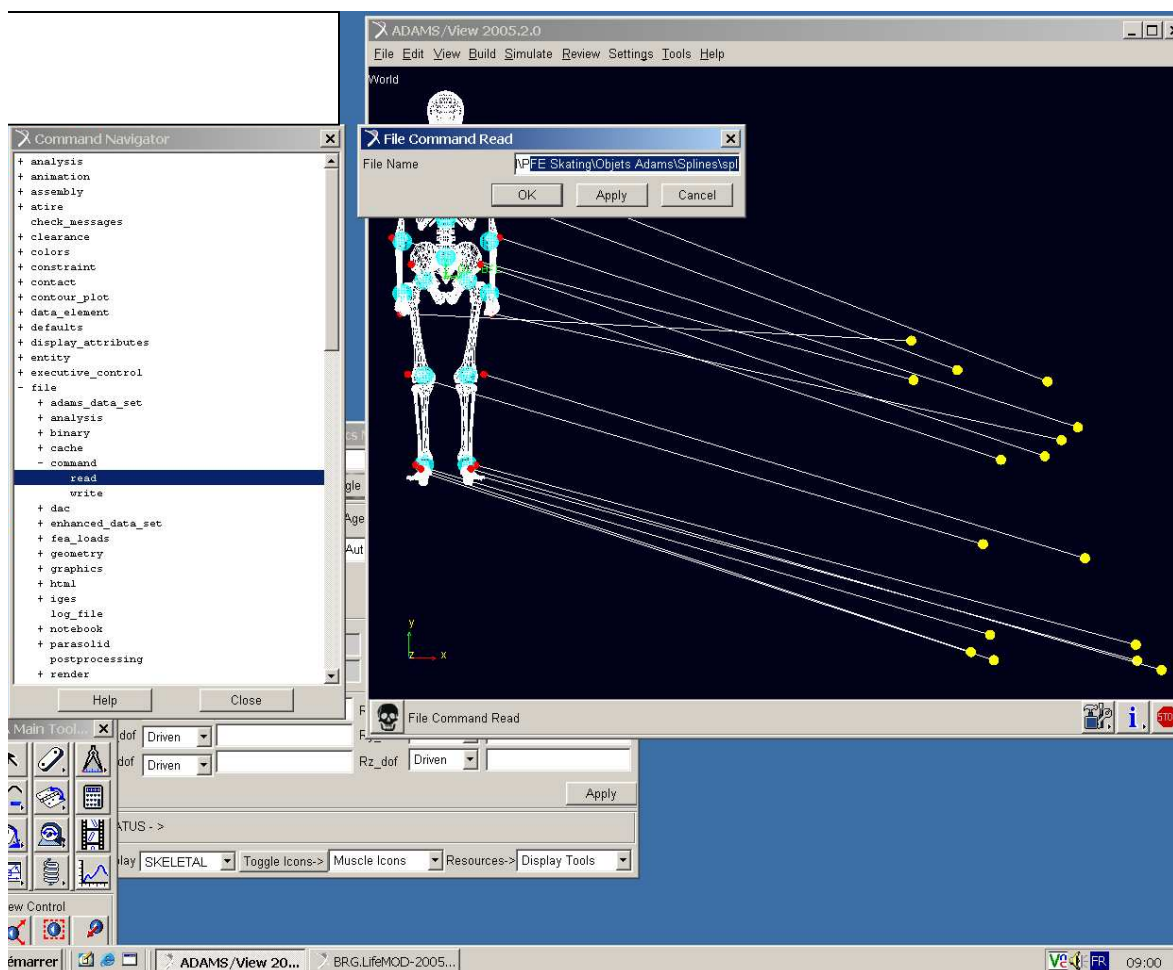


Figure A5.8 : lecture des splines



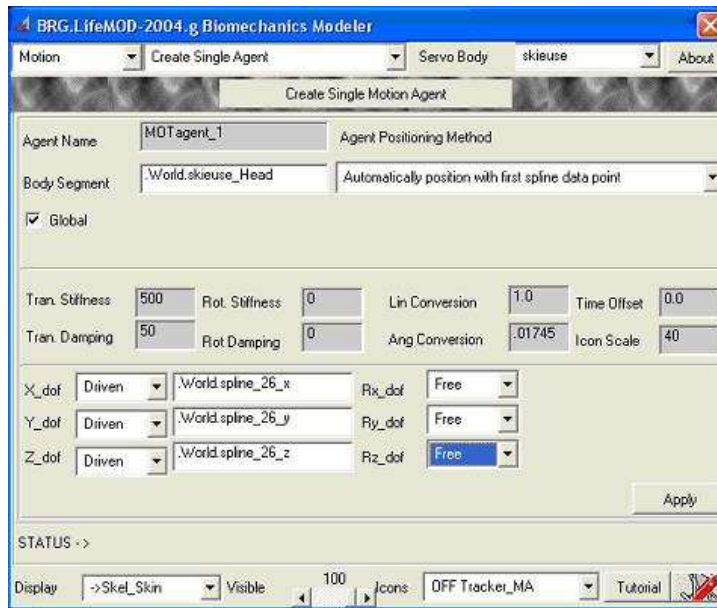


Figure A5.9 : fenêtre de création des motion agents

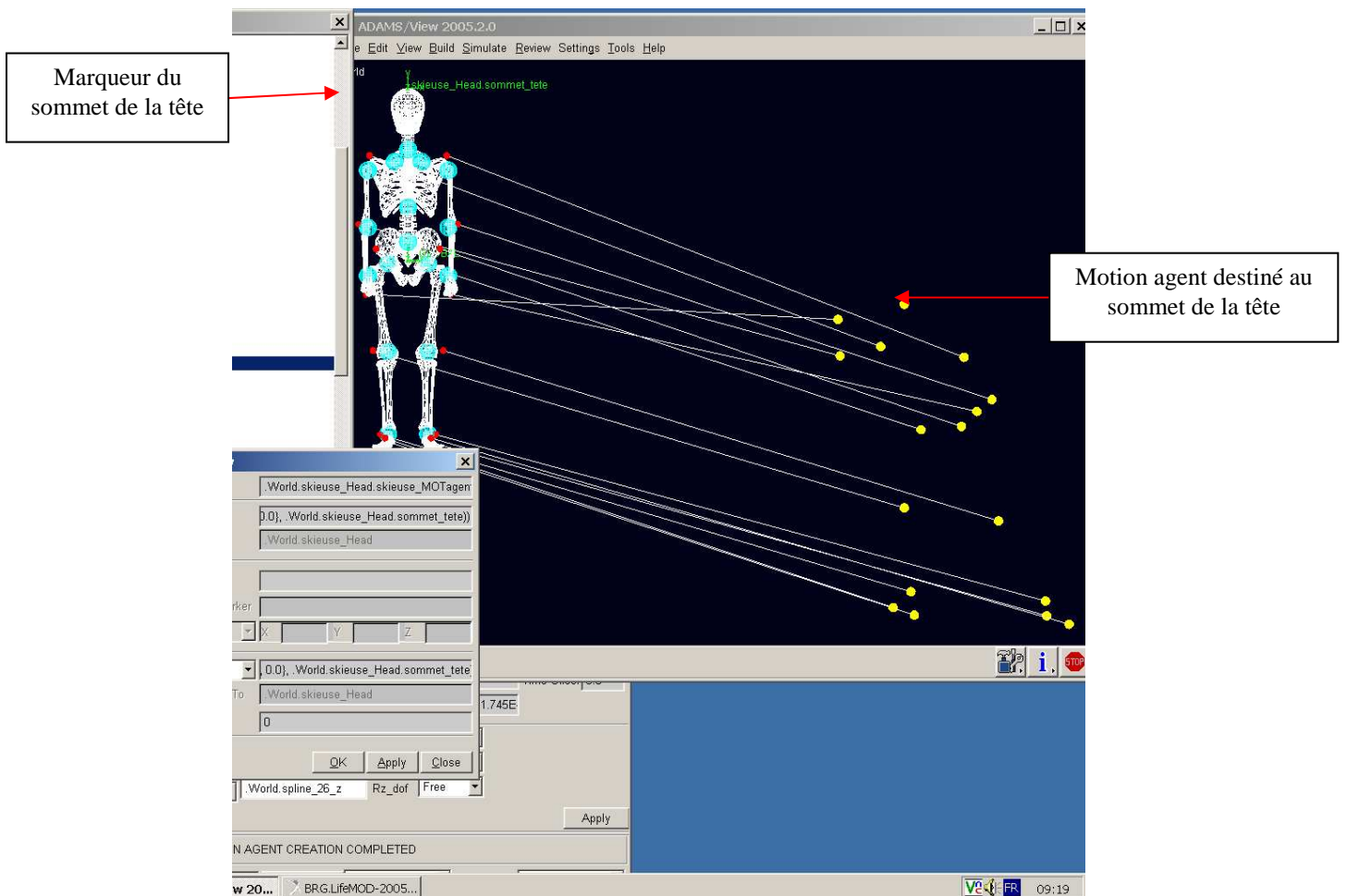


Figure A5.10 : génération du motion agent

## Création du marqueur

Grâce à la command navigator, nous créons les marqueurs et les situons précisément sur les segments, à la position des marqueurs d'A. Ruby. Sur la figure A5.11, le marqueur du pelvis correspond au repère vert en 3D "skieuse\_Lower\_Torso.Skel\_pelvis.V663"

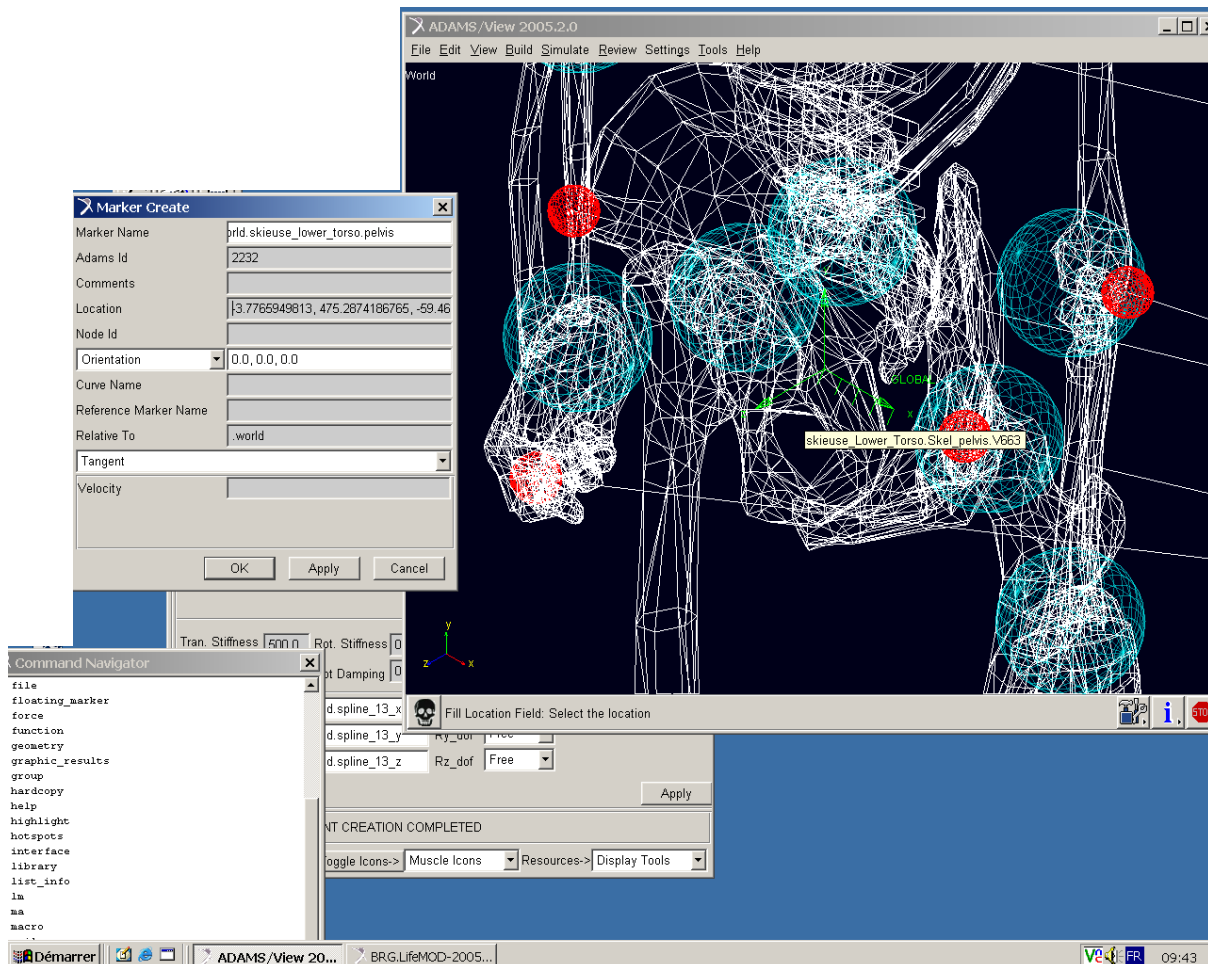
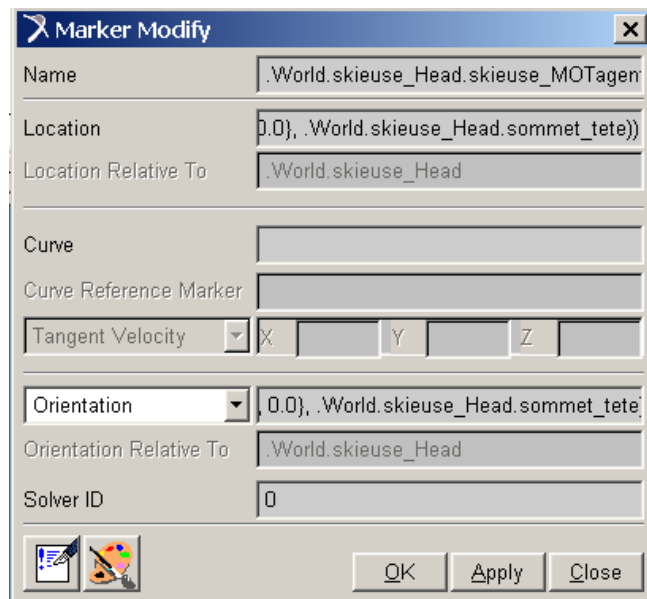


Figure A5.11 : création du marqueur du pelvis

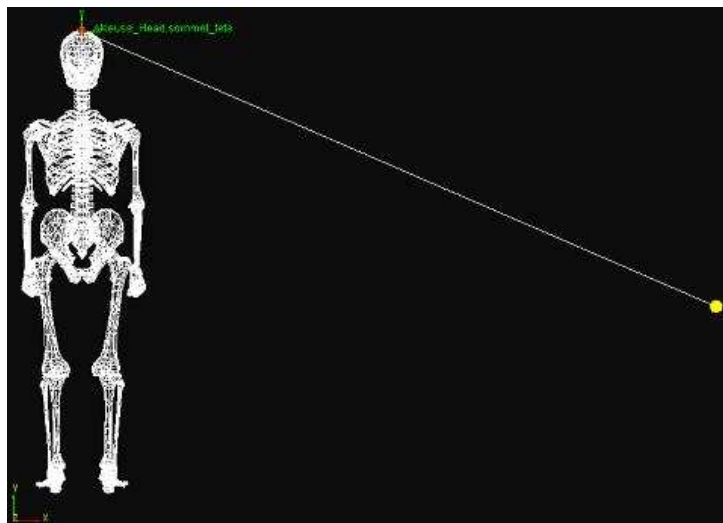
## Positionnement du motion agent

La command navigator permet de modifier l'emplacement du marqueur du motion agent (localisation et orientation), pour le positionner sur le marqueur créé, figure A5.12.

La sphère fixée à l'ossature du modèle (rouge) vient se placer sur le marqueur créé et est liée à la sphère du mouvement (jaune) par une liaison spécifique (un trait blanc), figure A5.13.



**Figure A5.12 :** *fenêtre de déplacement du marqueur du motion agent sur le marqueur du sommet de la tête*

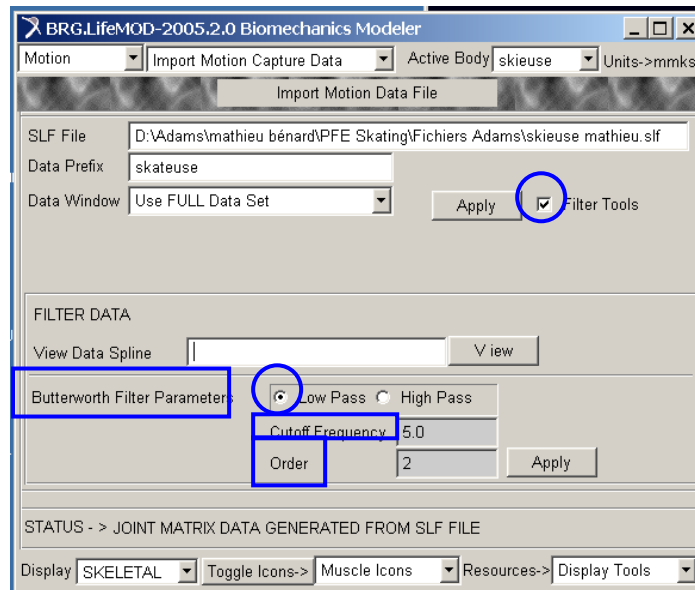


**Figure A5.13 :** *visualisation du motion agent du sommet de la tête*

### **Filtrage des données**

Nous filtrons les données pour avoir un rendu plus fidèle de la réalité, afin d'avoir un mouvement plus fluide.

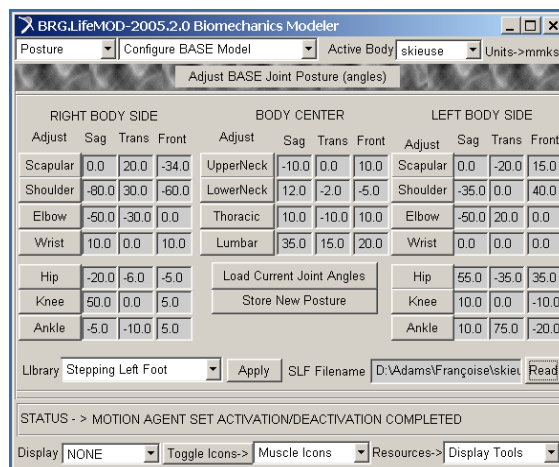




**Figure A5.14 :** *fenêtre de commande de filtrage des données*

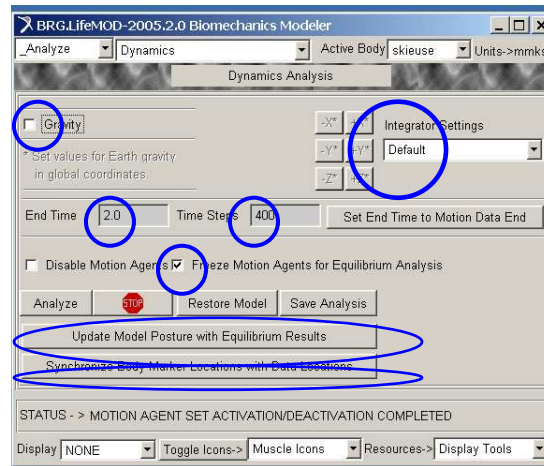
## Posture de départ

Nous affinons la posture de départ en utilisant une fonction de Lifemodeler. Par étude comparée de photos, nous définissons les trois angles de chaque articulation, figure A5.15.



**Figure A5.15 :** *ajustement de la posture de départ*

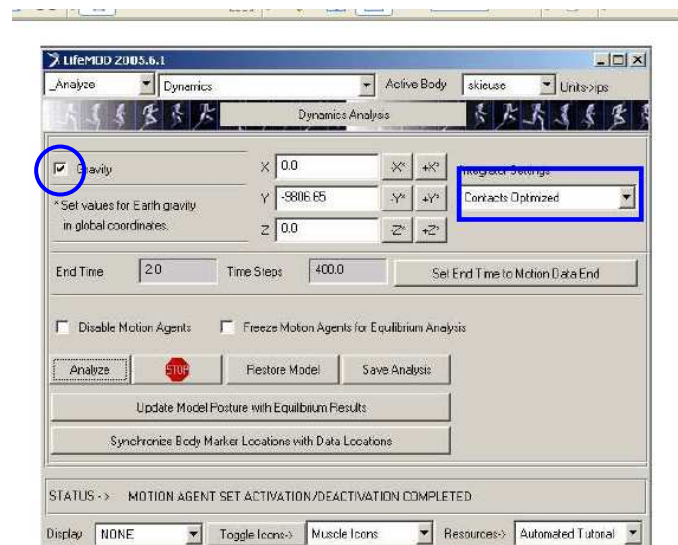
## Analyse statique



*Figure A5.16 : analyse statique du modèle*

La fenêtre de commande, figure A5.16, montre que l'analyse est de 2 secondes et qu'elle se décompose en 400 pas de temps. La gravité est prise en compte.

## Simulation de dynamique inverse



*Figure A5.17 : commande de la simulation dynamique inverse*

## Préparation du modèle au niveau des articulations

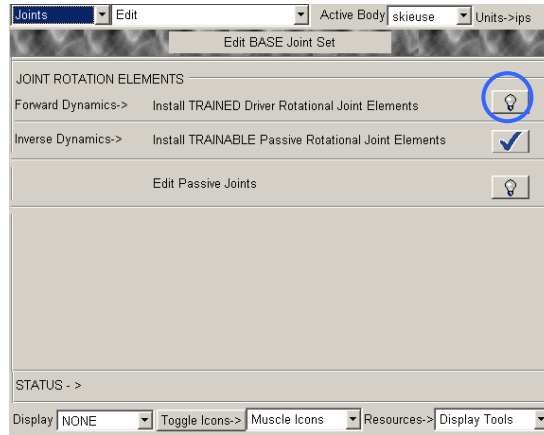


Figure A5.18 : commande d'édition des articulations pour la simulation dynamique

## Suppression des motion agents

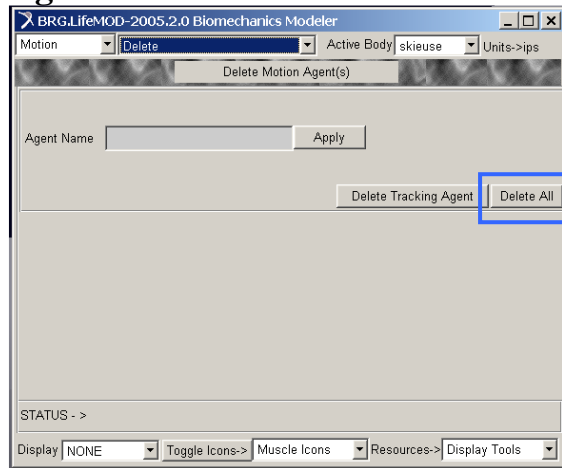


Figure A5.19 : commande pour supprimer tous les motion agents

## Création du tracker agent

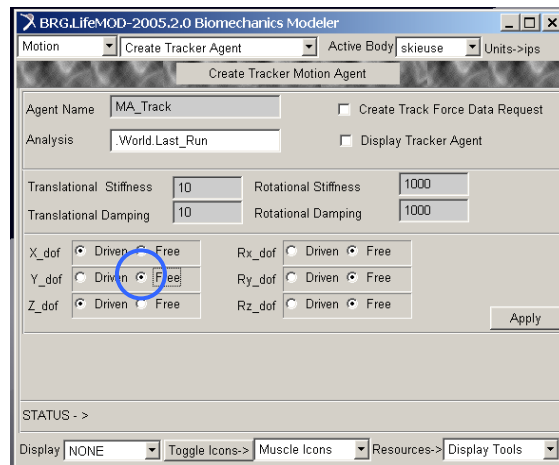


Figure A5.20 : création du "Tracker Agent"

## Analyse de simulation dynamique directe

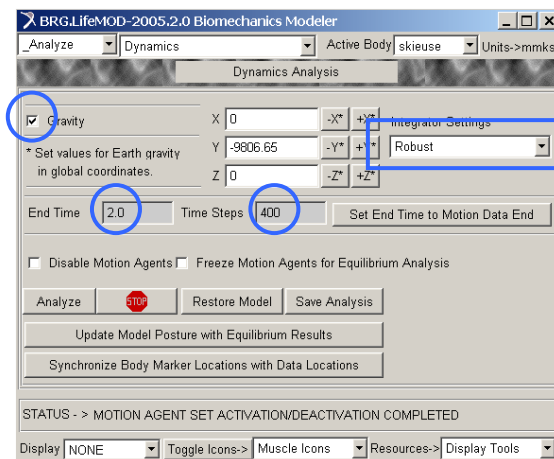
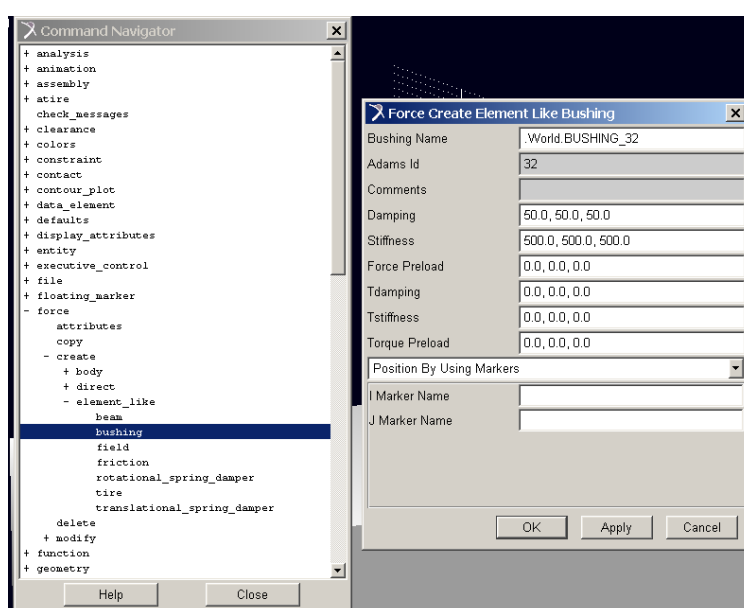


Figure A5.21 : commande de la simulation dynamique directe

## CREATION DES LIAISONS "BUSHING" DES MAINS ET DES PIEDS

Pour créer un bushing figure A6.1, il faut désigner les deux marqueurs et entrer des valeurs de rigidité et d'amortissement en translation et en rotation dans les trois directions de l'espace. Les valeurs de raideur,  $K$ , *stiffness* et d'amortissement,  $C$ , *damping*, en translation et en rotation ont été choisies de façon à ce que le mouvement soit correct, (pas de liaison trop lâche où le ski se décolle trop du pied en tournant et où les bâtons s'éloignent trop des mains, ou trop rigide avec un ski collé au pied ou des bâtons restant à la verticale), et que les efforts soient proches de ceux donnés par la littérature.



**Figure A6.1 :** fenêtre de commande de création d'un bushing par Command Navigator

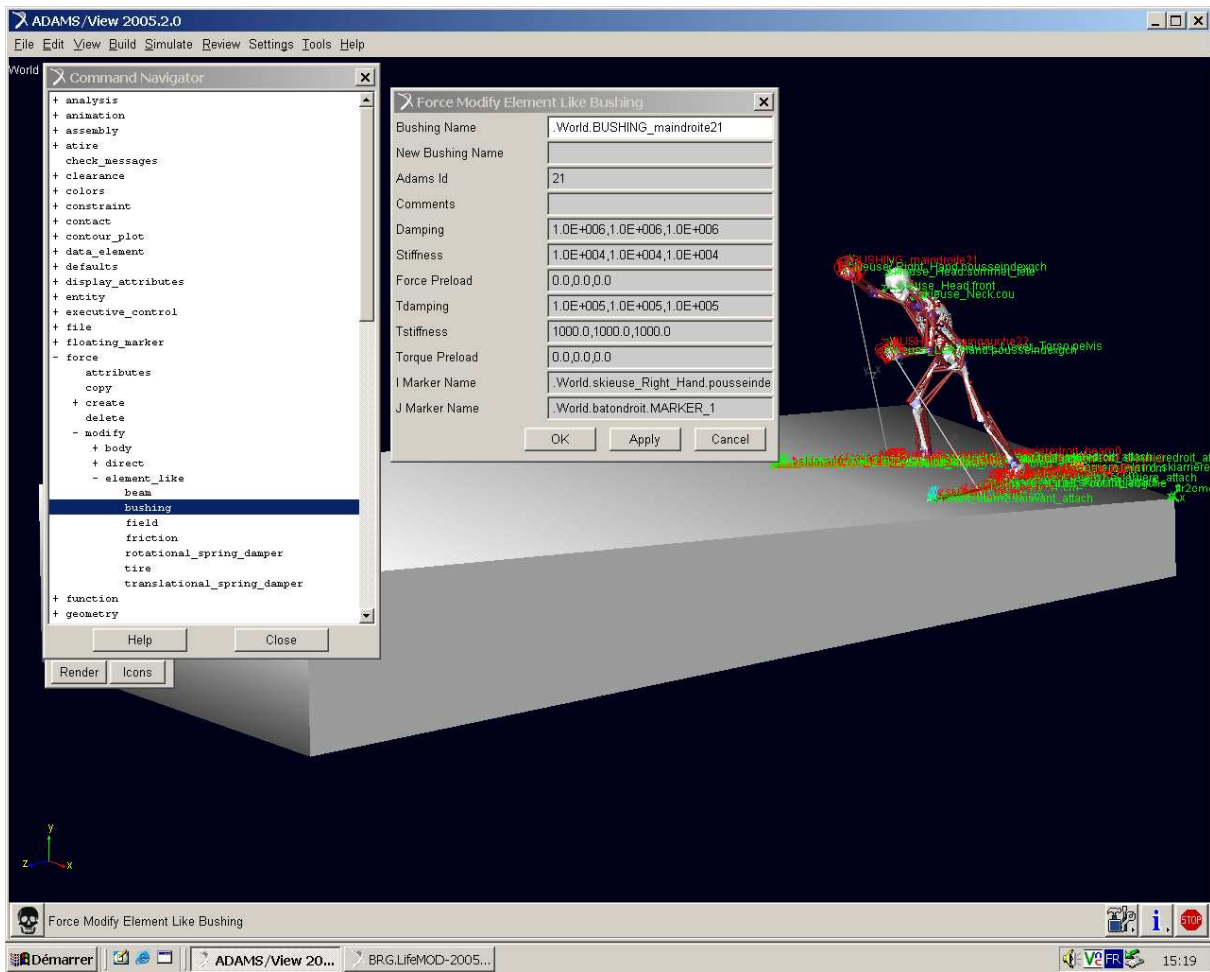


Figure A6.2 : fenêtre de commande de la liaison bushing de la main droite

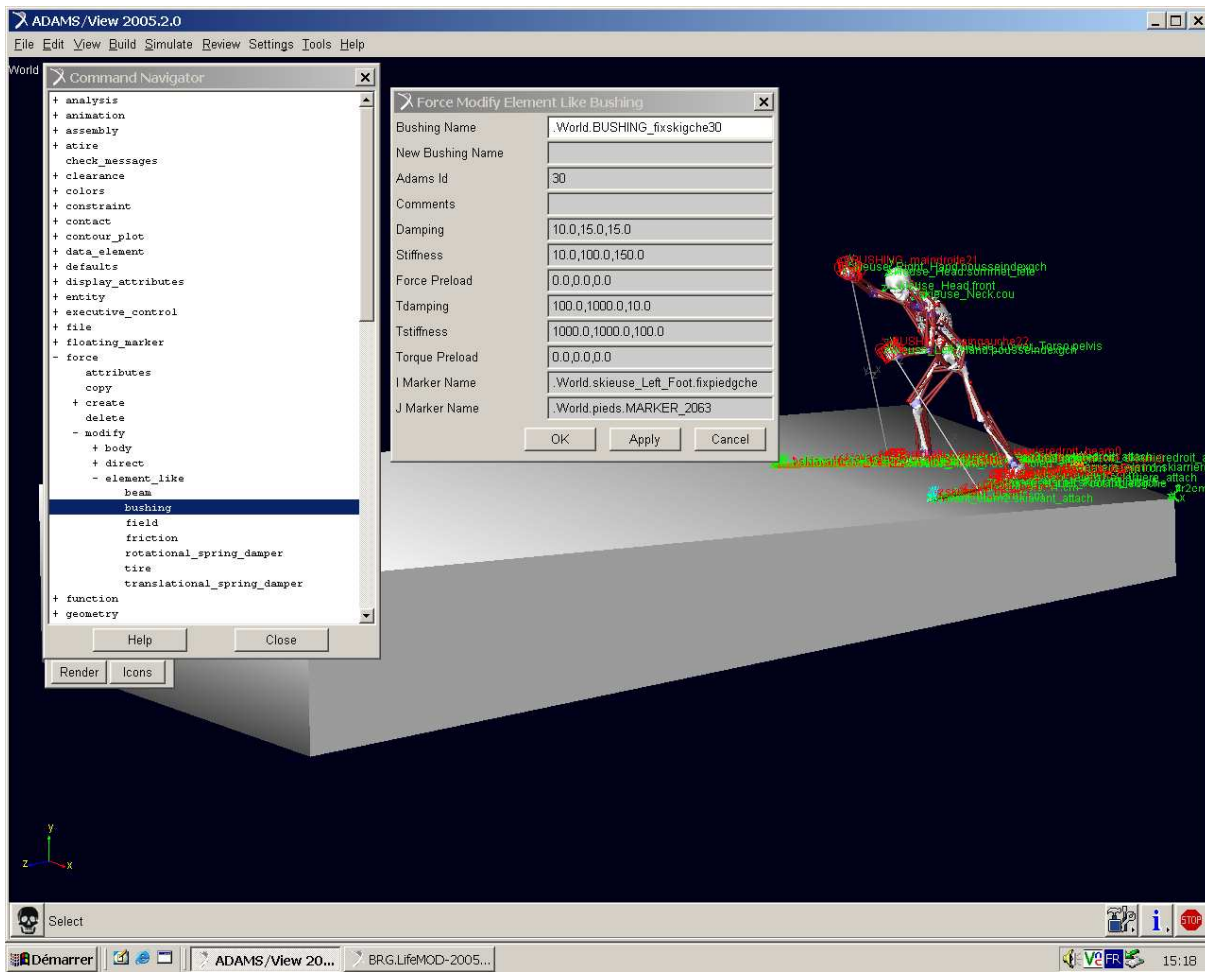


Figure A6.3 : fenêtre de commande de la liaison bushing du pied gauche





## CREATION DES CONTACTS

Définition des contacts du modèle, figure A7.1.

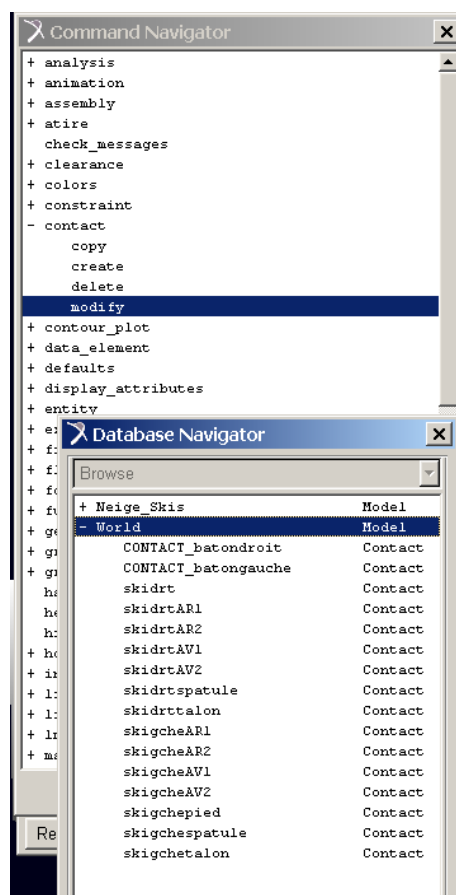


Figure A7.1 : les contacts du modèle

## Valeurs des contacts du bâton, figure A7.2.

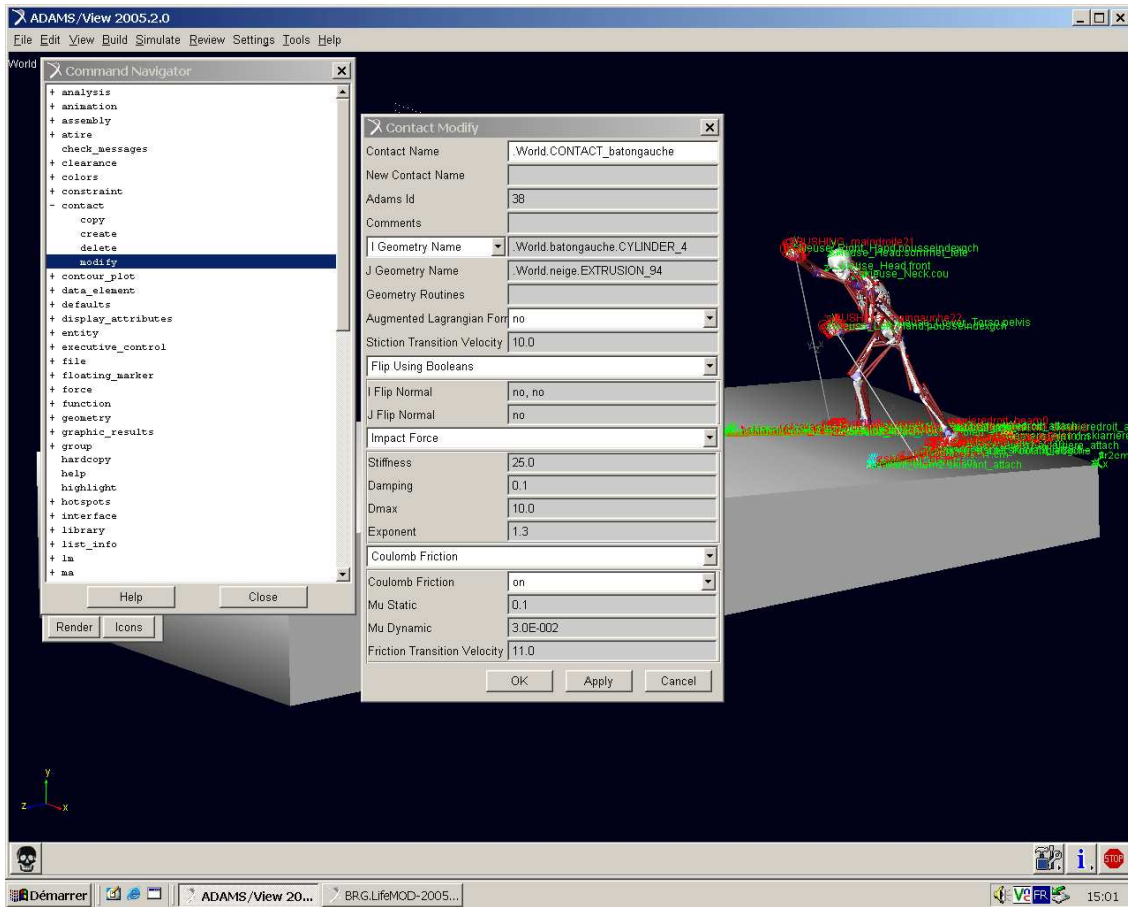


Figure A7.2 : fenêtre de commande du contact entre le bâton gauche et la neige

## Valeurs des contacts du ski, figure A7.3.

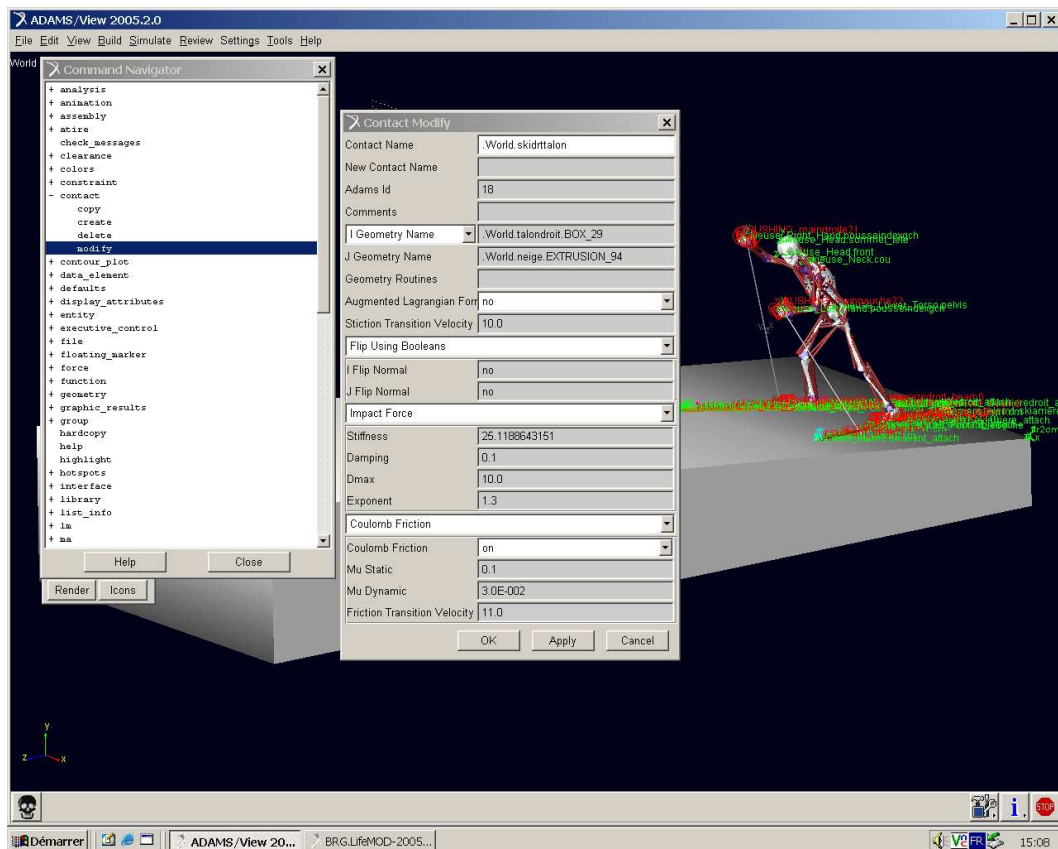


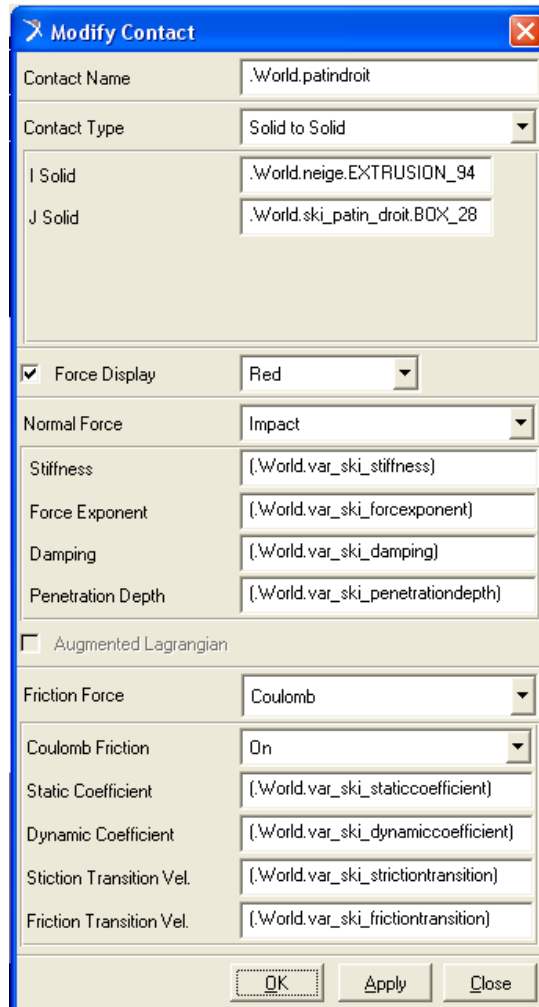
Figure A7.3 : fenêtre de commande du contact entre le patin droit du ski et la neige

## Création de variables pour les contacts des skis

Le nombre de contacts identiques étant importants, nous avons créé des variables ".World.var\_ski\_..." figure A7.4. Celles-ci permettent de modifier rapidement les conditions de contact sans être obligé d'éditer manuellement chaque contact. Ces variables ont été un gain de temps pour affiner le modèle. Les valeurs de chaque paramètre de contact apparaissent dans le tableau A7.1.

Variables pour les skis	
Nom	Valeur
var_ski_stiffness	25,11 N/mm
var_ski_forceexponent	1,3
var_ski_damping	0,1 kg/s
var_ski_penetrationdepth	10 mm
var_ski_staticcoefficient	0,1
var_ski_dynamiccoefficient	0,03
var_ski_strictiontransition	10 mm/s
var_ski_frictiontransition	11 mm/s

**Tableau A7.1 :** valeurs de contact du ski



**Figure A7.4 :** fenêtre de commande de modification des contacts avec variables

## Préparation à l'analyse dynamique directe du modèle de la skieuse dans son environnement

### Les articulations

Les articulations peuvent être éditées une à une, figure A 8.1, chacune d'entre elle devient autonome pour piloter le modèle grâce à l'enregistrement réalisé lors de la simulation dynamique inverse.

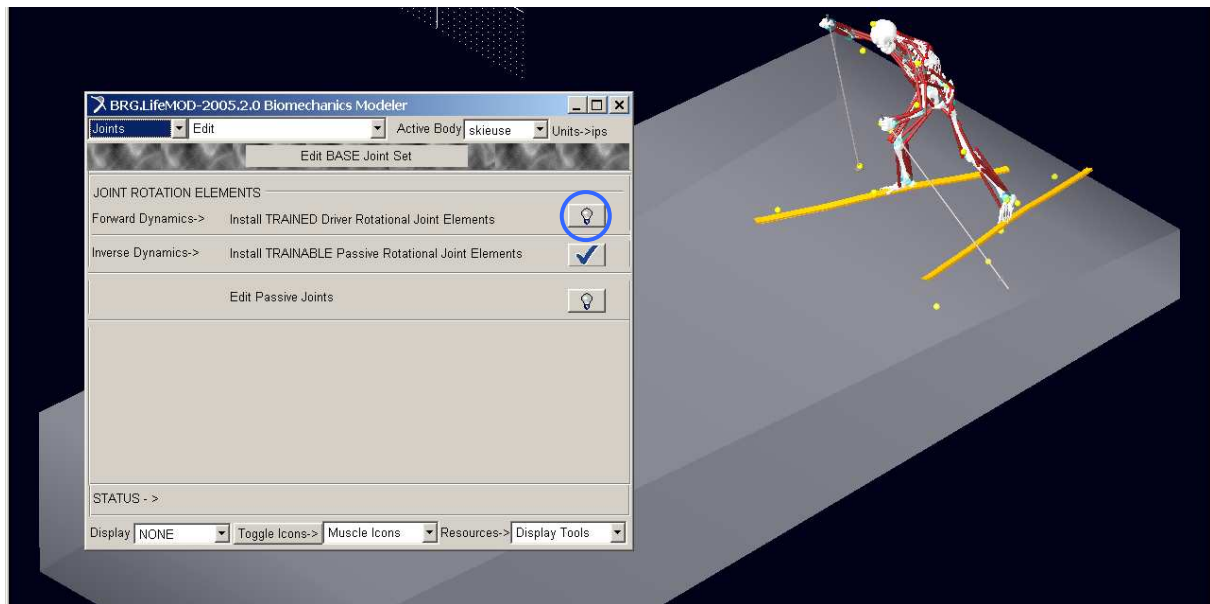


Figure A 8.1 : commande d'édition des articulations pour la simulation dynamique

### Les muscles

De même que pour les articulations, chaque muscle du modèle est traité et devient autonome pour conduire le modèle, figure A 8.2.

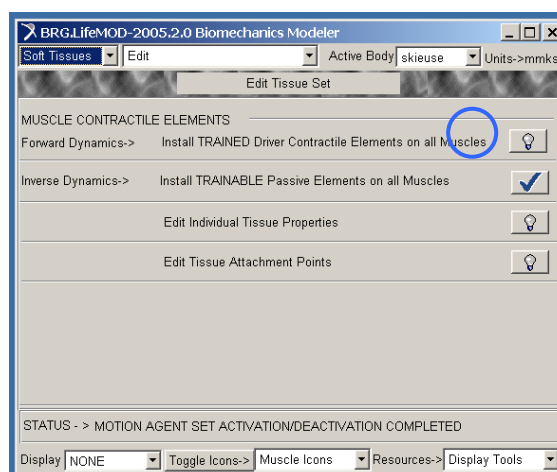


Figure A 8.2 : commande d'édition du tissu musculaire pour la simulation dynamique

### Annulation des motion agents

Les motion agents sont annulés, figure A 8.3, ou désactivés, figure A.8.4. Le système de pilotage disparaît pour céder la place à une situation dans laquelle le modèle est préparé pour être maître de son action et agir selon les lois de la mécanique, la gravité et les contacts sont pris en compte.

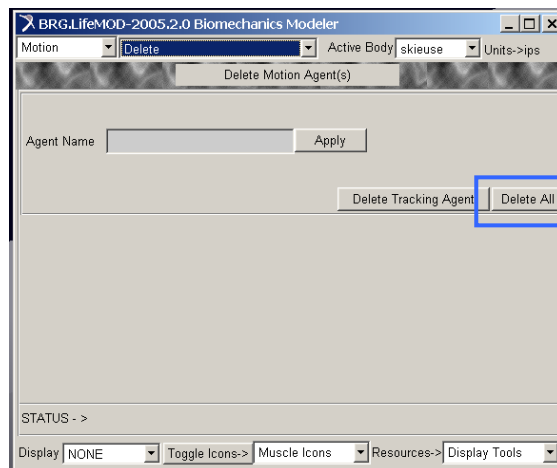


Figure A 8.3 : commande pour supprimer tous les motion agents

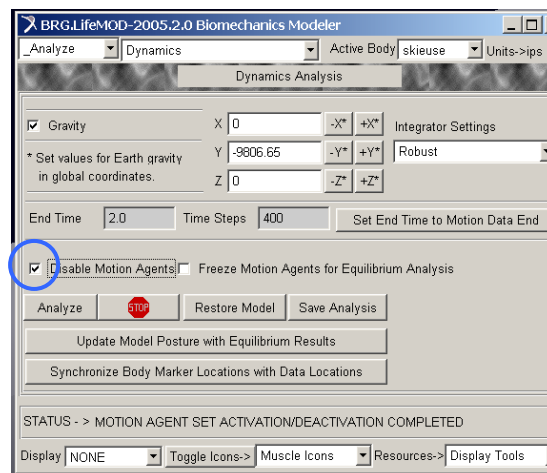


Figure A 8.4 : onglet pour désactiver les motion agents

### Création du tracker agent

Un "tracker agent" est créé. C'est un bushing représenté figure A 8.5, situé au niveau du bassin du modèle humain qui permet un meilleur maintien lors du déplacement entre le haut et le bas du corps. Des valeurs de raideur et d'amortissement peuvent être choisies. Nous avons laissé par défaut les valeurs du modèle de la marche. Nous avons aussi libéré les mouvements de rotation et celui de translation verticale en Y, afin que le modèle soit réellement en pesanteur, figure A 8.6. Le tracker agent n'est conduit qu'en X et en Z, c'est à dire lors des mouvements longitudinaux et latéraux. Le poids de la skieuse en Y, sur l'axe vertical, agit librement, rendant la modélisation plus proche de la réalité, surtout au niveau des contacts sur les skis.

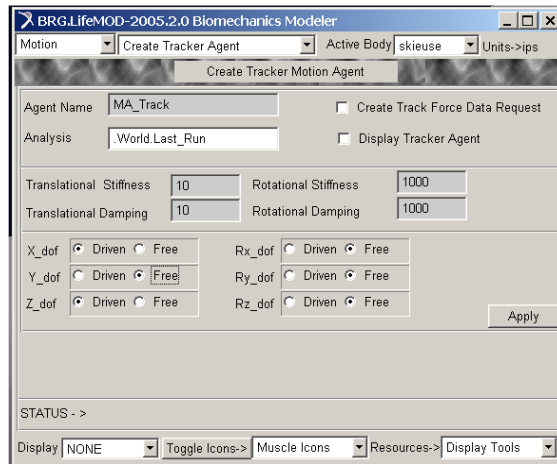


Figure A 8.5 : création du "Tracker Agent"

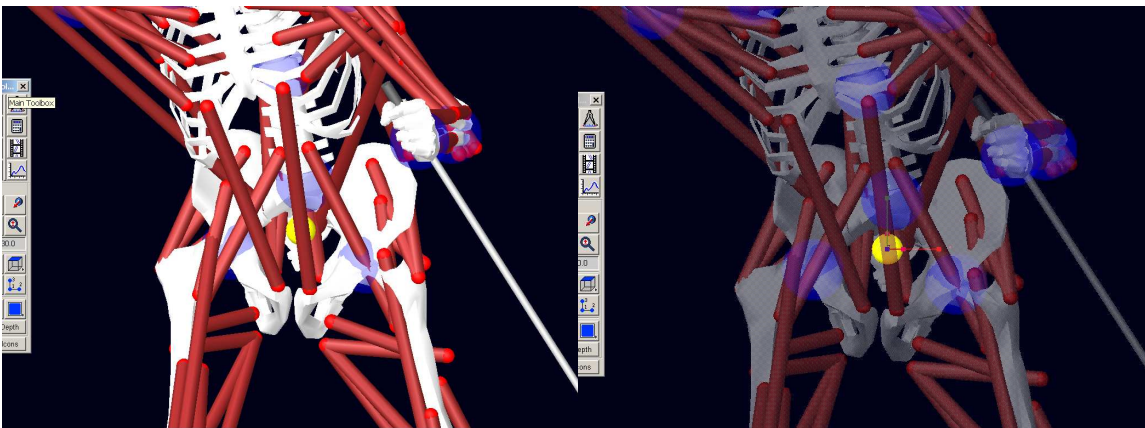


Figure A 8.6 : "Tracker agent" : sphère jaune au centre du bassin

### Simulation dynamique directe

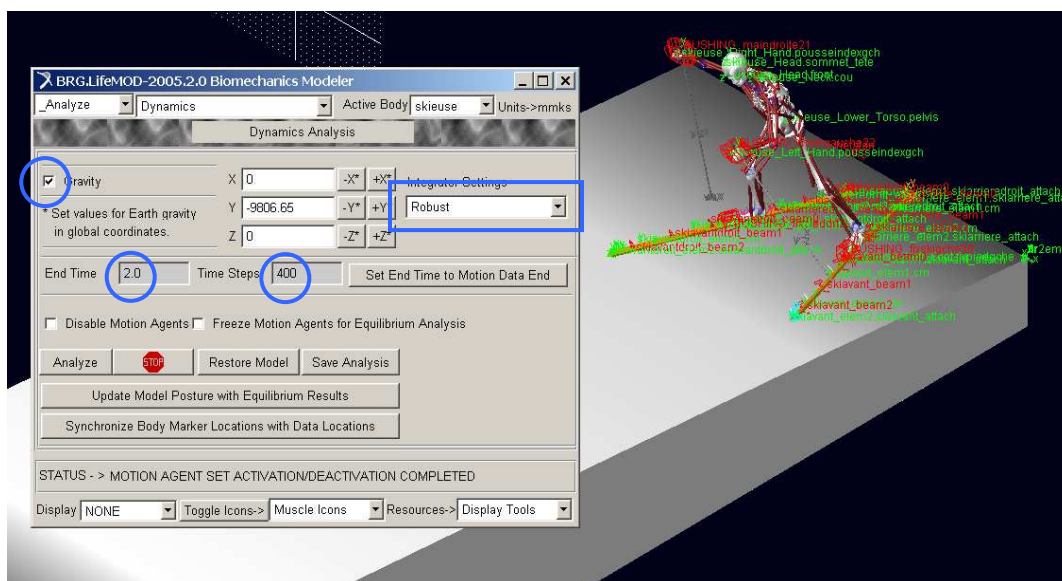


Figure A 8.7 : commande de la simulation dynamique directe





## **TITRE : CONTRIBUTION A LA MODELISATION CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE D'UN GESTE SPORTIF : LE PAS DE PATINEUR**

Le mouvement du pas de patineur est utilisé en skating, pratique moderne du ski de fond. Il résulte de l'association d'un geste technique et d'une évolution technologique. Le geste étudié : le décalé, est une des techniques qui correspond à une poussée latérale alternative des jambes associée à une poussée décalée des bras. Pour rendre compte de sa complexité gestuelle et pouvoir l'analyser au niveau mécanique, notre but est de construire un modèle dynamique en trois dimensions. Ce modèle est réalisé grâce au logiciel de biomécanique LifeModeler, module intégré du logiciel ADAMS. Outil de modélisation et de simulation cinématique et dynamique, il permet de modéliser le corps humain comme un robot anthropomorphe. La première étape consiste à construire un modèle humain, reproduisant la technique du décalé sur un sol dur. Pour valider ce modèle, nous analysons finement la cinématique en la comparant aux données recueillies dans la littérature.

Dans un second temps, le modèle est équipé. Les paramètres de contact sont élaborés de manière à rendre l'effet d'un sol enneigé.

Nous procédons à une simulation dynamique inverse puis directe. La simulation inverse rend assez bien compte de la réalité d'un point de vue cinématique, l'ordre de grandeur des forces de contact est bon. Pour la simulation dynamique directe nous utilisons l'ensemble des muscles disponibles dans le logiciel. Le modèle est stable, mais tous les problèmes n'ont pu être réglés notamment au niveau de la préhension des bâtons.

Ce travail permet de montrer la méthodologie de modélisation d'un skieur équipé de bâtons et de skis souples. Le modèle permet d'accéder aux efforts musculaires lors d'un cycle de décalé.

**MOTS CLES :** Modélisation, cinématique, dynamique, ski de fond, pas de patineur, skating.

## **TITLE : CONTRIBUTION TO THE KINEMATIC AND DYNAMIC MODELING OF A SPORTING GESTURE: THE SKATING IN CROSS-COUNTRY SKIING**

The skating movement is used in the modern practical of cross-country skiing. It results from the association of a technical motion and a technological development. The technical motion studied is the offset. It is one of the techniques, it corresponds to an alternative lateral thrust of the legs associated with a push shifted with the arms. To give an account of its gestural complexity and to be able to analyze it at the mechanical level, our goal is to build a three-dimensional dynamic model. This model is carried out thanks to the biomechanics software LifeModeler, plug in of ADAMS software. Dynamic simulation and numerical model tool, LifeModeler makes it possible to model the human body like an anthropomorphic robot.

The first stage consists in building a human model, reproducing the movements of the offset on a hard ground. To validate this model, we finely analyze kinematics by comparing it with the data collected in a thesis.

In the second time, the model is equipped. We elaborate the contact parameters so as to simulate the effect of a snow-covered ground.

We carry out an inverse dynamic simulation then a forward dynamic simulation.

The inverse simulation gives rather well an account of the reality from a kinematic point of view, the order of magnitude contact forces is good. For forward dynamic simulation we use the whole of the muscles available in the software. The stability of the model is correct, but not all the problems could be regulated particularly the gripping of the poles.

This work makes possible to show the modelling method of a cross-country skier equipped with poles and flexible skis. The model gives access to the skier muscular efforts.

**KEY WORDS :** Modelling, dynamic, kinematic, cross-country skiing, skating.