



## ÉCOLE CENTRALE LYON

UE PRO - PE 39  
RAPPORT FINAL

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

### *Élèves :*

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

### *Département d'accueil :*

Mathématiques - Informatique (MI)

### *Président du jury :*

Gilles ROBERT

### *Commanditaire et tuteur :*

Romain VUILLEMOT

*Conseiller en  
communication :*  
Emmanuel RHÉTY

*Conseiller en gestion de  
projet :*

Arnaud BRÉARD

## Résumé

Les progrès technologiques de ces dernières années offrent l'opportunité inédite de pouvoir analyser la pratique d'activités sportives de manière quantitative. Les sportifs professionnels sont en particulier friands de telles études, car cela leur permet d'accompagner leurs entraînements, mais surtout car cela ouvre la voie à l'automatisation de l'analyse des matchs de leurs potentiels adversaires. Ainsi, dans le cadre du projet "Science 2024", l'objectif de ce travail est de pouvoir analyser les matchs de compétition d'un joueur de tennis de table à partir de sa vidéo retransmise à la télévision par exemple, afin de faire ressortir sa stratégie et ses régularités inconscientes. Cette analyse se fait d'abord par le tracking des deux joueurs et de la balle sur une telle vidéo. L'approche adoptée se base sur l'utilisation d'un algorithme d'apprentissage, qui annote la trajectoire de ces trois objets, projetée dans le plan de la caméra, entre chaque "coup de raquette". Les caractéristiques de chaque échange (vitesse, rotation de la balle, etc.) sont déterminées en faisant correspondre la trajectoire pratique à une trajectoire théorique de la balle aux paramètres connus, issue d'un modèle physique précédemment construit, par une méthode du gradient. Enfin, dans le cas toutes les caractéristiques des échanges sont connues, une base de données peut être construite retracant l'historique du match et les particularités des coups de chaque joueur, en établissant un modèle de classification. Cette base de données peut être étudiée pour analyser le match dans son ensemble et ses moments clés.

## Summary

Technological progress of recent years offer the unprecedented opportunity to analyse sport from a quantitative point of view. Professional athletes are particularly interested by such studies : it allows them to monitor their training and pave the way to the automation of the analysis of their potential future opponents' matches. Thus, within the framework of the "Science 2024" project, this study aims to analyse competitive matches of a table tennis player thanks to its video broadcasted on TV for example, in order to determine the player's strategy and his unconscious regularities. The first step of this analysis is the computed tracking of the ball and both player in the video. The approach taken uses a learning algorithm which annotate the trajectory of the three precedent objects , projected in the camera's plane, between each racket play. Characteristics of each rallies (speed of the ball, rotation) are determined by matching, with a gradient method, the practical trajectory to a theoretical trajectory of the ball with known parameters from a physical model previously built. Finally, in case all the characteristics of one match's rallies are known, a data base can be built to trace back the history of the match and the particularities of the shots of each player, by establishing a classification model. This data base can then be studied to analyse the match as a whole and during its turning points.

## Remerciements

Nous souhaitons remercier notre tuteur scientifique et commanditaire, Romain VUILLEMOT, qui nous a accompagné, donné des conseils et apporté son expertise tout au long de cette année pour réaliser ce projet.

Nous souhaitons remercier notre tuteur de gestion de projet, Arnaud BRÉARD, qui nous a permis de conduire ce projet de manière claire, efficace et organisée.

Nous souhaitons remercier notre conseiller en communication, Emmanuel RHÉTY, qui a su nous apprendre à être pertinent et juste dans notre manière de communiquer durant notre présentation ou dans nos rapports écrits.

Nous souhaitons remercier la Fédération Française de Tennis de Table (FFTT) pour avoir fait confiance à l'Ecole Centrale de Lyon pour conduire un projet ambitieux et innovant dans le milieu du sport.

Nous souhaitons remercier le personnel en charge de la salle AMIGO dans le bâtiment D5 du campus de l'Ecole Centrale de Lyon, qui nous ont fourni un environnement propice à notre travail avec du matériel de pointe.

Nous souhaitons remercier Gabin ROLLAND et Nathan RIVIÈRE, élèves de l'Ecole Centrale de Lyon ayant aussi conduits un projet relatif à l'analyse de données dans le sport dans la salle AMIGO durant la première moitié de l'année scolaire, qui nous ont aidé dans la réalisation de notre projet et la prise en main du matériel de la salle.

Nous souhaitons remercier Guillaume GROULT, élève de l'Ecole Centrale de Lyon, qui a aussi conduit un projet dans la salle AMIGO durant la deuxième partie de l'année scolaire, pour nous avoir apporté des conseils.

Nous souhaitons remercier Huanyu QU, élève de deuxième année à l'Ecole Centrale de Lyon, qui a réalisé une étude complémentaire à la nôtre sur le tennis de table, en s'intéressant principalement aux mouvements des joueurs lors d'un match, et qui n'a pas hésité à nous partager son travail.

Enfin, nous souhaitons remercier l'Ecole Centrale de Lyon pour nous avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet, de regarder le sport, et en particulier le tennis de table, sous un angle plus technique et statistique, et ceci dans des conditions idéales qui a permis au groupe de s'épanouir, malgré la situation sanitaire qui a frappé l'Europe en milieu d'année.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Préliminaires</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Présentation du projet</b>	<b>6</b>
2.1	Contexte du projet . . . . .	6
2.2	Objectifs du projet . . . . .	7
2.3	Les membres du projet . . . . .	8
2.4	Planification du projet . . . . .	9
<b>3</b>	<b>La techniques au tennis de table</b>	<b>10</b>
3.1	Les différents coups . . . . .	10
3.2	Classification des coups dans un match . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Trajectoire d'une balle de tennis de table : théorie</b>	<b>12</b>
4.1	Théorie . . . . .	12
4.2	Simulations . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Tracking de la balle sur une vidéo</b>	<b>15</b>
5.1	Présentation du protocole . . . . .	15
5.2	Réalisation du protocole : (1) et (2) . . . . .	15
5.2.1	Tracking de la balle (1) . . . . .	15
5.2.2	Identification de la position de la caméra (2) . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Comparaison trajectoire théorique - trajectoire issue de la vidéo</b>	<b>17</b>
6.1	Rappel du protocole . . . . .	17
6.2	Réalisation du protocole : simulation et identification des paramètres de la trajectoire (3,4 & 5) . . . . .	18
6.2.1	Création d'une trajectoire en 3D projetée dans le plan de la caméra	18
6.2.2	Comparaison de la trajectoire vidéo avec la trajectoire théorique. .	19
6.3	Optimisation . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Catégorisation des coups et axes d'analyse des données récoltées</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>29</b>
<b>9</b>	<b>Annexe : Liste des tâches</b>	<b>31</b>
<b>10</b>	<b>Annexe : Diagramme de Gantt</b>	<b>32</b>
10.1	Diagramme complet . . . . .	32
10.2	Diagramme avec suivi . . . . .	33
<b>11</b>	<b>Annexe : Gestion des coûts</b>	<b>33</b>
<b>12</b>	<b>Annexe : Checklist du rapport</b>	<b>35</b>

## Table des figures

1	FFTT et Sciences 2024 . . . . .	6
2	Fiche statistique du premier set d'un match opposant Niwa à Groth . . . . .	7
3	Membres du PE . . . . .	8
4	Matériel utilisé pour des acquisitions par Motion Capture . . . . .	9
5	Les différentes manières de tenir la raquette . . . . .	10
6	La technique du top-spin/lifté . . . . .	11
7	La technique du coupé . . . . .	11
8	Rappel de la démarche d'étude balistique . . . . .	12
9	Modèle de la balle comme un ressort . . . . .	13
10	Trajectoire de la balle dans les plans 2D . . . . .	14
11	Trajectoire de la balle dans les plans 2D . . . . .	14
12	Illustration de la prédiction faite par l'algorithme de machine learning . . . . .	16
13	Illustration de la méthode de projection dans le <i>plan de la caméra</i> (axes en cm) . . . . .	17
14	Résultat de la projection dans le plan précédent (axes en cm) . . . . .	17
15	Coup pointé sur logiciel . . . . .	18
16	Simulation d'une trajectoire en 3D (un échange) . . . . .	19
17	Projection de cette trajectoire dans le plan de la caméra . . . . .	19
18	Évaluation de l'écart entre les deux trajectoires . . . . .	20
19	Méthode 1 : Trajectoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra . . . . .	21
20	Méthode 1 : Trajectoire 3D théorique finale dans des plans 2D . . . . .	21
21	Méthode 2 : Trajetoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra . . . . .	22
22	Méthode 2 : Trajetoire 3D théorique finale dans des plans 2D . . . . .	22
23	Méthode 3 : Trajetoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra . . . . .	23
24	Méthode 3 : Trajetoire 3D théorique finale dans des plans 2D . . . . .	23
25	Méthode 4 : Trajetoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra . . . . .	24
26	Méthode 4 : Trajetoire 3D théorique finale dans des plans 2D . . . . .	24
27	Coup A pointé sur logiciel . . . . .	25
28	Bilan comparatif des résultats obtenus pour le coup A . . . . .	25
29	Coup B pointé sur logiciel . . . . .	26
30	Bilan comparatif des résultats obtenus pour le coup B . . . . .	26
31	Suivi des mouvements des joueurs par tracking vidéo . . . . .	27
32	Moments clés dans un match de tennis de table, où les statistiques auront une valeur d'autant plus importante . . . . .	28
33	Liste des tâches du projet . . . . .	31
34	Nouveau diagramme de Gantt . . . . .	32
35	Diagramme de Gantt avec suivi . . . . .	33
36	Budget prévisionnel . . . . .	33
37	Checklist des éléments présents dans ce présent rapport . . . . .	35

## 1 Préliminaires

Le présent document détaille les résultats obtenus par le PE n° 39 : Analyse de matchs de tennis de table (préparation JO 2024), dans le contexte du projet "Science 2024", qui a pour ambition de mettre la science au service du sport de haut niveau dans l'optique des Jeux Olympiques 2024 à Paris.

Dans un premier temps, une présentation globale du projet est effectuée, en rappelant son contexte et la stratégie globale adoptée pour répondre à nos objectifs : analyser des matchs de tennis de table en catégorisant chaque coup du match à partir de la vidéo des rencontres.

Dans un second temps, un rappel succinct sur les techniques au tennis de table est fait, afin d'avoir une base de connaissances nécessaires à l'analyse de matchs de tennis de tables.

De plus, un modèle physique est construit dans le but de simuler la trajectoire d'une balle de tennis de table pour des paramètres initiaux connus (vitesse, rotation, etc.). Des simulations illustrant les résultats obtenus y sont exposées.

Puis, la première étape du protocole, ayant pour but final la détermination des caractéristiques quantitatives de la trajectoire d'une balle à partir de la vidéo d'un match, est détaillée. Le choix de la technique retenue pour effectuer le tracking de la balle sur une vidéo est explicité, ainsi que ses résultats.

Ensuite, la seconde étape du protocole est développée : retrouver la trajectoire théorique de la balle à partir de sa trajectoire extraite sur la vidéo. Ceci est réalisé en superposant les paramètres une trajectoire théorique à la trajectoire pointée en se basant une méthode du gradient. Les différentes méthodes testées sont décrites avec leurs résultats. Connaissant finalement les caractéristiques de la trajectoire issue de la vidéo, le coup peut être classé.

Enfin, dans l'hypothèse que ce protocole a été appliqué à un match de tennis de table, une stratégie d'analyse des données récoltées est développée.

## 2 Présentation du projet

### 2.1 Contexte du projet

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".



(a) Logo de la FFTT



(b) Logo du projet "Sciences 2024"

FIGURE 1 – FFTT et Sciences 2024

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) ».

Lors de notre entrevue 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 consacrer davantage de temps à l’en-

traînement pour 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.

Un exemple de fiche statistique, réalisée par Christian Gaubert, est illustré sur la Figure 2.

	Score	1er Coup	2ème Coup	3ème Coup	4ème Coup	5ème Coup	6ème Coup	7ème Coup	8ème Coup	
	Niwa	Groth	Coup	Plct	Coup	Plct	Coup	Plct	Coup	Plct
1er point	1	0	SDLG D1							
2ème point	2	0	SDLG D1	PD D3	PD M2	AD G3	CR M2			
3ème point	3	0	SDLG D1	AR G3	CR M3	AR D3				
4ème point	4	0	SDLG D2	AD G3	AR G3	AR G3				
5ème point	5	0	SDLG D2	AR M3	AD G3					
9ème point	6	3	SDLD D2	PD D3	AD G3	CD M3	AR M3			
11ème point	7	4	SDLG D1	PD M2						
12ème point	8	4	SDLD G2	AR G3						
13ème point	9	4	SDLG M1	AR M2	AD G3					
17ème point	10	7	SDD G3							
19ème point	11	8	SDLD G2	AR M3						
6ème point	5	1	SDLG D2	AD D3						
7ème point	5	2	SDLD G1	PR G2	AR M3					
8ème point	5	3	SDLD M3	AR G3	AD G3					
10ème point	6	4	SDLD M2	PD D1	PD D3	AD D3				
14ème point	9	5	SDLG M1	AR M3						
15ème point	9	6	SDLD D1							
16ème point	9	7	SDLD G3							
18ème point	10	8	SDD M1	PD D2	AD D3	CD M3	AR G3	CD M3	AR D3	CD G3

FIGURE 2 – Fiche statistique du premier set d'un match opposant Niwa à Groth

Nous remarquerons que des abréviations ont ici été utilisées, qui indiquent le type de coup et la zone trouvée par le joueur.

## 2.2 Objectifs du projet

Comme évoqué précédemment, ce PE a pour objectif principal d'aider les pongistes français à améliorer leurs performances en vue des Jeux Olympiques de Paris 2024. Pour cela, nous souhaitons proposer aux joueurs français (ou à leur entraîneur) de pouvoir analyser leur jeu et celui de leurs adversaires grâce au travail réalisé sur des acquisitions vidéo, **en catégorisant chaque coup de chaque point d'un match selon une classification donnée**, d'une manière similaire à celle qui a été montrée sur la Figure 2.

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.

Ainsi, notre premier objectif est donc de pouvoir réaliser le tracking vidéo de la trajectoire de la balle sur la vidéo d'un match de tennis de table. Ceci représente un

véritable enjeu car il s'est avéré qu'il est difficile d'avoir une acquisition où la position de la balle est enregistrée pour tout instant, étant donné la qualité de certaine vidéo, la vitesse des échanges ou encore la couleur de la balle qui la rend parfois peu visible. Il faut que le dispositif final soit rapide et confortable à utiliser.

**Notre deuxième objectif** est de pouvoir déterminer de manière théorique la trajectoire d'une balle en fonction de différents paramètres en entrée : vitesse, rotation, hauteur initiale, angle de la raquette, etc., et de cette étude pouvoir simuler le mouvement de la balle avec ses rebonds. A terme, il faudra exhiber, de ces trajectoires simulées, des caractéristiques propres à chaque type de coup.

**Notre troisième objectif** est de pouvoir comparer la trajectoire extraite d'une vidéo à une trajectoire théorique dont on connaît les paramètres : ainsi, il sera de possible de connaître dans l'idéal les caractéristiques quantitatives de chaque coup du match.

Enfin, **notre dernier objectif** consiste à, connaissant les caractéristiques d'un coup donné, de le classer selon une classification que nous déterminerons

Une fois réalisés, ces objectifs constitueront une base solide pour pouvoir traiter les données d'un match et analyser ce dernier.

## 2.3 Les membres du projet

Ce projet d'étude visant à saisir l'opportunité qu'offrent les progrès technologiques à avoir une analyse plus quantitative du sport en général, est proposé et commandité par Romain VUILLEMOT, professeur et chercheur à l'Ecole Centrale Lyon, qui nous apporte son expertise technique. Il est encadré par Emmanuel RHETY qui nous apprend à communiquer sur les résultats obtenus, ainsi que par Arnaud BRÉARD, qui nous enseigne la manière de suivre et d'organiser un projet.



LEFEVRE Corentin



FILIPPI Yanis



AUDREN-DE-KERDEL Cyprien



MACHADO-FERRI-DA-SILVA  
Heitor

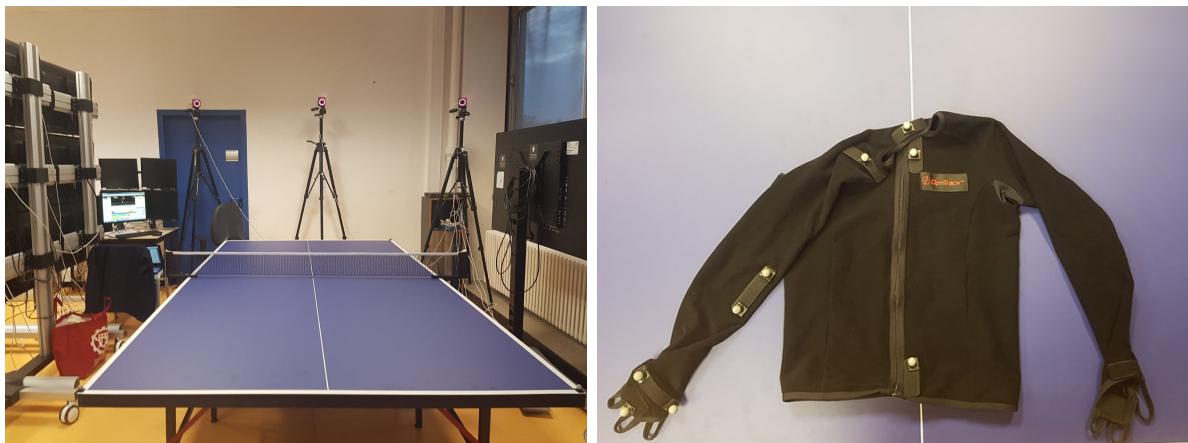


LASSARAT Côme

FIGURE 3 – Membres du PE

## 2.4 Planification du projet

La nature de ce projet a quelque peu évolué au cours de l'année. Initialement, ce projet avait pour objectif d'analyser des matchs de tennis de table par Motion Capture, outil qui permet d'enregistrer le mouvement d'objets dans l'espace grâce à des caméras et des capteurs positionnés sur le corps étudié (voir la figure 4).



(a) Salle AMIGO avec 3 caméras infrarouges et la table de tennis de table

(b) Tenue de Motion Capture avec des capteurs réfléchissants

FIGURE 4 – Matériel utilisé pour des acquisitions par Motion Capture

Cependant, les acquisitions se sont révélées fastidieuses, peu concluantes et le dispositif possédait un inconvénient majeur : suivre la balle avec un capteur, sans que ce dernier ne perturbe sa trajectoire. Ces problèmes rencontrés nous ont ainsi poussés à changer de stratégie, en accord avec notre tuteur.

Ainsi, notre nouvelle approche s'est focalisée sur l'analyse de matchs de tennis de table à partir de vidéos officielles. Nous avons listé les nouvelles tâches à effectuer en Annexe 9, qui sont reprises dans le nouveau diagramme de Gantt en Annexe 10.

Sur ce nouveau diagramme de Gantt avec le suivi des tâches (Annexe 10), la ligne bleue correspond à l'avancée du projet au moment où ce rapport est écrit. Nous pouvons noter des retards sur notre planning, qui sont dus à plusieurs facteurs :

- Suite au changement d'approche du projet au milieu de l'année, notre diagramme de Gantt s'est sans doute montré un peu ambitieux, afin garder une cohérence et un objectif final
- Nous avions sous-estimé les obstacles que représentait le télétravail dans le contexte du Covid-19, et la nouvelle manière de travailler en groupe
- L'approche adoptée pour le tracking de la balle sur des vidéos nécessitait une grande puissance de calcul. N'ayant plus accès au matériel informatique de la salle AMIGO à cause du confinement, la tâche fut plus longue que prévue
- Une communication moins bien maîtrisée avec notre tuteur au cours du dernier mois.

### 3 La techniques au tennis de table

### 3.1 Les différents coups

Avant de pouvoir prétendre analyser un match de tennis de table, il est nécessaire de connaître les stratégies et coups fondamentaux de la discipline. 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).

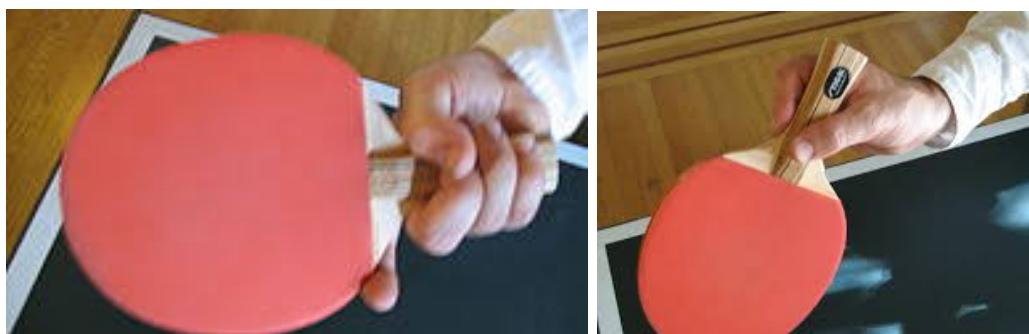


FIGURE 5 – Les différentes manières de tenir la raquette

De plus, il est possible classifier les coups déférés lors d'un match.

Premièrement, le coup droit est réalisé lorsque le joueur frappe la balle du même côté que celui correspondant à la main qui tient la raquette. Le joueur peut mettre beaucoup de puissance avec ce mouvement.

Le revers est réalisé lorsque le joueur frappe la balle du côté opposé à celui correspondant à la main du joueur qui tient la raquette. Bien que cette technique soit importante, le revers permet une attaque usuellement moins agressive que le coup droit. De ces deux coups principaux découlent différentes techniques pour déstabiliser l'adversaire.

Il y a tout d'abord le "**top spin**" : l'effet résulte du frottement quasiment à l'horizontale entre la balle et la raquette, et en passant en-dessous de la balle (voir Figure 6). Il s'agit davantage d'un coup d'attaque.

Alternatif au "top spin", le "**side spin**" permet de donner un effet latéral à la balle. Ce coup s'effectue quasiment comme un coup classique mais la raquette doit frotter la balle sur le côté, ce qui lui donne son effet latéral. Cette technique est réalisée usuellement pour imposer une zone de remise à l'adversaire ou le déplacer, lorsque la balle part sur le côté. Elle est plus utilisée en coup droit qu'en revers.

Ensuite, il existe aussi la technique appelée "**coupé**" qui est plus défensive que les autres montrées ci-dessus, mais elle demeure 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 à ce 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.

Aussi, le **coup "mou"** est un coup utilisé pour "masquer" l'effet possédant de la balle. Les pongistes l'utilisent plutôt au service en réalisant un service sans effet (ou très peu

effet) dont l'exécution ressemble à un service avec effet pour tromper un adversaire non attentif, qui va retourner une balle facile à attaquer. Quand il est utilisé lors d'une frappe, comme un "faux" top spin, le principe est le même, le pongiste ne va pas entièrement effectuer le mouvement associé à ce coup (mouvement proche mais moins de rotation mise dans la balle), cependant l'exécution rassemblera à un vrai top spin. Il n'est pas très classique, mais il constitue un coup important dans un match.

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 (Figures 6 et 7) 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 renvoi de la balle.

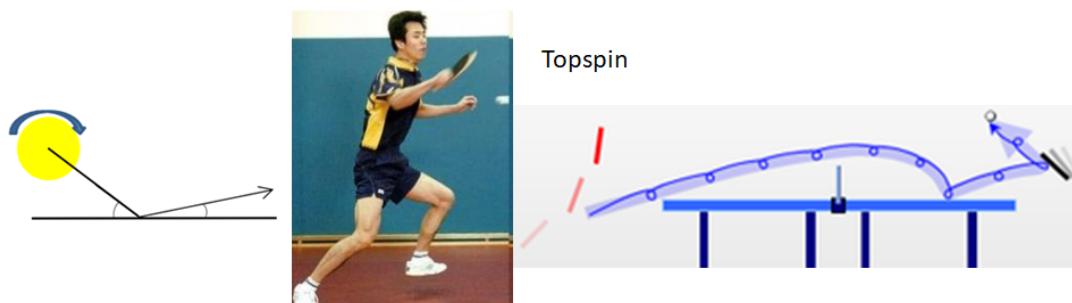


FIGURE 6 – La technique du top-spin/lifté

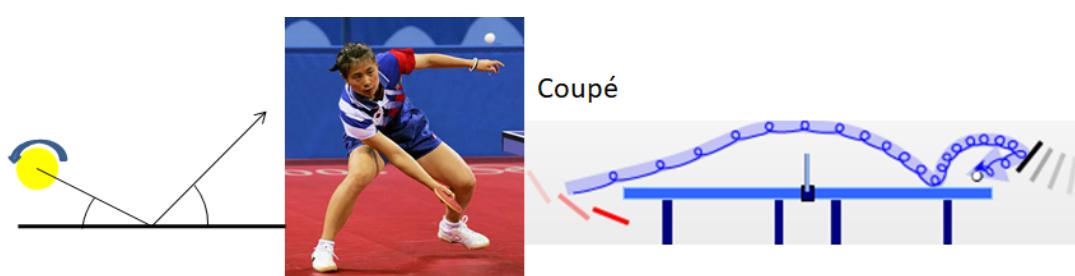


FIGURE 7 – La technique du coupé

### 3.2 Classification des coups dans un match

Une analyse statistique complète d'un match consisterait à attribuer à chaque coup de chaque point : le type de coup (topspin en attaque, etc.) et la zone de la table visée. Dans la réalité, une telle feuille statistique serait difficilement analysable, compte tenu de la richesse des coups possibles et de leurs complexités. La FFTT nous a ainsi fournie une classification simplifiée pour rendre plus lisibles ces statistiques :

- **Balles courtes** (le joueur empêche son adversaire d'attaquer)
- **Balles d'attaque** (caractérisées par une grande vitesse)

### — Les autres coups.

Pour réaliser cela, nous avons jugé nécessaire dans notre stratégie de construire un modèle physique permettant de déterminer la trajectoire d'une balle de tennis de table à partir de son état initial : vitesse, rotation, hauteur, etc.

## 4 Trajectoire d'une balle de tennis de table : théorie

### 4.1 Théorie

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.

La figure 8 rappelle la démarche suivie pour cette étude théorique. Les trois forces s'appliquant sur la balle y sont représentées : le poids  $\vec{P}$ , la force de trainée  $\vec{F}_t$  et la force de Magnus  $\vec{f}$ . Les paramètres cinématiques caractérisant la balle sont la vitesse  $\vec{v}$  et l'effet (vitesse de rotation de la balle sur elle-même)  $\vec{\omega}$ . La balle est également définie par sa masse  $m$ , son rayon  $r$  et les coefficients  $\alpha$  et  $h$ . Le vecteur de gravitation terrestre est noté  $\vec{g}$ .

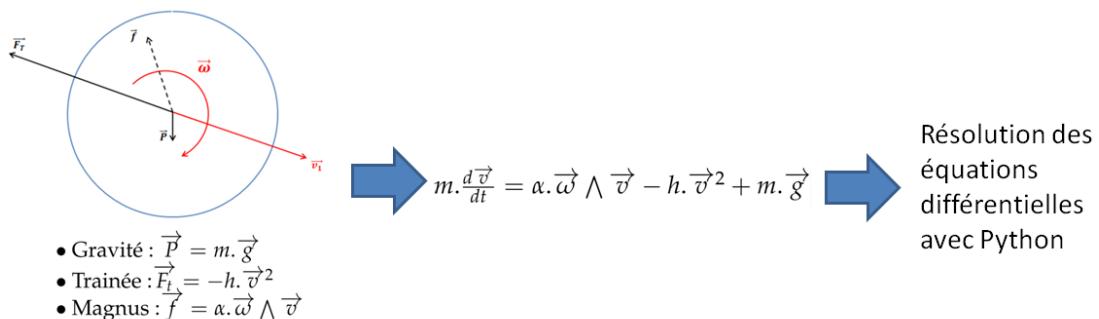


FIGURE 8 – Rappel de la démarche d'étude balistique

L'étude du rebond, plus complexe, nous a permis, à partir des caractéristiques cinétiques de la balle avant le rebond (vitesse  $\vec{v}_1$  et effet  $\vec{\omega}_1$ ) de déterminer ces mêmes caractéristiques après le rebond (vitesse  $\vec{v}_2$  et effet  $\vec{\omega}_2$ ). 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, pu faire un bilan de la quantité de mouvement avant et après impact. La démarche et les calculs sont réalisés grâce aux ressources [1], [2] et [3].

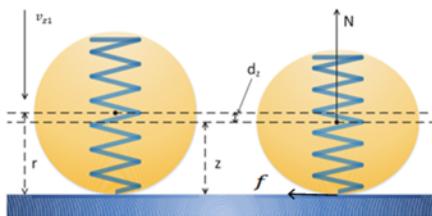


FIGURE 9 – Modèle de la balle comme un ressort

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, les équations matricielles obtenues sont les mêmes, avec les matrices A, B, C et D qui sont changées par rapport au cas du roulement.

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

Les constantes  $\gamma$  et  $e$  sont définies dans le livrable dont le lien est en annexe.

## 4.2 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).

Ci-dessous est présentée une première simulation réalisée pour mettre en évidence la prise en compte de l'effet dans notre modèle et son importance dans une trajectoire. Le coup correspondant est le suivant : la balle est lâchée à 20 cm de la table (au point de coordonnées  $(0 \ 0 \ 0,2)$ ) avec une vitesse  $v_1$  nulle mais une rotation non nulle  $\omega_1 = (150 \ 40 \ 0)$  (en rad/s).

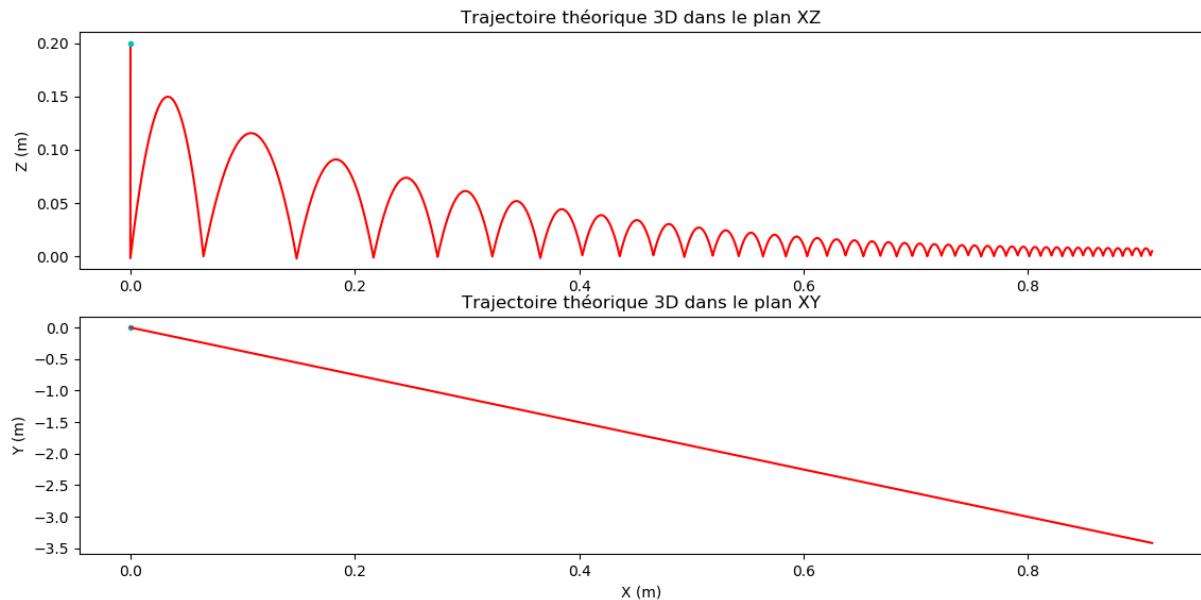


FIGURE 10 – Trajectoire de la balle dans les plans 2D

On constate que l'impact de l'effet est bien pris en compte dans la simulation.

Ci-dessous est présentée une autre simulation réalisée avec les paramètres initiaux suivants : position initiale  $(-0.1 \ 1.2 \ 0.2)$  avec une vitesse  $v_1 = (10 \ -1 \ 1)$  et une rotation  $\omega_1 = (150 \ 40 \ 0)$  (en rad/s).

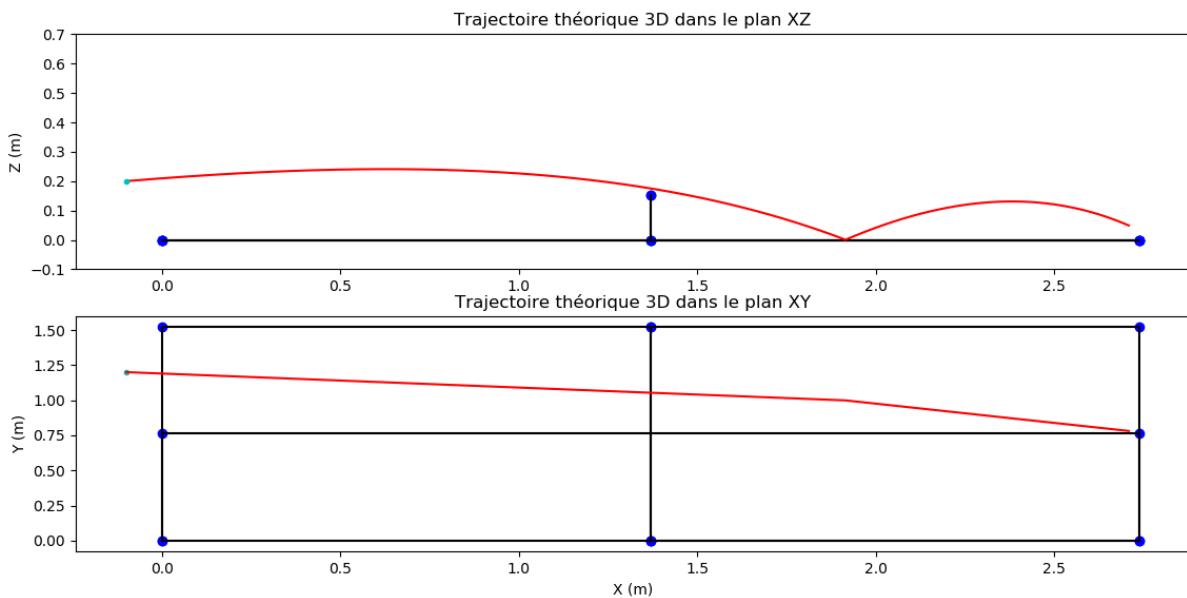


FIGURE 11 – Trajectoire de la balle dans les plans 2D

Ces simulations numériques aboutissent aux trajectoires auxquelles on s'attendait au moins qualitativement pour les données initiales des simulations. Il est néanmoins difficile de comparer quantitativement les trajectoires réelles et simulées pour les mêmes conditions initiales. Nous faisons donc l'hypothèse assez forte pour la suite de l'étude que le modèle théorique décrit correctement la trajectoire d'une balle de tennis de table. Nous allons pour la suite de notre travail utiliser ce modèle.

## 5 Tracking de la 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.

### 5.1 Présentation du protocole

Pour identifier la trajectoire de façon exacte, le plan suivant est adopté :

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.

Nous avons choisi un tel protocole car, en accord avec notre tuteur, il s'agissait d'une méthode cohérente à nos objectifs et qui pouvait renseigner un grand nombre d'informations s'il était amené à être efficace.

### 5.2 Réalisation du protocole : (1) et (2)

#### 5.2.1 Tracking de la balle (1)

On effectue un "tracking" de la balle image par image. Pour ce faire, on utilise un algorithme d'apprentissage (Machine Learning) 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. L'algorithme d'apprentissage a été créé grâce au module Tensorflow de Python, crée par Google [5], car Python est un environnement informatique qui nous est familier et Tensorflow semblait facile d'accès. Le principe d'un tel algorithme est en réalité très simple : il faut un jeu de données annotées, c'est-à-dire des images où sont pointées la position de la balle et la position des joueurs, ce qui sera utile dans notre cas à identifier si un coup a été joué à gauche ou à droite d'un joueur. Un fois la base de données créée, il suffit de la transmettre à l'algorithme pour la phase d'apprentissage, durant laquelle l'algorithme va en fait faire des essais, essayer de prédire la position des différents éléments et va comparer sa prédiction avec la "vérité", celle annotée sur le jeu de données. L'algorithme s'auto-corrigé ensuite pour converger au final vers une solution.

Le choix d'un tel type d'algorithme s'explique par le fait qu'une balle est très difficilement identifiable durant une phase de jeu : forme très variable, floue et même parfois légèrement transparente du fait de la vitesse élevée de la balle. Il devient alors difficile d'imaginer une relation entre la valeur des pixels d'une image et la présence ou non d'une balle de tennis de table. Un algorithme de machine learning va lui "trouver" une relation entre pixels et balle sans que l'on sache réellement quelle opération il réalise, cependant beaucoup d'erreurs sont commise et de plus la phase d'apprentissage nécessite beaucoup de calculs.

Malheureusement, du fait du confinement imposé par le gouvernement du fait de l'épidémie de coronavirus, nous n'avons pas eu accès au matériel de la salle AMIGO et donc cette phase a dû être réalisée sur un ordinateur pas assez performant et l'algorithme ne détecte que les joueurs et non la balle (voir l'illustration figure 12). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que la phase d'apprentissage n'a pas été correctement menée ; en effet après plus de 20 000 itérations et une semaine d'apprentissage, l'erreur annoncée par l'algorithme n'est pas arrivée à un seuil satisfaisant.



FIGURE 12 – Illustration de la prédiction faite par l'algorithme de machine learning

Une autre étrangeté dans ce résultat est le fait que dans la majeure partie des cas, la prédiction sur les joueurs se fait avec une précision surprenante, alors que l'algorithme ne fait même pas d'essai de prédiction de la balle, ce qui laisse à penser qu'il faudrait un algorithme ayant pour seul but la détection de la balle. De plus il faudrait aussi remettre en question la qualité du jeu de données, qui conditionne le bon fonctionnement du machine learning. Ici on a utilisé 1800 images provenant de plus de 10 matchs différents. Il faudrait déterminer s'il n'est pas plus pertinent de diminuer le nombre d'images au profit d'un jeu de données se basant sur plus de matchs différents, afin de couvrir plus de situations.

### 5.2.2 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).

Sur la FIGURE 13, 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).

Angle caméra : -75° Position : [600. 76.1 150. ]

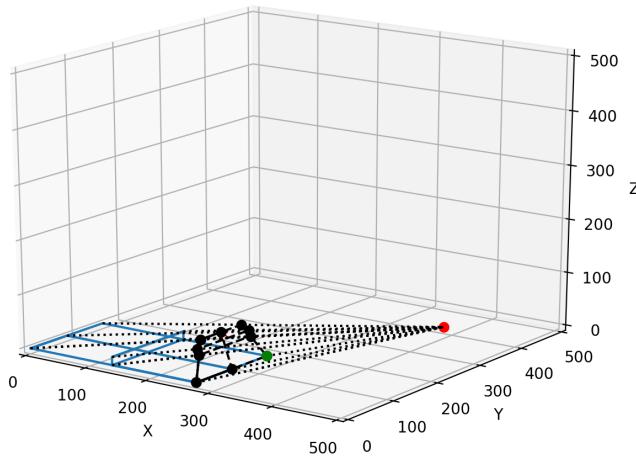


FIGURE 13 – Illustration de la méthode de projection dans le *plan de la caméra* (axes en cm)

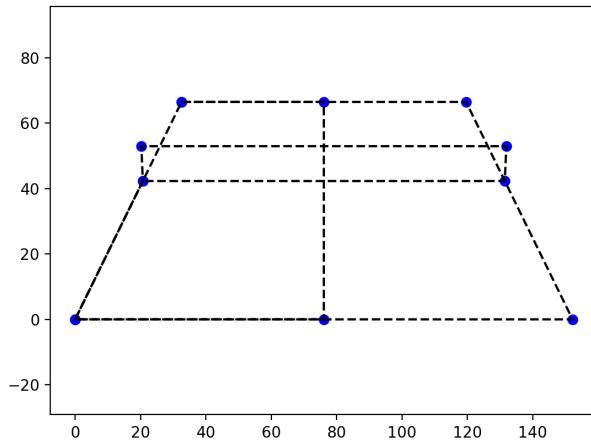


FIGURE 14 – Résultat de la projection dans le plan précédent (axes en cm)

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 13) ce qui simplifie grandement la recherche de la position.

## 6 Comparaison trajectoire théorique - trajectoire issue de la vidéo

### 6.1 Rappel du protocole

Pour identifier la trajectoire de façon exacte, le plan suivant est adopté :

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.

Pour conclure l'identification, il faut simuler une trajectoire en 3D dont tous les paramètres sont connus, et il s'agit ensuite de modifier ces paramètres pour approcher ce qui est vu dans le plan de la caméra.

## 6.2 Réalisation du protocole : simulation et identification des paramètres de la trajectoire (3,4 & 5)

Pour identifier la trajectoire théorique à la trajectoire pratique, la méthode itérative du gradient à pas constant est utilisée pour trouver les paramètres de la trajectoire simulée, une méthode d'analyse numérique mathématique que nous connaissons. 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 vitesse, rotation et position initiales) ( $\vec{v}_0, \vec{\omega}_0, \vec{x}_0$ )).

Afin de réaliser l'objectif de cette partie, la position de la balle après un coup de raquette, a manuellement été annotée sur une vidéo grâce au logiciel Tracker, afin de posséder la vraie trajectoire de la balle pour travailler. **Par abus de langage, nous appellerons "trajectoire pointée" la trajectoire de la balle issue de la vidéo annotée par le logiciel Tracker**

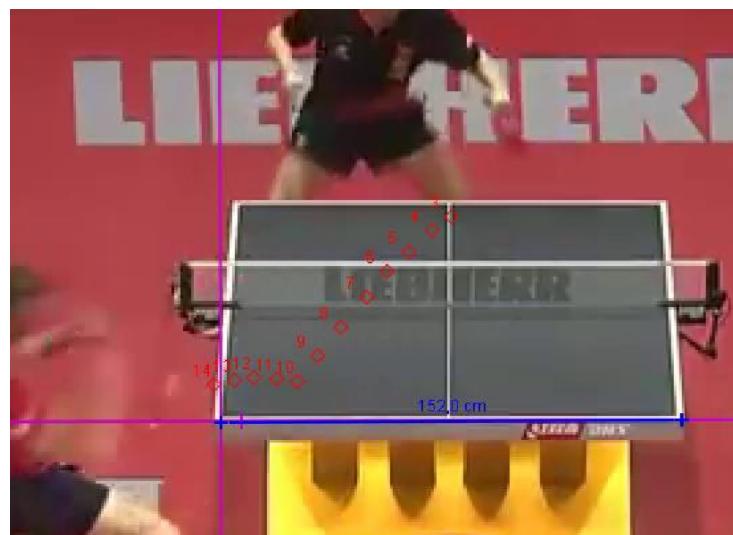


FIGURE 15 – Coup pointé sur logiciel

### 6.2.1 Création d'une trajectoire en 3D projetée dans le plan de la caméra

La méthode du gradient [4], que nous avons développée devra permettre de comparer la trajectoire pratique à une trajectoire théorique. Cette trajectoire théorique est simulée comme en section 4.2 dans l'espace 3D réel. Or, le coup que dont on cherche à caractériser

la trajectoire a été échantillonné dans le référentiel de la caméra, un plan 2D. Ainsi la trajectoire théorique n'est pas simulée dans le même référentiel que celle pointée. Pour comparer les deux trajectoires, il est nécessaire qu'elles soient dans le même référentiel. Cependant, il n'est pas possible de passer du plan 2D de la caméra au 3D théorique : la trajectoire théorique 3D est projetée dans le référentiel 2D de la caméra. Les résultats de l'exécution de ces programmes sur une trajectoire théorique sont visibles sur les Figures 16 et 17.

Notez que sur la figure ci-dessus comme sur toutes les autres figures de cette section où la table est représentée, l'unité des abscisses et des ordonnées est le **mètre**.

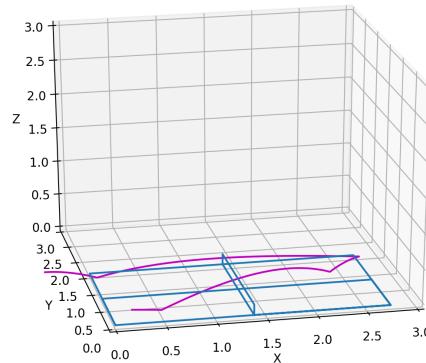


FIGURE 16 – Simulation d'une trajectoire en 3D (un échange)

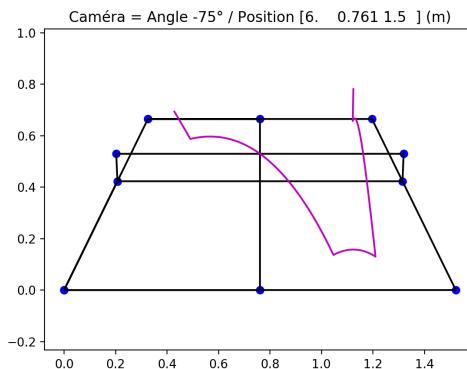


FIGURE 17 – Projection de cette trajectoire dans le plan de la caméra

Ce changement de repère étant complexe et pouvant s'avérer long, nous avons choisi de réduire le nombre de points de la trajectoire théorique (on passe de 200 points à une petite vingtaine) grâce à un échantillonnage.

### 6.2.2 Comparaison de la trajectoire vidéo avec la trajectoire théorique.

Rappelons une dernière fois l'objectif de notre travail dans cette tâche : nous cherchons le vecteur  $E = (x_0, y_0, z_0, v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}, \omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0})$  des conditions initiales correspondant au coup réel. Pour cela, une trajectoire théorique basée sur le modèle physique établi en Section 4 est simulée. Comme décrit précédemment, cette trajectoire est échantillonnée

puis transposée dans le plan de la caméra. Il est alors possible de comparer les deux trajectoire simulée et pointée. Cette comparaison est évaluée en calculant l'écart spatial entre les points de la trajectoire théorique et leur vis-à-vis de la trajectoire pointée. Pour chaque point de la trajectoire, on note  $E_i$  l'écart spatial entre le  $i^{me}$  point de la trajectoire pointée et celui de la trajectoire théorique. Tous ces écarts sont ensuite sommés pour obtenir l'erreur globale entre les deux trajectoires. Les points en vis-à vis sont visibles sur l'image suivante.

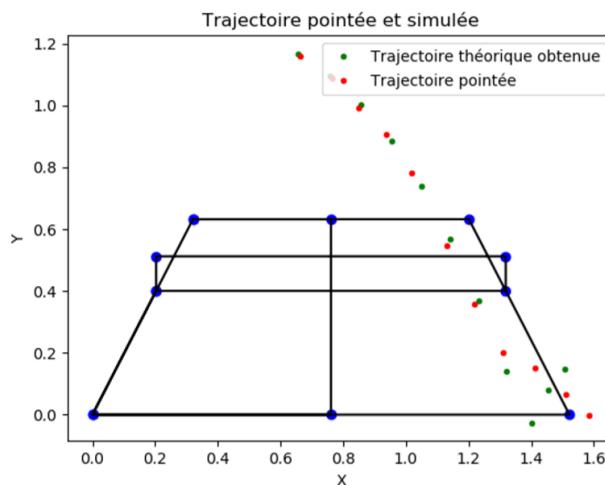


FIGURE 18 – Évaluation de l'écart entre les deux trajectoires

Le problème devient donc un problème de minimisation de cette erreur globale. Une méthode d'optimisation classique sur la fonction "erreur" est effectuée : la méthode du gradient. Ainsi, l'algorithme commence avec un vecteur de conditions initiales pris au hasard, il réalise un échantillonnage, il transpose la trajectoire dans le plan de la caméra, il évalue l'erreur globale puis réalise la méthode du gradient qui donne un nouveau vecteur de conditions initiales qui permet de réduire l'erreur globale. Le processus recommence jusqu'à ce qu'un certain nombre d'itérations soit réalisé.

Plusieurs méthodes ont été développées et sont présentées ici. Pour chaque méthode, on s'est focalisé ici sur les résultats suivants :

- Dans les figures intitulées 'Trajectoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra' :
- la courbe de l'évolution de l'erreur globale entre les deux trajectoires en fonction du nombre d'itération.
- les trajectoires 2D : celle pointée et celle simulée théoriquement à l'aide du vecteur de conditions initiales trouvé suite à l'exécution de la méthode en question.
- Dans les figures intitulées 'Trajectoire 3D théorique finale dans les plans 2D' :
- la trajectoire 3D est décomposée en deux : dans le plan XZ et dans le plan XY. A défaut de pouvoir afficher une courbe correcte en 3D avec la table, il nous semblait préférable d'afficher ces deux courbes séparées (X correspond à l'axe de la longueur de la table, Y à l'axe de sa largeur et Z à l'axe vertical).

## Méthode 1

Dans un premier temps, la stratégie la plus naïve a été mise en place. En effet cette méthode reprend la méthode générale du gradient en modifiant à chaque itération toutes les conditions initiales. Ci-dessous, la Figure 19 met en évidence que la trajectoire théorique n'a rien à voir avec celle pointée bien que l'erreur après avoir fortement chutée ait atteint une valeur de saturation.

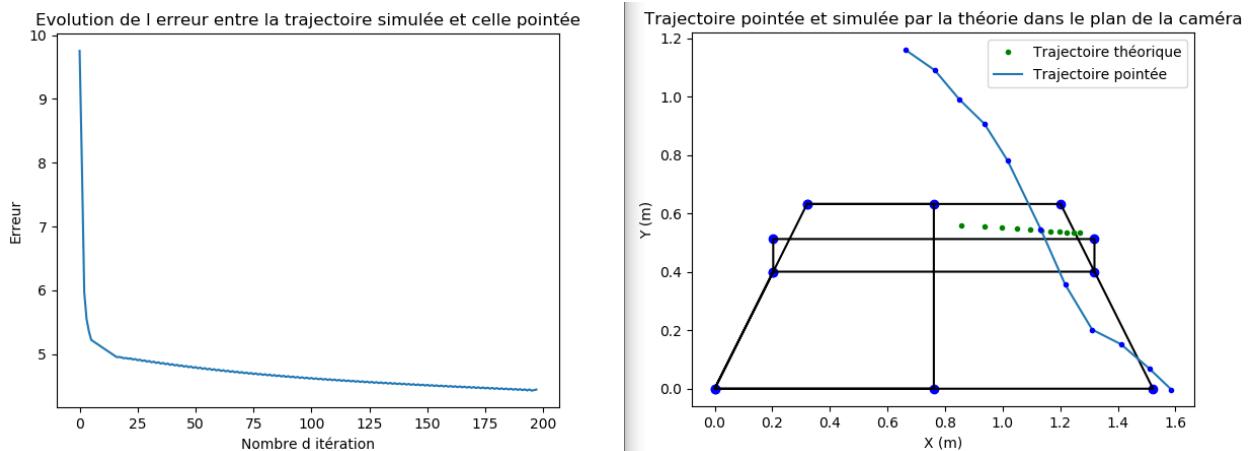


FIGURE 19 – Méthode 1 : Trajectoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra

Le problème de cette méthode est que le point initial n'est pas du tout détecté au bon endroit si bien que la trajectoire 3D qui découle du vecteur de conditions initiales final (en rouge) est complètement en dehors de la table.

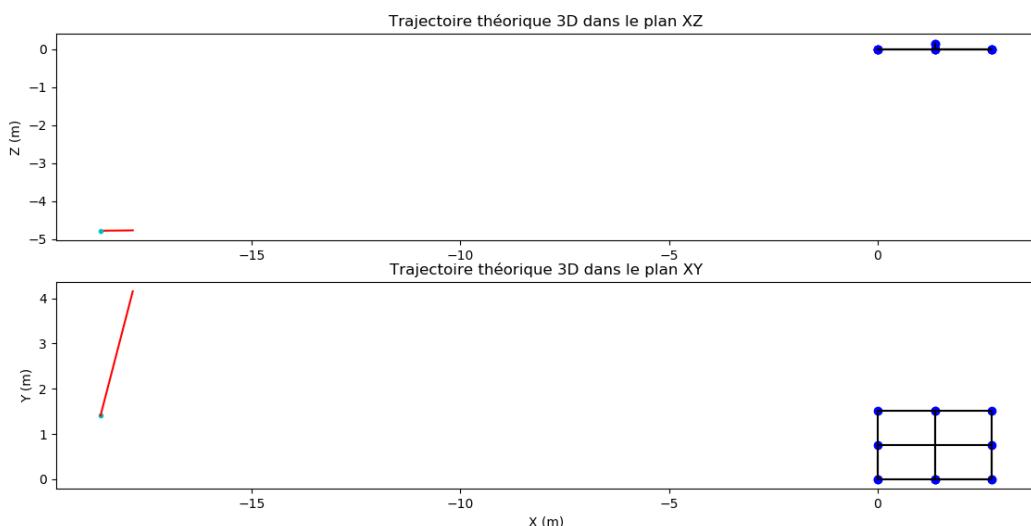


FIGURE 20 – Méthode 1 : Trajectoire 3D théorique finale dans des plans 2D

De cette première méthode fallacieuse est retenu la nécessité de trouver le point initial de la trajectoire avec justesse. C'est ce que la méthode 2 s'emploie à faire.

## Méthode 2

Pour rechercher le premier point, la méthode du gradient sur toutes les coordonnées n'est plus réalisée pour toutes les itérations mais le problème est scindé : le premier point est d'abord déterminé, puis la vitesse initiale et enfin l'effet initial. La méthode du gradient ne prend alors en compte seulement les coordonnées de position initiale. La fonction minimisée est l'erreur qui est alors égale à l'écart spatial  $E_1$ . Une fois qu'un certain seuil d'erreur minimale est atteint, la vitesse initiale est alors recherchée. La fonction erreur à minimiser correspond à nouveau à celle évaluant l'écart spatial entre tous les points.

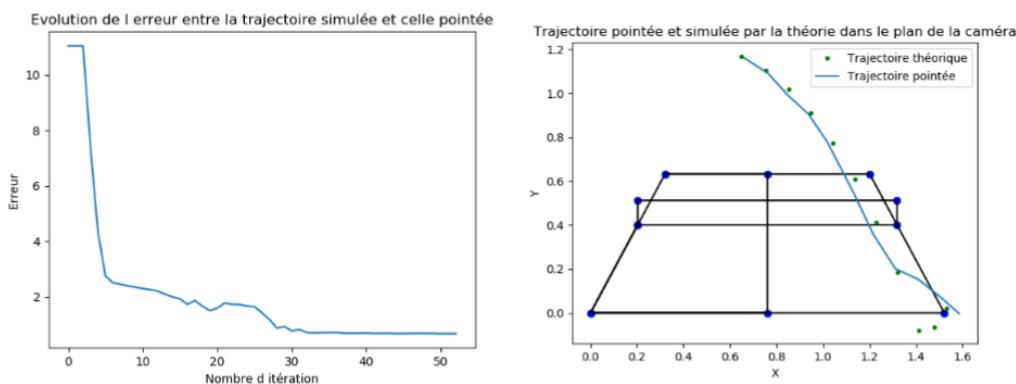


FIGURE 21 – Méthode 2 : Trajectoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra

Nous observons donc qu'il y correspondance dans le repère 2D de la caméra. Cependant, dans le repère 3D (Figure 22) la trajectoire trouvée n'est pas réaliste car le rebond n'a pas lieu sur la table.

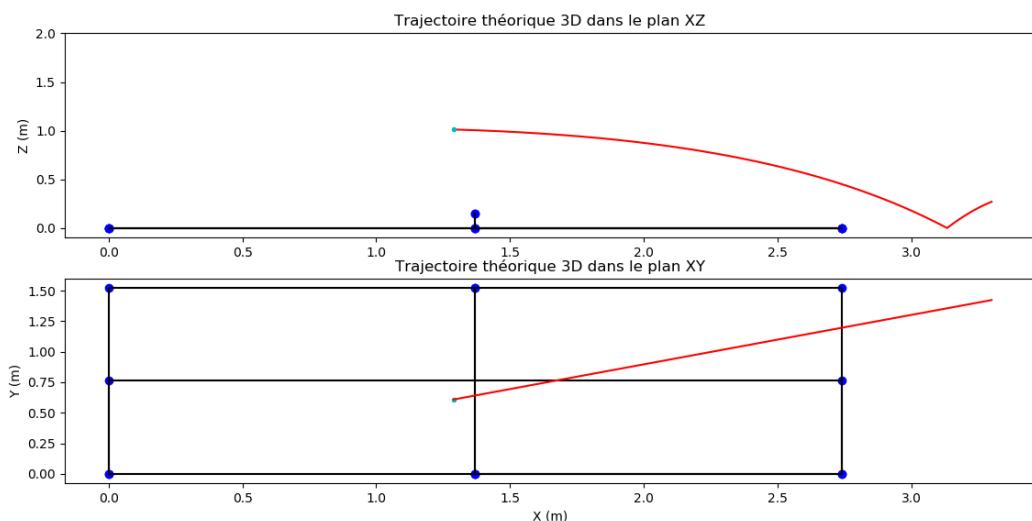


FIGURE 22 – Méthode 2 : Trajetotie 3D théorique finale dans des plans 2D

Ainsi cette méthode converge vers plusieurs solutions de trajectoire (erreur faible et trajectoires dans le plan de la caméra qui correspondent mais qui sont incorrectes en 3D).

## Méthode 3

La stratégie est ici de conserver la recherche du point initial de la méthode 2 mais de modifier la recherche de la vitesse initiale. Pour évaluer l'erreur globale, la méthode 2 sommait les écarts spatiaux  $E_i$ . Ici, dans un premier temps, l'optimisation ne concerne que les deux premiers points : l'erreur est égale à la somme de  $E_1$  et de  $E_2$ . Par la méthode du gradient, on cherche la vitesse initiale qui va minimiser cette nouvelle erreur. Lorsque cette dernière est inférieure à certain seuil ou qu'une saturation d'erreur est observée, le processus est réitéré mais la définition de l'erreur est modifiée : l'erreur devient égal à la somme de  $E_1$ , de  $E_2$  et de  $E_3$ . Ce processus est réitéré jusqu'au dernier point.

Cette méthode se révèle efficace pour la partie de la trajectoire avant le rebond (Figure 23).

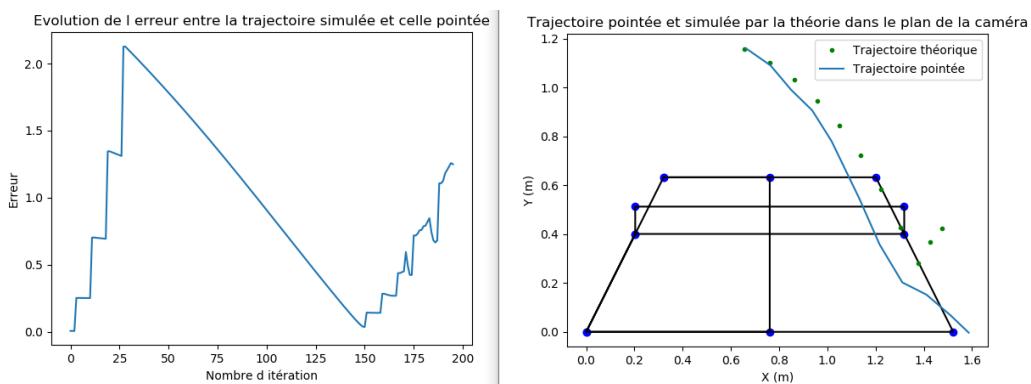


FIGURE 23 – Méthode 3 : Trajectoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra

Notons que le passage dans le référentiel 3D (Figure 24) est concluant : en effet la trajectoire correspondante se rapproche du coup réel pointé bien qu'il subsiste une erreur. Néanmoins la mauvaise prise en compte de la trajectoire après le rebond limite cette méthode. Pour remédier à cela, une amélioration de la méthode 2 est tentée, dans la méthode suivante.

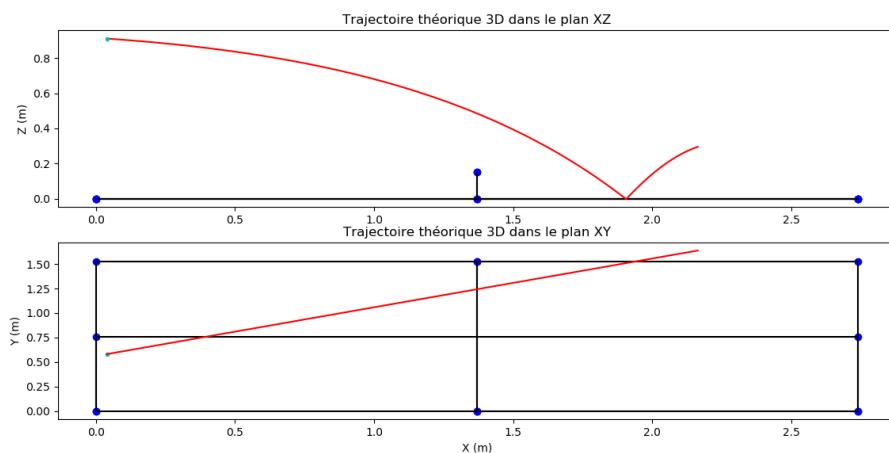


FIGURE 24 – Méthode 3 : Trajectoire 3D théorique finale dans des plans 2D

## Méthode 4

Face aux limites de la méthode 3, nous avons choisi de revenir à la méthode 2 et de l'améliorer. Cette méthode semblait aboutir à plusieurs résultats qui donnaient une trajectoire correcte en 2D mais fallacieuse en 3D. Pour y remédier, nous avons essayé d'améliorer la méthode du gradient en modifiant son itération principale. La méthode du gradient à pas optimal est implémentée. Les résultats sont illustrés dans les Figures 25 et 26 :

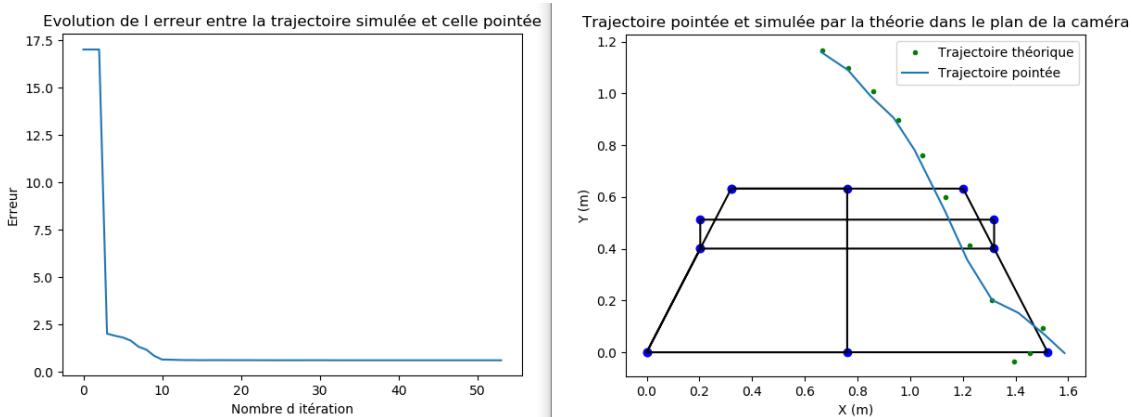


FIGURE 25 – Méthode 4 : Trajectoire pointée et théorique finales dans le plan 2D de la caméra

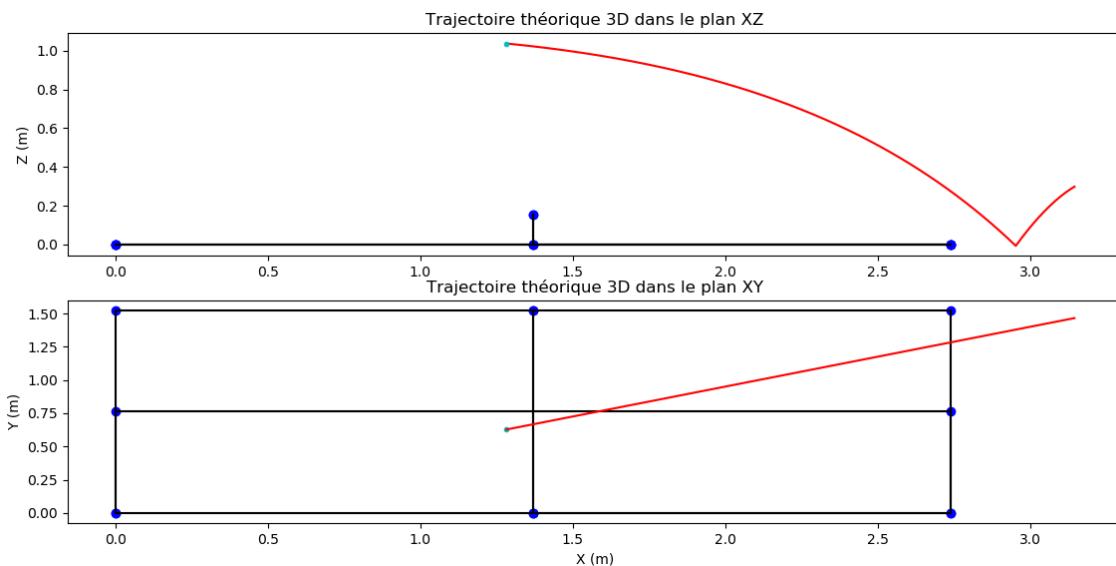


FIGURE 26 – Méthode 4 : Trajectoire 3D théorique finale dans des plans 2D

Cette nouvelle méthode permet, contrairement aux méthodes précédentes de réduire l'erreur de manière importante. Ce résultat encourageant a un coût : la lenteur de l'algorithme. En effet, pour calculer le pas optimal, beaucoup de calculs sont réalisés. Bien que l'on converge en un nombre d'itération réduit, ces itérations sont beaucoup plus longues. De plus, bien que l'erreur soit faible, il est observé que la trajectoire simulée en 3D ne correspond pas parfaitement à la trajectoire réelle, puisque le rebond n'est pas sur la table.

## Bilan récapitulatif

Finalement, ce cheminement a permis d'aboutir à la méthode 4 qui donne les résultats les plus cohérents et qui collent le plus à la réalité du coup. Cette méthode a été testée sur plusieurs coups, pointés sur une vidéo d'un match de Simon Gauzy.

Les figures 27 et 28 comparent les résultats obtenus pour les trois dernières méthodes (la première étant trop aberrante) pour le coup A.

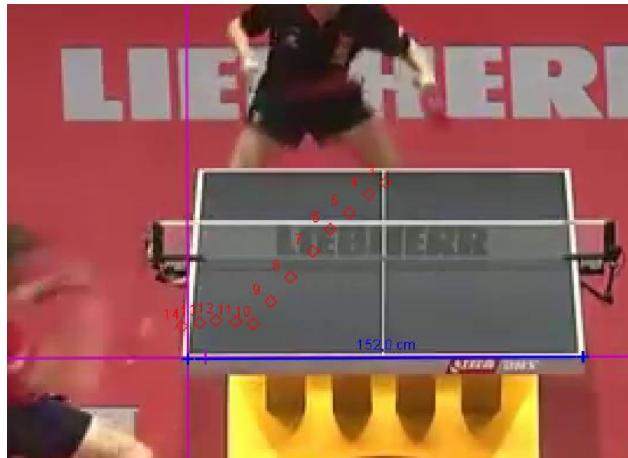


FIGURE 27 – Coup A pointé sur logiciel

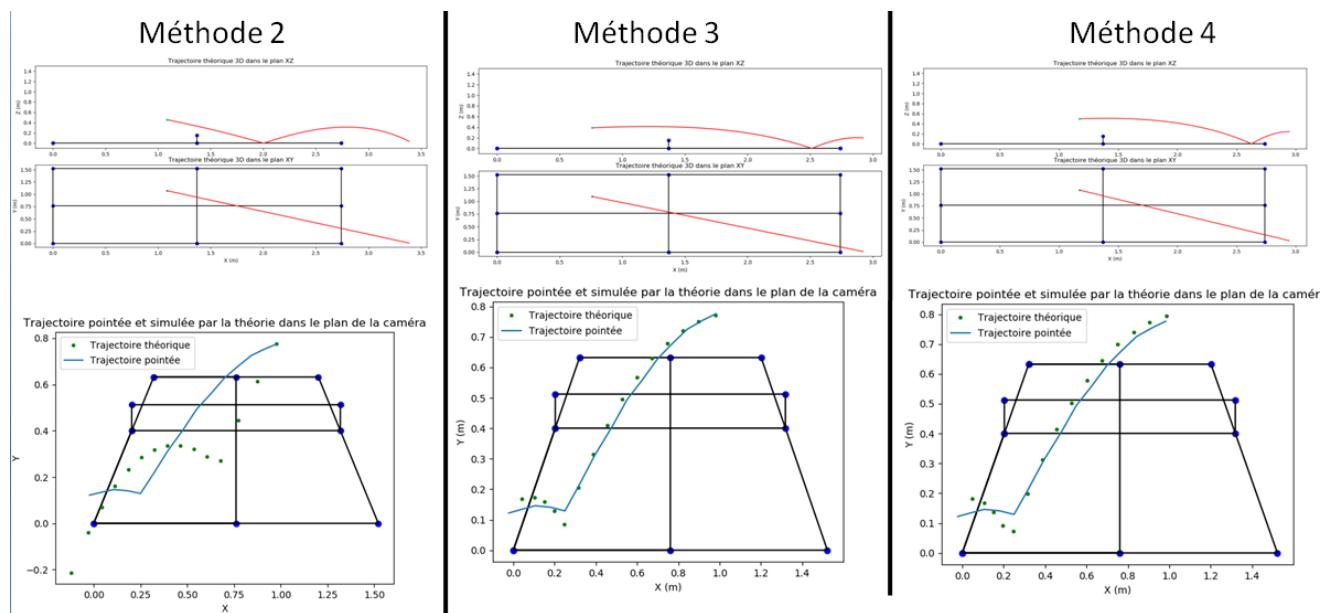


FIGURE 28 – Bilan comparatif des résultats obtenus pour le coup A

Les figures 29 et 30 comparent les résultats obtenus pour le coup B.

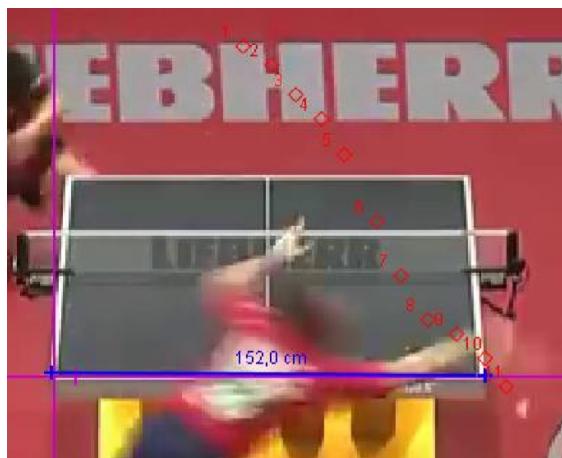


FIGURE 29 – Coup B pointé sur logiciel

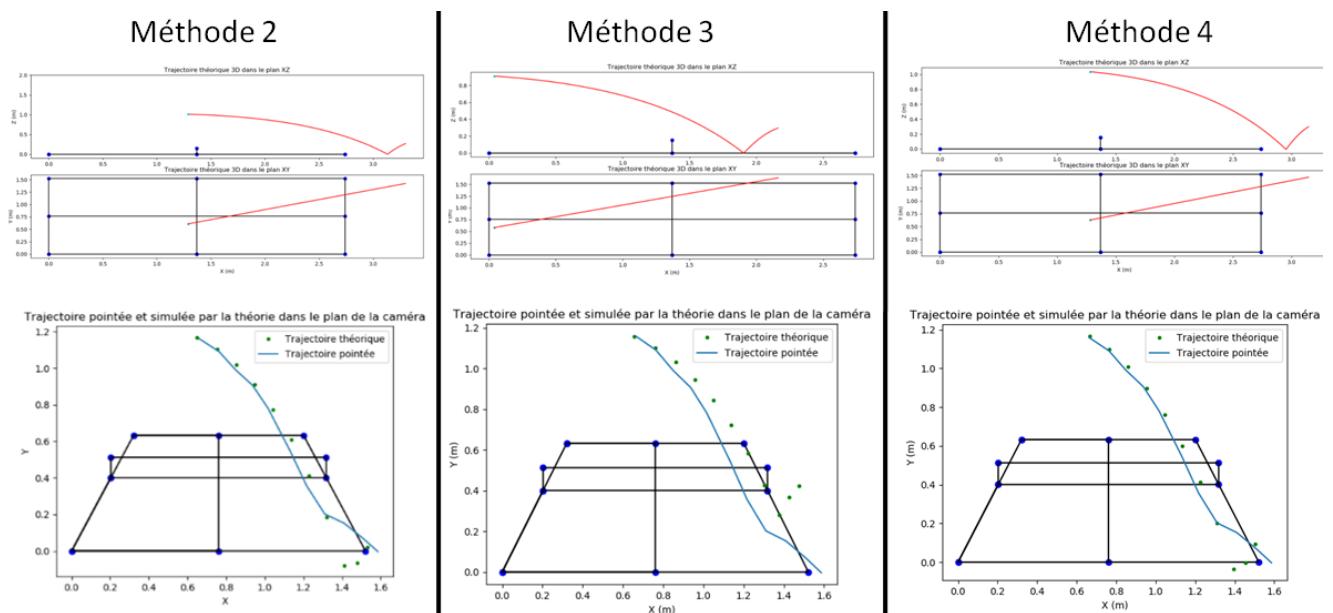


FIGURE 30 – Bilan comparatif des résultats obtenus pour le coup B

Dans le plan de la caméra, la méthode 4 donne la trajectoire théorique la plus proche de celle pointée. Néanmoins, en 3D, il semble que la trajectoire théorique s'éloigne du coup que nous cherchons à modéliser.

Cependant, pour toutes les méthodes, nous constatons que le rebond pose beaucoup de problèmes et est souvent à l'origine de résultats aberrants. Nous pouvons ainsi nous demander si la méthode d'optimisation utilisée est adéquate : il est possible que la discontinuité de la trajectoire due au rebond rende cette méthode moins efficace. Il faut également prendre en compte l'erreur due à la position de la caméra, qui est d'une importance capitale puisqu'elle permet le changement de référentiel.

### 6.3 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 31).



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

FIGURE 31 – Suivi des mouvements des joueurs par tracking vidéo

Ainsi, connaître la vitesse de certaines articulations ou bien leur type de mouvement permettrait d'avoir des informations sur le type de coup. Par exemple, si l'articulation n° 7 représentant le poignet droit du joueur (Figure 31(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 dernière seront plus nombreuses.

## 7 Catégorisation des coups et axes d'analyse des données récoltées

Le dernière étape du projet consiste à catégoriser les coups déterminés grâce au tracking vidéo de la balle et à la comparaison trajectoire réelle - trajectoire théorique. Cependant, les problèmes rencontrés dans ces deux tâches ont perturbé la réalisation de ce travail. De plus, les données extraits (coups catégorisés) devaient 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. A défaut d'avoir réalisé ce travail, un bilan succinct des moments clés et des informations importantes à analyser dans les statistiques a été synthétisé sur la Figure 32.

Au début du match :

- Chaque joueur va essayer de mettre sa stratégie préférée en place. C'est donc un moment important pour connaître les techniques de l'adversaire.
- Le jeu est plus étudié, les joueurs s'observent et vont prendre plus de risques car perdre un point au départ est moins grave.
- Certains joueurs vont tenter de jouer fort dès le début. Il est donc important de voir comment les joueurs se comportent face à l'adversaire dans les deux cas.

Vers la fin d'un set :

- Lorsqu'il y a égalité (7-7 par exemple), il est important de gagner les points de son service (et au moins 1 pendant le service de l'autre), la réaction de chaque joueur pour reprendre l'avantage est donc importante.
- Lorsqu'il y a un joueur à 10, il est intéressant de voir si il joue la sécurité/défense (voir où il sert) ou si il joue fort pour terminer rapidement le set.

Milieu du match :

- Après le début du match, les joueurs peuvent attendre (défendre) sur le début de set. Ils attendent qu'il y ait un score tel que 8-8 ou 9-9 pour accélérer le jeu ou alors ils ont une stratégie faite pour ce moment là.
- L'influence de la confiance en soi quand on perd des points : Arrêter d'attaquer ? Faire plus d'erreurs ? Amélioration ou adaptation du jeu de l'adversaire ?
- Le nombre d'échange n'a, en lui même, pas tellement d'importance. Toutefois, on peut tout de même observer au cours d'un set si il diminue ou augmente.

Fin du match (dernier set) :

- C'est peut être l'un des moments les plus importants car les joueurs ont observé la tactique, les réactions de l'autre et ils peuvent alors se préparer au coup. Jouer sur son milieu ?
- Au début du set, il faut gagner les premiers points. Il y a une question de confiance pour trouver comment gagner la partie.

Les services :

- Observation du comportement du joueur : Service court ? Service long ?
- En fin de set, il faut regarder l'initiative que va prendre le joueur.

FIGURE 32 – Moments clés dans un match de tennis de table, où les statistiques auront une valeur d'autant plus importante

## 8 Conclusion

### Rappel des objectifs

Ce projet consiste à analyser des matchs de tennis de table à partir de leurs vidéos. Il en découlait plusieurs sous-objectifs :

- Réaliser le tracking vidéo de la balle sur la vidéo d'un match de tennis de table pour y exhiber sa trajectoire
- Déterminer la trajectoire théorique d'une balle de tennis de table à partir de son état initial
- Fort du modèle théorique précédemment construit, approcher la trajectoire de la balle extraite de la vidéo par une trajectoire théorique aux caractéristiques connues
- Catégoriser les différents coups selon la classification communiquée par la FFTT

### Résultats

Si certaines tâches n'ont pas pu aboutir, le projet a tout de même permis une grande avancée vers l'objectif final :

- Un modèle théorique du mouvement d'une balle de tennis de table a été construit avec succès
- L'approche de la trajectoire extraite de la vidéo par une trajectoire théorique s'est montrée de plus en plus juste. Des progrès sont tout de même encore à faire.
- L'algorithme d'apprentissage a permis de reconnaître sur la vidéo les deux joueurs, mais pas la balle. Les raisons de cet échec ont été expliquée précédemment.
- Les programmes de tracking de la balle et de comparaison trajectoire théorique - trajectoire pratique n'étant pas optimaux, nous n'avons pas eu de jeu de donnée à classer. Ainsi, une simple stratégie d'analyse de ces statistiques, dans l'hypothèse où elles ont été faites, a été exposée.

### Perspectives

Le projet "Science 2024" est un projet qui s'étale sur plusieurs années, jusqu'à l'organisation des Jeux Olympiques à Paris cette même année. Ainsi, si le PE n° 39 s'achève en cette fin d'année scolaire 2020, le projet pourra être repris l'année prochaine par un autre groupe pour continuer le travail réalisé, en prenant peut-être une approche différente de la nôtre (notamment sur le tracking de la balle qui n'a pas été concluante) ou en cherchant des moyens d'optimiser davantage les algorithmes produits.

Fort de ce qui a déjà été fait, l'année prochaine sera aussi l'occasion de travailler davantage sur le traitement des données des matchs de tennis de table, l'unique valeur pertinente pour la FFTT. Un autre axe d'étude serait de prendre en compte le mouvement des joueurs, en exhibant leurs squelettes sur le vidéo conformément à la Figure 31. En bref, il existe encore beaucoup d'axes de réflexions et d'études pour optimiser l'analyse de matchs de tennis de table.

## Bibliographie

- [1] Yongsheng Zhao, Rong Xiong and Yifeng Zhang, "Rebound Modeling of Spinning Ping-Pong Ball Based on Multiple Visual Measurements", IEEE Trans. Instrum. Meas, August 2016
- [2] Han Bao, Xiaopeng Chen, ZhanTao Wang, Min Pan and Fei Meng, "Bouncing Model for the Table Tennis Trajectory Prediction and the Strategy of Hitting the Ball", IEEE, 2012
- [3] Moodle ECL : Cours de Fluides et Energies, Julian SCOTT, Mikhael GOROKHOVSKI, Denis JEANDEL, Francis LEBOEUF
- [4] Moodle ECL : Cours d'Analyse Numérique de M. Vial et M. Seppecher
- [5] TensorFlow : Large-scale machine learning on heterogeneous systems, 2015. Exemples et documentation disponible sur : <https://www.tensorflow.org> (consulté le 08/04/2020)
- [6] Canal Sport : tennis de table : <https://tennis-de-table.canal-sport.fr/fr/coupe-du-monde-2018>

## 9 Annexe : Liste des tâches

Détail des tâches	
<b>1 Gestion de projet</b>	
1.1	Livrable 1 : Gestion de projet
1.2	RVP1
1.3	RVP2
1.4	Rapport final
<b>2 Acquisitions (motion capture et tracking vidéo)</b>	
2.1	Prise en main matériel/premières acquisitions/placement des capteurs
2.2	Extraction des coordonnées temporelles du sujet étudié (rédiger une procédure)
<b>3 Mouvement de la balle : théorie VS pratique</b>	
3.1	Etat de l'art du tennis de table
3.2	Définition d'une trajectoire théorique d'une balle
3.3	Livrable 2 : Etat de l'art du tennis de table, définition d'une trajectoire théorique d'une balle, simulations
<b>4 Programmes informatiques et simulations</b>	
4.1	Programme Python calculant vitesses, angles, ... à partir des acquisitions
4.2	Programme Python simulant la trajectoire d'une balle
<b>5 Analyse de la trajectoire d'une balle sur une vidéo</b>	
5.1	Projection d'une trajectoire 3D dans un plan quelconque
5.2	Détermination de la position de la caméra filmant les joueurs (hauteur, angle, ...)
5.3	Tracking (non manuel) de la balle sur une vidéo : trajectoire 2D
5.4	Identification d'une trajectoire théorique connue à la trajectoire issue de la vidéo
5.5	Méthodes de traitement et d'analyse des statistiques construites
5.6	Programmes Python de catégorisation des coups
5.7	Livrable 3 : Analyse de la trajectoire d'une balle sur une vidéo et élaboration de statistiques

FIGURE 33 – Liste des tâches du projet

## 10 Annexe : Diagramme de Gantt

## 10.1 Diagramme complet

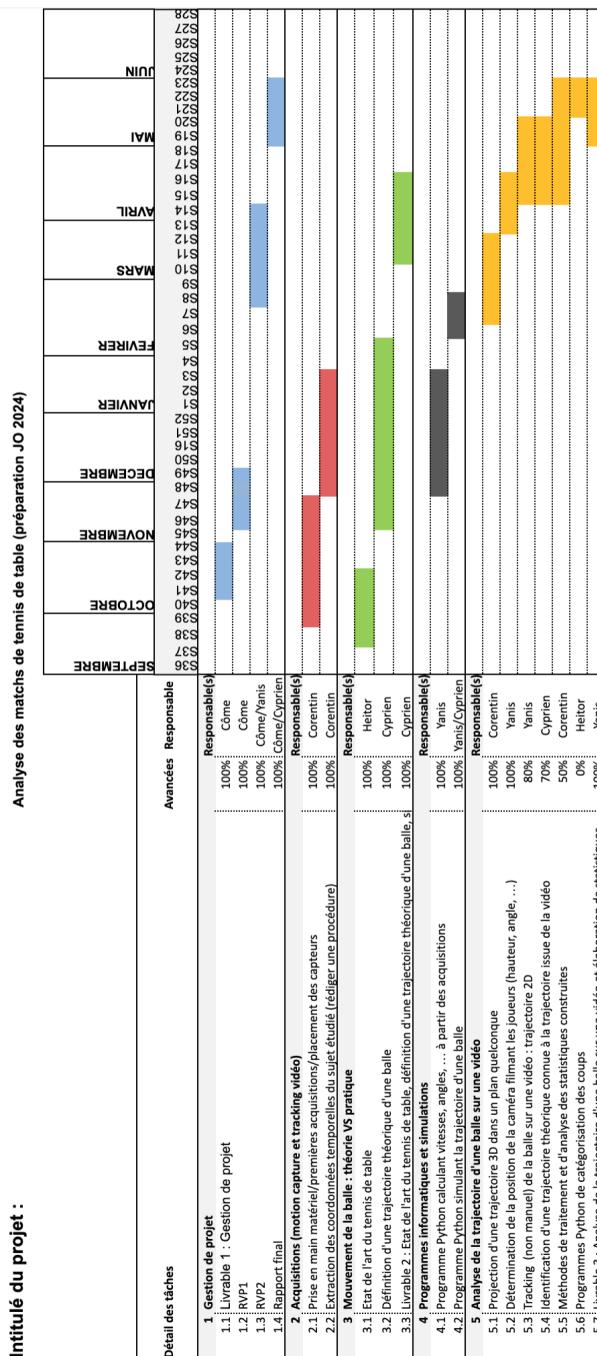


FIGURE 34 – Nouveau diagramme de Gantt

*Lien pour accéder au diagramme de Gantt*

## 10.2 Diagramme avec suivi

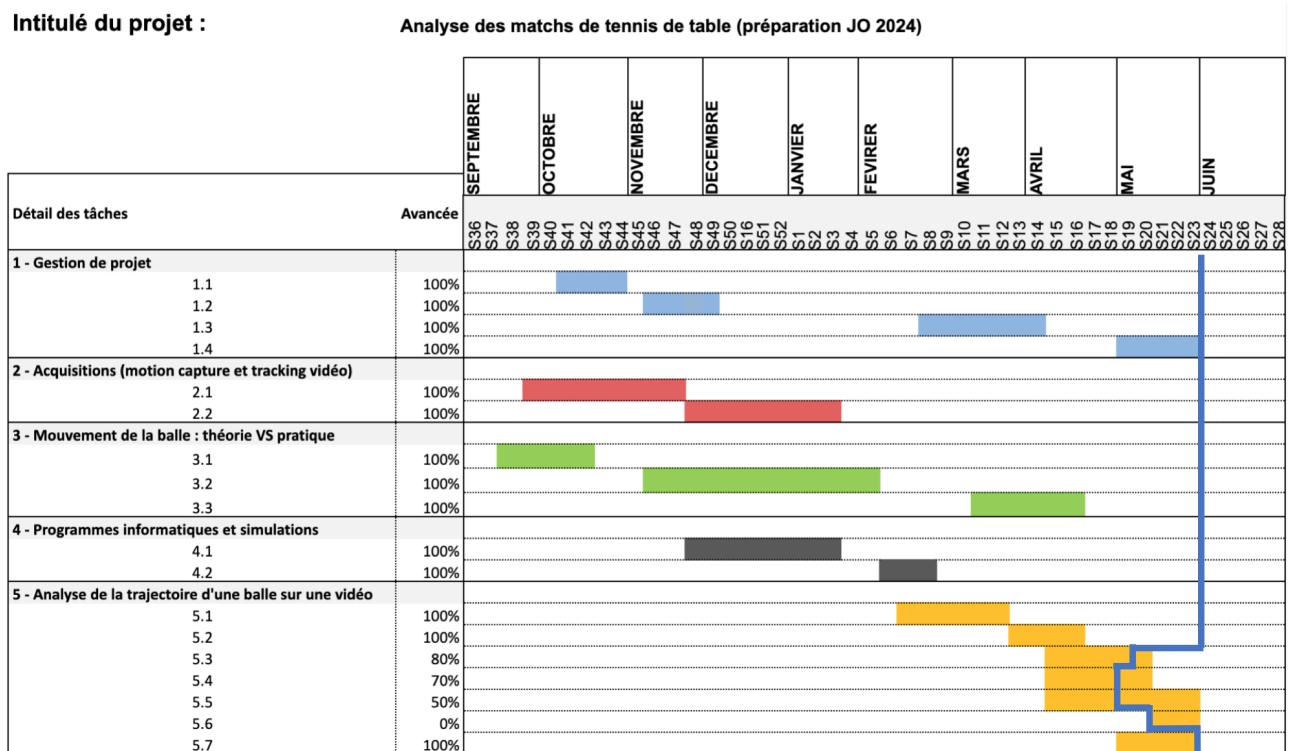


FIGURE 35 – Diagramme de Gantt avec suivi

## 11 Annexe : Gestion des coûts

Sorties	Entrées
Caution kit caméras infrarouges : 15 000	Trésorerie départ : 300
Caution GoPro : 500	Salaire chercheur-ingénieur : à déterminer
Caution table de tennis de table : 150	Caution caméras infrarouges : 15 000
Caution raquettes,balles et accessoires : 50	Caution GoPro : 500
Voyage à Paris pour 5 personnes : 428	Caution table de tennis de table : 150
	Caution raquettes, balles et accessoires : 50
	<b>TOTAL : &gt;-128</b>

FIGURE 36 – Budget prévisionnel

Notre budget ne prend en compte que très peu de sorties car nous avons la chance de profiter de ressources déjà présentes dans la salle Amigo (endroit où nous travaillons) : caméras de motion capture , table de tennis de tables, raquettes, capteurs. Mis à part les possibles cautions à payer pour le matériel que nous utilisons, une potentielle sortie d'argent est le paiement d'un voyage vers les locaux de la FFTT où nous aurions pu avoir à y effectuer des expériences avec des professionnels dans le cas où notre projet aboutirait. Un aller-retour par personne coûterait environ 86,60€ (2x40€ pour un aller-retour en train Lyon-Paris pris suffisamment à l'avance (sans carte de réduction) et 2x2,80€ pour

un aller-retour en RER à Vincennes). Cependant, le contexte sanitaire actuel a avorté ce possible voyage.

En entrée, nous bénéficions a priori du retour des cautions à la fin de l'année et éventuellement de cinq salaires en tant d'ingénieur-chercheurs.

## 12 Annexe : Checklist du rapport

### A développer

Renseigner la case par le nom du responsable, ou la date ou une simple croix lorsque la vérification a été faite.

	Vérification présence	Vérification qualité
--	-----------------------	----------------------

#### Contenu

Résumé en français	X	X
Résumé en anglais	X	X
Table des matières	X	X
Table des figures	X	X
Introduction	X	X
Conclusion générale	X	X
Bibliographie	X	X
Citation des références dans le texte	X	X

#### Forme

Vérification orthographe	X	X
Pagination	X	X
Homogénéité de la mise en page	X	X Cependant, la charte graphique n'est pas respectée, ayant changée récemment.
Lisibilité des figures	X	X

FIGURE 37 – Checklist des éléments présents dans ce présent rapport