



ÉCOLE CENTRALE LYON

UE PRO - PE 39
ETAT D'AVANCEMENT - RVP2

Analyse de Matchs de Tennis de table (Préparation JO 2024)

Elèves :

Cyprien AUDREN-DE-KERDEL
Yanis FILIPPI
Corentin LEFEVRE
Heitor MACHADO-FERRI-DA-SILVA
Côme LASSARAT

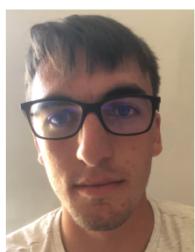
Commanditaire et tuteur :
Romain VUILLEMOT

Conseiller en communication :
Emmanuel RHÉTY

Conseiller en gestion de projet :
Arnaud BRÉARD

Introduction

Ce Projet d'Étude ou PE 39 intitulé « Analyse de matchs de tennis de table (JO 2024) » vise à saisir l'opportunité qu'offrent les progrès technologiques à avoir une analyse plus quantitative du sport en général. Ce projet est proposé et commandité par Romain VUILLEMOT, professeur et chercheur à l'Ecole Centrale Lyon, et encadré par un conseiller en communication, Emmanuel RHETY, ainsi que par un conseiller en gestion de projet, Arnaud BRÉARD.



LEFEVRE Corentin



FILIPPI Yanis



AUDREN-DE-KERDEL Cyprien



MACHADO-FERRI-DA-SILVA
Heitor



LASSARAT Côme

FIGURE 1 – Membres du PE

Table des matières

1 Rappel du contexte du projet	3
2 Etat d'avancement des différentes tâches et gestion de crise	4
2.1 Difficultés rencontrées et réunion avec la FFTT	4
2.1.1 Difficultés rencontrées	4
2.1.2 Réunion avec la FFTT et nouveaux objectifs	5
2.2 Gestion de crise	5
2.3 Affinage des objectifs	6
2.4 Les différentes tâches	7
2.4.1 Avancement des tâches déjà effectuées pour accomplir les objectifs précédents	7
2.4.2 Avancement des nouvelles tâches	8
2.5 Conclusion sur l'état d'avancement du projet	8
3 Les tactiques au tennis de table	8
4 Travail initial : acquisitions par Motion Capture	10
4.1 Le motion capture	10
4.2 Matériel à disposition	10
4.3 Acquisitions réalisées	11
4.4 Caractériser les coups : Approche "naïve" et machine learning	12
4.5 Limites de cette approche	12
5 Trajectoire d'une balle de tennis de table : théorie	13
5.1 Théorie	13
5.2 Simulations	15
6 Analyse de la trajectoire d'une balle sur une vidéo	16
6.1 Présentation du protocole	16
6.2 Réalisation du protocole	16
6.2.1 Tracking de la balle (1)	16
6.2.2 Identification de la position de la caméra (2)	16
6.2.3 Simulation et Identification des paramètres de la trajectoire (3,4&5)	17
6.3 Analyses des données récoltées	18
6.4 Optimisation	18
7 Travail restant	19
8 Conclusion	19
9 Annexes	20
9.1 Gestion de projet	20
9.1.1 Diagramme de Gantt	20
9.1.2 Compte-rendu de la réunion avec la FFTT	21
9.1.3 Tableau de bord du projet à t = 31 semaines	21
9.2 Lien vers les livrables	21
9.3 Détails de la modélisation théorique du rebond	21

1 Rappel du contexte du projet

Apparu tel que nous les connaissons à la fin du 19ème siècle, le tennis de table est un sport de raquette qui a constamment évolué au cours du siècle suivant de par la standardisation des règles (hauteur du filet, dimension des tables), mais aussi par la volonté des joueurs de devenir meilleur en améliorant leurs équipements, grâce aux progrès techniques, tels que leurs raquettes (nature du revêtement, ...) pour donner toujours plus de vitesse et d'effet à la balle. Les premiers championnats du monde apparaissent en 1926 avec la création de la Fédération Internationale de Tennis de table, donnant ainsi naissance aux premières rivalités mondiales. Si jusqu'aux années 1950 les européens dominent les championnats du monde, l'essor du sport en Asie va engendrer la domination des chinois et des japonais dans ces championnats, jusqu'à une domination quasi-totale depuis les années 2000. Depuis que ce sport est devenu une discipline olympique en 1988, on observe le même constat dans cette compétition. Pour autant, le tennis de table est très populaire en Europe et particulièrement en France, qui ne compte pas moins de 3 millions de pratiquants réguliers et un peu moins de 200000 licenciés. Les statistiques témoignent de la croissante popularité de ce sport en France entre les années 1990 et 2000.

Aujourd'hui, le titre olympique apparaît comme la distinction la plus honorifique pour un pongiste ou un sportif. Ainsi, avec la perspective des JO organisés en 2024 en France, le Comité National Olympique et Sportif Français (CNOSF) aspire à voir leurs sportives et sportifs briller durant la compétition. De cette ambition est né le projet Sciences 2024 pour que « les universités, les grandes écoles et les étudiants puissent mettre leur expertise et leurs connaissances au service du sport de haut niveau » (Martin Fourcade, biathlète français, quintuple champion du monde et actuel membre du conseil d'administration des JO 2024). La ministre des Sports a affirmé qu'elle souhaitait voir la France "doubler son nombre de médailles".

Le tennis de table est une discipline délivrant 4 médailles d'or, 4 médailles d'argent et 4 médailles de bronze (1 simple dames et messieurs, 1 dames et messieurs par équipe). Ainsi, dans le but d'aider la France à avoir au moins une deuxième médaille olympique en tennis de table (la seule médaille française a été obtenue par Jean-Philippe Gatien, médaillé d'argent à Barcelone en 1992), grâce au projet Science 2024, scientifiques et sportifs coopèrent afin de déterminer des solutions techniques qui puissent accompagner les pongistes dans leur entraînement quotidien, les aider à progresser et optimiser leur apprentissage. Dans notre cas, cela passera par une acquisition numérique des mouvements des joueurs et de la balle lors d'un entraînement ou d'un match. Ces acquisitions pourront faire l'objet d'analyses quantitatives, fournissant ainsi des statistiques qui profiteront aux pongistes. C'est pourquoi du partenariat entre Science 2024 et l'École Centrale Lyon est né ce PE, « Analyses de matchs de tennis de table (Préparation JO 2024) ».



FIGURE 2 – Simon Gauzy aux JO de Rio en 2016 (Source : sport.francetvinfo)

2 Etat d'avancement des différentes tâches et gestion de crise

2.1 Difficultés rencontrées et réunion avec la FFTT

2.1.1 Difficultés rencontrées

A l'origine, dans le cadre du projet Sciences2024, la contribution de ce PE était la suivante : utiliser le dispositif de Motion Capture pour que ce dernier puisse accompagner les pongistes dans leurs entraînements. Nous avons en effet limité l'utilisation du Motion Capture à un usage personnel pour le joueur : cet outil doit faire office de valeur ajoutée à son entraînement et à l'analyse de ce dernier, en fournissant par exemple des statistiques de coups, de vitesses, etc. En parallèle de ces statistiques, une telle acquisition pourra nous fournir les conditions initiales nécessaires à la simulation de la trajectoire de la balle (vitesse initiale de la balle, hauteur, effet, ...). Il sera alors possible de comparer la trajectoire réelle et simulée de la balle après rebond, et l'écart entre ces deux jeux de données après rebond nous permettra éventuellement d'inférer un type d'effet lié à certains mouvements du joueur.

Cependant, nous avons remarqué, durant les 5 premiers mois de notre projet, que pour atteindre les objectifs évoqués ci-dessus, l'utilisation du Motion Capture, était inadaptée. En effet, la mise en place du dispositif, son calibrage, l'acquisition et le traitement des acquisitions est très fastidieux car il arrive fréquemment que certains capteurs ne sont pas détectés, et la correction de ce problème est manuelle. De plus, des détecter la balle sans influer sur ses propriétés, sa dynamique et sa trajectoire paraissait irréalisable. Ainsi, nous avons revu nos objectifs à la décision de notre commanditaire. Désormais, nous essayons de travailler en parallèle d'un autre projet qui traite de problématiques similaires mais utilise l'acquisition vidéo pour enregistrer la position des joueurs.

2.1.2 Réunion avec la FFTT et nouveaux objectifs

Lors de notre entrevue par ZOOM avec Christian Gaubert (FFTT), ce dernier a insisté sur le point suivant : beaucoup de joueurs français consacrent une importante partie de leur entraînement à leur technique personnelle, mais pas une part suffisante à leur adaptation à l'adversaire et son type de jeu : un joueur devrait davantage se concentrer sur son adversaire et son jeu plutôt que sur lui-même et sa propre technique.

Ainsi, établir des fiches de matchs et des statistiques sur le jeu des joueurs, plus précisément sur les zones trouvées par leurs balles, constitue un enjeu capital pour la FFTT. Ceci est déjà fait par certains entraîneurs mais fastidieux à réaliser, d'où la volonté de la FFTT : faciliter le remplissage de telles feuilles de statistiques à partir de vidéos de matchs de compétition facilement accessibles sur internet. Malgré le non-recourt au motion capture, **ce but reste fortement lié à un de nos objectifs initiaux, qui consistait à faire un compte-rendu statistique d'un match acquis pas motion capture.**

La FFTT nous a de plus apporté quelques précisions quant à leurs attentes : compte tenu de la richesse des coups possibles au tennis de table et de leur complexité, les coups devront être classés en 3 catégories pour rendre plus lisible les statistiques :

- Balles courtes (le joueur empêche son adversaire d'attaquer)
- Balles d'attaque (caractérisées par une grande vitesse)
- Les autres coups.

De plus, le dispositif voulu devra pouvoir rendre compte, par la classification précédente, de la tactique de l'adversaire dans le point mais aussi d'un point à l'autre : ces adaptations, changements de jeu en fonction de l'état d'avancement du match (points importants, money time), tout cela dans le but de **faire ressortir les régularités inconscientes de l'adversaire.**

2.2 Gestion de crise

La pandémie du Covid-19 et le confinement de la population ordonné par le gouvernement nous a poussé à changer notre manière de travailler, étant donné que nous sommes tous rentrés dans nos domiciles respectifs.

Jusqu'à présent, le contexte actuel n'a pas énormément pesé sur notre projet. En effet, la majorité de notre travail consiste depuis plus d'un mois à écrire des programmes informatiques, tâche que nous réalisons individuellement de toute manière dans la salle AMIGO à l'école Centrale Lyon.

En ce qui concerne les réunions (entre les membres du projet ou bien avec Christian Gaubert (FFTT) et Romain Vuillemot (Commanditaire et tuteur)), celles-ci se réalisent sur des outils comme ZOOM (pour des "télé-réunions") ou DISCORD (échanges vocaux à plusieurs), et leur efficacité est très satisfaisante pour notre utilisation. Les échanges avec le commanditaire se poursuivent par email, SLACK et ZOOM.

Exemple d'une après-midi type de travail en PE :

1. **Début de la séance** : réunion sur DISCORD pour une mise au point sur le travail effectué précédemment et les tâches à accomplir durant la séance

2. **Travail individuel** : la conversation DISCORD reste ouverte en cas de questions/remarques mais le travail est majoritairement individuel
3. **Fin de la séance** : réunion sur DISCORD pour faire un point sur la séance et le travail qui vient d'être effectué. Détermination des objectifs pour la prochaine séance.

Finalement, notre capacité d'adaptation a aussi été due à notre faible dépendance au matériel de la salle AMIGO, étant donné que nous n'utilisons dorénavant plus le Motion Capture mais principalement nos ordinateurs personnels.

2.3 Affinage des objectifs

Les circonstances évoquées précédemment (difficultés à travailler avec le motion capture, attentes de la FFTT, crise de Covid-19) nous ont poussés à changer nos objectifs. Malgré ce changement de direction, **une grande partie de ce que nous avons déjà fait au cours de l'année pourra être réutilisé pour répondre aux nouvelles problématiques** (en particulier la tâche 3 et ce qui a été fait jusqu'à présent dans la tâche 4).

Les nouveaux objectifs sont ceux décrits dans la section 2.1.2 Réunion avec la FFTT et nouveaux objectifs : à partir de vidéos de compétition, répertorier chaque coup d'un match dans les catégories évoquées pour effectuer un compte-rendu statistique du match et faire ressortir les régularités inconscientes de l'adversaire.

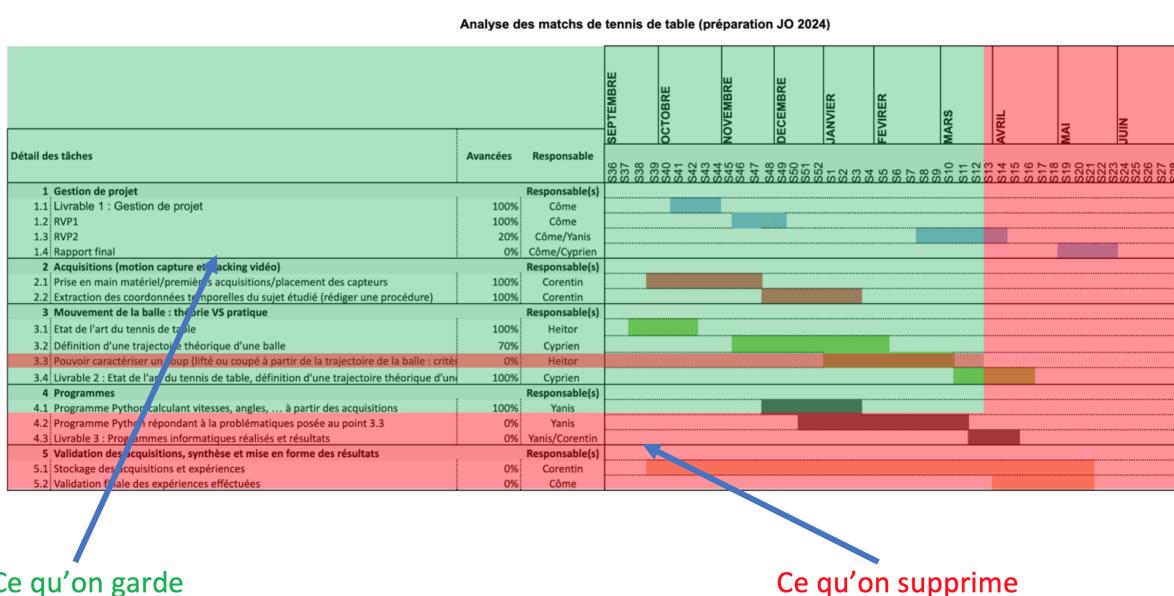
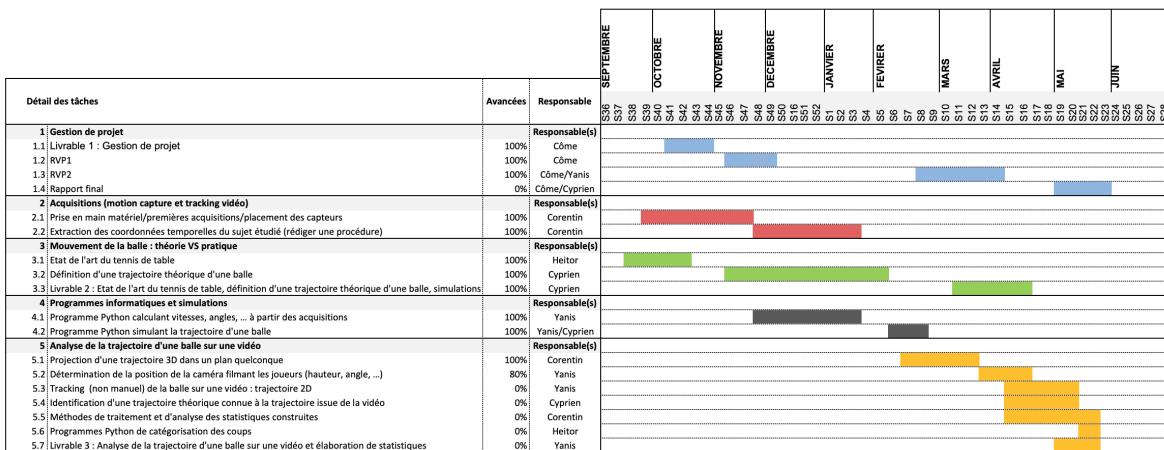


FIGURE 3 – Modification du diagramme de Gantt

Un nouveau diagramme de Gantt avec de nouvelles tâches a ainsi été construit.

Intitulé du projet :
Analyse des matchs de tennis de table (préparation JO 2024)

FIGURE 4 – Nouveau diagramme de Gantt

2.4 Les différentes tâches

2.4.1 Avancement des tâches déjà effectuées pour accomplir les objectifs précédents

Lot 1 : Gestion de projet : ce lot consiste s'assurer du bon pilotage du projet.

Tâche 1.1 : Mise en cohérence des enjeux du projet (100%)

Tâche 1.2 : Réalisation du RVP1 (100%)

Tâche 1.3 : Réalisation du RVP2 (100%)

Tâche 1.4 : Rapport final (0%)

Lot 2 : Acquisition en motion capture : ce lot consiste à organiser la manipulation du matériel de Motion Capture.

Tâche 2.1 : Prise en main du matériel et du logiciel de motion capture (100%)

Tâche 2.2 : Premières acquisitions en motion capture (100%)

Tâche 2.3 : Récupération des données temporelles et rédaction d'une procédure (100%)

Lot 3 : Analyse du mouvement de la balle, confrontation de la théorie et de la pratique : ce lot consiste à déterminer un modèle physique permettant de simuler la trajectoire d'une balle de tennis de table pour des paramètres d'entrée donnés.

Tâche 3.1 : État de l'art du tennis de table (100%)

Tâche 3.2 : Définition de la trajectoire théorique d'une balle de tennis de table (100%)

Tâche 3.3 : Livrable 2 : État de l'art du tennis de table, définition d'une trajectoire théorique et simulations (tâche 4.2) (100%)

Lot 4 : Programmes informatiques et simulations : ce lot consiste à rédiger les programmes Python permettant de simuler les trajectoires de balle.

Tâche 4.1 : Réaliser des programmes calculant vitesses, angles, ... à partir des acquisitions (100%)

Tâche 4.2 : Programme Python simulant la trajectoire d'une balle de tennis de table (100%)

2.4.2 Avancement des nouvelles tâches

Lot 5 : Analyse de la trajectoire d'une balle sur une vidéo : compte tenu de l'impossibilité de détecter la balle sur des vidéos avec des logiciels de tracking vidéo tels que OpenPose, ce lot consiste à tenter une autre approche pour détecter la trajectoire de la balle, tout cela dans le but de pouvoir classer les coups des joueurs lors d'un match qui aurait été filmé.

Tâche 5.1 : Projection d'une trajectoire 3D dans un plan quelconque (100%)

Tâche 5.2 : Détermination de la position de la caméra filmant les joueurs (hauteur, angle, ...) (80%)

Tâche 5.3 : Tracking (non manuel) de la balle sur une vidéo : trajectoire 2D (0%)

Tâche 5.4 : Identification d'une trajectoire théorique connue (projetée dans le plan de la caméra qui filme le match) à la trajectoire issue de la vidéo (0%)

Tâche 5.5 : Programmes Python de catégorisation des coups (0%)

Tâche 5.6 : Méthodes de traitement et d'analyse des statistiques construites (0%)

Tâche 5.7 : Livrable 3 : Analyse de la trajectoire d'une balle sur une vidéo et élaboration de statistiques (0%)

2.5 Conclusion sur l'état d'avancement du projet

Pour conclure sur cette section, nos objectifs ont été revus essentiellement à cause de difficultés rencontrées et des attentes communiquées par la FFTT, à qui le projet se destine dans l'optique des JO 2024. Si le projet a été ralenti à causes des complications évoquées, les tâches ont plutôt bien été réalisées jusqu'à présent. Après cette petite période d'incertitudes, le PE semble avoir retrouvé son rythme avec de nouvelles tâches adaptées aux nouveaux objectifs communiqués par la FFTT. De plus, un certain nombre de tâches qui ont été effectuées dans le but de répondre aux attentes initiales nous seront utiles pour répondre aux nouveaux objectifs. Par soucis de clarté, nous les avons tous intégrés dans le nouveau diagramme de Gantt. Cependant, nous ne sommes pas sûr de pouvoir concevoir le dispositif fini demandé d'ici la fin de l'année si de nouvelles difficultés sont rencontrées.

3 Les tactiques au tennis de table

Il existe plusieurs types de style de jeu au tennis de table.

Tout d'abord en ce qui concerne la manière de tenir la raquette, il y a deux écoles : la prise orthodoxe (prise traditionnelle en Europe) et la prise "porte-plume" (plus commun en Asie).

De plus, nous pouvons bien classifier les coups déférés lors d'un match.

Premièrement, le top-spin (ou lift) consiste à frotter la balle de bas en haut pour imposer une rotation avant à la balle. Ainsi, elle suit une trajectoire parabolique.



FIGURE 5 – Prise orthodoxe



FIGURE 6 – Prise "porte-plume"

Ensuite, le coup droit est réalisé lorsque le joueur frappe la balle du même côté que celui correspondant à la main qui tient la raquette. L'effet résulte du frottement quasiment à l'horizontale entre la balle et la raquette, et en passant en dessus de la balle. Le joueur peut mettre beaucoup de puissance avec ce mouvement.

Le revers est aussi une technique résultant du frottement quasiment à l'horizontale entre la balle et la raquette et en passant en dessus de la balle. Par revanche, il est réalisé lorsque le joueur frappe la balle du côté opposé à celui correspondant à la main du joueur qui tient la raquette. Et bien que cette technique soit importante, normalement le revers permet une attaque moins agressive que le coup droit.

Ensuite, il existe aussi la technique appelée coupé qui est plus défensive que les autres montrées ci-dessus, mais elle est tout de même très importante dans les matchs de tennis de table de haut niveau. Une balle coupée est frappée en mettant la raquette quasiment à l'horizontale de sorte que la raquette passe en dessous de la balle. La raquette a un mouvement vers le bas et vers la table, de façon à imposer une rotation arrière à la balle.

Finalement, nous avons aussi les flips : le flip coup droit et le flip revers. Le flip coup droit est réalisé suite à une balle courte déposée du côté de la main qui tient la raquette. C'est surtout avec le poignet que s'effectue le mouvement. Le flip revers est réalisé suite à une balle courte déposée du côté opposé de la main qui tient la raquette. L'idée est la même que celle du flip coup droit, mais parfois le flip revers permet de mettre soit plus

d'effet (latéral) dans la balle soit plus de puissance. Cette technique est donc actuellement très utilisée par les meilleurs joueurs.

Ci-dessous vous pouvez trouver les illustrations de l'application d'un top-spin et d'un coupé, suivi par les réponses adversaires avec un mauvais angle de renvoie de la balle.

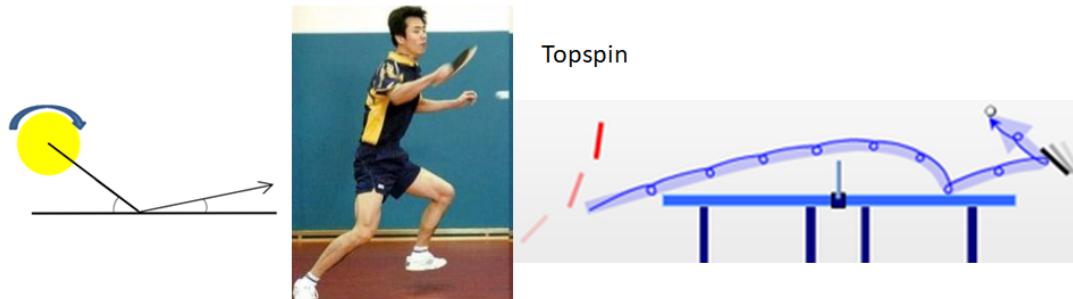


FIGURE 7 – La technique du top-spin/lifté

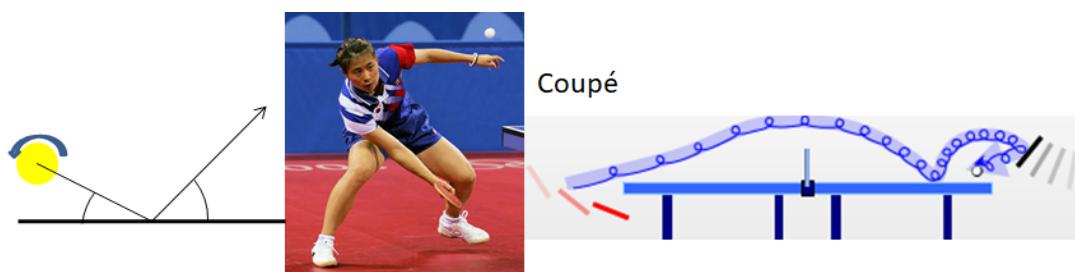


FIGURE 8 – La technique du coupé

De plus, aux annexes vous pouvez trouver le livrable concernant l'état de l'art du tennis de table où il est possible de trouver plus de détails et plus d'exemples sur les tactiques dans ce sport.

4 Travail initial : acquisitions par Motion Capture

4.1 Le motion capture

Dans le but de capturer un match de tennis de table, nous nous sommes orientés vers le motion capture. Son principe est de capturer un mouvement à l'aide de caméras infrarouges et de capteurs réfléchissants placés sur le sujet. Les différents points observés sont ensuite utilisés par un logiciel pour recréer le sujet numériquement et donc d'avoir toutes les données sur ses mouvements (vitesse, angle, position). Ce procédé demande d'être dans un espace sombre pour limiter les erreurs de mesure des appareils.

4.2 Matériel à disposition

A Centrale, la salle Amigo est mise à notre disposition. Cette salle possède plusieurs technologies, tels qu'un mur d'écran, une imprimante 3D ainsi que du matériel de réalité

virtuelle et de motion capture. Deux groupes de trois caméras infrarouges sont donc placées face à face pour permettre de recouvrir une partie de la salle. Nous avons ensuite ajouté une table de tennis de table pour capturer des échanges simples.

Nous avons également à disposition des tenues de motion capture nous permettant de



FIGURE 9 – Salle Amigo avec 3 caméras infrarouges et la table de tennis de table

conserver la position des capteurs tout au long de l'année. Le logiciel Nexus 2.5 permet de récupérer et de traiter les données acquises par les caméras.



FIGURE 10 – Tenue de motion capture avec des capteurs réfléchissants

Nous nous sommes également appuyé sur des vidéos réalisées par des étudiants de l'ECL ainsi que des tutoriels Nexus pour pouvoir faire un guide d'utilisation du logiciel. Ce guide d'utilisation réalisé est accessible sur ce [lien](#)

4.3 Acquisitions réalisées

Nous avons tout d'abord capturé plusieurs échanges courts pour maîtriser le logiciel et plus particulièrement la gestion des gaps. Avec une meilleure expérience, nous avons capturer des matchs entiers. Toutefois plusieurs problèmes persistent : Les corrections apportées sont parfois incohérentes, mais il est difficile de le voir directement depuis le logiciel Nexus, beaucoup de trajectoires ne sont pas traitable car elles sont trop petites (trop peu de frames concernées) et qu'elles ne sont pas reconnues par le logiciel comme l'un des capteurs. Pour corriger ses deux problèmes, il faut vérifier "à la main", ce qui est

plus précis mais très long (on peut passer plus d'une heure pour un échange). La balle est difficilement détectée ou est parfois détectée en double, nous avons donc testé plusieurs prototypes sans succès. Il semblerait qu'un point sur la balle, bien qu'il la déstabilise, est la meilleure solution pour la détecter.



FIGURE 11 – Deux prototypes de balle

Une fois certaines acquisitions bien traitées, nous avons pu récupérer les coordonnées de chaque points pour avoir des vues sur Python.

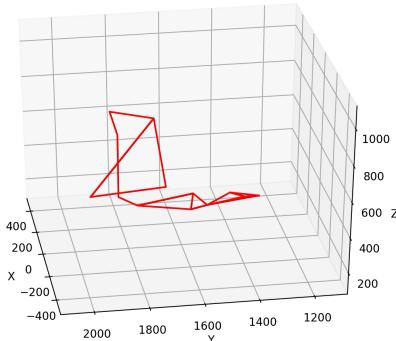


FIGURE 12 – Squelette reconstitué sur Python

4.4 Caractériser les coups : Approche "naïve" et machine learning

Pour tenter de caractériser les coups d'un joueur à partir d'une acquisition (ie. déterminer si le coup est un coup droit lifté, revers slicé, etc.), nous avons tenté différentes approches. Tout d'abord, nous avons essayé de créer un mouvement avec python en considérant le geste parfait, mais nous ne pouvons pas prédire le mouvement de l'adversaire. Nous avons également étudié si le machine learning pouvait être utilisé, toutefois nous n'avons pas donné suite à cette méthode du fait de sa complexité.

4.5 Limites de cette approche

Le motion capture demande du temps et il n'est pas possible de l'automatiser. De plus, sa précision n'est pas suffisante pour détecter différents coups. De plus, il faut déplacer le

matériel pour pouvoir filmer l'entraînement des joueurs. Bien qu'il peut nous permettre d'avoir une meilleure vision des gestes du joueur, cette approche ne nous permet pas d'avoir la trajectoire de la balle, et les données liées à la raquette et au poignée du joueur. Nous avons donc décidé de ne pas continuer de développer le motion capture.

5 Trajectoire d'une balle de tennis de table : théorie

5.1 Théorie

Pour mieux cerner les exigences du tennis de table de compétition, nous avons réalisé un premier travail de recherche sur ce sport que nous connaissons et pratiquons tous auparavant. Nous avons choisi de nous pencher sur l'histoire de ce sport, les règles et les compétitions mais également et surtout sur les différentes tactiques (effets et coups) et sur le lien entre la science et le tennis de table. En effet ces deux sujets ont été largement approfondis par la suite.

Dans le cadre de l'établissement de statistiques à partir de données vidéo, il était capital de pouvoir caractériser un coup joué (coupé, topspin...) à partir de sa trajectoire. C'est ce que nous avons réalisé à partir d'une étude théorique de la physique du tennis de table qui comprend non seulement la balistique mais également l'étude du rebond de la balle sur la table. L'étude de la balistique consistait simplement à étudier les différentes forces en jeu pour résoudre ensuite les équations différentielles régissant l'évolution des coordonnées de la balle.

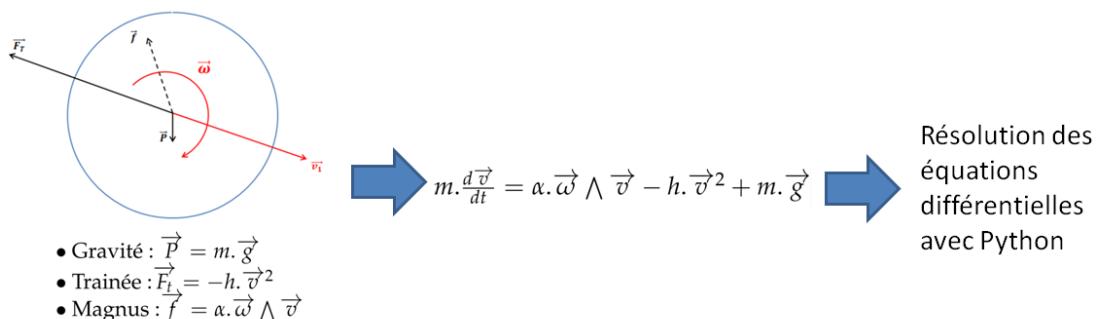


FIGURE 13 – Rappel de la démarche d'étude balistique

L'étude du rebond, plus complexe, nous a permis, à partir des caractéristiques cinétiques de la balle (vitesse et effet) avant le rebond de déterminer ces mêmes caractéristiques après le rebond. Nous avons modélisé la balle lors de son contact avec la table comme un ressort, introduisant alors les forces normale et tangentielle, N et f .

Fort de ce modèle, nous avons, toujours à l'aide du second principe de la dynamique,

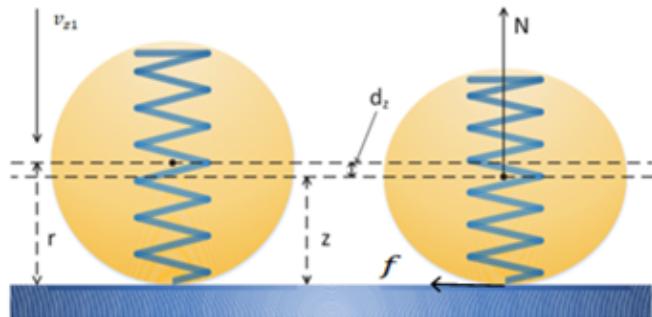


FIGURE 14 – Modèle de la balle comme un ressort

pu faire un bilan de la quantité de mouvement avant et après impact. La démarche et les calculs sont explicités dans le livrable dont le lien est en annexe.

Nous avons finalement abouti à une disjonction de cas entre le roulement et le glissement de la balle lors du rebond. Cela résulte de l'hypothèse selon laquelle les vitesses au point de contact au début et à la fin du contact ont un même sens. Ainsi dans le cas du roulement (qui s'applique lorsque certaines conditions initiales sont réunies), la vitesse au point de contact est nulle et alors l'énergie cinétique de rotation est majoritairement transformée en énergie cinétique de translation.

Pour le roulement on obtient ainsi les équations matricielles suivantes donnant la vitesse (\vec{v}_2) et l'effet ($\vec{\omega}_2$) après rebond.

$$\begin{cases} v_2 = A.v_1 + B.\omega_1 \\ \omega_2 = C.v_1 + D.\omega_1 \end{cases}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0 \\ 0 & 0 & -e \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 0,4.r & 0 \\ -0,4.r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{0,6}{r} & 0 \\ \frac{0,6}{r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } D = \begin{pmatrix} 0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Pour le glissement on obtient les mêmes équations matricielles avec les matrices A, B, C et D qui sont changés par rapport au cas du roulement.

$$A = \begin{pmatrix} 1 - \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \gamma & 0 \\ 0 & 0 & -e \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & \gamma.r & 0 \\ -\gamma.r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{3.\gamma}{2.r} & 0 \\ -\frac{3.\gamma}{2.r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 1 - \frac{3.\gamma}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \frac{3.\gamma}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

5.2 Simulations

Cette étude théorique de trajectoire nous permet donc de simuler informatiquement des trajectoires de balle en fonction des conditions initiales (vitesse, effet et position). Ces simulations théoriques sont capitales pour la suite car elles vont être comparées aux trajectoires pointées sur les vidéos pour déterminer les caractéristiques du coup joué lors du match pris en vidéo.

Ci-dessous vous est présentée une simulation réalisée pour souligner la prise en compte de l'effet dans notre modèle et son importance dans une trajectoire.

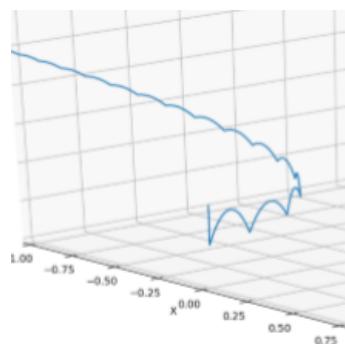


FIGURE 15 – Trajectoire de la balle en 3D

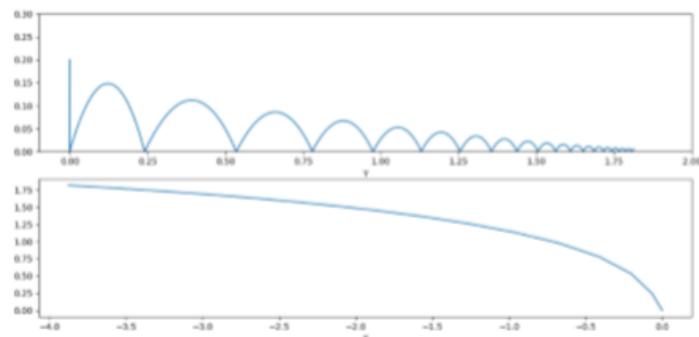


FIGURE 16 – Trajectoire de la balle en 2D

Le coup correspondant est le suivant : on lache la balle à 20 cm de la table (au point de coordonnées $(0 \ 0 \ 0,2)$) avec une vitesse nulle ($v_1 = 0$) mais une rotation non nulle : $\omega_1 = (150 \ 40 \ 0)$ (en rad/s).

6 Analyse de la trajectoire d'une balle sur une vidéo

Le cœur du problème s'articule autour d'une identification fidèle de la trajectoire de la balle, et de l'analyse du style de jeu d'un joueur, en accord avec les critères donnés par la FFTT, comme expliqué plus haut. On se focalise dans cette partie sur le premier point.

6.1 Présentation du protocole

Pour identifier la trajectoire de façon exacte on adopte le plan suivant :

1. **Tracking de la balle** sur la vidéo.
2. **Identification** de la position de la caméra
3. **Création** d'une trajectoire en 3D que l'on projette dans le plan de la caméra.
4. **Comparaison** de la trajectoire vidéo avec la trajectoire théorique.
5. **Identification** des paramètres permettant une trajectoire au plus proche de la réalité.

6.2 Réalisation du protocole

6.2.1 Tracking de la balle (1)

On effectue un "tracking" de la balle image par image. Pour ce faire, on utilise un algorithme d'apprentissage afin de détecter la présence de la balle et de trouver sa position. La sortie de cet algorithme est un nuage de points ordonnés, décrivant une trajectoire dans le plan de la caméra, c'est-à-dire une trajectoire en 2D, où les distances ne sont pas significatives, on ne peut pas effectuer de mesure de vitesse ou autre directement sur ce jeu de données.

6.2.2 Identification de la position de la caméra (2)

On identifie la position de la caméra grâce aux seuls points supposés stables tout au long de la vidéo : les arrêtes de la table. On peut ainsi identifier une position et un angle de caméra (voir illustrations).

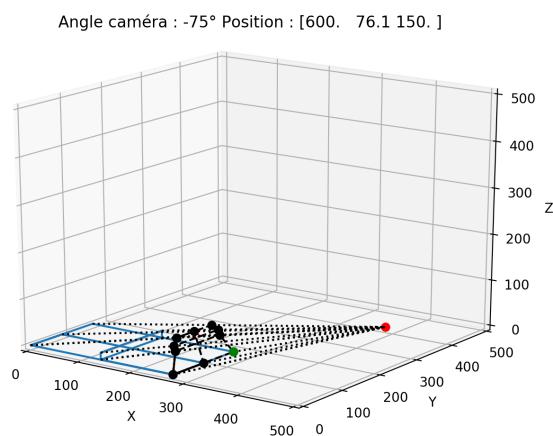


FIGURE 17 – Illustration de la méthode de projection dans le *plan de la caméra*

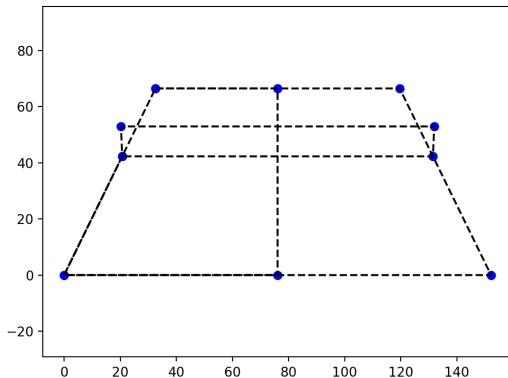


FIGURE 18 – Résultat de la projection précédente

Sur la FIGURE 17, on identifie en bleu la table réelle en 3D, en noir la projection de ces lignes dans le plan de la caméra et enfin le point rouge représente la caméra (modélisation ponctuelle).

Pour identifier les paramètres de la caméra (angle, position) on utilise un algorithme itératif utilisant une méthode du gradient à pas constant. Dans l'optique où l'on connaît la hauteur de la caméra puisque réglementée, et que l'on sait que celle-ci est centrée sur la table, il ne reste plus qu'à identifier la distance Table-Caméra (dans la direction X, en suivant la FIGURE 17) ce qui simplifie grandement la recherche de la position.

6.2.3 Simulation et Identification des paramètres de la trajectoire (3,4&5)

Pour conclure l'identification, on doit simuler une trajectoire en 3D dont on connaît tous les paramètres, et on modifie ces paramètres pour approcher ce que l'on voit dans le plan de la caméra. On utilise ici encore la méthode itérative du gradient à pas constant pour trouver les paramètres de la trajectoire simulée. Cependant, ici les paramètres à identifier sont beaucoup plus nombreux ; 9 au total (Ce sont les conditions initiales de la simulation c'est-à-dire les vitesses, rotation et position initiales $(\vec{v}_0, \vec{\omega}_0, \vec{x}_0)$).

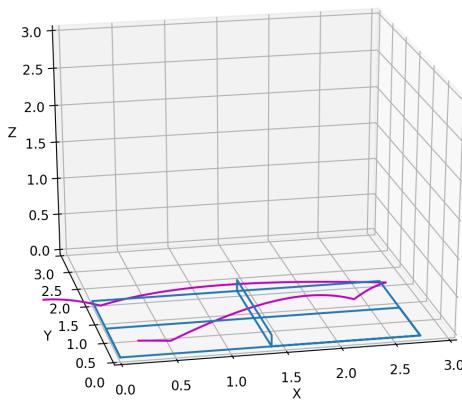


FIGURE 19 – Simulation d'une trajectoire en 3D (un échange)

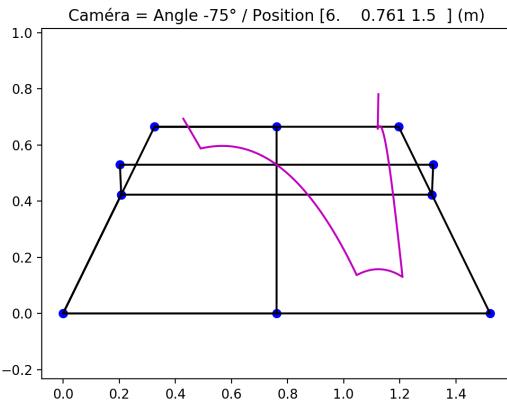


FIGURE 20 – Projection de cette trajectoire dans le plan de la caméra

6.3 Analyses des données récoltées

Enfin, les données extraites (coups catégorisés) devront faire l'objet d'un traitement afin de faire ressortir les régularités inconscientes d'un adversaire. Pour chaque coup enregistré dans une des trois catégories précédemment évoquées, il faudra lui associer d'autres informations : score avant le point, serveur, coup de son adversaire avant le sien, etc. Le recours à une base de données semble inévitable. Les outils relatifs à cette dernière seront développés en fin d'année.

6.4 Optimisation

Le travail présenté précédemment est l'approche qui nous semblait la plus judicieuse afin de traiter le problème. Si sa finalité (construire un jeu de données sur un match filmé) n'a pas encore été atteinte, nous pouvons déjà réfléchir à la manière d'optimiser le processus d'identification de la trajectoire réelle enregistrée sur une vidéo à une trajectoire théorique.

En effet, notre démarche ne prend pas compte du mouvement et du déplacement du joueur en amont de son coup. Ainsi, l'étape suivante serait de pouvoir inclure ces paramètres en collaborant avec un autre projet réalisé à l'école Centrale de Lyon qui capture le mouvement des pongistes à partir des mêmes vidéos que nous utilisons pour en exhiber un squelette (Figure 13).

Ainsi, connaître la vitesse de certaines articulations ou bien leur type de mouvement nous permettrait d'avoir des informations sur le type de coup. Par exemple, si l'articulation n° 7 représentant le poignet droit du joueur (Figure 13(a)) effectue un mouvement du bas vers le haut, derrière la table, avec une grande vitesse, il est fort probable qu'il s'agisse d'un coup droit topspin.

La connaissance ou supposition du coup permettrait d'affiner la trajectoire théorique identifiée à la trajectoire réelle, car les hypothèses sur cette dernières seront plus nombreuses.



(a) Squelette détaillé (b) Mise en évidence des squelettes des joueurs dans une vidéo

FIGURE 21

7 Travail restant

À l'heure actuelle, le projet touchant à sa fin, sont restantes les tâches 5.2 à 5.6. C'est-à-dire qu'il nous reste donc à identifier automatiquement une trajectoire, et d'en tirer les paramètres utiles, de stocker ces données et enfin d'élaborer une classification de ces données pour construire une interface statistique permettant une transmission claire et précise des informations récoltées et analysées.

8 Conclusion

Pour conclure, cette étude n'est rien d'autre l'application des outils informatiques au monde du sport, et en particulier au tennis de table. Si les instruments numériques a révolutionné la manière de regarder le sport au 20ème siècle, ils n'ont encore que trop peu révolutionné leur apprentissage. Traiter les vidéos de matchs officiels de tennis de table pour en exhiber des statistiques, pouvant faire ressortir les régularités inconscientes d'un adversaire, est dorénavant à porté de main grâce à l'étude dynamique de la trajectoire d'une balle et à des modèles et traitements informatiques. Enfin, une analyse fine des données extraites permettrait de rendre les joueurs plus compétitifs grâce à une préparation adaptée à l'adversaire, et devrait constituer, à défaut de déjà l'être, un enjeu majeur dans le monde du sport.

9 Annexes

9.1 Gestion de projet

9.1.1 Diagramme de Gantt

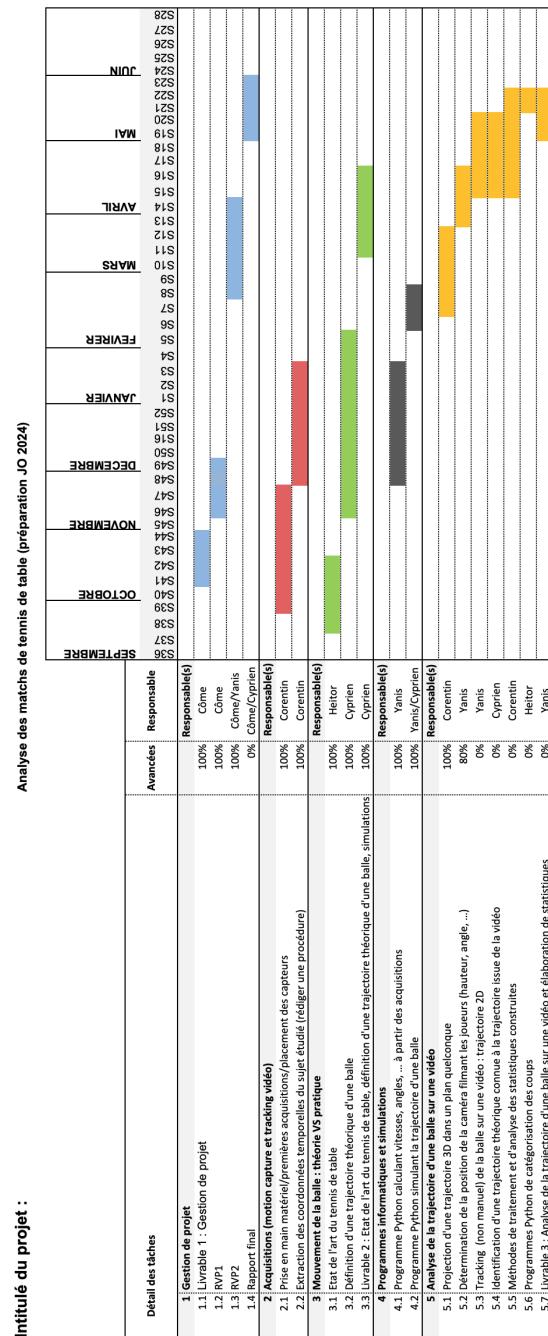


FIGURE 22 – Nouveau diagramme de Gantt

[Lien pour accéder au diagramme de Gantt](#)

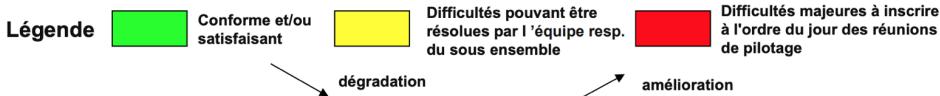
9.1.2 Compte-rendu de la réunion avec la FFTT

Lien : <https://drive.google.com/file/d/1I0bX4ZaP3ObSbIt1BQ5VKYisA0GmUR/view?usp=sharing>

9.1.3 Tableau de bord du projet à t = 31 semaines

Structure du projet	Analyse des risques	Situation actuelle du projet	Décisions à prendre
Tâche 3.3		Finie	RAS
Tâche 5.2		En cours de finition	RAS
Tâche 5.3		Tout juste commencée comme convenu. Cependant, approche avec des incertitudes mais validée par le commanditaire	Aucune pour le moment
Tâche 5.4		Tout juste commencée comme convenu mais difficultés à quantifier le temps nécessaire pour effectuer cette tâche	Mettre 2 personnes sur la tâche
Tâche 5.5		Tout juste commencée comme convenu	RAS

Légende



- Conforme et/ou satisfaisant
- Difficultés pouvant être résolues par l'équipe resp. du sous ensemble
- Difficultés majeures à inscrire à l'ordre du jour des réunions de pilotage

↓ dégradation ↑ amélioration

FIGURE 23 – Tableau de bord du projet à t = 31 semaines

9.2 Lien vers les livrables

[Tâches 1 à 4](#)
[Début tâche 5](#)

9.3 Détails de la modélisation théorique du rebond

Pour établir le modèle physique du rebond on utilisera les notations suivantes :

$\vec{\omega}_1 = (\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1})$, $\vec{\omega}_2 = (\omega_{x2}, \omega_{y2}, \omega_{z2})$ les vecteurs rotation de la balle respectivement avant et après le rebond.

$\vec{v}_1 = (v_{x1}, v_{y1}, v_{z1})$, $\vec{v}_2 = (v_{x2}, v_{y2}, v_{z2})$ les vecteurs vitesse de la balle respectivement avant et après le rebond.

$\vec{v}_{c1} = (v_{cx1}, v_{cy1}, v_{cz1})$, $\vec{v}_{c2} = (v_{cx2}, v_{cy2}, v_{cz2})$ les vecteurs vitesse de la balle au point de contact M dans le plan(\vec{x} , \vec{y}) respectivement à $t = 0$ et à $t = t_c$.

Par changement de point, on peut établir \vec{v}_{c1} :

$$\vec{v}_{c1} = (\vec{v}_1 + \overrightarrow{MO} \wedge \vec{\omega}_1) = \begin{pmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} \omega_{x1} \\ \omega_{y1} \\ \omega_{z1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{x1} - r \cdot \omega_{y1} \\ v_{y1} + r \cdot \omega_{x1} \\ 0 \end{pmatrix}$$

On notera v_{c1} sa norme.

Soit $\vec{\rho} = m \cdot \vec{v}$ la quantité de mouvement de la balle.

On notera $\vec{S} = \vec{\Delta}_p = \vec{\rho}_2 - \vec{\rho}_1$, $\vec{\rho}_2$ et $\vec{\rho}_1$ étant les quantités de mouvement respectivement après et avant le contact.

On a ainsi, par définition, selon l'axe \vec{i} , $\vec{S} \cdot \vec{i} = S_i = m \cdot (v_{i2} - v_{i1})$.

Le second principe de la dynamique nous permet d'écrire :

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i \quad \text{et il vient donc avec l'étude réalisée en 3.2 :}$$

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} + \vec{N}$$

On obtient alors :

$$\vec{S} = m \cdot \vec{\Delta}_v = \int_{t=0}^{t_c} (N \cdot \vec{z} - \mu \cdot N \cdot \frac{\vec{v}_{c1}}{v_{c1}}) \cdot dt \quad (1)$$

On considère que seule la force normale N dépend du temps. On obtient alors les équations suivantes :

$$S = \vec{S} \cdot \frac{\vec{v}_{c1}}{v_{c1}} = -\mu \cdot \int_{t=0}^{t_c} N \cdot dt \quad (2)$$

$$S_x = \vec{S} \cdot \vec{x} = -\mu \cdot \int_{t=0}^{t_c} N \cdot \frac{\vec{v}_{c1}}{v_{c1}} \cdot \vec{x} \cdot dt = -\mu \cdot \frac{v_{cx1}}{v_{c1}} \cdot \int_{t=0}^{t_c} N \cdot dt = \frac{v_{cx1}}{v_{c1}} \cdot S \quad (3)$$

$$S_y = \vec{S} \cdot \vec{y} = -\mu \cdot \int_{t=0}^{t_c} N \cdot \frac{\vec{v}_{c1}}{v_{c1}} \cdot \vec{y} \cdot dt = -\mu \cdot \frac{v_{cy1}}{v_{c1}} \cdot \int_{t=0}^{t_c} N \cdot dt = \frac{v_{cy1}}{v_{c1}} \cdot S \quad (4)$$

$$S_z = \vec{S} \cdot \vec{z} = \int_{t=0}^{t_c} N \cdot dt = -\frac{S}{\mu} \quad (5)$$

On a donc :

$$\begin{cases} S = -\mu \cdot S_z \\ v_{z2} = -e \cdot v_{z1} \\ S_z = m \cdot (v_{z2} - v_{z1}) \end{cases}$$

Doù finalement : $S = \mu \cdot m \cdot (1 + e) \cdot |v_{z1}|$

Donc il vient avec (7) et (8) :

$$S_i = \mu \cdot m \cdot (1 + e) \cdot |v_{z1}| \cdot \frac{v_{ci1}}{v_{c1}} \quad \text{avec } i \in \{x, y\} \quad (6)$$

Soit

$$v_{i2} = v_{i1} - \mu \cdot (1 + e) \cdot |v_{z1}| \cdot \frac{v_{ci1}}{v_{c1}} \quad \text{avec } i \in \{x, y\} \quad (7)$$

On a ainsi obtenu les expressions de v_{x2} et v_{y2} . On va maintenant déterminer l'expression de ω_{x2} , ω_{y2} et ω_{z2} .

Par théorème du moment cinétique projeté sur le plan de la table de tennis de table, on a, avec $J = \frac{2}{3} \cdot m \cdot r^2$ le moment d'inertie de la balle et $vecM_F$ le moment de la force F :

$$J \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \sum \vec{M}_F \quad (8)$$

Or la seule force dans le plan de la table de tennis de table est la force de friction $\vec{f} = \mu \cdot \vec{N}$ de moment $\vec{M}_f = -r \cdot \mu \cdot \vec{N}$. Il vient donc :

$$J \cdot \vec{\Delta}_{\omega} = \int_{t=0}^{t_c} \vec{M}_f \cdot dt \quad (9)$$

$$\vec{\Delta}_{\omega} \cdot \vec{i} = \Delta_{\omega i} = \frac{1}{J} \cdot \int_{t=0}^{t_c} \vec{M}_f \cdot \frac{v_{c1j}}{v_{c1}} \cdot dt \text{ avec } i, j \in \{x, y\} \text{ et } i \neq j \quad (10)$$

Soit :

$$\begin{cases} \Delta_{\omega x} = \omega_{x2} - \omega_{x1} = -\frac{r \cdot \mu \cdot v_{c1y}}{J \cdot v_{c1}} \cdot \int_{t=0}^{t_c} N \cdot dt \\ \Delta_{\omega y} = \omega_{y2} - \omega_{y1} = -\frac{r \cdot \mu \cdot v_{c1x}}{J \cdot v_{c1}} \cdot \int_{t=0}^{t_c} N \cdot dt \end{cases}$$

De plus, on a vu ci-dessus que $\int_{t=0}^{t_c} N \cdot dt = S_z = -m \cdot (1 + e) \cdot |v_{z1}|$ et $J = \frac{2}{3} \cdot m \cdot r^2$. Ainsi en remplaçant, on obtient finalement :

$$\begin{cases} \omega_{x2} = \omega_{x1} - \frac{3 \cdot \mu \cdot v_{c1y} \cdot (1+e) \cdot |v_{z1}|}{2 \cdot r \cdot v_{c1}} \\ \omega_{y2} = \omega_{y1} - \frac{3 \cdot \mu \cdot v_{c1x} \cdot (1+e) \cdot |v_{z1}|}{2 \cdot r \cdot v_{c1}} \end{cases} \quad (11)$$

Nous avons ainsi trouvé toutes les expressions requises pour modéliser le rebond. Toutefois, il nous faut vérifier une des hypothèses pour l'étude du rebond : la direction de la vitesse au point de contact M reste la même à $t = 0$ et $t = t_c$. Vérifions que cette hypothèse est vérifiée. La vitesse au point de contact M après le contact ($t = t_c$) est :

$$\vec{v}_{c2} = (\vec{v}_2 + \vec{MO} \wedge \vec{\omega}_2) = \begin{pmatrix} v_{x2} \\ v_{y2} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} \omega_{x2} \\ \omega_{y2} \\ \omega_{z2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{x2} - r \cdot \omega_{y2} \\ v_{y2} + r \cdot \omega_{x2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

En remplaçant v_{x2} et ω_{y2} par leur valeur trouvée ci-dessus ((11) et (15)), il vient :

$$v_{cx2} = v_{x1} - \mu \cdot |v_{z1}| \cdot (1 + e) \cdot \frac{v_{cx1}}{v_{c1}} - r \cdot (\omega_{y1} - \frac{3 \cdot \mu \cdot v_{c1x} \cdot (1+e) \cdot |v_{z1}|}{2 \cdot r \cdot v_{c1}}) \quad (12)$$

Or $v_{c1x} = v_{x1} - r.\omega_{y1}$.

Donc on peut factoriser cette expression et on a alors :

$$v_{cx2} = v_{cx1} \cdot \left(1 - \frac{5\mu.(1+e).|v_{z1}|}{2.v_{c1}}\right) \quad (13)$$

On réalise un calcul analogue pour v_{cy2} et finalement, on a :

$$v_{ci2} = v_{ci1} \left(1 - \frac{5\mu.(1+e).|v_{z1}|}{2.v_{c1}}\right) \text{ avec } i \in \{x, y\} \text{ et } v_{cz2} = 0 \quad (14)$$

Pour que l'hypothèse en question soit vérifiée, on doit avoir v_{c2i} de même signe que v_{c1i} . Il nous faut donc distinguer deux cas en fonction de la valeur de $\beta = \frac{5\mu.(1+e).|v_{z1}|}{2.v_{c1}}$.

Pour accéder à l'ensemble de cette modélisation théorique, allez sur ce [lien](#).