



Rapport de fin de stage international

Optimisation du mouvement du violoniste afin de minimiser la fatigue musculaire

Étudiant :

Théophile GOUSSELOT EI18

Tuteur pédagogique :

David MOREAU

Tuteur laboratoire :

Benjamin MICHAUD

Directeur du laboratoire :

Mickaël BEGON

Effectué du 18 Mars 2020 au 04 Août 2020

En télétravail depuis Montréal

Résumé

Le présent rapport s'intègre au sein d'une thèse portant sur l'optimisation du mouvement du violoniste afin de minimiser la fatigue musculaire. Ma contribution à ce projet fut parallèlement partagée entre le développement d'un outil générique de contrôle optimal : *BiorbdOptim*, et l'optimisation du mouvement du violoniste grâce à cet outil. *BiorbdOptim* est une interface entre un utilisateur et un solveur de problèmes de contrôle optimal. Cet outil est développé par et dans une première finalité, pour les chercheurs du laboratoire *s2mlab*. L'utilisation de *BiorbdOptim* et d'un modèle, issue de la librairie *BIORBD*, des membres supérieurs humains portant un violon et son archet, m'a permis d'écrire un problème de contrôle optimal. Ce problème s'est progressivement raffiné, en intégrant successivement : le mouvement de tiré-poussé via des couples articulaires, le maintien du contact entre l'archet et la corde, le respect du parallélisme entre l'archet et le chevalet, le maintien du même angle pour l'archet, une force de contact entre l'archet et le violon, les muscles aux alentours du bras, une modélisation de fatigue musculaire, plusieurs mouvements successifs de tiré-poussé. La finalité de cette modélisation est de parvenir à déterminer le plus fidèlement possible, et par du contrôle optimal le mouvement minimisant la fatigue musculaire dans le but d'aider à l'enseignement du violon.

Abstract

This report is part of a thesis on the optimization of the violinist's movement in order to minimize muscular fatigue. My contribution was shared between the development of a generic optimal control tool: *BiorbdOptim*, and the optimization of the violinist's movement thanks to this tool. *BiorbdOptim* is an interface between a user and a solver of optimal control problems. Further, it is developed by and also for the researchers of the *s2mlab* laboratory. The use of *BiorbdOptim* and a model of human upper limbs carrying a violin and its bow, from the *BIORBD* library, allowed me to write an optimal control problem. This problem has been progressively enhanced, successively integrating these concepts : the back and forth movement via articular couples, maintaining contact between the bow and the string, respecting parallelism between the bow and the bridge, maintaining the same angle for the bow, a contact force between the bow and the violin, the muscles around the arm, a model of muscular fatigue, several successive pull-push movements. The purpose of this modeling is to determine as accurately as possible, and through optimal control, the movement that minimizes muscle fatigue in order to assist in the teaching of the violin.

Remerciements

Mickaël BEGON Benjamin MICHAUD David MOREAU

Paul WEGIEL

Ariane DANG Kilpéric NOUVELLET Quitterie BOISSÉ Amedeo CEGLIA Bailly FRANCOIS
Léa SANCHEZ

Eve CHARBONNEAU Najoua ASSILA

Clara ZIANE

Fabien DEL MASO Béatrice MOYEN-SYLVESTRE Anne Laure MÉNARD + tout le laboratoire

Klara NOVOTNA Frédérique Alexandre MICHAUD : Les événements culturels rythmant les été
de Montréal -> FAM

Bruno MONSARRAT Les familles SOLAR

Sylvie et Philippe GOUSSELOT

Camille WILHELM

À mes amis musiciens, et à ceux qui aiment la musique...



Figure 1: Un violon muni d'une mentonnière .

La mentonnière, utilisée pour la première fois au début du XIX^{ème} siècle, est une des premières adaptation du violon au corps du musicien, elle sépare la sueur du violoniste du violon afin de ne pas altérer le vernis à sa surface.

À l'image de la mentonnière, mon travail est de perfectionner le “couple” du musicien et de son violon.

0. Table des matières

Résumé	ii
Remerciements	iii
Glossaire	vii
I Introduction	1
1 Stage international	2
2 Laboratoire s2m	3
2.1 Histoire	3
2.2 Domaine d'expertise	3
2.3 Effectif	4
2.4 Recherche scientifique	4
3 Contexte	5
3.1 Covid-19	5
3.2 Télétravail	5
3.3 Construction d'équipe	6
II BiorbdOptim	7
4 Outils de modélisation	8
4.1 Commande optimal	8
4.2 Biorbd	10
4.3 BiorbdViz	12
5 Réalisation	15
5.1 Nécessité collective	15
5.2 Commande optimale numérique	15
5.2.1 Direct multiple shooting	15
5.2.2 Exemple d'implémentation	16
5.3 cahier des charges	21
5.4 Développement collaboratif	21
5.5 Logiciel sur mesure	21
5.6 Article scientifique	21
6 Développement	22
6.1 Transfert de langage	22
6.2 Besoin/Réalisation1	22
6.3 Besoin/Réalisation2	22

6.4	Besoin/Réalisation2	22
6.5	Exploitation des résultats	22
6.5.1	Affichage graphique des états et controles	22
	Matplotlib	22
	Intégration	22
6.5.2	Visualisation sur Biorbd-viz	22
6.5.3	Sauvegarde	22
	Contexte	22
	Résultat	22
	22
6.6	Exemples	22
6.7	Tests	22
III	Optimisation de la gestuelle du violoniste	23
7	Modélisation initiale	25
7.1	Violon	25
7.1.1	Jeu	25
7.1.2	Modélisation	25
7.2	Muscles	25
7.2.1	Fonctionnement	25
7.2.2	Modélisation	25
8	Écriture du problème	26
8.1	BiorbdOptim	26
8.2	Structure du problème	26
8.3	Ajout1	26
8.4	Ajout2	26
8.5	Ajout3	26
8.6	Ajout4	26
8.7	Ajout5	26
9	Résultats	27
IV	Conclusion	28
10	Conclusion	29
A	Annexes	31

0. Glossaire

acados - 16

Anaconda - 8

casadi - 12

github : service de gestion de développement de logiciels individuel ou collectif - 5

gitkraken : interface graphique pour logiciels de gestion de développement de logiciels - 5

linux - 8

MHE Moving horizon estimation - 22

microsoft teams : application de communication collaborative - 5

numpy - 12

opopt - 16

pomodoro : technique de gestion du temps avec alternance de temps de travail (25 minutes) et de pauses (5 minutes) - 6

slack : plate-forme de communication collaborative - 5

zoom video communications : service de téléconférence - 5

Part I

Introduction

1. Stage international

Mon cursus à l'École des Mines de Saint-Étienne me permet au deuxième semestre de deuxième année de réaliser un *projet industriel* sur le campus ou un *stage international*. J'ai souhaité partir à l'étranger, l'expérience associée me semblant davantage complète et engageante. La dimension professionnelle du stage, mettant en jeu des interactions sociales différentes de celles rencontrées au sein d'associations et de groupes de projets étudiants en est la première raison. Mon choix s'est porté sur le Canada et la province du Québec. Principalement motivé par le laboratoire de simulation et modélisation du mouvement : *s2m*, la culture québécoise et les splendides paysages ne m'ont que confortés dans ce choix.

Mme Camille WILHELM, étudiante de la promotion précédente ayant réalisé un stage international au laboratoire s2m m'en a fait une présentation globale : activités de recherches, état d'esprit, encadrement et méthodes de travail. J'ai ensuite échanger avec M. Benjamin MICHAUD, ancien tuteur de Mme Camille WILHELM. La discussion a porté sur ses activités de recherches, ses besoins et mes compétences. Cette série d'échange, entre autre, m'a permis de prendre conscience de l'intérêt de s'essayer à un travail de recherche et non industriel, dans l'optique d'appréhender fidèlement ces deux mondes.

2. Laboratoire simulation et modélisation du mouvement

2.1 Histoire

En 2008, M. Mickaël BEGON fonde le laboratoire de Simulation et Modélisation du Mouvement dont l'objectif est la recherche en biomécanique et la formation de personnel hautement qualifié en kinésiologie. D'abord installé dans les locaux du Centre de réadaptation Marie-Enfant à Montréal, le laboratoire migre à Laval en 2011, lors de la fondation du nouveau campus de l'université de Montréal.

2.2 Domaine d'expertise

Le laboratoire s2m est porté vers le développement de nouvelles connaissances sur la motricité humaine à partir de mesures et de modèles de simulation pour des applications en réadaptation, prévention des blessures et amélioration de la performance sportive et artistique. On peut citer des projets phares comme l'optimisation dynamique d'acrobaties, l'optimisation du geste violonistique et pianistique, ou encore la conception d'orthèses plantaires personnalisées. Les projets se rapportent tous à une thématique musicale, sportive ou ergonomique. Le laboratoire S2M fonctionne majoritairement grâce aux subventions des organismes du Québec et du Canada comme la fondation Canadienne pour l'innovation ou l'Institut de recherche en Santé et Sécurité au travail. Il est aussi en relation avec des partenaires industriels.

Le laboratoire bénéficie d'équipement de pointe pour les mesures biomécaniques:

- Un ergomètre isocinétique.
- Un système optoélectronique de 18 caméras.
- Un système EMG: Électromyographie (intramusculaire et de surface).
- Des plateformes de force sur une piste de marche.
- Un tapis instrumenté pour la marche.
- Un piano acoustique.

2.3 Effectif

Supervisé par M. Mickaël BEGON et M. Fabien DEL MASO, le laboratoire de recherche universitaire s2mlab peut s'apparenter à un outil pédagogique de formation étudiante. L'effectif de recherche regroupe en moyenne 25 chercheurs. Il se renouvelle très régulièrement, allant du stagiaire de quelques mois à la thèse ou au doctorat de plusieurs années, à titre d'exemple, on peut dénombrer 6 arrivants lors de mon stage. L'objectif de ce renouvellement est de proposer à un maximum d'étudiants de vivre une expérience scientifique afin d'insuffler un goût pour la recherche, amenant certains à faire suite à leur stage avec une thèse ou un doctorat. Le laboratoire est découpé en plusieurs thématiques, en

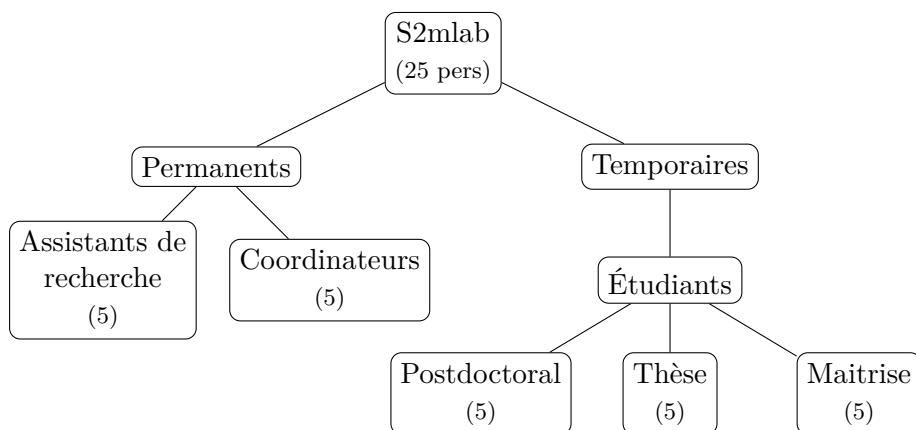


Figure 2.1: Organigramme du laboratoire

tant que stagiaire de Benjamin MICHAUD, j'ai rejoint l'équipe de *optimal control*, *commande optimale* en français. Composé d'une dizaine de chercheurs, l'équipe se réunit tous les mardi matin lors d'un tour de table où chacun expose ses avancées et ses problèmes. L'aspiration de cette réunion est double, débloquer rapidement les chercheurs qui sont en difficultés et s'assurer d'une collaboration efficace : jouir de l'expérience des autres chercheurs pour ne pas essayer de réinventer l'eau chaude. M. Mickaël BEGON, professeur agrégé, participe à cette rencontre et apporte, entre autre, une vision biomécanique et un sens de l'efficacité.

2.4 Recherche scientifique

Il est important de différencier la recherche scientifique de la recherche industrielle. Si la première se veut collaborative et nécessite le concours de plusieurs laboratoire, la deuxième est par nature concurrentielle afin de commercialiser en premier des technologies et de déposer des brevets.

Un chercheur scientifique se doit donc de publier des articles afin de partager ses recherches à ses homologues. A travers ses articles, et les citations de ses articles, le chercheur peut appuyer ses demandes de financement. La recherche, n'engendrant pas de profit direct, nécessite de faire appel à des acteurs extérieurs. La collectivité assume en grande partie ce rôle en finançant les universités, qui finance ensuite le laboratoire s2mlab.

3. Contexte

3.1 Covid-19

Lors de mon arrivé le 15/03/20, l'université de Montréal a fermé ses portes à la totalité de ses étudiants, professeurs et chercheurs. Les locaux du laboratoire s2m ont ainsi été fermés, privant les chercheurs de matériel expérimental et de certaines ressources informatiques.

3.2 Télétravail

L'obligation de télétravail pour l'ensemble des chercheurs du laboratoire a nécessité la mise en place de plusieurs outils informatiques :

Messagerie : *slack* puis *microsoft teams*.

Visioconférence : *zoom video communications*, comprenant une fonctionnalité de *remote control* : prise de contrôle à distance de l'ordinateur.

En complément de ceux existants :

Gestion de développement de logiciels : *github* couplé avec *gitkraken*.

Répartition de tâches : *trello*.

Partage de fichiers : *serveurs du laboratoire*.

En écartant *trello* dont l'utilisation est rendue caduc par le système d'*issue* proposé par *github*, on peut considérer que 3 logiciels de communication permettent de répondre aux besoins émanants de collaboration.

Mode	Temps	Type	Échéance	Logiciel
oral	long (\simeq heure)	réflexions stratégiques/développement	long terme	<i>zoom</i>
écrit	court (\simeq min)	aide rapide, mémorisation par écrit	court terme	<i>microsoft teams</i>
écrit	instantané	fichiers de programmation (code)	court terme	<i>github, gitkraken</i>
écrit	court (\simeq min)	liste d'idées (issue)	long terme	<i>github, gitkraken</i>

S'il est pertinent de remarquer qu'un échange oral permet un débat profond et efficace autour d'une stratégie de développement, on peut regretter l'éphémérité de l'information. Il est possible d'y palier en inscrivant l'information essentiel sur teams, sur les issues de github ou au sein des lignes de codes.

La répartition des échanges est simple, néanmoins, elle implique, à chaque instant, de réfléchir au moyen de communication le plus adapté.

Avec du recul, il est aisé de détecter un choix de communication inadapté, par exemple une discussion sur teams avec un nombre de messages important, laisse présager qu'une vidéoconférence aurait été davantage efficace. En revanche, une vidéoconférence sans prise de note, c'est à dire n'aboutissant pas à une issue, un message ou un commentaire dans le code, laisse présager une perte d'information.

Enfin, il faut garder à l'esprit qu'un outil de collaboration est là pour économiser du temps et préserver l'information utile, ce qui revient à économiser du temps. L'objectif étant de se concentrer davantage sur la recherche. Il faut ainsi toujours veiller à rester vigilant et lucide face à l'utilisation faite des outils de communications.

3.3 Construction d'équipe

Le confinement étant de vigueur, les régulières activités de groupe du laboratoire ont été suspendues. Malgré cela, certaines activités ont pu se réinventer via logiciel de vidéoconférence :

- Séance de sport.
- Séance de yoga.
- Escape-game en ligne.

Au fur et à mesure de l'assouplissement du confinement, des activités extérieures de groupe ont pu voir le jour, dans le respect des distances et des gestes barrières :

- Séances de travail collectives en appliquant la technique *pomodoro* dans des parcs.
- Randonnées et séances sportives.

La finalité de ces temps partagés avec des collègues chercheurs, est de casser la monotonie de télétravail depuis la maison. En télétravail, il est particulièrement complexe de dissocier les temps de travail des temps personnels. D'autant plus dans un cadre de recherche où l'avancement, et ainsi l'entrain varient. Il en résulte que mon temps de travail hebdomadaire est en moyenne supérieur à 35 heures par semaine, avec un temps de travail quotidien oscillant entre 6h et 9h.

Il s'est avéré que le simple fait de travail en visioconférence avec ses collègues, sans forcément discuter, permet au travers du bruit de fond et de leur présence de reconstituer un contexte de travail.

Part II

BiorbdOptim

4. Outils de modélisation numérique du mouvement

Avant de rentrer dans le vif du sujet, il est nécessaire de définir et décrire quelques notions et logiciels sans quoi on ne peut comprendre l'intérêt ou le fonctionnement de *BiorbdOptim*.

Le système d'exploitation *linux* a été le premier outil utilisé par la quasi-totalité des contributeurs à BiorbdOptim, il est intéressant de noter que la couche de compatibilité *Windows Subsystem for Linux* a permis à quelques utilisateurs de travailler sur BiorbdOptim depuis le système d'exploitation *windows*. Afin de pouvoir simplifier la gestion des paquets et faciliter le déploiement du logiciel, la distribution libre et open source Anaconda a été grandement utilisée.

des langages de programmation Python appliqué au développement d'applications dédiées à la science des données et à l'apprentissage automatique (traitement de données à grande échelle, analyse prédictive, calcul scientifique), qui vise à 4

4.1 Commande optimal

La commande optimale est une méthode utilisée dans le cas d'un problème de dynamique régit par des équations différentielles.

L'objectif est d'amener le système d'un état initial jusqu'à un état final tout en maximiser ou minimiser des indices de performances nommées "fonctions-objectifs" et en respectant des contraintes.

L'algorithme de commande optimale a pour but de générer les paramètres d'entrée du système afin de passer de l'état initial à l'état final en respectant les contraintes et en minimisant la fonction objectif.

L'utilisation du contrôle optimal est particulièrement approprié lorsque les déplacements sont difficilement contrôlables. A titre d'exemple, on l'utilise en biomécanique pour modéliser les mouvements du corps humain. La notion *difficilement contrôlables* réside ici dans l'impossibilité pour le système nerveux à contrôler la position finale d'un membre, son contrôle se limite à émettre un signal au muscle par le système nerveux. Le mouvement du membre est alors régit par des contraintes tels que le fonctionnement du muscle ou la gravité.

Le principe consiste à agir sur les commandes (variables d'entrées) qui à partir des équations du système donnent les états différentiels du système dynamique. On vérifie ensuite si les contraintes sont respectées et si la valeur de la fonction objectif est plus petite qu'une limite pré-établie. Si c'est le cas, la valeur constitue la solution optimale, sinon on modifie les commandes pour recommencer le processus.

Il est possible de schématiser le fonctionnement de la commande optimale comme suit :

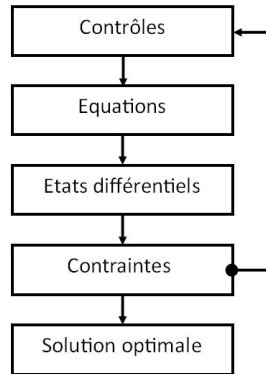


Figure 4.1: Principe de fonctionnement de la commande optimal.

La difficulté de la commande optimale réside dans la détermination de l'influence des modifications en entrée sur la fonction objectif tout en respecter les contraintes. Un problème de commande optimale possède nécessairement trois composantes :

- une fonction objectif à minimiser.
- un ensemble de contraintes à respecter.
- un système dynamique.

Mathématiquement, on peut le définir de manière simplifiée comme suit :

Fonction objectif :

$$\min J(t_F, x(t_F)) + \int_{t_0}^{t_F} \phi(t, x(t), u(t), p) dt$$

Contraintes dynamique :

$$\dot{x}(t_F) = f(t_F, x(t_F), u(t))$$

Contraintes de bornes :

$$x_{\min} \leq x(t) \leq x_{\max}$$

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$$

$$x(t_0) = x_0$$

$$x(t_F) = x_F$$

avec :

t_0 : l'instant initial.

t_F : l'instant final.

p : les paramètres à optimiser lors de la résolution.

u : le vecteur des commandes.

x : le vecteur des états différentiels.

u_{\min} , u_{\max} : les contraintes de bornes des commandes.

x_{\min} , x_{\max} : les contraintes de bornes des états différentiels.

$\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_F$: états initiaux et finaux.

Le premier terme de la fonction objectif est un *terme de Mayer*, il traduit un objectif final, mesuré à t_F , tandis que l'intégrale, dit *terme de Lagrange*, traduit un objectif sur l'ensemble du mouvement mesuré à *chaque instant* entre t_0 et t_F .

L'équation différentielle qui décrit la dynamique du modèle permet de calculer l'état suivant à partir de l'état précédent et des commandes.

Les contraintes de bornes c'est-à-dire les limites des variables d'états et des commandes permettent de définir le cadre du problème. Elles peuvent réduire le champ de recherche de l'optimiseur mais peuvent également rendre le problème numériquement impossible à résoudre.

L'optimiseur est le logiciel chargé d'agir donc sur les commandes pour aboutir à une solution. Les commandes peuvent être diverses, on peut citer non-exhaustivement : accélérations, moments articulaires, activations musculaires, excitations neuronales.

4.2 Biorbd

La librairie Biorbd, codée au sein du laboratoire s2m en très grande partie par M. Benjamin MICHAUD. possède un grand nombre d'outils de dynamique et de modélisation. Le nom de cette librairie provient de l'association de :

bio : pour biomécanique, domaine d'étude du laboratoire

rbd : l'essentiel de la librairie s'appuie sur la bibliothèque de fonction de calculs mécaniques des corps rigides RBDL (Rigid Body Dynamics Library).

La librairie gère la création et l'accès à un modèle biomécanique stocké sous la forme d'un fichier ayant un extension *.bioMod*. Les caractéristiques du modèles y sont définies avec une syntaxe précise. Une image valant mille mots, l'exemple ci-dessous décrit un cube dans l'espace nommé ayant :

- un *segment* : “Ground” immobile faisant office de repère global, , il se caractérise par :
 - un *marqueur* : “m1” fixés sur le segment Ground aux coordonnées (1, 0, 0).
 - un *marqueur* : “m2” fixés sur le segment Ground aux coordonnées (2, 0, 0).
- un *segment* : “Seg1” représentant le cube, il se caractérise par :
 - une *translation le long de l'axe x* définie dans l'intervalle $[-0.7, 2.3]$.
 - une *translation le long de l'axe z* définie dans l'intervalle $[-1, 1]$.
 - une *rotation autour de l'axe y* définie dans l'intervalle $[-0.7, 2.3]$.
 - une *masse* de 1 kg.
 - une *matrice d'inertie* caractérisant la répartition de la masse dans le volume, moment d'inertie identique selon les 3 axes.
 - un *centre de masse* aux coordonnées (0, 0, 0).
 - un *ensemble de mesh* : segments représentant les arêtes du cube.

```

1  version 4
2
3  // Seg1
4      segment Seg1
5          translations      xz
6          rotations         y
7          rangesQ   -0.70  2.30
8                  -1  1
9                  -pi pi
10         mass 1
11         inertia
12             1 0 0
13             0 1 0
14             0 0 1
15         com 0 0 0
16     mesh 0 -1 -1
17     mesh 0 0 -1
18     mesh 0 0 0
19     mesh 0 -1 0
20     mesh 0 -1 -1
21     mesh 1 -1 -1
22     mesh 1 0 -1
23     mesh 0 0 -1
24     mesh 1 0 -1
25     mesh 1 0 0
26     mesh 0 0 0
27     mesh 1 0 0
28     mesh 1 -1 0
29     mesh 0 -1 0
30     mesh 1 -1 0
31     mesh 1 -1 -1
32 endsegment
33
34 // Marker on Seg1
35     marker m0
36         parent Seg1
37         position 0 0 0
38     endmarker
39
40 // Ground
41     segment ground
42 endsegment

```

```

43
44 // Markers on ground
45     marker m1
46         parent ground
47         position 1 0 0
48     endmarker
49
50     marker m2
51         parent ground
52         position 2 0 0
53     endmarker

```

Figure 4.2: Modèle cube.bioMod

En première approximation, un segment peut être assimilable à un membre du corps humain, et un marqueur à un point fixe dans le repère du segment. Un segment peut être défini dans le repère global ou à partir d'un segment existant, par exemple un avant-bras peut être défini à partir du bout du bras. La librairie propose une grande quantité d'éléments biomécaniques, on peut citer non-exhaustivement :

- des segments.
- des marqueurs.
- des muscles.
- des forces de contact.
- des forces externes.

Biobrd comprend également une importante quantité de fonctions mécaniques calculatoires. La librairie repose, entre autre, sur *casadi*³ : un outil open-source pour l'optimisation non linéaire et la différenciation algorithmique. La différenciation algorithmique de *casadi* permet un gain considérable lors de la dérivation des équations différentielles.

Téléchargeable en libre accès sur GitHub¹ la librairie Biorbd se développe encore au sein du laboratoire, qui essaie de démocratiser son utilisation.

4.3 BiorbdViz

Biorbd possède également une interface de programmation écrite en Python : *biorbd-viz*. Elle permet à partir d'un fichier *.bioMod* de :

- visualiser en trois dimensions le modèle.
- visualiser un mouvement en trois dimensions du modèle à partir d'un tableau de position *numpy*

Pour chaque degré de liberté, *biorbd-viz* dispose de curseurs indiquant la valeur actuelle par rapport à l'intervalle autorisé. A titre d'illustration, le cube initialement à 0 sur chacun de ses degré

¹<https://github.com/pyomeca/biorbd>

³<https://web.casadi.org/>

de liberté a subit d'abord une rotation autour de l'axe de 0.74 radians puis une translation de -0.52 mètres selon l'axe z.

À l'instar de biorbd, biorbd-viz peut être téléchargé sur GitHub².

²<https://github.com/pyomeca/biorbd-viz>

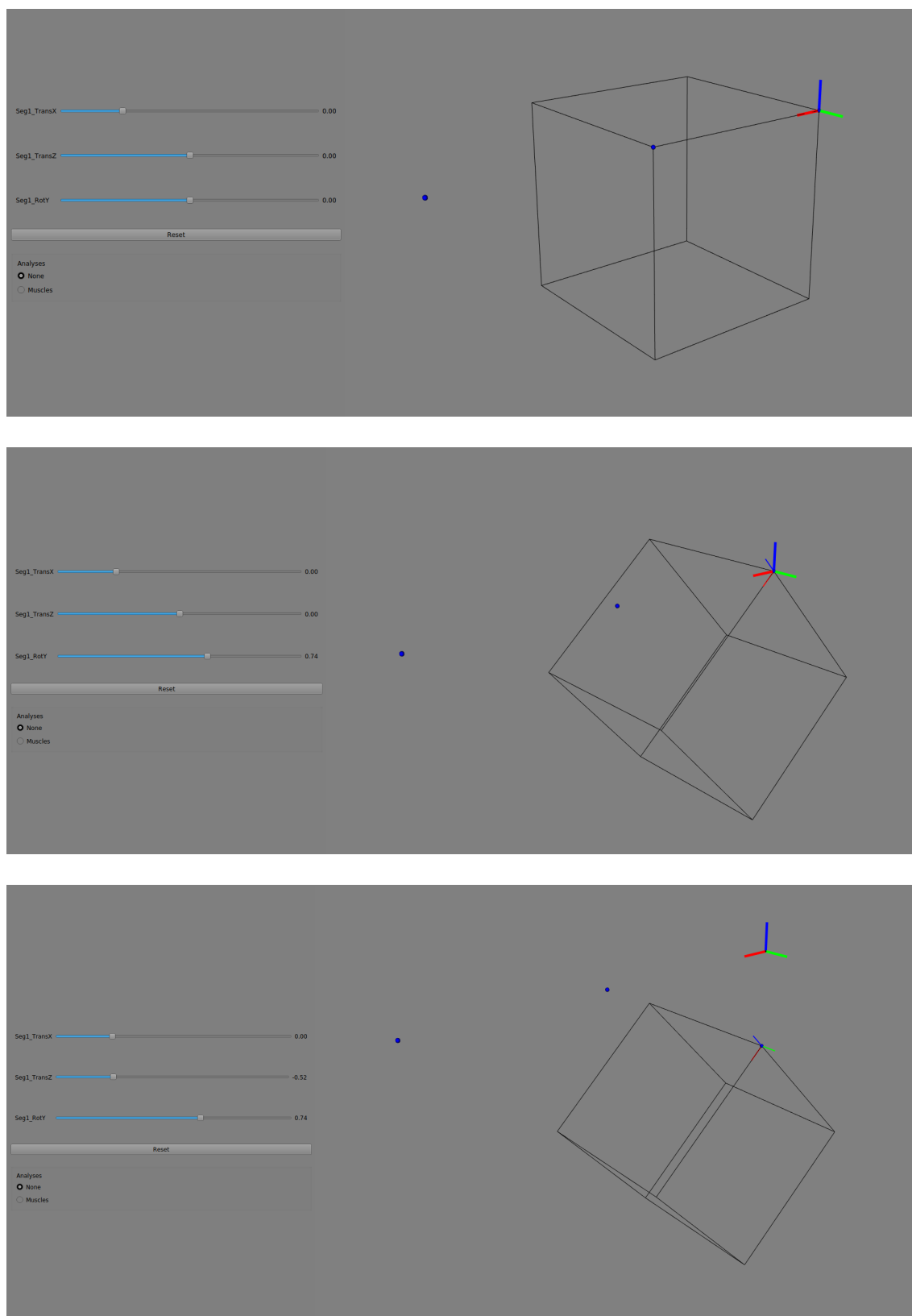


Figure 4.3: Représentation sous biorbd-viz du modèle cube.bioMod.

5. Réalisation

5.1 Nécessité collective

Comme présenté précédemment (section 2.3 p. 4), l'équipe de Commande optimale regroupe une dizaine de personne. L'épidémie du Covid-19 a contraint d'autres chercheurs, privés d'expérience à mener, à rejoindre le groupe.

Chacun travaille sur une problématique biomécanique, et fait appel à la commande optimale pour la résoudre. Rapidement, un constat a émané du groupe : pour appliquer du contrôle optimal, chaque chercheur programme majoritairement les mêmes instructions que ses collègues. Benjamin MICHAUD a alors suggéré d'écrire une base commune permettant de mutualiser l'écriture des problèmes. Benjamin MICHAUD, mon homologue Paul WEGIEL et moi avons entamé la programmation de cette base au commencement de nos stages.

5.2 Commande optimale numérique

La solution d'un problème de commande optimale est une équation générale, obtenue comme définie précédemment (section 4.1 p. 8), à partir d'une fonction objectif, d'un ensemble de contraintes et d'un système dynamique. En pratique, la plupart des problèmes sont trop complexes pour trouver la solution exacte, on procède donc à une résolution numérique.

5.2.1 Direct multiple shooting

Pour cela, il existe plusieurs approches, au laboratoire, le direct multiple shooting est la plus utilisée. Il consiste à diviser la durée du problème en intervalles, puis à calculer les états en chaque point, appelé nœud. Entre ces nœuds, les commandes sont déterminées, on calcule donc l'état au prochain nœud à partir de l'état précédent et des commandes sur l'intervalle. Les commandes sont définies constantes sur l'intervalle afin de simplifier le problème, cependant, elles pourraient suivre une fonction définie.

Mathématiquement, on doit définir de surcroît :

Subdivision du temps :

$$t_0 < t_1 < \dots < t_N \quad \text{avec} \quad \forall i \in [0, N] : t_i = t_0 + i \cdot \frac{t_F - t_0}{N}$$

les degrés de liberté et le nombre de noeuds : 2 degrés avec 31 noeuds - *lignes 27-28*.

le système dynamique : écrite avec le module casadi - *lignes 31-64*.

les fonction objectif : minimiser les commandes - *lignes 70-75*.

les contraintes : de continuité, de bornes, des états initiaux et finales - *ligne 67 / lignes 77-93*.

l'appel au solveur : *ligne 97*.

La suite du fichier permet, à partir de la solution renvoyé par le solveur, d'afficher avec le module matplotlib les valeurs des états et commandes en fonction du temps. Enfin, l'appel à biorbd-viz, l'interface trois dimension de biorbd, avec chargement des positions permet de visualiser le mouvement.

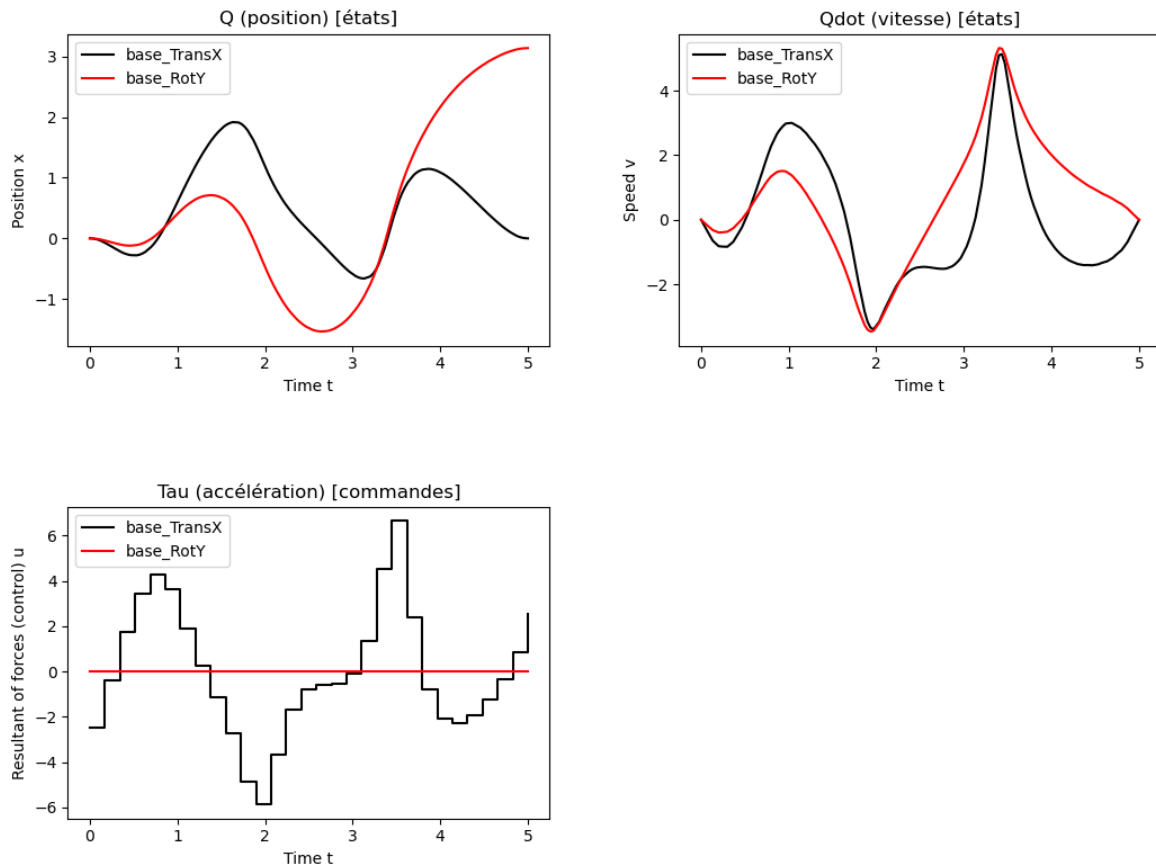
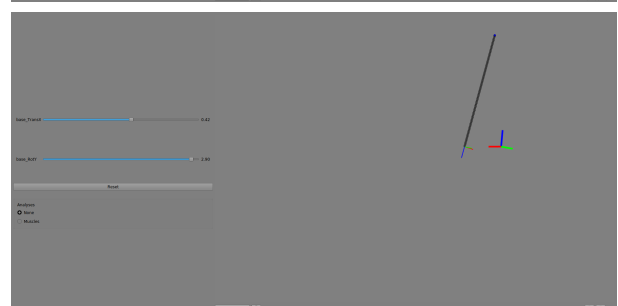
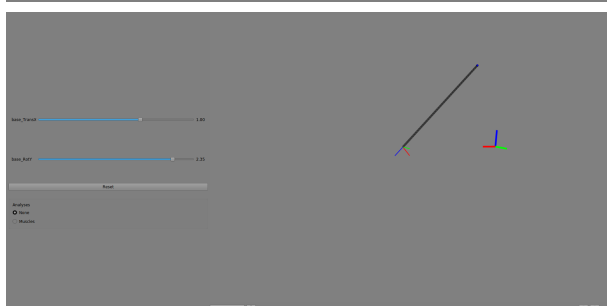
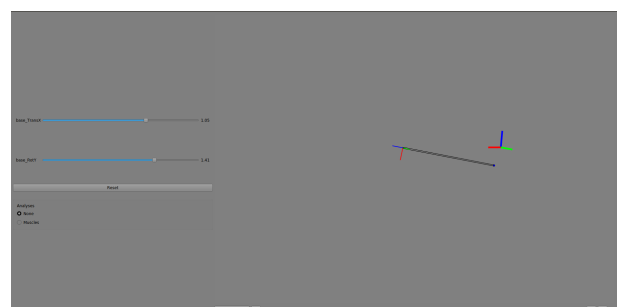
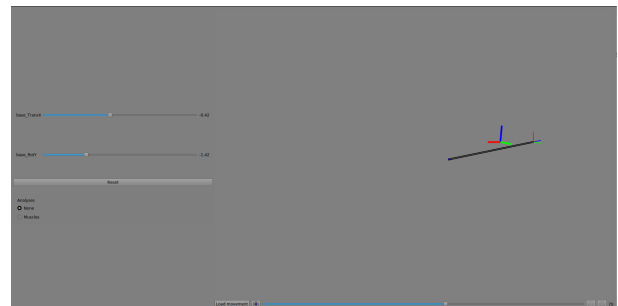
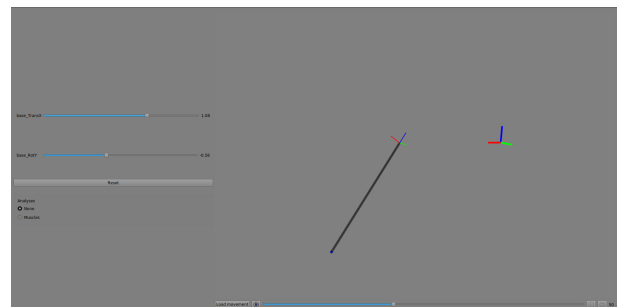
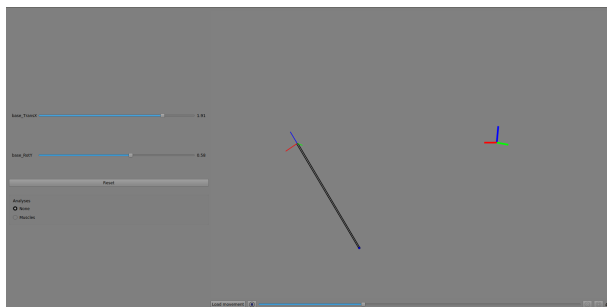
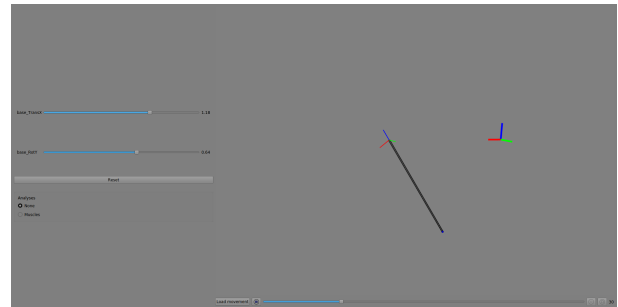
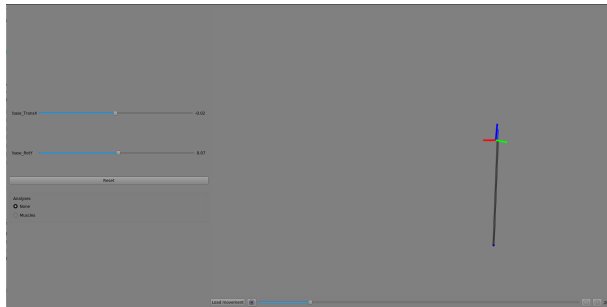
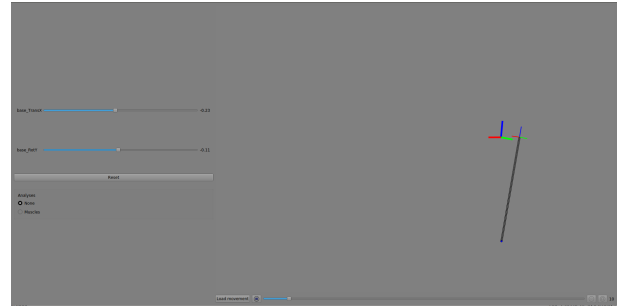
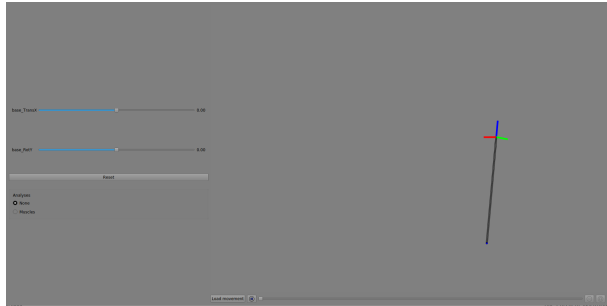


Figure 5.2: Évolution des états et commandes en fonction du temps.



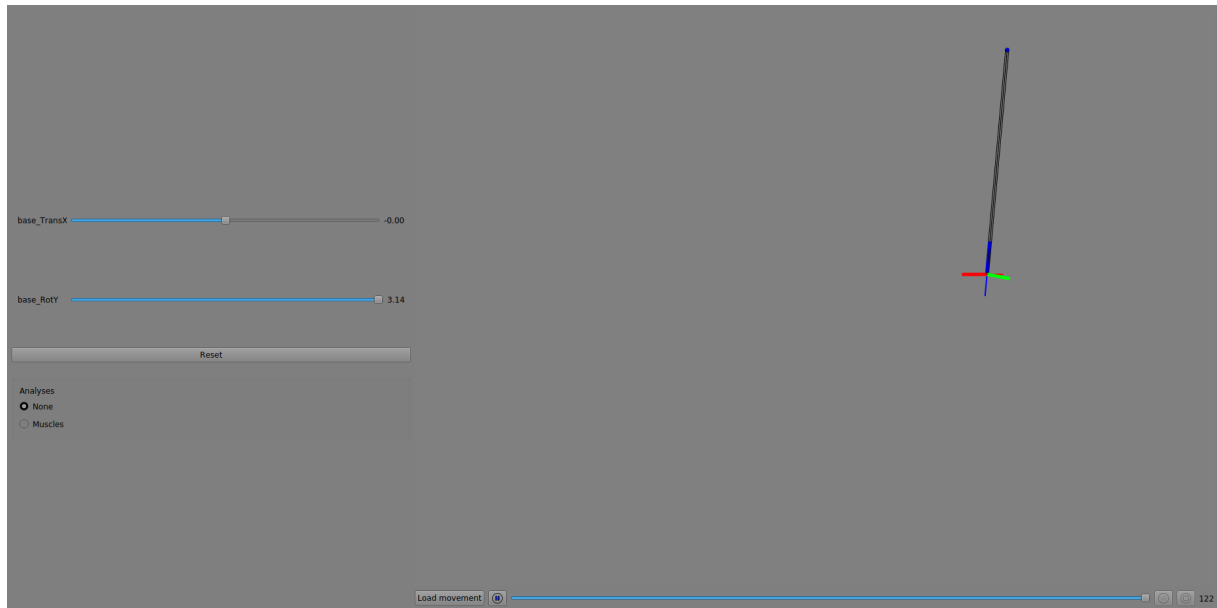


Figure 5.3: Mouvement sous biorbd-viz du modèle pendule.bioMod.

blablabla

5.3 cahier des charges

5.4 Développement collaboratif

github + gitkraken + trello choix de python

5.5 Logiciel sur mesure

lien <-> Violon

5.6 Article scientifique

6. Développement

6.1 Transfert de langage

6.2 Besoin/Réalisation1

Mettre en avant les choix réalisés

6.3 Besoin/Réalisation2

6.4 Besoin/Réalisation2

single shooting, comparar test manuellement sur meld-> écrire le test, il faudra l'écrire dans tous les cas

6.5 Exploitation des résultats

6.5.1 Affichage graphique des états et controles

Matplotlib

Moving horizon estimation - (MHE)

Intégration

6.5.2 Visualisation sur Biorbd-viz

6.5.3 Sauvegarde

Contexte

Résultat

6.6 Exemples

6.7 Tests

Part III

Optimisation de la gestuelle du violoniste

BiorbdOptim a pris 75% de mon temps mais a rendu le développement du Violon 4 fois plus rapide !

7. Modélisation initiale

7.1 Violon

7.1.1 Jeu

7.1.2 Modélisation

7.2 Muscles

7.2.1 Fonctionnement

7.2.2 Modélisation

Travaux de Benjamin Valentin et Camille.

8. Écriture du problème

8.1 BiorbdOptim

8.2 Structure du problème

8.3 Ajout1

besoin/choix/explication/conclusion/...

8.4 Ajout2

8.5 Ajout3

8.6 Ajout4

8.7 Ajout5

9. Résultats

torques résiduels et non-résiduels.

Part IV

Conclusion

10. Conclusion

Ces quatre mois et demi de télétravail m’ont permis de co-développer un logiciel générique de contrôle optimal que j’ai parallèlement utilisé pour modéliser et optimiser la gestuelle du violoniste.

BiorbdOptim

Le développement de *BiorbdOptim* m’a offert une expérience de travail collaboratif à distance. Progressivement, j’ai intégré le rôle et l’utilisation des divers outils de communication. J’ai compris, par la pratique et l’échec, qu’il est primordial de toujours savoir situer son travail par rapport au groupe et au projet. Sans cela, il devient inévitable de programmer des fonctionnalités déjà existantes ou incompatibles avec le reste du projet. Dans ce sens, la présence d’un manager assurant la cohérence des développements demeure irréfragable. Enfin, l’entraide étant permanente et réciproque au sein de mon groupe de travail, je ressors de ce stage convaincu par l’adage “*seul, on va plus vite, ensemble on va plus loin*”. J’en tire la conclusion qu’il est essentiel de réfléchir avec lucidité face à chaque obstacle : faut-il chercher seul, demander de l’aide et à qui, ou retarder la confrontation ? Tout cela nécessite de l’expérience, ce stage a contribué, à sa hauteur, à m’en pourvoir.

Le développement de *BiorbdOptim* m’a également offert une expérience de création de logiciel avec le langage Python, en y intégrant un logiciel écrit avec le langage C++. Outre les compétences indéniablement acquises en programmation, j’ai utilisé et joué avec un logiciel de gestion de projet informatique : *github* renforcé par *gitkraken*. Le terme “joué” me semble important, car c’est en expérimentant, que l’on acquière une maîtrise complète d’un logiciel. De même, l’utilisation quotidienne du système d’exploitation *Linux* et de *miniconda* m’a permis de manipuler ces outils basiques avec aisance. Enfin, si je ne devais retenir qu’une morale, alors je choisirais sans hésiter l’importance d’écrire de tests, dès le commencement, qui vérifient l’exactitude de toutes les lignes de code et de leurs évolutions.

BiorbdOptim s’étoffe progressivement, en intégrant continuellement plus de fonctionnalités. À ce jour, il égal son principal concurrent : *MOCO*. Un article est, à ce jour, en écriture afin de présenter *BiorbdOptim* à la communauté scientifique de contrôle optimal appliqué à la biomécanique. Le propos de cet article est de comparer ses performances et fonctions à ceux d’une référence : *MoCo*. Je suis fier d’avoir écrit les premières lignes de ce logiciel, et d’avoir contribué, approximativement, à l’écriture d’un quart du logiciel.

Optimisation de la gestuelle du violoniste

La gestuelle de violoniste, peu étudiée par les biomécaniciens,...

modélisation, importante, 74 états 18 muscles 10 dof xia multiphase tant d'aller retour intérêt de BiorbdOptim rapide à coder

démarche scientifique

difficulté de dissocier la démarche scientifique et le développement de BiorbdOptim (qu'on outil)

J'aurais souhaité...

Il reste encore à...

Expérience générale

L'expérience apportée par ces 4 mois et demi passés virtuellement au laboratoire s2m correspond à mon attente : découvrir le métier de chercheur. Je peux succinctement, citer divers apprentissages : s'il est évident de mener ses propres recherches, il demeure crucial de chercher les conclusions de ses homologues. J'ajouterais la valeur de considérer avec recul les situations de stagnation, où il paraît insurmontable de parvenir à son objectif. C'est là tout l'enjeu de la recherche : expérimenter ce que personne n'a déjà tenté. Subséquemment à la frustration de la stagnation, la joie enivrante lors d'un succès alimente la volonté de perpétuer et perfectionner ses travaux. Bien que n'ayant qu'à traverser mon appartement pour me rendre sur mon lieu de travail, je l'ai toujours fait avec alacrité et excitation.

Finalement, l'expérience apportée par ces 4 mois et demi passés effectivement à Montréal me remplit de satisfaction. En dépit du contexte pandémique, j'ai pu profiter de l'accueil enthousiaste des québécois à commencer par le tutoiement qui l'illustre parfaitement. Je retiendrais des belles rencontres avec de longs échanges sur l'histoire et la double colonisation du Québec, dont la devise est : *Je me souviens, que né sous le lys, je crois sous la rose*. Au terme de mon stage, j'ai pu jouir de la superbe nature québécoise, de ses lacs et forêts, peu apprivoisées par l'homme.

[2]

A. Annexes

```
1 version 3
2
3 // SEGMENT DEFINITION
4
5 // Information about base segment
6 // Segment
7 segment base
8     translations x
9     rotations y
10    mass 1
11    com 0 0 -1
12    inertia
13    1 0 0
14    0 1 0
15    0 0 1
16
17    mesh 0.005 0.005 0
18    mesh -0.005 0.005 0
19    mesh -0.005 -0.005 0
20    mesh 0.005 -0.005 0
21    mesh 0.005 0.005 0
22    mesh 0.005 0.005 -1
23    mesh -0.005 0.005 -1
24    mesh -0.005 0.005 0
25    mesh -0.005 0.005 -1
26    mesh -0.005 -0.005 -1
27    mesh -0.005 -0.005 0
28    mesh -0.005 -0.005 -1
29    mesh 0.005 -0.005 -1
30    mesh 0.005 -0.005 0
31    mesh 0.005 -0.005 -1
32    mesh 0.005 0.005 -1
33
```

```

34
35
36     endsegment
37 // Markers
38         marker   origine
39                 parent   base
40                 position   0 0 -1
41     endmarker

```

Figure A.1: Modèle pendule.bioMod

```

1 from casadi import MX, Opti, vertcat, Function
2 from matplotlib import pyplot as plt
3 import numpy as np
4 import biorbd
5 import BiorbdViz
6
7 model = biorbd.Model("pendule.bioMod")
8
9
10 # Initialisation
11 T = 5 # 100 secondes
12 N = 30 # 30 intervalles
13 G = 9.81
14
15 continuous_integration = True
16 number_of_nodes = 5
17 nbQ = model.nbQ()
18 nbQdot = model.nbQdot()
19 nbTau = model.nbGeneralizedTorque()
20 nx = nbQ + nbQdot
21 nu = nbTau
22 dt = T / N # duree d'un intervalle
23 colors = ["k", "r", "g", "b", "y", "m"]
24 captions = [s.to_string() for s in model.nameDof()]
25
26 opti = Opti()
27 x = opti.variable(nx, N+1) # position et vitesse
28 u = opti.variable(nu, N) # controle
29
30
31 # Declaration dynamique

```

```

32 x_sym=MX.sym("x",nx)
33 u_sym=MX.sym("u",nu)
34 dyn=Function(
35     "Dynamics",
36     [x_sym,u_sym],
37     [
38         vertcat(
39             x_sym[nbQ:,0],
40             model.ForwardDynamics(
41                 x_sym[:nbQ,0],x_sym[nbQ:,0],u_sym
42             ).to_mx(),
43         )
44     ],
45     ["x","u"],
46     ["xdot"],
47 ).expand()
48
49
50 def rk_calcul(x,u,dt_kutta):
51     k1=dyn(x,u)
52     k2=dyn(x+(dt_kutta/2)*k1,u)
53     k3=dyn(x+(dt_kutta/2)*k2,u)
54     k4=dyn(x+dt_kutta*k3,u)
55     return x+(dt_kutta/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4)
56
57
58 #RK4
59 dt_kutta=dt/(number_of_nodes)
60 rk=Function("RK",[x_sym,u_sym],[rk_calcul(x_sym,u_sym,dt_kutta)])
61 for j in range(N):
62     x_next=x[:,j]
63     for p in range(number_of_nodes):
64         x_next=rk(x_next,u[:,j])
65
66     #Contrainte de continuité
67     opti.subject_to(x_next==x[:,j+1])
68
69 #Fonction objectif
70 obj=MX(0)
71 for i in range(nu):
72     for j in range(N):
73         obj+=u[i,j]*dt*u[i,j]*dt
74

```



```

75 opti.minimize(obj)##optimisation sur plusieurs crit res possible
76
77 # Contraintes de continuité
78 opti.subject_to(x[:,0]==0)##vitesse et position nulles au début
79 opti.subject_to(x[0,N]==0)
80 opti.subject_to(x[1,N]==3.14)
81 opti.subject_to(x[nbQ:,N]==0)##vitesses nulles à la fin
82
83 # Contraintes sur le chemin
84 for j in range(N+1):
85     opti.subject_to(x[nbQ,j]>=-10)
86     opti.subject_to(x[nbQ,j]<=20)
87     opti.subject_to(x[nbQ:,j]>=-100)
88     opti.subject_to(x[nbQ:,j]<=100)
89
90 for j in range(N):
91     opti.subject_to(u[0,j]>=-100)
92     opti.subject_to(u[0,j]<=100)
93     opti.subject_to(u[1,j]==0)
94
95 # Solution
96 opti.solver("ipopt")
97 sol=opti.solve()##appel au solveur
98
99 x_opt=sol.value(x)
100 u_opt=sol.value(u)
101
102 t_int=np.ndarray(((number_of_nodes-1)*N+2,))
103 q_int=np.ndarray((nbQ,(number_of_nodes-1)*N+2))
104 qdot_int=np.ndarray((nbQdot,(number_of_nodes-1)*N+2))
105 x_next=x_opt[:,0]
106 cmp=0
107 continuous_integration=True
108 t_int[cmp]=0
109 q_int[:,cmp]=x_next[nbQ:]
110 qdot_int[:,cmp]=x_next[nbQ:]
111 cmp+=1
112 for j in range(N):
113     if not continuous_integration:
114         x_next=x_opt[:,j]
115
116     for p in range(number_of_nodes):
117         x_next=rk(x_next,u_opt[:,j])

```

```

118 t_int [cmp] = dt_kutta * j * number_of_nodes + dt_kutta * p + dt_kutta
119 q_int[:, cmp] = np.array(x_next[:nbQ, :]).reshape((nbQ,)).squeeze()
120 qdot_int[:, cmp] = (
121 np.array(x_next[nbQ:, :]).reshape((nbQdot,)).squeeze()
122 )
123 cmp += 1
124 cmp -= 1
125
126 plt.subplot(221)
127 for i in range(nbQ):
128     plt.title("Q(position) [ tats ]")
129     plt.plot(t_int, q_int[i, :], colors[i], label=captions[i])
130     plt.xlabel("Time t")
131     plt.ylabel("Position x")
132
133 plt.subplot(222)
134 for i in range(nbQdot):
135     plt.title("Qdot(vitesse) [ tats ]")
136     plt.plot(t_int, qdot_int[i, :], colors[i], label=captions[i])
137     plt.xlabel("Time t")
138     plt.ylabel("Speed v")
139
140 plt.subplot(223)
141 for i in range(nu):
142     plt.title("Tau(acceleration) [commandes]")
143     line = plt.step(
144         np.linspace(0, T, N),
145         u_opt[i],
146         where="post",
147         color=colors[i],
148         label=captions[i],
149     )
150     plt.xlabel("Time t")
151     plt.ylabel("Resultant of forces (control) u")
152
153
154 plt.tight_layout()
155 plt.legend()
156 plt.show()
157
158
159 BiorbdViz.BiorbdViz("pendule.bioMod").load_movement(q_int[:, :61])

```

Figure A.2: Programmation du problème du pendule

A. Bibliography

- [1] Zhengru Ren, Roger Skjetne, and Zhen Gao. A crane overload protection controller for blade lifting operation based on model predictive control. *Energies*, 12:50, 12 2018.
- [2] E. Marshal B. Ackermann, R. Adams. The effect of scapula taping on electromyographic activity and musical performance in professional violinists. *Australian Journal of Physiotherapy*, vol.48, no. 3, pp. 197–203, 2002.

Epilogue

A. List of Figures

1	Un violon muni d'une mentonnière	iv
2.1	Organigramme du laboratoire	4
4.1	Principe de fonctionnement de la commande optimal.	9
4.2	Modèle cube.bioMod	12
4.3	Représentation sous biorbd-viz du modèle cube.bioMod.	14
5.1	Illustration of direct multiple shooting. Ren Z. Skjetne R. Gao Z. [1]	16
5.2	Évolution des états et commandes en fonction du temps.	18
5.3	Mouvement sous biorbd-viz du modèle pendule.bioMod.	20
A.1	Modèle pendule.bioMod	32
A.2	Programmation du problème du pendule	36

A. List of Tables