

# Étude des trajectoires et optimisation du jeu de Badminton

Nessim OUSSEDIK



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Trajectoire globale du volant</b>	<b>8</b>
1.1	Équation du mouvement . . . . .	9
1.1.1	Position de l'étude . . . . .	9
1.1.2	Force de traînée . . . . .	10
1.1.3	Coefficient de traînée . . . . .	11
1.2	Analyse des trajectoires . . . . .	12
1.2.1	Discussion qualitative . . . . .	12
1.2.2	Le mur aérodynamique . . . . .	14
1.2.3	Angle de projection optimal . . . . .	16
1.3	Étude expérimentale et numérique . . . . .	18
1.3.1	Trajectoire et vitesse des volants . . . . .	18
1.3.2	Portée des volants . . . . .	26
1.3.3	Différences entre les volants en plume et en plastique . . . . .	27
<b>2</b>	<b>Comportement du volant après impact avec la raquette</b>	<b>30</b>
2.1	Dynamique de retournement . . . . .	31
2.1.1	Position du modèle . . . . .	31
2.1.2	Mise en équation . . . . .	32
2.2	Étude expérimentale et numérique . . . . .	33
2.2.1	Observations expérimentales . . . . .	33
2.2.2	Résolution numérique . . . . .	37
2.2.3	Validation du modèle . . . . .	39
2.3	Sur la forme du volant . . . . .	40
2.3.1	Approche expérimentale . . . . .	40
2.3.2	Analyse des résultats . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Influence des caractéristiques du volant et conditions initiales sur le jeu</b>	<b>44</b>
3.1	Stratégie du service . . . . .	45
3.1.1	Cadre du travail . . . . .	45
3.1.2	Le service long . . . . .	46
3.1.3	Le service court . . . . .	49
3.2	Influence de la dynamique de retournement . . . . .	51
3.2.1	Étude expérimentale . . . . .	51
3.2.2	Classification des coups . . . . .	52
3.3	Smashes et kill shots . . . . .	53
3.3.1	Étude expérimentale et numérique . . . . .	53
3.3.2	Zone de réalisation de smashes . . . . .	54
<b>A</b>	<b>Code Python - Angle de projection optimal</b>	<b>57</b>
<b>B</b>	<b>Code Python - Trajectoire et vitesse des volants</b>	<b>58</b>
<b>C</b>	<b>Code Python - Résolution numérique du retournement</b>	<b>60</b>

D	Code Python - Vitesse de frappe optimale et angle de projection	61
E	Code Python - Modélisation 3D du terrain et des trajectoires	63
F	Rapport scientifique de Yuen-Ming Tong et Youlian Hong	66
G	Rapport final de TIPE	73

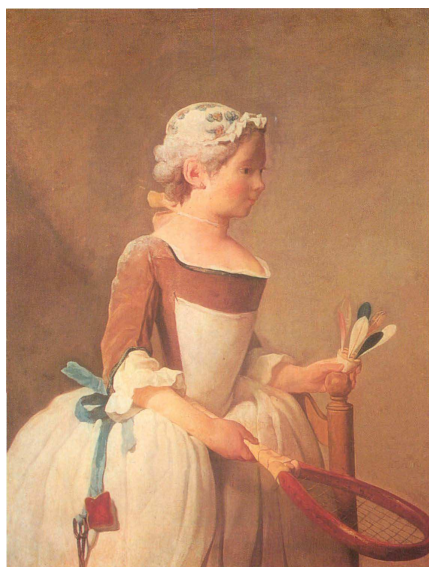


# Un sport atypique

Quand, un jour de 1873, deux officiers coloniaux britanniques du château de Badminton House eurent l'idée d'adapter la pratique indienne du «Poona» (jeu de raquette joué avec une balle légère faite de duvet) en remplaçant la balle par un bouchon de champagne piqué de plumes, un nouveau sport allait naître. Et avec lui, de très nombreux adeptes. De fait, en un siècle et demi, le badminton est devenu l'un des sports les plus pratiqués au monde, particulièrement en Asie, le continent de ses ancêtres. Henri Sérandour, ancien président du Comité National Olympique Sportif Français (CNOSF) explique cet engouement par le plaisir qu'il procure :

*« Le badminton est un jeu, aujourd'hui olympique, qui bénéficie d'une notoriété immédiate, laquelle est sans doute liée au plaisir d'une pratique à laquelle nous nous sommes tous essayés, à un moment ou à un autre, mais également à la qualité du spectacle prodigieux offert par des compétiteurs particulièrement habiles. »*

Afin de développer ce spectacle unique, les britanniques codifièrent et institutionnalisèrent progressivement le jeu. Dans sa version moderne, deux adversaires ou paires d'adversaires s'affrontent au meilleur de 3 sets de 21 points. Chaque joueur fait face à son ou ses adversaires sur des moitiés d'un terrain rectangulaire de 13.4 mètres de long et 6.1 mètres de large. Le terrain est divisé en deux par un filet d'une hauteur de 1.55 mètre. En match, un point est marqué dès lors qu'un coup de raquette envoie le volant dans les limites de la moitié adverse, sans que l'opposition ne soit en mesure de renvoyer un bon coup.



(a)



(b)

FIGURE 1 – L'évolution du badminton : (a) *La fillette au volant*, XVIIIème siècle. Jean-Siméon Chardin, huile sur toile. (b) Raquette et volant de badminton actuels.

Ce qui distingue le badminton des autres sports de raquette est son sujet : le volant. Il s'agit là d'un projectile unique en son genre, bien nécessaire - nous le verrons - pour dompter les dimensions du terrain. Deux grands types de volants existent à ce jour : les volants en plume et les volants en plastique. Les prérogatives de la Fédération Française de Badminton (FFBad) établissent les caractéristiques que doivent avoir les volants destinés à être utilisés en compétition :

*« Quel que soit le matériau utilisé, les caractéristiques de vol doivent, d'une façon générale, être identiques à celles obtenues avec un volant en plumes naturelles et ayant une base en liège recouverte d'une fine peau en cuir. [...] »*

- Les plumes doivent avoir une longueur uniforme comprise entre 62 mm et 70 mm lorsque la longueur est mesurée de la pointe de la plume à la partie supérieure de la base du volant.
- Les plumes doivent être solidement fixées avec du fil ou tout autre matériau adéquat.
- La base doit avoir un diamètre compris entre 25 mm et 28 mm et son bout est arrondi.
- Le volant doit peser entre 4,74 grammes et 5,50 grammes.
- La « jupe », ou l'imitation des plumes en matériau synthétique, doit remplacer les plumes naturelles. »

Ce cadre établi, toute la stratégie du badiste consiste à imprimer au volant une trajectoire qui lui permette de passer le filet et de rendre le retour le plus délicat possible pour l'adversaire. La bonne connaissance des trajectoires du volant se révèle ainsi très importante pour les joueurs, désireux de dominer l'échange et marquer des points. C'est précisément l'ambition de ce travail : décrire le comportement du volant et étudier son influence sur le jeu, tant d'un point de vue «spectateur» que joueur.

Cette étude s'inscrit dans le cadre plus général de la physique du sport et de la balistique extérieure, branche de la dynamique des fluides. Physique du sport d'abord, en ce qu'elle s'intéresse particulièrement aux phénomènes physiques créés par ce sport. La balistique extérieure, elle, est l'étude plus large de la trajectoire d'un projectile se mouvant dans l'air. Elle a largement été explorée sous le spectre de l'artillerie militaire, la volonté étant alors de comprendre les trajectoires pour en tirer un avantage certain sur le champ de bataille.

En premier lieu, nous étudions la trajectoire en vol du volant en fonction de ses caractéristiques. Le cadre des particules denses à hauts nombres de Reynolds est ici rappelé. L'analyse du comportement du volant après impact avec la raquette est l'objet de la partie 2. Enfin, nous caractérisons le jeu en termes de choix et de stratégie pour le joueur. L'étude de l'influence des caractéristiques du volant et des conditions initiales est menée.

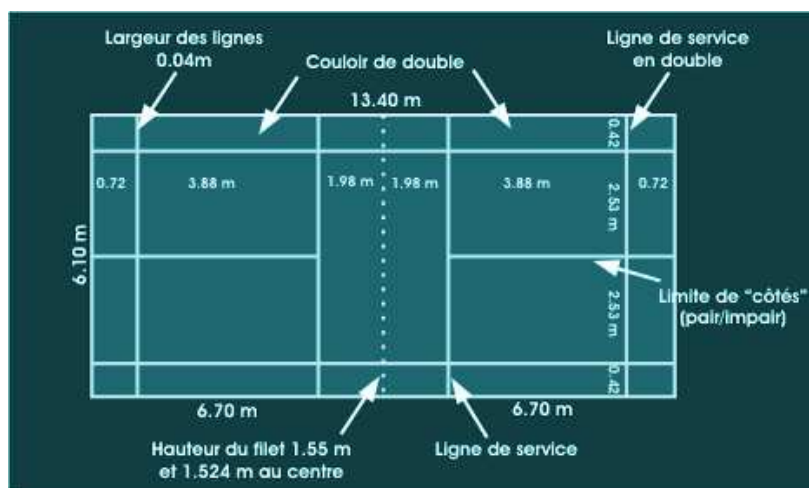


FIGURE 2 – Vue de dessus d'un court de badminton





# Partie 1

## Trajectoire globale du volant

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Équation du mouvement . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1.1	Position de l'étude . . . . .	9
1.1.2	Force de traînée . . . . .	10
1.1.3	Coefficient de traînée . . . . .	11
<b>1.2</b>	<b>Analyse des trajectoires . . . . .</b>	<b>12</b>
1.2.1	Discussion qualitative . . . . .	12
1.2.2	Le mur aérodynamique . . . . .	14
1.2.3	Angle de projection optimal . . . . .	16
<b>1.3</b>	<b>Étude expérimentale et numérique . . . . .</b>	<b>18</b>
1.3.1	Trajectoire et vitesse des volants . . . . .	18
1.3.2	Portée des volants . . . . .	26
1.3.3	Différences entre les volants en plume et en plastique . . . . .	27

---

# Pourquoi un volant ?

Tout projectile utilisé n'est que l'élément visible qui permet d'appréhender le comportement invisible de l'air environnant. Le badminton ne déroge en rien à cette règle. Au contraire, la forme complexe du projectile - en l'occurrence le volant - rend son mouvement dans l'air à la fois simple et extrêmement particulier.

Simple car, à la différence de la balle de tennis ou du ballon de football, le volant n'est pas sujet aux «effets» comme on les appelle communément dans le jargon sportif. D'un point de vue physique, la jupe protège le volant de l'effet Robins-Magnus modifiant de façon asymétrique le champ des vitesses dans l'air. On ne verra donc pas en match un volant suivant un trajet similaire à celui du ballon botté par le célèbre footballeur brésilien Roberto Carlos face à la France.

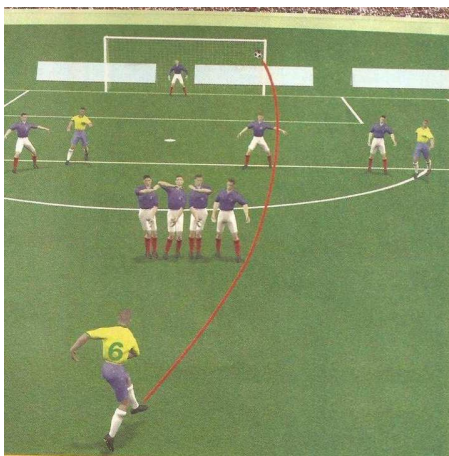


FIGURE 1.1 – Le coup franc de Roberto Carlos lors de France-Brésil, 1997.

On peut donc penser que l'introduction de projectiles de type «volant» répond à la volonté de facilement visualiser le déroulé du jeu, en supprimant par exemple les courbures tridimensionnelles de la trajectoire. Dans la suite, nous étudions précisément les trajectoires particulières proposées par le volant de badminton.

## 1.1 Équation du mouvement

### 1.1.1 Position de l'étude

On considère un volant de badminton tel que décrit précédemment. Sa masse est dans la suite notée  $M$ , et l'intensité de la pesanteur est prise égale à  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ . Le mouvement est de plus étudié dans le repère cartésien  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y)$ .

Le volant est alors soumis aux actions mécaniques suivantes :

- Son poids  $\vec{P} = M\vec{g}$  ;
- Une force aérodynamique exercée par l'air et notée  $\vec{F}_A$  .

C'est cette seconde force qui confère au mouvement du volant toute sa complexité. Du point de vue du fluide, le volant trouble l'écoulement de l'air environnant. En retour, l'air exerce cette force aérodynamique, qui se décompose en :  $\vec{F}_A = \vec{F}_D + \vec{F}_L$  .

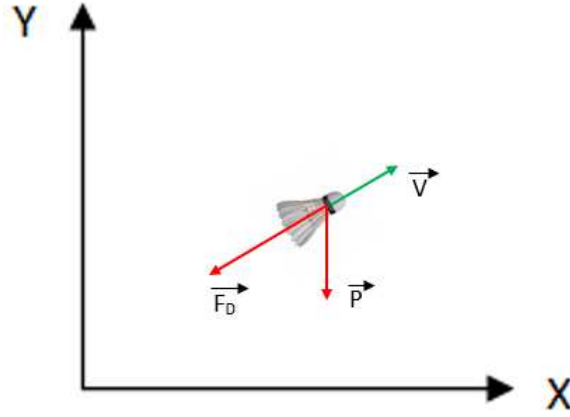


FIGURE 1.2 – Représentation du volant avec les forces qui s'exercent sur lui. Le vecteur vert représente le vecteur vitesse du projectile.

Le premier terme  $\vec{F}_D$  correspond à la composante de  $\vec{F}_A$  parallèle à la direction du mouvement. On la nomme force de traînée (*Drag*). Le second terme  $\vec{F}_L$  est la composante de la force aérodynamique perpendiculaire à la direction du mouvement. Il s'agit de la force de portance (*Lift*). L'influence de cette dernière est toutefois négligeable devant le poids et la force de traînée, comme l'ont montré les physiciens Lung-Ming Chen, Yi-Hsiang Pan et Yung-Jen Chen dans un article du *Journal of Sports Science and Medicine*. L'ensemble de la dynamique du volant est finalement représenté en figure 1.2 .

L'application du principe fondamental de la dynamique au volant aboutit à l'équation du mouvement suivante :

$$M \frac{d\vec{V}}{dt} = M\vec{g} + \vec{F}_D \quad (1.1)$$

Il convient à présent d'étudier plus précisément la force de traînée subie par le volant ainsi que les considérations physiques qu'elle entraîne.

### 1.1.2 Force de traînée

La force de traînée est une force qui s'oppose au mouvement du volant dans l'air. Elle dépend de la vitesse relative du volant par rapport à l'air, et sa direction est toujours opposée à la direction de la vitesse du volant. Un modèle général consiste à exprimer cette force de la façon suivante :

$$\|\vec{F}_D\| = F_D = bV^n \quad (1.2)$$

où  $V$  est la vitesse du volant relativement à l'air,  $b$  est une constante qui dépend des propriétés de l'air et de la forme du volant,  $n$  est un entier naturel.

Le modèle retenu dans le cadre de notre étude est - nous le verrons par ailleurs - celui d'une dépendance quadratique de  $F_D$  en vitesse, soit  $n = 2$ . Ainsi, la force de traînée est habituellement écrite :

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2}\rho S C_D V \vec{V} \quad (1.3)$$

où  $V$  est toujours la vitesse,  $S$  la section du volant exposée à l'air dans la direction de l'écoulement (typiquement  $S = \pi R^2$ , avec  $R$  le rayon de la robe du volant),  $\rho$  la masse volumique de l'air ( $\rho = 1,225 \text{ kg.m}^{-3}$  à  $15^\circ\text{C}$ ), et  $C_D$  un coefficient sans dimension appelé coefficient de traînée.

Il ressort des équations (1.1) et (1.3) que la trajectoire du volant est contenue dans un plan, ce qui justifie la représentation bidimensionnelle opérée précédemment. Afin de convenablement appréhender ces trajectoires, nous présentons dans la suite l'étude du coefficient de traînée  $C_D$ .

### 1.1.3 Coefficient de traînée

Le coefficient de traînée permet de quantifier la force de résistance que subit le volant. Il dépend de la géométrie du volant et des caractéristiques de l'écoulement dans l'air. Pour caractériser les écoulements, le physicien Osborne Reynolds a mis en évidence en 1883 un nombre sans dimension qui porte aujourd'hui son nom. Il est défini de la manière suivante :

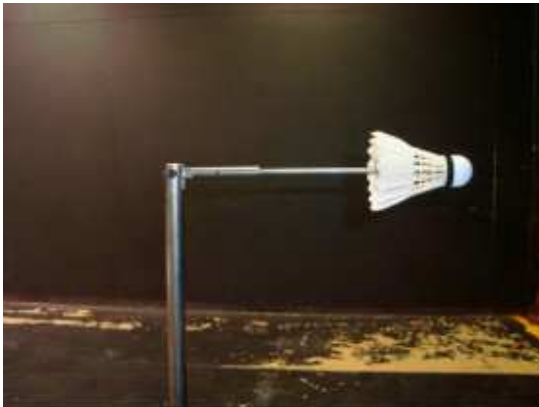
$$Re = \frac{DU}{\nu} \quad (1.4)$$

où  $U$  est la vitesse caractéristique du fluide,  $D$  la dimension caractéristique du volant, et  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide.

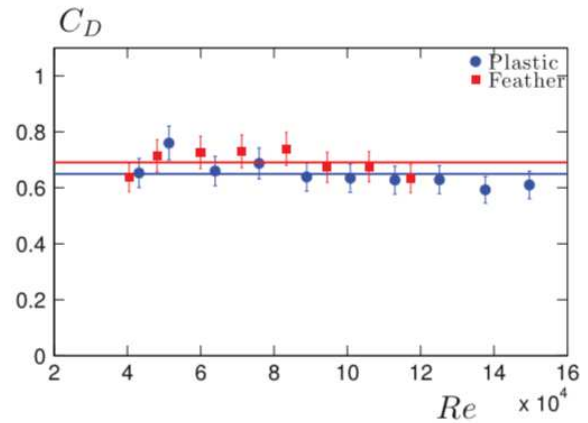
#### Différence entre volants en plume et en plastique

Les questions auxquelles nous nous intéressons ici sont : Comment évolue le coefficient de traînée en fonction de ce nombre de Reynolds ? Quelles sont les différences de comportement entre les volants plume et plastique ?

Le paramètre que l'on peut faire varier facilement est la vitesse de l'air autour du volant, notée  $U$ . C'est d'ailleurs tout l'enjeu des dispositifs de soufflerie. L'étude des coefficients de traînée des volants est menée précisément dans une soufflerie constituée d'une plateforme montée sur un capteur de forces. Les volants sont fixés sur un support fin puis soumis aux effets aérodynamiques du vent dans le tunnel. Les résultats sont regroupés sur la figure 1.3 .



(a)



(b)

FIGURE 1.3 – Mesure du coefficient de traînée : (a) Montage en soufflerie avec le volant. (b) Mesure du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement. Les ronds bleus correspondent au volant en plastique et les carrés rouges à celui en plume. Les lignes continues représentent les valeurs moyennes des coefficients de traînée pour chacun des deux volants.

Les deux volants utilisés ont la même dimension caractéristique  $D = \pi R^2 = 28 \text{ cm}^2$ . On note que, pour les vitesses testées, les coefficients de traînée des volants sont relativement constants. Par ailleurs, dans le cadre du badminton les nombres de Reynolds typiques du jeu sont compris entre  $10^4$  et  $10^6$  (le record du coup le plus rapide est détenu

par le Malaisien Tan Boon Heong avec un smash à  $137 \text{ m.s}^{-1}$ ). L'étude des trajectoires peut donc s'effectuer en considérant un coefficient de traînée constant et en introduisant les valeurs moyennes de l'expérience présentée :  $C_{Dplu} = 0,68$  et  $C_{Dpla} = 0,65$ .

## 1.2 Analyse des trajectoires

### 1.2.1 Discussion qualitative

Notre étude dans la section précédente permet de réécrire l'équation du mouvement vérifiée par le volant de badminton de la figure 1.2 :

$$M \frac{d\vec{V}}{dt} = M\vec{g} - \frac{1}{2}\rho S C_D V \vec{V} \quad (1.5)$$

En réarrangeant les termes, cette équation se ramène à :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{g} - \underbrace{\frac{\rho S C_D}{2M}}_{1/L} V \vec{V} \quad (1.6)$$

Le paramètre mis en évidence par les accolades est homogène à l'inverse d'une longueur, qualifiée de longueur aérodynamique du volant et dont la signification physique sera détaillée dans la suite :

$$L = \frac{2M}{\rho S C_D} \quad (1.7)$$

Dans un souci d'allègement des notations, on écrit l'équation (1.6) sous la forme suivante :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + \frac{V}{L} \vec{V} = \vec{g} \quad (1.8)$$

La trajectoire du volant dépend donc de sa longueur aérodynamique, de sa vitesse initiale  $V_0$  ainsi que de l'angle de projection  $\theta_0$ . Notons que cette équation admet un état stationnaire (correspondant à  $\frac{dV}{dt} = 0$ ) lorsque la traînée compense le poids. Ce comportement diffère de celui décrit par la mécanique galiléenne, en l'absence de forces aérodynamiques. Cet état stationnaire est attractif - c'est à dire qu'il est toujours atteint pourvu que l'on attende suffisamment longtemps - et est caractérisé par une vitesse terminale notée  $V_\infty$  qui est verticale et qui s'exprime par :

$$V_\infty = \sqrt{gL} \quad (1.9)$$

Cette vitesse est dite «terminale» car il s'agit de la vitesse à laquelle s'achève la trajectoire du volant de façon certaine. Il est intéressant de l'introduire pour étudier la dynamique du volant :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{g} - \frac{gV}{V_\infty^2} \vec{V} \quad (1.10)$$

Si l'influence de l'angle de projection sur la trajectoire du volant semble immédiate ( $\theta_0 \leq 0 \implies \text{smash}$ ), celle de la vitesse initiale  $V_0$  du volant fait l'objet de la suite de cette section.

## Influence de la vitesse initiale sur la trajectoire

Afin de faire apparaître la vitesse initiale du volant dans l'équation du mouvement établie précédemment, on effectue le changement de variable  $V_p = \frac{V}{V_0}$ . L'équation (1.10) se transforme en :

$$V_0 \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \vec{g} - g \frac{V_0^2}{V_\infty^2} V_p \vec{V}_p$$

D'où, avec  $g$  donné par (1.9) :

$$V_0 \frac{d\vec{V}_p}{dt} = -\frac{V_\infty^2}{L} \vec{e}_y - \frac{V_0^2 V_p}{L} \vec{V}_p$$

En multipliant par  $\frac{L}{V_0^2}$  :

$$\frac{L}{V_0} \frac{d\vec{V}_p}{dt} = -\frac{V_\infty^2}{V_0^2} \vec{e}_y - V_p \vec{V}_p$$

Avec  $\frac{1}{V_0} = \frac{V_p}{V}$ , il vient :

$$\frac{LV_p}{V} \frac{d\vec{V}_p}{dt} = -\frac{V_\infty^2}{V_0^2} \vec{e}_y - V_p \vec{V}_p$$

Une étude plus fine du mouvement peut être effectuée en considérant non pas l'abscisse cartésienne du volant mais son abscisse curviligne, notée  $s$ . La représentation graphique de ce modèle est présentée sur la figure 1.4 .

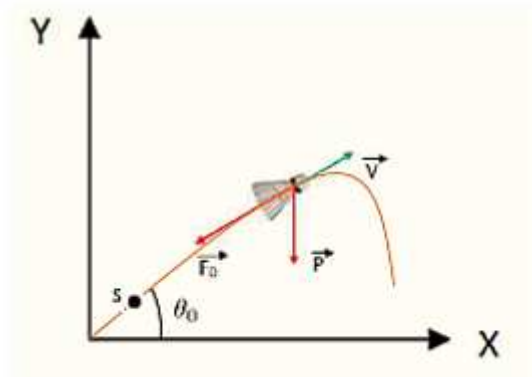


FIGURE 1.4 – Représentation du mouvement du volant avec les forces et notations utilisées.

L'abscisse curviligne du volant vérifie la relation :

$$\frac{ds}{dt} = V$$

D'où l'équation vérifiée par la vitesse réduite  $V_p$  :

$$LV_p \frac{d\vec{V}_p}{ds} = -\frac{V_\infty^2}{V_0^2} \vec{e}_y - V_p \vec{V}_p \quad (1.11)$$

On voit clairement poindre un comportement différent de cette équation selon la valeur du rapport entre vitesses terminale et initiale.

**Cas où  $V_0 \ll V_\infty$  :**

Lorsque la vitesse initiale est faible devant celle terminale, le troisième terme de l'équation (1.11) est négligeable devant le deuxième. La trajectoire du volant se ramène alors au cas purement gravitaire de la mécanique galiléenne, dont les caractéristiques sont bien connues : la trajectoire est parabolique, et donc symétrique par rapport à son sommet.

**Cas où  $V_0 \gg V_\infty$  :**

À l'inverse, lorsque le volant est initialement animé d'une vitesse grande devant sa vitesse terminale, c'est le troisième terme qui devient prédominant. Dans ce cas, l'équation du mouvement se ramène à :

$$LV_p \frac{d\vec{V}_p}{ds} = -V_p \vec{V}_p$$

c'est à dire :

$$L \frac{d\vec{V}_p}{ds} = -\vec{V}_p \quad (1.12)$$

Cette équation s'intègre directement en  $\vec{V}_p(s) = e^{-s/L} \vec{u}_0$ , où  $\vec{u}_0$  est un vecteur unitaire de mêmes sens et direction que  $\vec{V}_0$ . La première partie de la trajectoire est donc une droite orientée par l'angle de projection. Le volant y subit une décélération sur la distance aérodynamique  $L$ . Le projectile tombe ensuite verticalement à  $V_\infty$  comme nous l'avons vu par ailleurs. Ces deux portions rectilignes de trajectoire sont reliées par une portion courbe, zone pour laquelle aucun terme n'est prédominant et où  $V \gtrsim V_\infty$ .

Ces descriptions ont déjà été faites par les précurseurs de l'étude balistique. Dès 1537, l'italien Niccolo Tartaglia avait esquissé la trajectoire d'un boulet de canon. La particularité de cette trajectoire est qu'elle n'est pas symétrique par rapport à son sommet. Ses travaux ont convaincu les balisticiens de l'importance de la résistance de l'air d'une part, et des caractéristiques du projectile d'autre part.



FIGURE 1.5 – Courbe balistique qualitative d'un boulet de canon. Niccolo Tartaglia, *La nova Scientia*, 1537.

Il existe finalement un critère simple afin de prévoir la forme de la trajectoire suivie par le volant. Si la vitesse initiale est faible devant celle terminale, la trajectoire est parabolique. Dans le cas contraire, on a une trajectoire de type «Tartaglia».

Une autre propriété très importante pour les joueurs est la portée des volants. Cette dernière fait l'objet de la suite de cette section.

## 1.2.2 Le mur aérodynamique

La portée correspond à l'abscisse  $x_0$  pour laquelle le volant repasse par son altitude initiale. Dans ce qui suit nous explicitons une expression approchée de cette portée.

En projetant l'équation (1.11) selon la direction normale au vecteur vitesse, notée  $\vec{n}$ , on obtient :

$$LV_p \frac{d\vec{V}_p}{ds} \cdot \vec{n} = -\frac{V_\infty^2}{V_0^2} \underbrace{\vec{e}_y \cdot \vec{n}}_{\cos \theta}$$

où  $\theta$  désigne l'angle entre  $\vec{V}_p$  et  $\vec{e}_x$ .

Le calcul fastidieux, non détaillé ici, fait sortir un  $1 + \sin^2 \theta$  et permet d'obtenir l'équation vérifiée par  $\theta$  :

$$V^2 \frac{d\theta}{ds} = -g \cos \theta$$

Par ailleurs, la relation  $\cos \theta = \frac{V_x}{V}$  ainsi que l'expression  $V_x(s) = V_{x0} e^{-s/L}$  donnent :

$$-\frac{1}{\cos^3 \theta} \frac{d\theta}{ds} = \frac{g}{V_{x0}^2} e^{2s/L} \quad (1.13)$$

En séparant les variables et en réalisant l'intégration sur  $[\theta, \theta_0]$  pour le membre de gauche et sur  $[0, s]$  pour celui de droite, on obtient l'expression suivante :

$$\left[ \ln \left( \frac{1 + \sin t}{\cos t} \right) + \frac{\sin t}{\cos^2 t} \right]_{\theta}^{\theta_0} = \left( \frac{V_{\infty}}{V_0 \cos \theta_0} \right)^2 (e^{2s/L} - 1) \quad (1.14)$$

Remarquons que, par des considérations mathématiques, on peut approximer la fonction entre crochets par  $A = 2 \frac{\sin t}{\cos^2 t}$  sur l'intervalle  $]-\pi/2, \pi/2[$ , qui correspond à la gamme de valeurs possibles pour l'angle  $\theta$ . Une justification graphique de cette approximation est présentée à la figure ci-dessous.

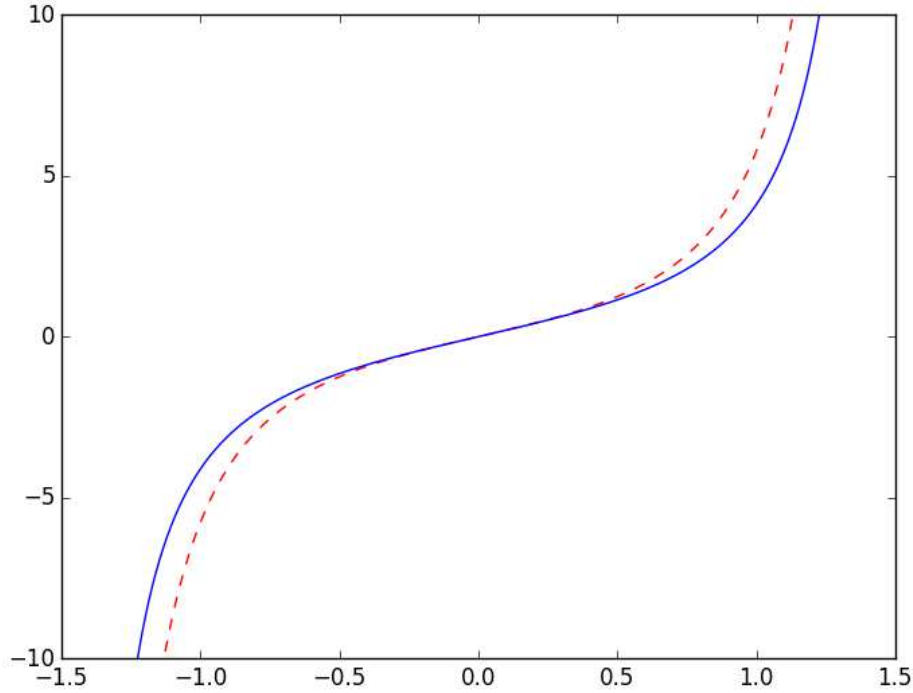


FIGURE 1.6 – Représentation de la fonction entre crochets de l'équation (1.14) en ligne continue, et son approximation par A.

On peut de plus évaluer la portée  $x_0$  par  $x_0 \approx s_{-\theta_0} \cos \theta_0$ , où  $s_{-\theta_0}$  est l'abscisse curviligne pour laquelle  $\theta = -\theta_0$ . Cette expression tient à la forme quasi triangulaire des trajectoires dans la limite  $V_0 \gg V_{\infty}$  (cf. l'esquisse de Tartaglia en figure (1.5)).

Au final, une expression approchée de la portée des volants est :

$$x_0 \approx \frac{L \cos \theta_0}{2} \ln \left( 1 + 4 \left( \frac{V_0}{V_{\infty}} \right)^2 \sin \theta_0 \right) \quad (1.15)$$

Là encore, il convient de distinguer 2 cas selon la valeur du rapport entre vitesses terminale et initiale. Le graphe suivant représente l'évolution du paramètre  $x_0/L \cos \theta_0$  en fonction de  $(V_0/V_{\infty})^2 \sin \theta_0$ .



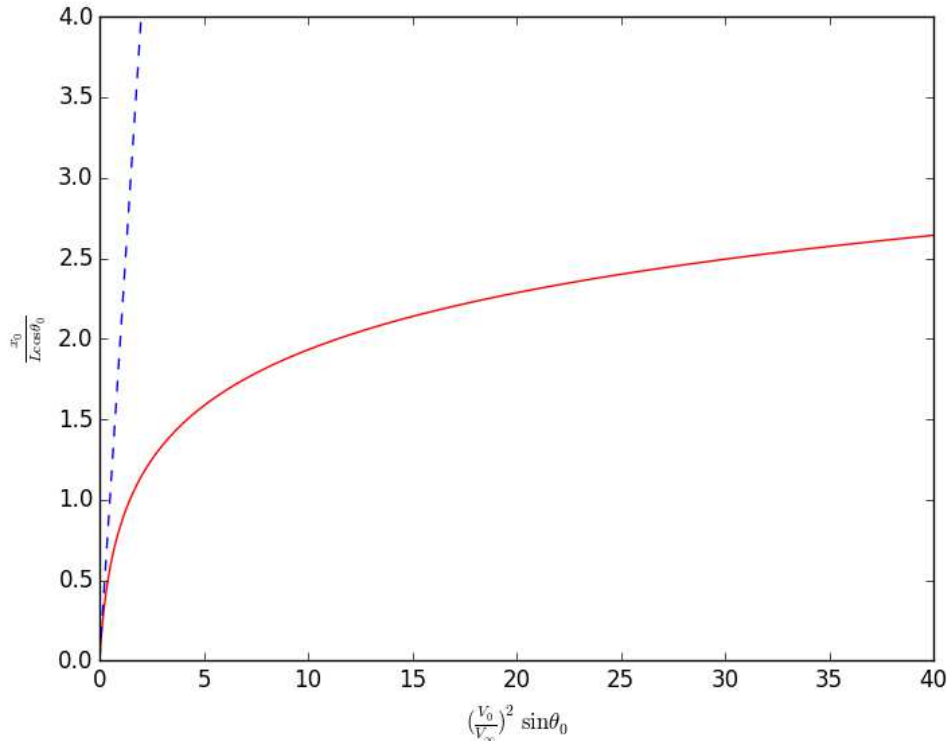


FIGURE 1.7 – Évolution de la portée réduite  $x_0/L \cos \theta_0$  en fonction de  $(V_0/V_\infty)^2 \sin \theta_0$ . Les pointillés représentent la limite des faibles vitesses initiales.

**Cas où  $V_0 \ll V_\infty$  :**

Quand la vitesse initiale est faible devant la terminale, on peut réaliser un développement limité du logarithme de la relation (1.15). On obtient alors la portée du cas classique purement gravitaire :  $x_0 = V_0^2 \sin(2\theta_0)/g$ . D'où la dépendance linéaire mise en évidence par la figure 1.7 .

**Cas où  $V_0 \gg V_\infty$  :**

Dans le cas contraire, la portée réduite perd cette dépendance linéaire. Du fait du terme logarithmique, la portée du volant sature avec la vitesse initiale. C'est précisément cette notion de saturation de la portée avec la vitesse de lancer qui explique la qualification de « mur aérodynamique ».

Ce constat permet d'optimiser le jeu du badiste. En effet, ce dernier aura beau frapper le volant de plus en plus fort, le projectile n'ira pas bien plus loin à chaque coup ! Ce qui corrobore le caractère non symétrique de ces trajectoires.

La question qu'il est légitime de se poser dans notre démarche d'optimisation est celle de l'existence d'un angle de tir qui permette de maximiser la portée du volant.

### 1.2.3 Angle de projection optimal

Il est utile dans un premier temps de voir comment varie la portée  $x_0$  en fonction de l'angle  $\theta_0$ . Au vu de la forme de la relation (1.15), la portée présente un maximum atteint pour un angle de projection  $\theta_{opt}$ . La figure suivante présente l'allure de cette fonction.

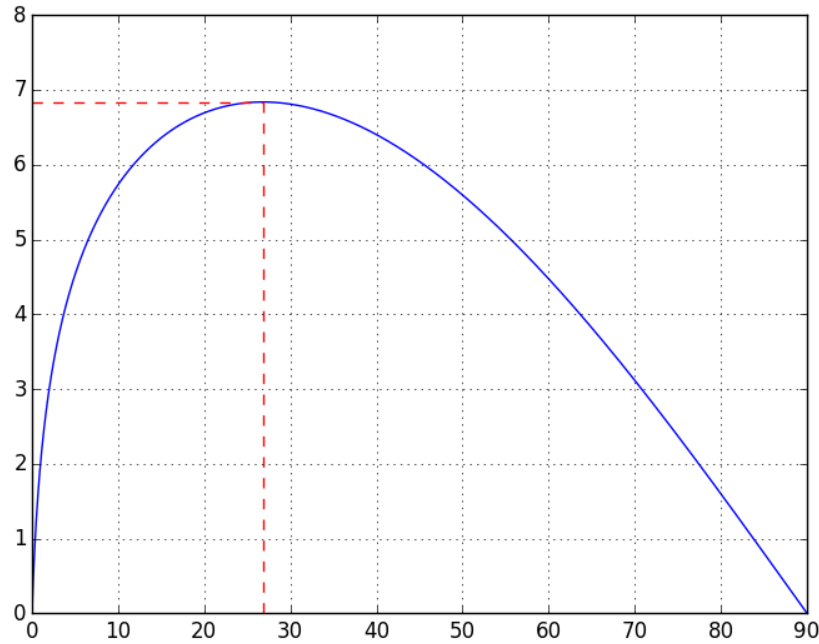


FIGURE 1.8 – Allure de l'évolution de la portée (en m) en fonction de l'angle de tir (en  $^{\circ}$ ). Les lignes en pointillés mettent en évidence la position de l'angle  $\theta_{opt}$  pour lequel la portée atteint un maximum.

De façon cohérente avec l'intuition que l'on s'en fait, la portée s'annule pour des angles de tir valant  $0^{\circ}$  ou  $90^{\circ}$ . L'angle optimal est de plus celui pour lequel la dérivée de la portée par rapport à l'angle initial s'annule.

Afin de déterminer précisément comment évolue  $\theta_{opt}$  lorsque la vitesse de tir évolue, un procédé informatique - détaillé en annexe - a été conçu. Le résultat est représenté à la figure 1.9 .

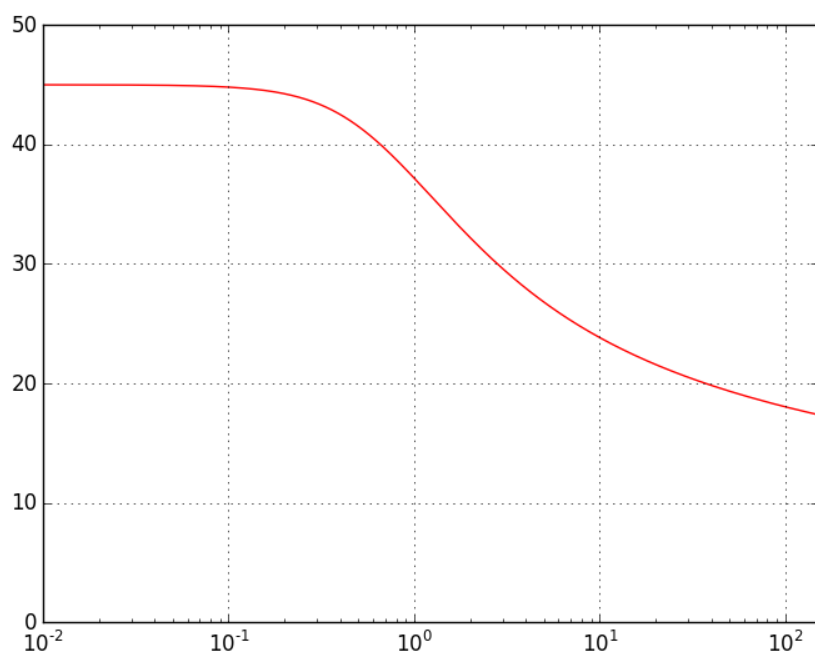


FIGURE 1.9 – Angle optimal de frappe du volant (en  $^{\circ}$ ) en fonction du rapport  $(V_0/V_{\infty})^2$ .

Plusieurs remarques méritent d'être faites. En premier lieu, notre étude montre que le joueur de badminton peut savoir sous quel angle de tir il doit frapper le volant pour que ce dernier aille au plus loin. Cela dépend tout de même des caractéristiques du volant, qui sont cachées dans l'expression de sa vitesse terminale.

De plus, la représentation graphique de la figure ci-dessus montre une décroissance de  $\theta_{opt}$  à mesure que la vitesse initiale du volant est élevée. Dans la limite des faibles vitesses de frappe, l'angle optimal est de l'ordre de  $45^\circ$ . Notons aussi que l'angle optimal n'est jamais supérieur à cette valeur. Les frappes très « en cloche » sont donc particulièrement inefficaces pour envoyer le volant le plus loin possible dans la moitié adverse.

À ce stade de notre travail, nous avons donc construit un modèle et des approximations permettant de décrire le mouvement du volant et d'en optimiser les performances. Dans la section qui suit, nous étudions les trajectoires du volant de badminton par une approche informatique et expérimentale, afin de comparer les performances décrites précédemment et celles effectives en fonction des caractéristiques du projectile.

## 1.3 Étude expérimentale et numérique

### 1.3.1 Trajectoire et vitesse des volants

Dans cette partie, on analyse le comportement de volants dans leur vol. Les expériences qui vont suivre ont été réalisées dans les locaux du Laboratoire d'Hydrodynamique de l'école Polytechnique (LadHyx). Pour deux volants de badminton - l'un en plume, l'autre en plastique - on a réalisé une série de 10 lancers. Précisons que l'étude a été faite en extérieur un jour du mois de mars 2017, où le vent était relativement négligeable. Ces lancers ont ensuite été analysés à l'aide du logiciel de traitement d'images *ImageJ*. L'acquisition des images a été réalisée par une caméra rapide PHOTRON à une fréquence d'acquisition de 250 images par seconde. Les photographies du dispositif sont présentées ci-après.



(a)

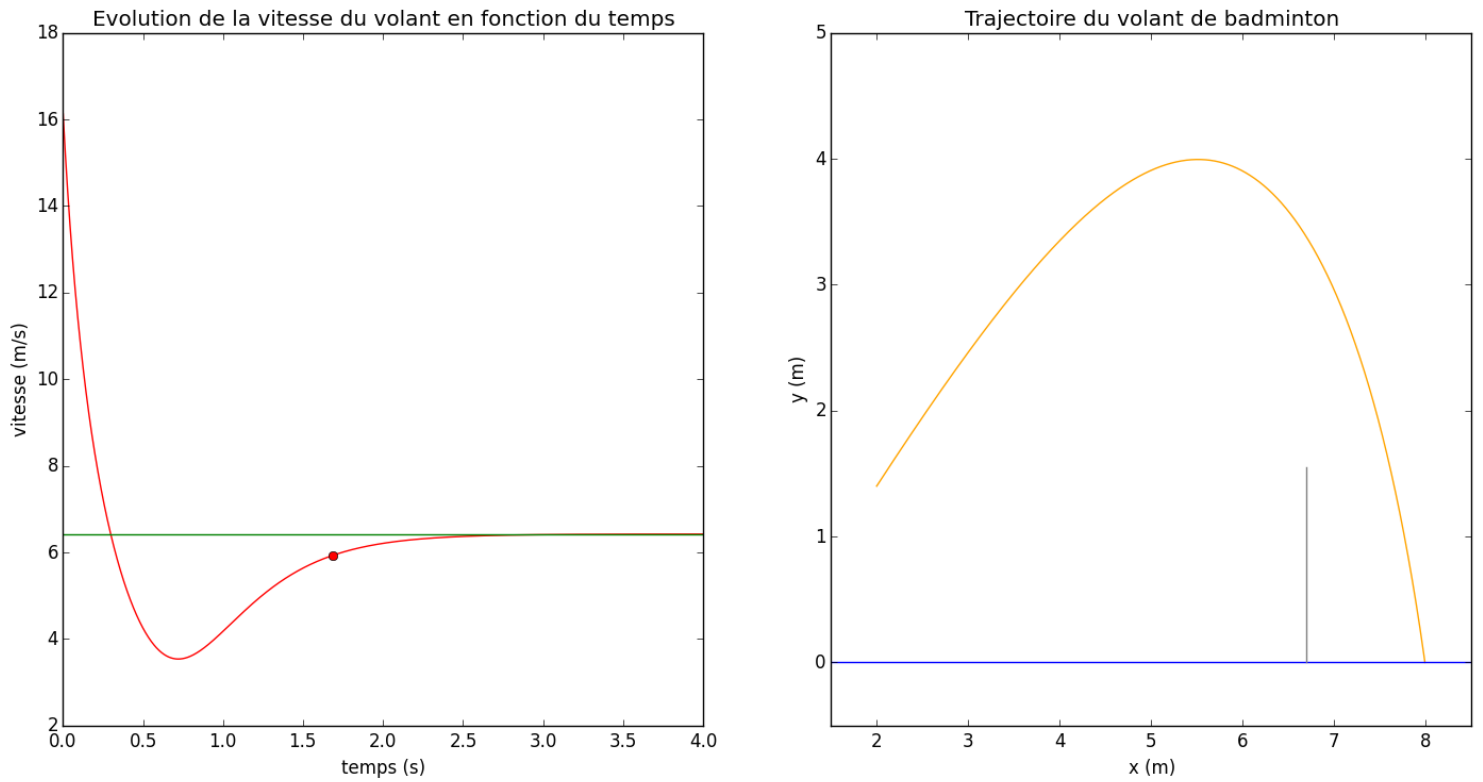


(b)

FIGURE 1.10 – Suivi du vol des volants : (a) Modèle de caméra rapide utilisé. (b) Dispositif global d'acquisition.

Les deux modèles de volant utilisés ont une section  $S = \pi R^2 = 28 \text{ cm}^2$ . Le volant en plume a une masse  $M_{plu} = 4,8 \text{ g}$  et celui en plastique une masse  $M_{pla} = 5,1 \text{ g}$ . Les coefficients de frottements sont ceux établis à la première section de ce travail. En regroupant ces données, on estime les longueurs aérodynamiques relatives aux deux volants :  $L_{plu} = 4,20 \text{ m}$  et  $L_{pla} = 4,67 \text{ m}$ . Leurs vitesses terminales peuvent également être déterminées par la relation (1.9) :  $V_{\infty plu} = 6,42 \text{ m.s}^{-1}$  et  $V_{\infty pla} = 6,77 \text{ m.s}^{-1}$ . La raquette utilisée est un modèle Yonex dont la tête mesure  $25 \text{ cm}$ .

## Vol du volant en plume

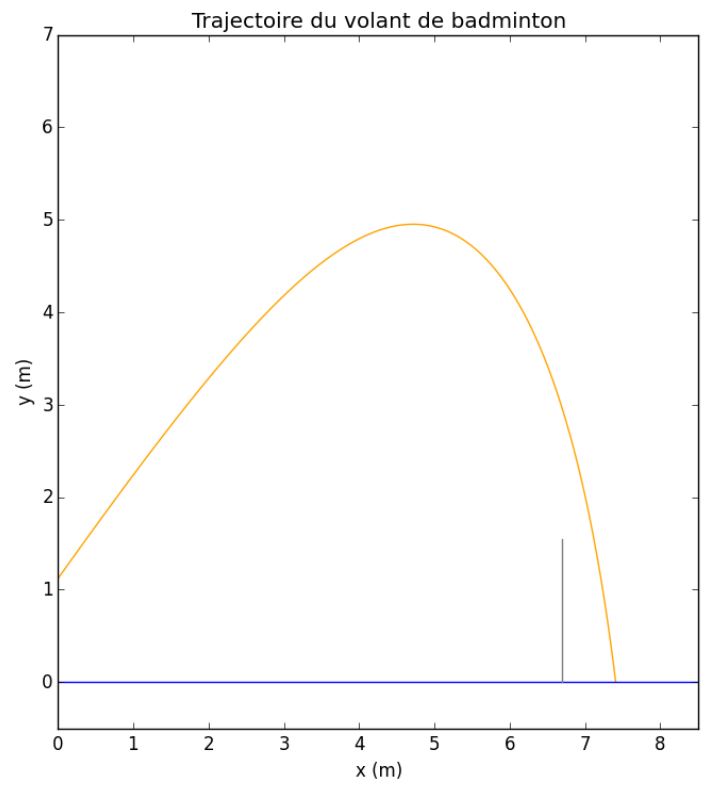
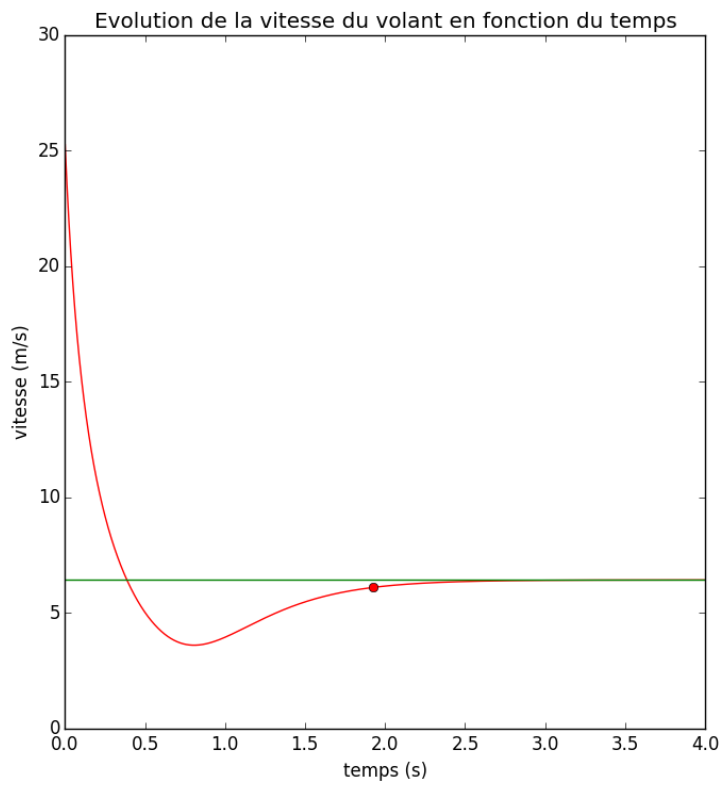


(a)



(b)

FIGURE 1.11 – Expérience  $n^{\circ} 1$  réalisée à  $\theta_0 = 46^{\circ}$  et  $V_0 = 16 \text{ m.s}^{-1}$  : (a) Résultats de l'analyse informatique. Le marqueur rouge indique l'impact du volant au sol, et la barre verte correspond à la vitesse terminale du volant. (b) Chronophotographie de la trajectoire du volant. Les images sont séparées de  $28 \text{ ms}$ .

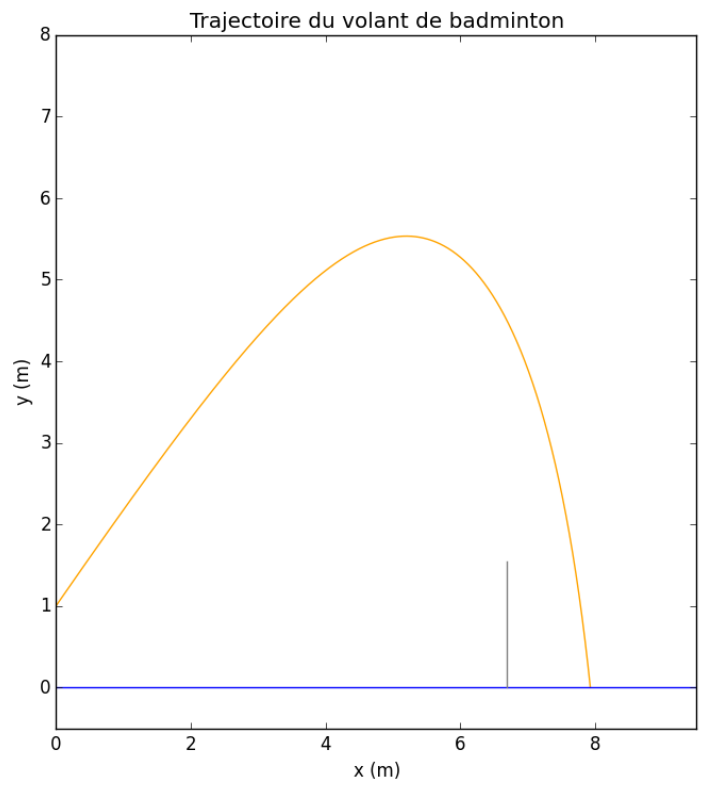
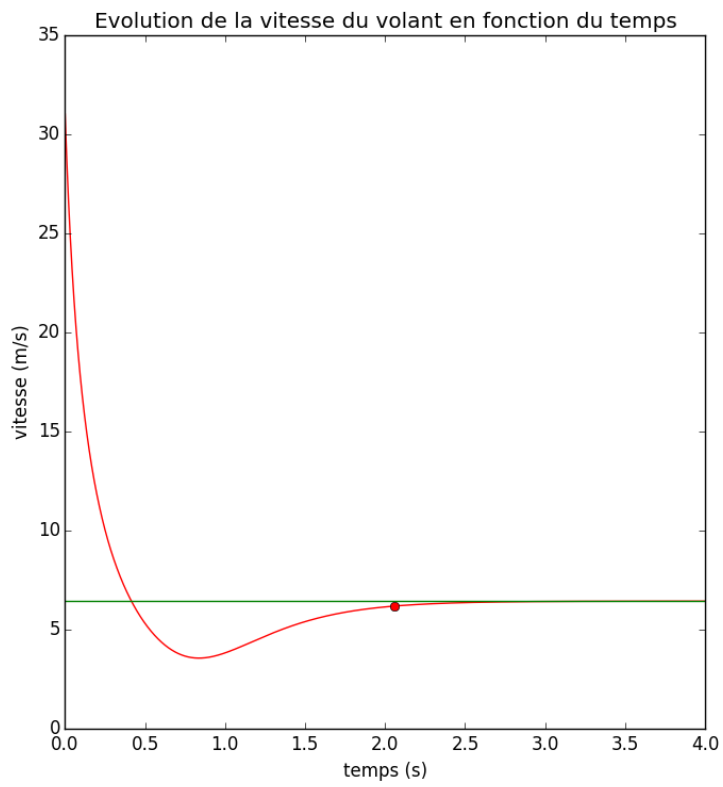


(a)



(b)

FIGURE 1.12 – Expérience n° 2 réalisée à  $\theta_0 = 50^\circ$  et  $V_0 = 25 \text{ m.s}^{-1}$  : (a) Résultats de l'analyse informatique. Le marqueur rouge indique l'impact du volant au sol, et la barre verte correspond à la vitesse terminale du volant. (b) Chronophotographie de la trajectoire du volant. Les images sont séparées de  $40 \text{ ms}$ .



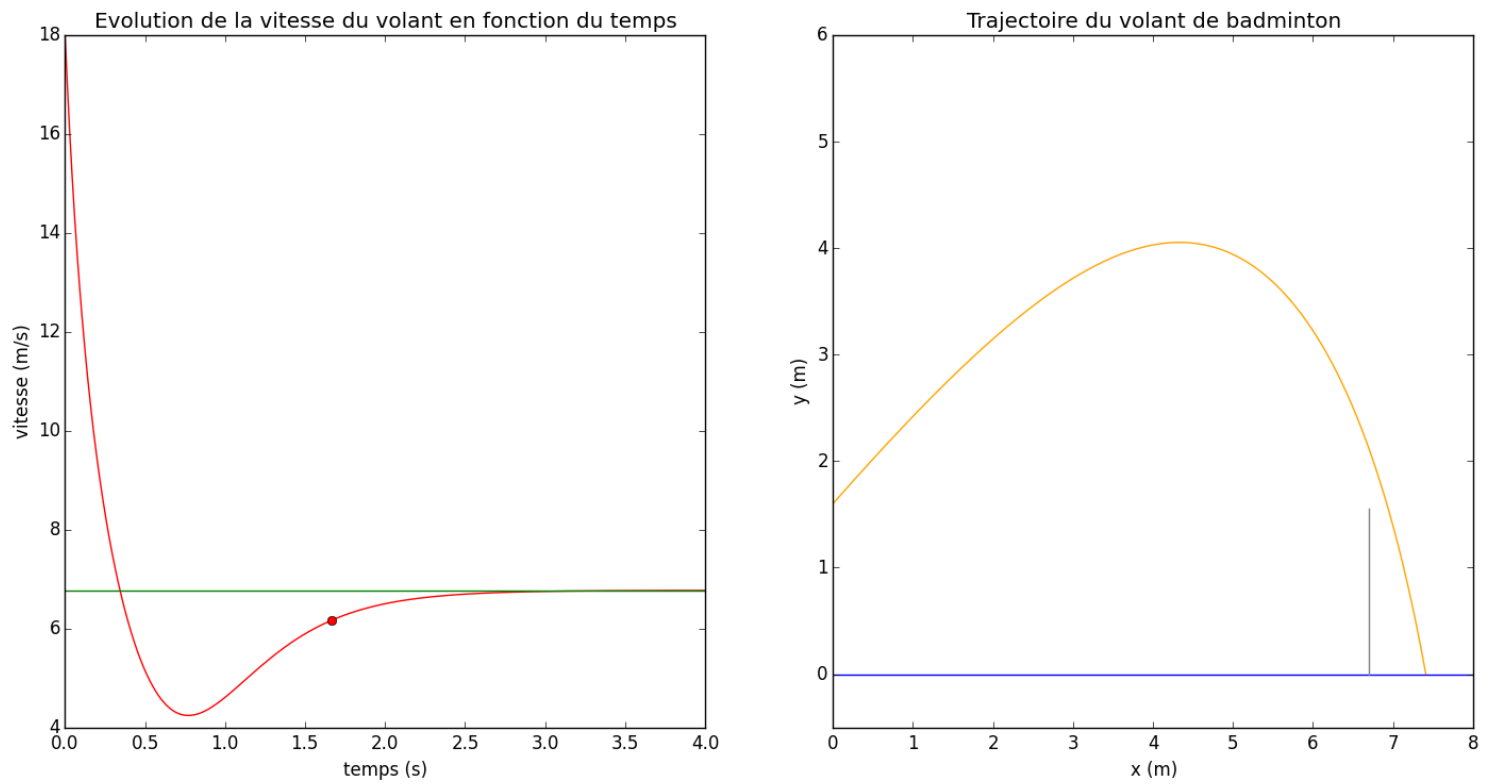
(a)



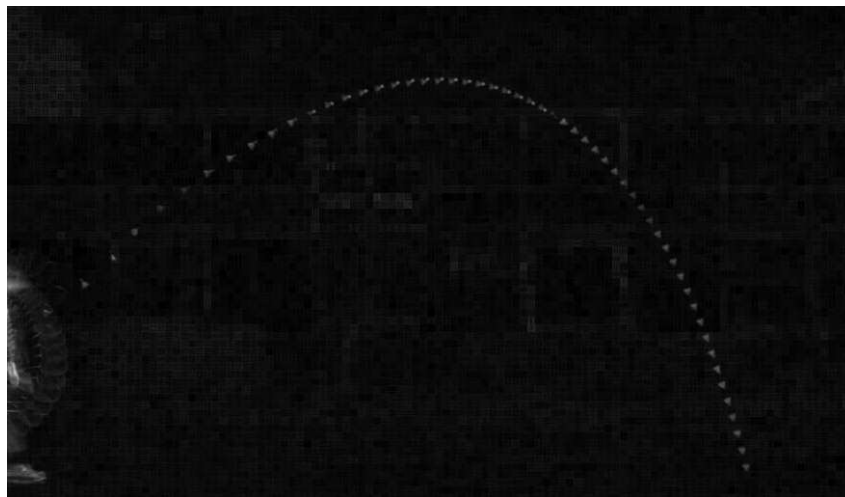
(b)

FIGURE 1.13 – Expérience n° 3 réalisée à  $\theta_0 = 50^\circ$  et  $V_0 = 31 \text{ m.s}^{-1}$  : (a) Résultats de l'analyse informatique. Le marqueur rouge indique l'impact du volant au sol, et la barre verte correspond à la vitesse terminale du volant. (b) Chronophotographie de la trajectoire du volant. Les images sont séparées de  $60 \text{ ms}$ .

## Vol du volant en plastique

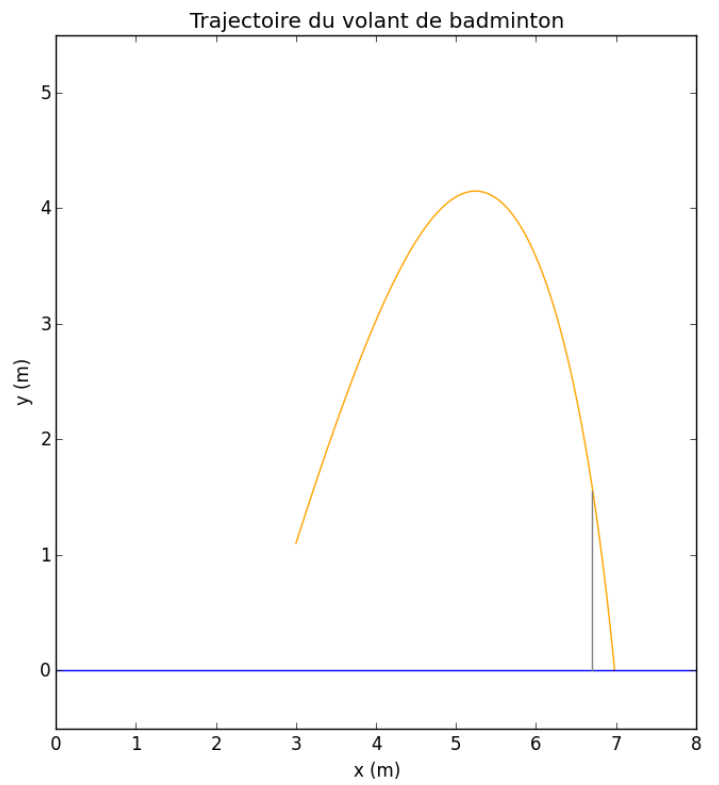
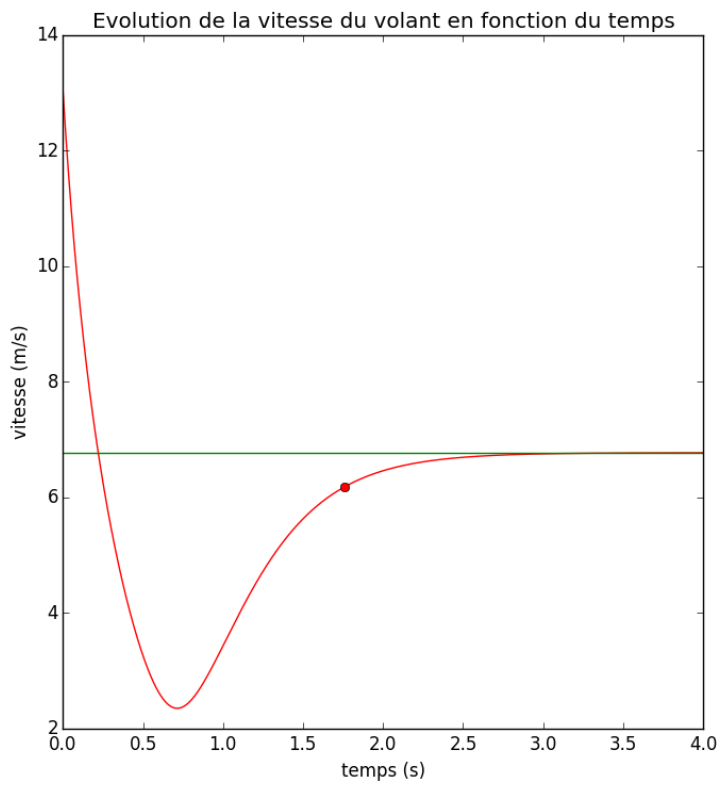


(a)

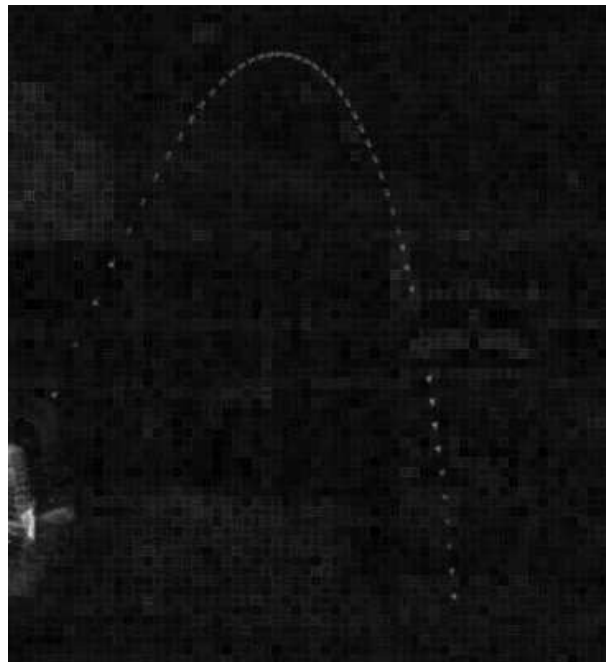


(b)

FIGURE 1.14 – Expérience  $n^{\circ} 4$  réalisée à  $\theta_0 = 42^{\circ}$  et  $V_0 = 18 \text{ m.s}^{-1}$  : (a) Résultats de l'analyse informatique. Le marqueur rouge indique l'impact du volant au sol, et la barre verte correspond à la vitesse terminale du volant. (b) Chronophotographie de la trajectoire du volant. Les images sont séparées de  $28 \text{ ms}$ .



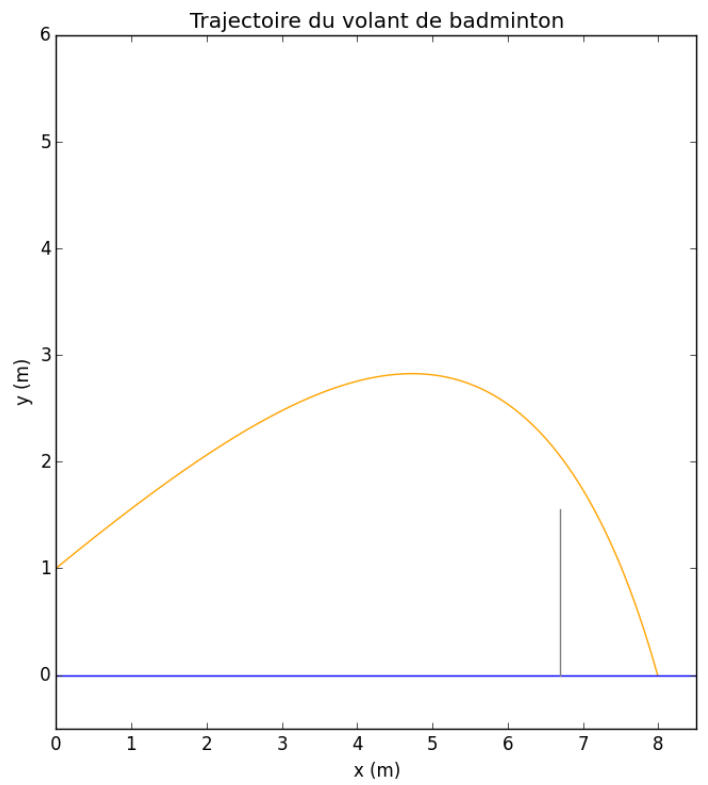
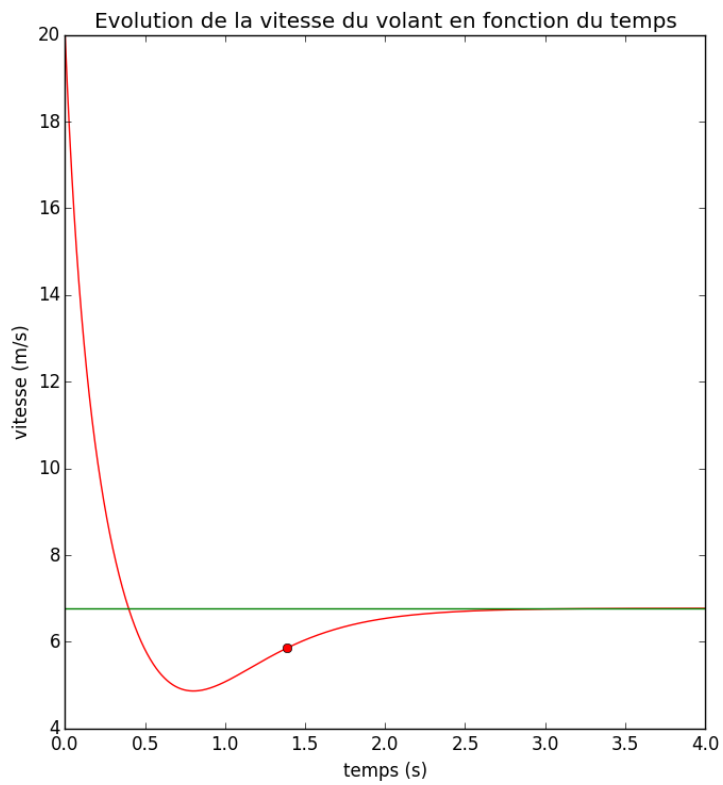
(a)



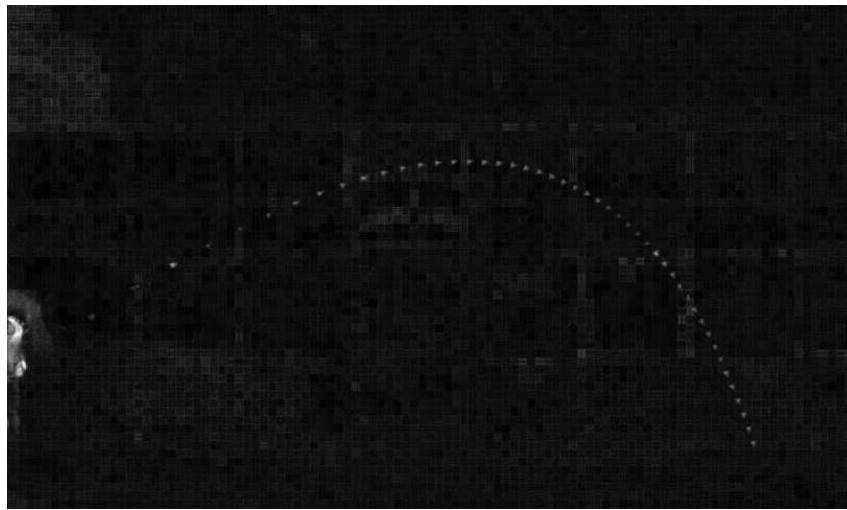
(b)

FIGURE 1.15 – Expérience n° 5 réalisée à  $\theta_0 = 65^\circ$  et  $V_0 = 13 \text{ m.s}^{-1}$  : (a) Résultats de l'analyse informatique. Le marqueur rouge indique l'impact du volant au sol, et la barre verte correspond à la vitesse terminale du volant. (b) Chronophotographie de la trajectoire du volant. Les images sont séparées de  $40 \text{ ms}$ .





(a)



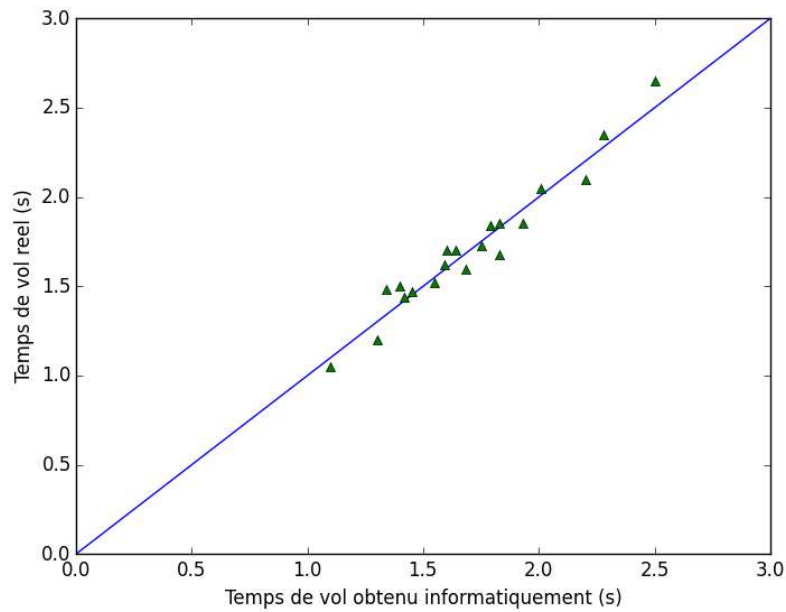
(b)

FIGURE 1.16 – Expérience  $n^{\circ} 6$  réalisée à  $\theta_0 = 30^{\circ}$  et  $V_0 = 21 \text{ m.s}^{-1}$  : (a) Résultats de l'analyse informatique. Le marqueur rouge indique l'impact du volant au sol, et la barre verte correspond à la vitesse terminale du volant. (b) Chronophotographie de la trajectoire du volant. Les images sont séparées de  $32 \text{ ms}$  .

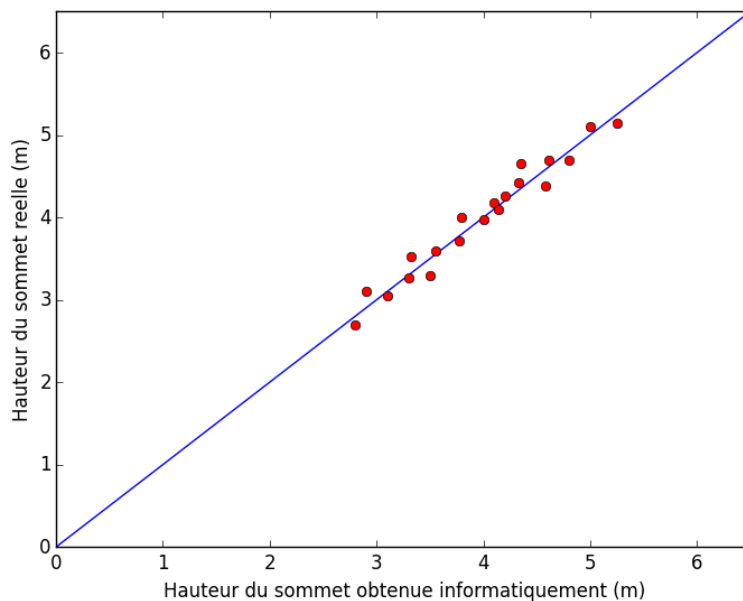
## Validation du modèle

Le choix d'une représentation chronophotographique des trajectoires des volants s'accorde avec les graphes d'évolution de leur vitesse obtenus par résolution informatique. Par ailleurs, la bonne concordance entre les trajectoires expérimentales et celles issues de l'intégration informatique tend à valider le modèle développé par ailleurs, qui considère que la trajectoire du volant est uniquement fonction du poids et de la force de traînée, mais aussi que le coefficient de traînée peut être considéré constant.

Afin de renforcer ces observations, la comparaison entre temps de vols expérimentaux et numériques ainsi qu'entre positions du sommet expérimentales et numériques est menée pour les 20 lancers. Le résultat est présenté en figure 1.17 .



(a)



(b)

FIGURE 1.17 – Comparaison numérique-expérimentale : (a) Valeurs du temps de vol relevées expérimentalement et obtenues numériquement. (b) Positions du sommet de la trajectoire relevées expérimentalement et obtenues numériquement.

L'alignement des différentes données autour d'une droite de pente unité appuie la validité du modèle physique expliquant le vol des volants. Dans la partie qui vient, nous étudions leur portée là encore sous le spectre expérimental-numérique.

### 1.3.2 Portée des volants

Dans la même optique que ce qui vient d'être fait, les portées de chacun des 2 volants ont été relevées pour chacun des 20 lancers de l'étude. Elles ont ensuite été comparées aux portées issues de la résolution informatique. Le résultat est représenté ci-dessous.

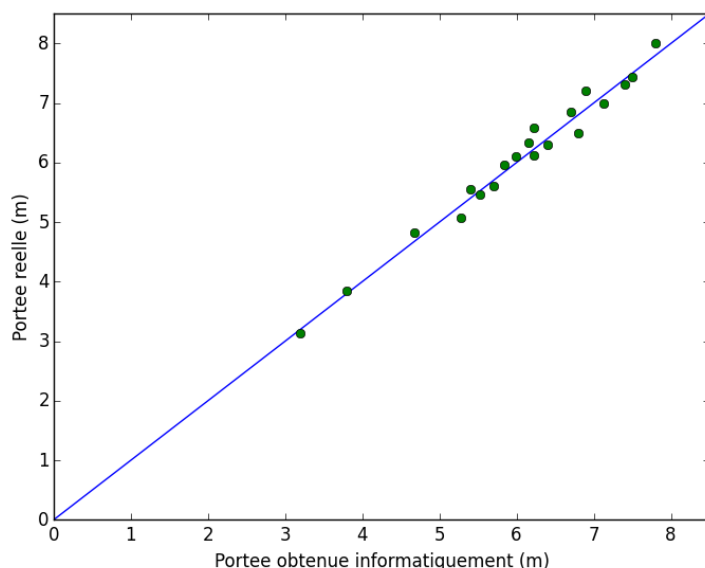


FIGURE 1.18 – Valeurs de la portée relevées expérimentalement et obtenues numériquement.

Il convient également d'étudier la validité de l'expression théorique de la portée (1.15) afin de valider l'étude globale.

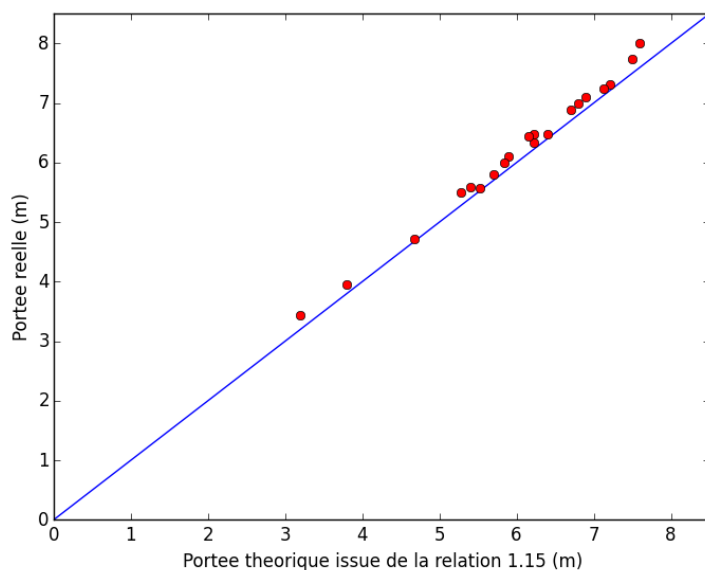


FIGURE 1.19 – Valeurs de la portée relevées expérimentalement et évaluées théoriquement par la relation (1.15).

Les données s'alignent autour de la première bissectrice. Notons tout de même que les valeurs obtenues par (1.15) sont systématiquement inférieures aux valeurs expérimentales. Ceci tient à l'approximation  $x_0 \approx s_{-\theta_0} \cos \theta_0$ , d'autant plus grossière que la vitesse initiale est grande devant celle terminale. Au final, cette expression est satisfaisante et permet de décrire convenablement la dynamique du volant.

### 1.3.3 Différences entre les volants en plume et en plastique

En compétition internationale comme aux Jeux Olympiques, le type de volant sélectionné est presque toujours le volant en plume. Ceci conduit à s'interroger sur les différences de performances expliquant ce choix.

En premier lieu, les expériences menées précédemment ont montré qu'en moyenne, la portée du volant en plastique est supérieure d'environ 10% à celle du volant en plume. Cette comparaison est valable lorsque les conditions initiales de tir sont sensiblement identiques, comme c'est le cas pour les expériences  $n^\circ 1$  et 4 (figures 1.11 et 1.14).

De plus, la modélisation informatique étant désormais validée, le tracé de trajectoires pour chaque volant est menée pour un coup typique de dégagé du fond du court, sous les mêmes conditions initiales. Le tracé est présenté à la figure suivante.

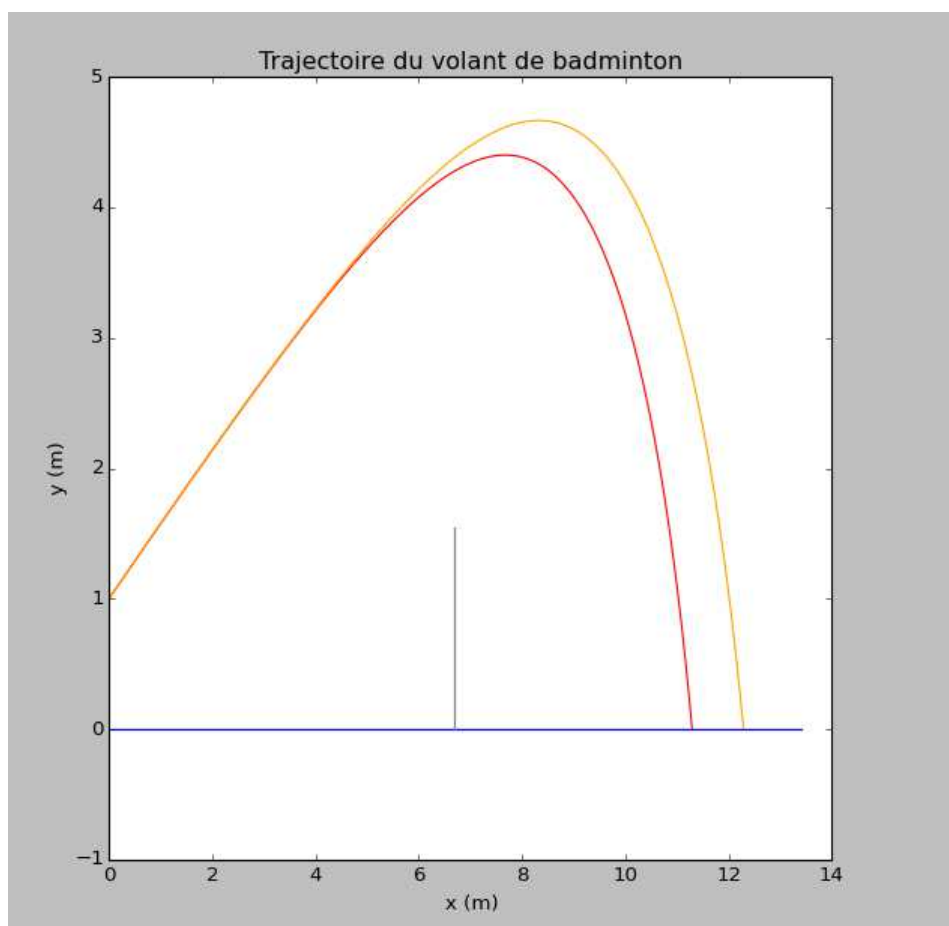


FIGURE 1.20 – Trajectoires tracées numériquement du volant en plume et en plastique. La trajectoire rouge est celle du volant en plume, la trajectoire en orange est celle du volant en plastique. L'angle de tir vaut  $\theta_0 = 30^\circ$  et la vitesse de frappe est de  $V_0 = 50 \text{ m.s}^{-1}$ .

On constate bien une différence de portée de l'ordre du mètre, pour une distance horizontale parcourue supérieure à 10 mètres. À ce niveau, la différence est conséquente. Par ailleurs, la position du sommet est également à distinguer selon le volant.

Toutes ces observations sont en accord avec le ressenti du badiste selon lequel le volant en plume a une trajectoire plus « piquée » que celui en plastique. En conséquence, le volant en plume est plus difficile à sortir des limites du terrain, ce qui permet d'optimiser, à position sur le terrain donnée, les vitesses de frappe « autorisées » pour ne pas envoyer le volant hors des limites du terrain.

Cela s'explique - nous l'avons vu - par un coefficient de traînée plus faible dans le cas du volant en plastique, ce qui implique qu'il subit moins la résistance de l'air. Mais cette différence de coefficients de traînée ne saurait expliquer à elle seule les écarts de portée. En effet, la différence entre les longueurs aérodynamiques  $L_{plu}$  et  $L_{pla}$  provient en majeure partie de la différence entre les masses des volants. En effet, l'augmentation du poids réduit relativement l'effet de la traînée et tend à rapprocher le volant vers sa limite gravitaire. Le poids plus élevé du volant en plastique n'est toutefois pas spécifique aux volants considérés dans cette expérience. Ceux en plastique sont systématiquement plus lourds que leurs homologues en plume. Ceci provient du fait qu'il n'existe pas encore de matériaux plastique aussi rigides et légers que la plume. De plus, le calcul de la masse que devrait avoir le volant en plastique pour avoir la même portée que celui en plume conduit à environ 3 grammes, soit bien en-dessous de la fourchette autorisée par les règlements internationaux en vigueur.

Au global, la comparaison menée entre les volants en plume et en plastique corrobore la forte influence des caractéristiques du projectile sur sa trajectoire. Ceci explique la sensibilité des joueurs au modèle de volant utilisé dans le jeu, et permet d'en optimiser les différents coups.



## Partie 2

# Comportement du volant après impact avec la raquette

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Dynamique de retournement . . . . .</b>	<b>31</b>
2.1.1	Position du modèle . . . . .	31
2.1.2	Mise en équation . . . . .	32
<b>2.2</b>	<b>Étude expérimentale et numérique . . . . .</b>	<b>33</b>
2.2.1	Observations expérimentales . . . . .	33
2.2.2	Résolution numérique . . . . .	37
2.2.3	Validation du modèle . . . . .	39
<b>2.3</b>	<b>Sur la forme du volant . . . . .</b>	<b>40</b>
2.3.1	Approche expérimentale . . . . .	40
2.3.2	Analyse des résultats . . . . .	41

---

## En avant de volant

La dynamique complexe du volant ne se résume pas à sa seule trajectoire en vol. Les suivis chronophotographiques réalisés dans le cadre de la partie 1 l'illustrent bien : si les volants sont frappés sur le bouchon, ils terminent leur trajectoire tête en avant. C'est donc bien qu'ils traversent une phase au début du vol durant laquelle ils changent de direction ou, dirons-nous plus simplement, durant laquelle ils se retournent.

En match, les joueurs ont donc grand intérêt à comprendre ce comportement très versatile mais en même temps si rapide. La photographie qui suit souligne d'ailleurs ce double effet.



FIGURE 2.1 – Le joueur chinois Lin Dan renvoyant un coup du danois Viktor Axelsen lors du tournoi olympique de Rio, 2016.

S'il peut sembler de prime abord que la raquette du double champion olympique ait frappé la jupe, il n'en est rien ! Ce cliché, pris moins d'une seconde après l'impact, montre un volant déjà retourné et prêt à voler vers la moitié adverse. Ceci permet de se faire une première idée des durées relativement courtes dont il est question. Dans la suite, nous analysons et construisons un modèle permettant d'étudier cette dynamique de retournement.

## 2.1 Dynamique de retournement

### 2.1.1 Position du modèle

Il convient, pour comprendre la dynamique du retournement, d'étudier les forces qui s'appliquent au volant - c'est l'objet de la première partie de ce travail - ainsi que leurs points d'application. Comme nous l'avons vu, les actions exercées par l'air sur le projectile se regroupent en une unique résultante aérodynamique de type traînée, conformément à la relation (1.3). Le point d'application de cette force est le point pour lequel le moment des forces de pression est nul : nous l'appellerons centre aérodynamique du volant. Dans cette étude, nous considérons que le centre aérodynamique est confondu avec le barycentre du volant.



Ce qui confère au problème toute sa singularité est que le centre aérodynamique et le centre de gravité du volant, point d'application de  $\vec{P}$ , sont distincts. Cela s'explique par une répartition inhomogène de la masse du volant, avec un bouchon plus massif que la jupe. En conséquence, la force de traînée exerce un couple sur le volant. Son effet sur cet objet est représenté à la figure 2.2 .

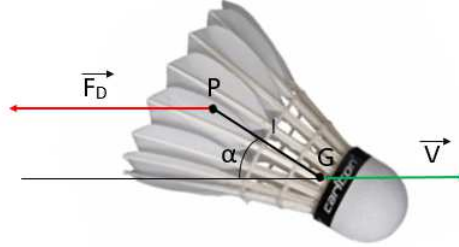


FIGURE 2.2 – Application de la force de traînée sur le volant lorsque son axe fait un angle  $\alpha$  avec la direction de sa vitesse  $\vec{V}$ . Le point P est le centre aérodynamique du volant, et G son centre de gravité. Ils sont séparés d'une distance  $l$  .

Le couple exercé par  $\vec{F}_D$  tend à aligner l'axe du volant avec la direction de sa vitesse et le bouchon en avant (cet équilibre correspond à  $\alpha = 0$ ). La position inversée du volant ( $\alpha = 180^\circ$ ) correspond à un équilibre instable jamais maintenu dans la pratique.

Par suite, puisque c'est la non-coïncidence entre P et G qui est à l'origine du comportement complexe du volant, nous modélisons ce dernier par deux sphères afin de réduire ses caractéristiques à l'essentiel. La première possède une section  $S$  et une masse  $M_J$  qui correspondent à celles de la jupe. La seconde sphère modélise le bouchon et possède une section  $s$  et une masse  $M_B$ . Les volants sont par ailleurs tous construits tel que  $s < S$  et  $M_J < M_B$ , de sorte que l'on ait un bouchon massif et une jupe subissant la traînée. La figure 2.3 présente finalement ce modèle.

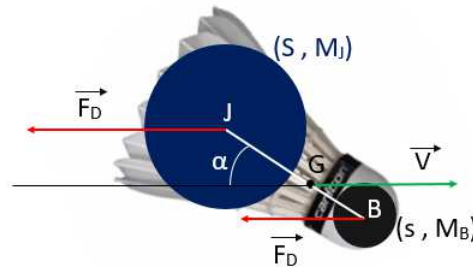


FIGURE 2.3 – Modèle d'étude du volant. Le point J est le centre de la sphère modélisant la jupe, le point B le centre de la jupe modélisant le bouchon.

Ayant désormais notre modèle de base, il convient de mettre en équation l'évolution de l'angle  $\alpha$  caractéristique du volant. C'est l'objet de la partie qui vient.

### 2.1.2 Mise en équation

On reprend la représentation proposée par la figure 2.3 . On considère deux bases mobiles de coordonnées cylindriques : la base  $(\vec{e}_{GJ}, \vec{e}_\alpha, \vec{e}_z)$  liée au point J et la base  $(\vec{e}_{GB}, \vec{e}_\alpha, \vec{e}_z)$  liée au point B. La relation de changement de point (passage par G) permet d'exprimer les vitesses des points B et J dans leurs bases respectives :

$$\vec{V}_J = -V \cos \alpha \vec{e}_{GJ} + (V \sin \alpha + l_{GJ}\dot{\alpha}) \vec{e}_\alpha \quad (2.1)$$

$$\vec{V}_B = V \cos \alpha \vec{e}_{GB} + (-V \sin \alpha + l_{GB}\dot{\alpha}) \vec{e}_\alpha \quad (2.2)$$

Par suite, l'application du théorème du moment cinétique au système de points représenté par (B,J) par rapport au centre de gravité G aboutit à l'équation suivante :

$$(M_J l_{GJ}^2 + M_B l_{GB}^2) \ddot{\alpha} \vec{e}_z = \vec{GJ} \wedge \left( -\frac{1}{2} \rho S C_D V_J \vec{V}_J \right) + \vec{GB} \wedge \left( -\frac{1}{2} \rho s C_D V_B \vec{V}_B \right) \quad (2.3)$$

où le terme  $M_J l_{GJ}^2 + M_B l_{GB}^2$  est le moment d'inertie du volant selon  $\vec{e}_z$ . Les produits vectoriels donnent  $\vec{GJ} \wedge \vec{V}_J = l_{GJ} (V \sin \alpha + l_{GJ} \dot{\alpha}) \vec{e}_z$  et  $\vec{GB} \wedge \vec{V}_B = l_{GB} (-V \sin \alpha + l_{GB} \dot{\alpha}) \vec{e}_z$ . Ainsi, l'équation (2.3) se réécrit sous la forme :

$$(M_J l_{GJ}^2 + M_B l_{GB}^2) \ddot{\alpha} = -\frac{1}{2} \rho S C_D V_J (V \sin \alpha + l_{GJ} \dot{\alpha}) l_{GJ} - \frac{1}{2} \rho s C_D V_B (-V \sin \alpha + l_{GB} \dot{\alpha}) l_{GB} \quad (2.4)$$

Par ailleurs, lorsque  $l_{GJ} \dot{\alpha} \ll V$ , il vient  $V_J \simeq V_B \simeq V$ . Ainsi :

$$(M_J l_{GJ}^2 + M_B l_{GB}^2) \ddot{\alpha} + \frac{\rho C_D}{2} (S l_{GJ}^2 + s l_{GB}^2) V \dot{\alpha} + \frac{\rho C_D}{2} (S l_{GJ} - s l_{GB}) V^2 \sin \alpha = 0 \quad (2.5)$$

Rappelons que le point G est le centre de gravité des 2 sphères de la figure 2.3 . D'où la relation intrinsèque  $M_J l_{GJ} = M_B l_{GB}$ . En insérant cette relation dans (2.5), il résulte :

$$\ddot{\alpha} + \frac{\rho C_D}{2} \frac{S \frac{M_B}{M_J} + s \frac{M_J}{M_B}}{M_J + M_B} V \dot{\alpha} + \frac{\rho C_D}{2} \frac{S M_B - s M_J}{M_B (M_J + M_B) l_{GB}} V^2 \sin \alpha = 0 \quad (2.6)$$

Finalement, dans la limite où  $S M_B \gg s M_J$ , la dynamique de l'angle  $\alpha$  est régie par l'équation suivante :

$$\ddot{\alpha} + \underbrace{\frac{\rho S C_D V}{2 M_J (1 + M_J / M_B)}}_{\text{Terme d'amortissement}} \dot{\alpha} + \underbrace{\frac{\rho S C_D V^2}{2 M l_{GB}}}_{\text{pulsation } \omega_0^2} \sin \alpha = 0 \quad (2.7)$$

où  $M = M_J + M_B$ . Cette équation du second ordre est non linéaire et donne lieu à des oscillations amorties.

Dans la suite nous étudions la validité de cette modélisation. Nous adoptons, à l'instar de notre démarche dans le cadre de la partie 1, une approche expérimentale et numérique afin d'étudier les différents paramètres caractéristiques de la dynamique du retournement.

## 2.2 Étude expérimentale et numérique

### 2.2.1 Observations expérimentales

Dans cette partie, on analyse le comportement de volants dans leur phase de retournement. Les expériences qui vont suivre ont été réalisées - une fois n'est pas coutume ! - dans les locaux du Laboratoire d'Hydrodynamique de l'école Polytechnique (LadHyx). Pour deux volants de badminton - l'un en plume, l'autre en plastique - on a réalisé une série de 10 coups. Ces coups ont ensuite été analysés à l'aide du logiciel de traitement

d'images *ImageJ*. L'acquisition des images a été réalisée par une caméra rapide PHOTRON à une fréquence d'acquisition de 1000 images par seconde afin de capturer cette très rapide dynamique. Les photographies du dispositif sont rappelées à la figure 1.10 . Les caractéristiques des projectiles sont celles décrites au bas de la page 17 du présent rapport. Pour le volant en plume, on a  $M_{Bplu} = 2,94\text{ g}$  et  $M_{Jplu} = 1,86\text{ g}$ . Pour le volant en plastique,  $M_{Bpla} = 3,0\text{ g}$  et  $M_{Jpla} = 2,1\text{ g}$ . Par ailleurs, les travaux de A.J Cooke conduisent à la valeur  $l_{GB} = 1,0\text{ cm}$ .

### Approche chronophotographique

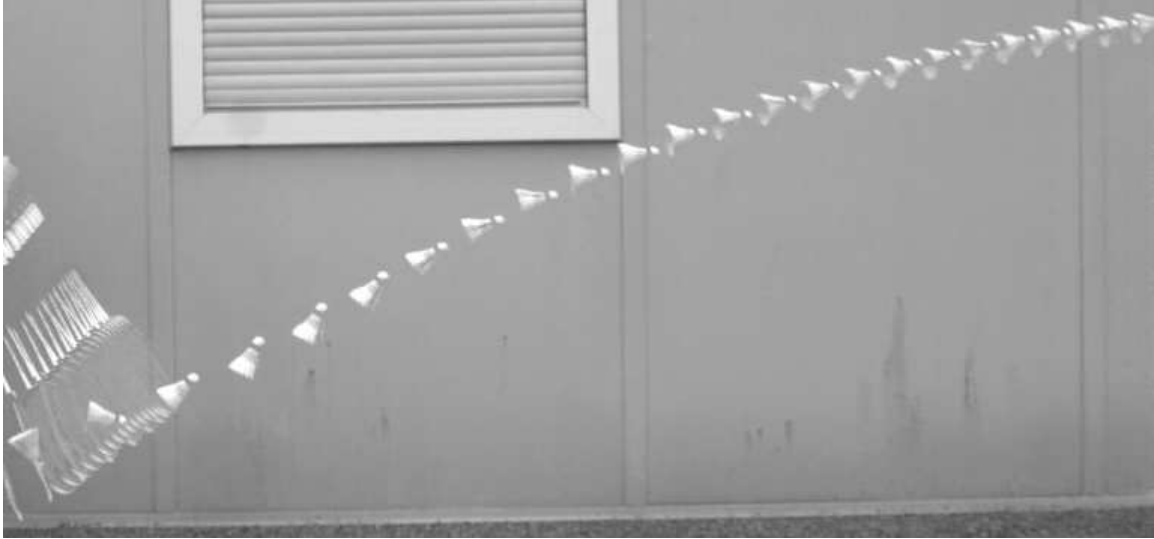


FIGURE 2.4 – Expérience n°1 : Volant en plume frappé à  $V_0 = 13\text{ m.s}^{-1}$  et  $\dot{\alpha}_0 = 71,4\text{ rad.s}^{-1}$ . Les images sont séparées de 15 ms.

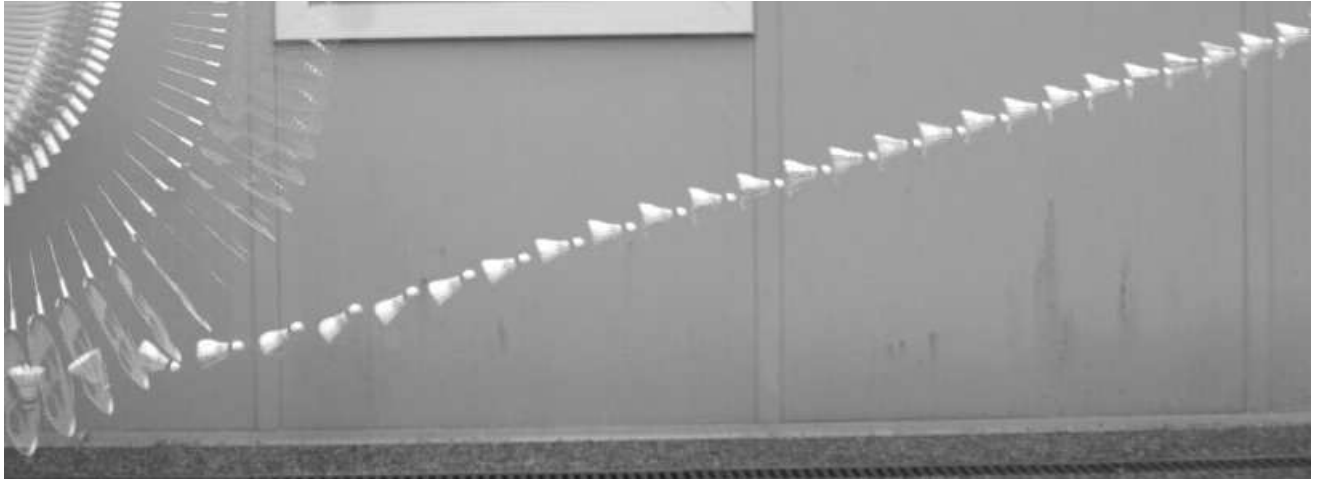


FIGURE 2.5 – Expérience n°2 : Volant en plume frappé à  $V_0 = 31\text{ m.s}^{-1}$  et  $\dot{\alpha}_0 = 150\text{ rad.s}^{-1}$ . Les images sont séparées de 5 ms.



FIGURE 2.6 – Expérience n°3 : Volant en plastique frappé à  $V_0 = 10,1 \text{ m.s}^{-1}$  et  $\dot{\alpha}_0 = 26,3 \text{ rad.s}^{-1}$ . Les images sont séparées de 15 ms.

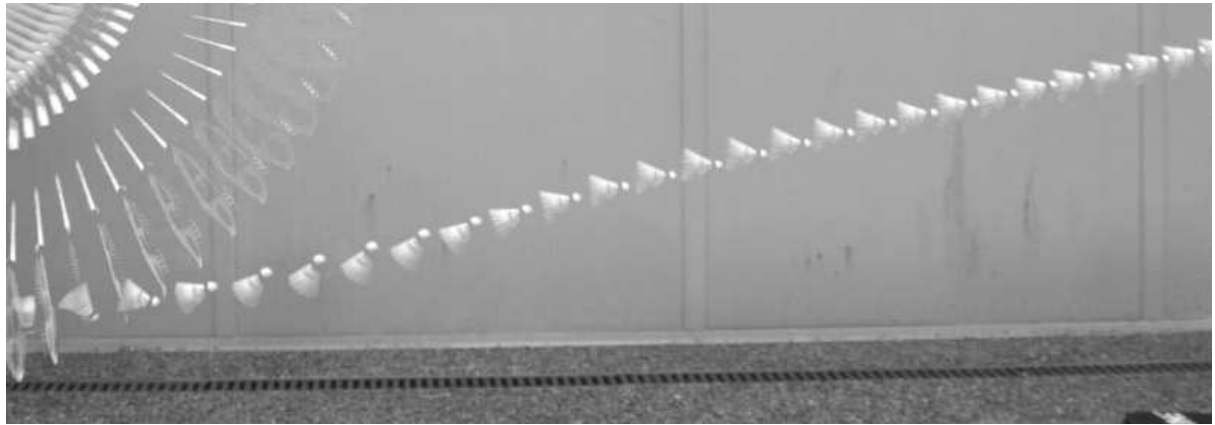


FIGURE 2.7 – Expérience n°4 : Volant en plastique frappé à  $V_0 = 29 \text{ m.s}^{-1}$  et  $\dot{\alpha}_0 = 144,5 \text{ rad.s}^{-1}$ . Les images sont séparées de 5 ms.

Ces chronophotographies explicitent le comportement d'un volant après qu'il ai quitté la raquette. On observe que, suite au retournement du volant (passage de  $180^\circ$  à  $0^\circ$ ), sa direction oscille autour de celle de sa vitesse  $V$ . Ces oscillations s'amortissent et le volant finit par s'aligner avec la direction de sa vitesse, le bouchon en avant. De plus, dans les 20 coups effectués, le volant n'effectue jamais un tour complet. Les figures précédentes soulignent aussi que, lorsque l'intensité de la frappe du volant est moins importante, sa dynamique est plus lente. Les séquences vidéo réalisées permettent de mesurer l'angle  $\alpha$  entre l'axe du volant et la direction de sa vitesse au cours du temps.

### Évolution expérimentale de l'angle $\alpha$

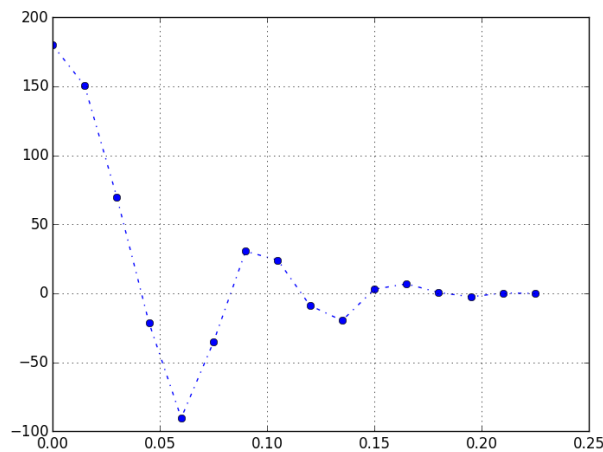


FIGURE 2.8 – Évolution de l'angle  $\alpha$  (en  $^\circ$ ) de l'expérience n°1 en fonction du temps (s).

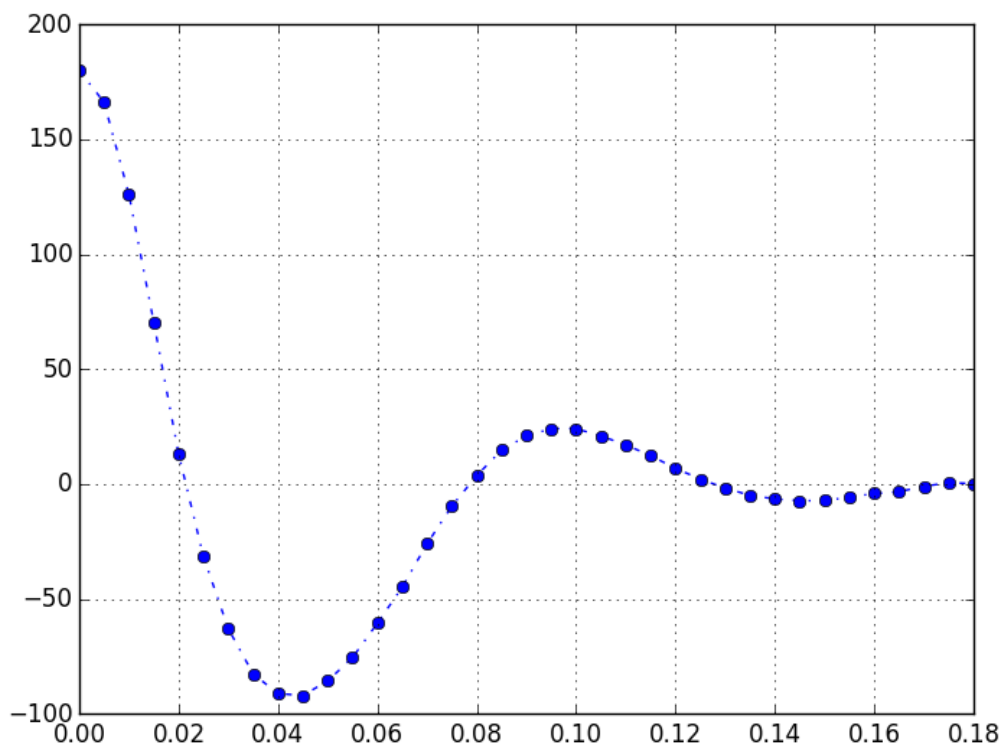


FIGURE 2.9 – Évolution de l'angle  $\alpha$  (en °) de l'expérience n°2 en fonction du temps (s).

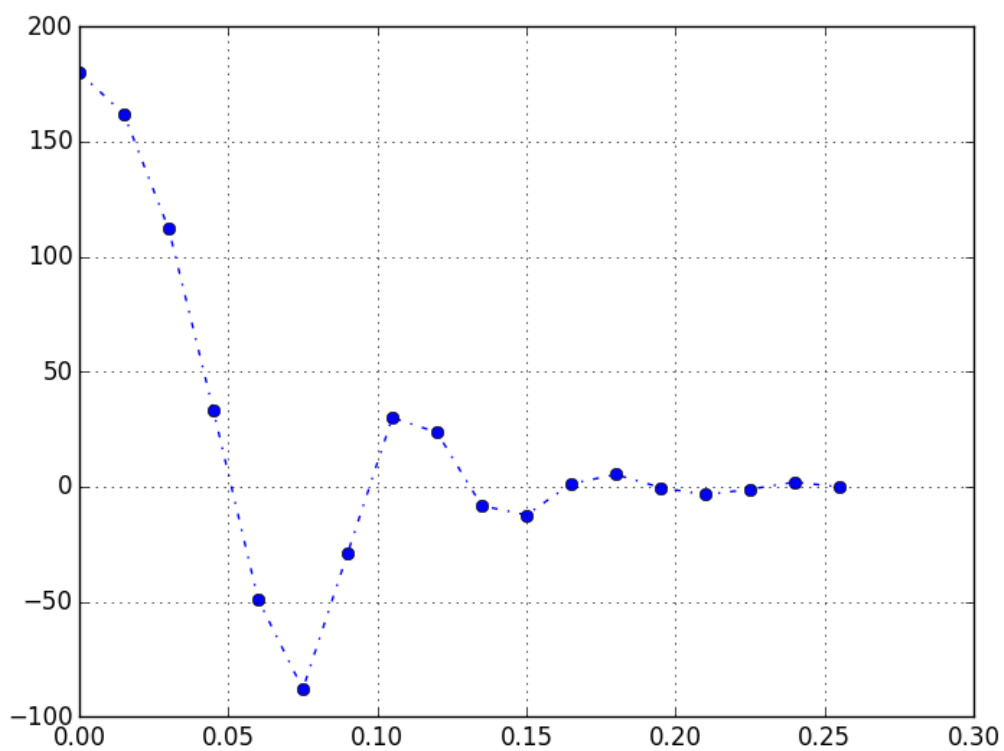


FIGURE 2.10 – Évolution de l'angle  $\alpha$  (en °) de l'expérience n°3 en fonction du temps (s).

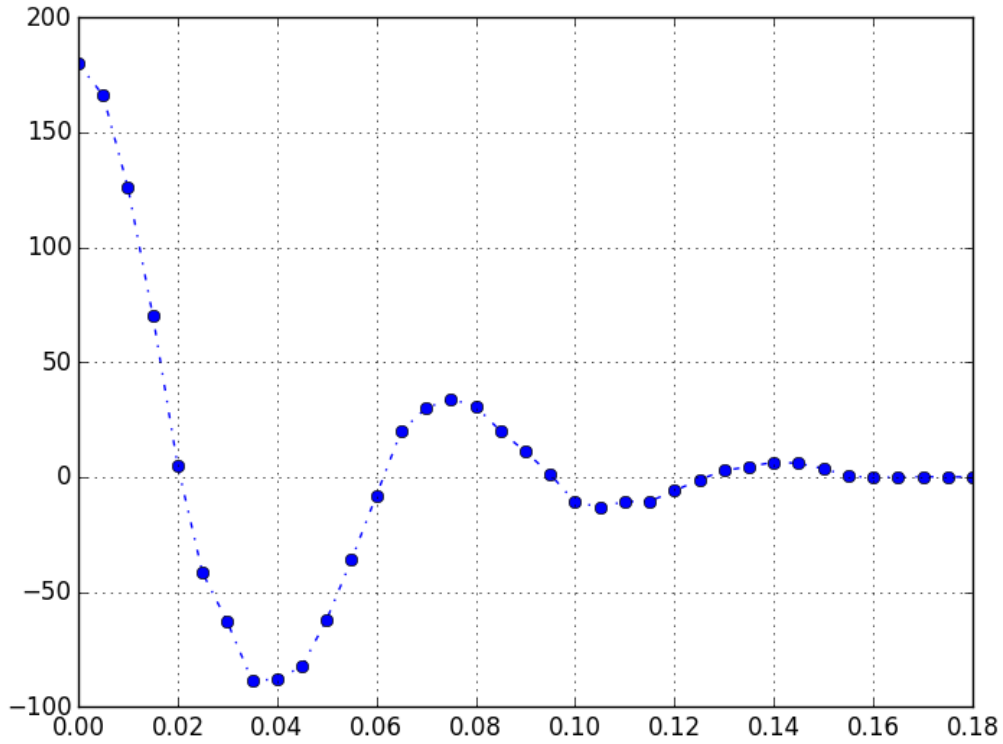


FIGURE 2.11 – Évolution de l'angle  $\alpha$  (en  $^\circ$ ) de l'expérience n°4 en fonction du temps (s).

Les variations de l'angle  $\alpha$  dans nos expériences mettent en évidence plusieurs temps caractéristiques. En premier lieu le temps de retournement  $\tau_{ret}$  nécessaire pour passer de  $180^\circ$  à  $0^\circ$ . Puis vient le temps d'oscillation  $\tau_{osc}$ , qui correspond à la pseudo-période des oscillations du volant. Enfin, le temps de stabilisation  $\tau_{stab}$  qui est le temps d'amortissement de ces oscillations.

Afin d'étudier la validité de notre modélisation en ce qui concerne ces temps caractéristiques et la forme de la courbe d'évolution de  $\alpha$ , une étude numérique de la dynamique de retournement est menée.

### 2.2.2 Résolution numérique

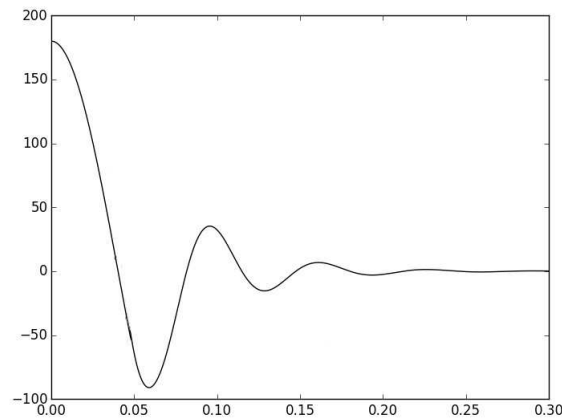


FIGURE 2.12 – Évolution de l'angle  $\alpha$  (en  $^\circ$ ) de l'expérience n°1 en fonction du temps (s) obtenue par intégration informatique de la relation (2.7) .

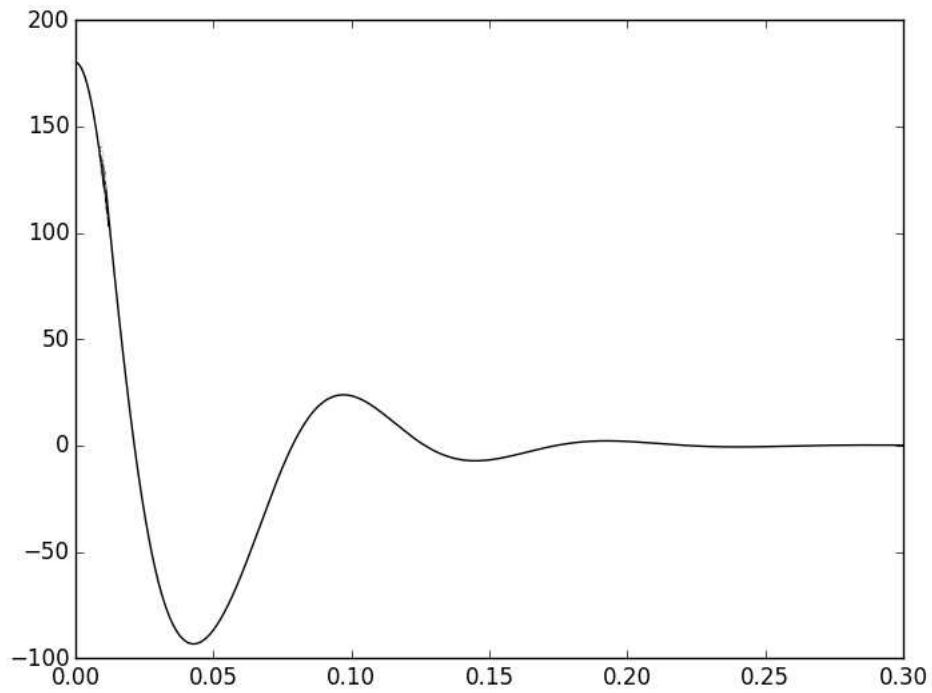


FIGURE 2.13 – Évolution de l'angle  $\alpha$  (en °) de l'expérience n°2 en fonction du temps (s) obtenue par intégration informatique de la relation (2.7) .

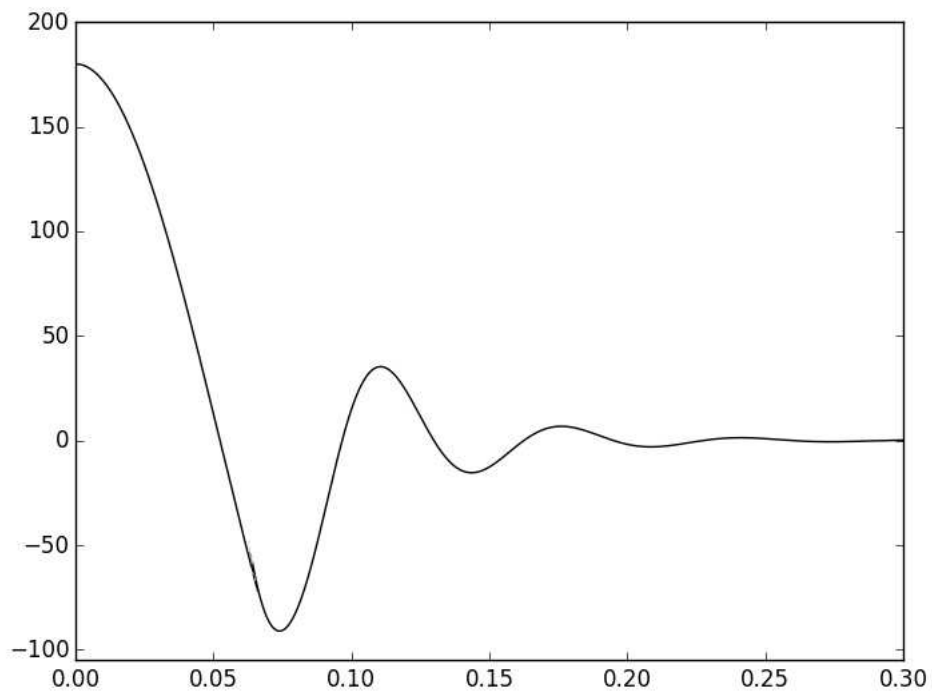


FIGURE 2.14 – Évolution de l'angle  $\alpha$  (en °) de l'expérience n°3 en fonction du temps (s) obtenue par intégration informatique de la relation (2.7) .

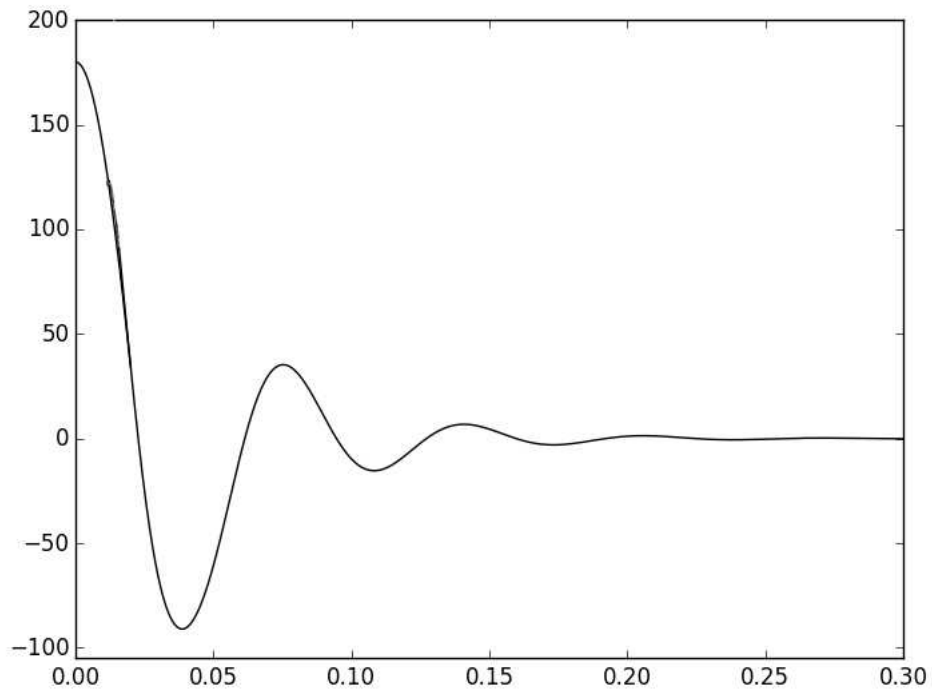


FIGURE 2.15 – Évolution de l'angle  $\alpha$  (en  $^\circ$ ) de l'expérience n°4 en fonction du temps (s) obtenue par intégration informatique de la relation (2.7) .

### 2.2.3 Validation du modèle

La bonne concordance entre les variations expérimentales et celles issues de l'intégration informatique tend à valider le modèle développé par ailleurs. Afin de renforcer ces observations, la comparaison entre temps caractéristiques expérimentaux et numériques est menée pour les 20 lancers. Les résultats sont présentés dans la suite.

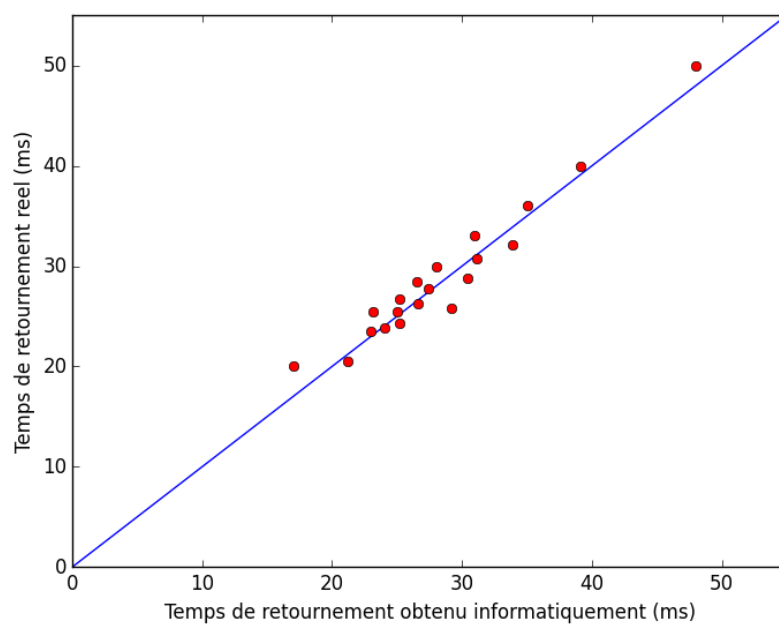


FIGURE 2.16 – Valeurs du temps de retournement relevées expérimentalement en fonction de celles obtenues numériquement.



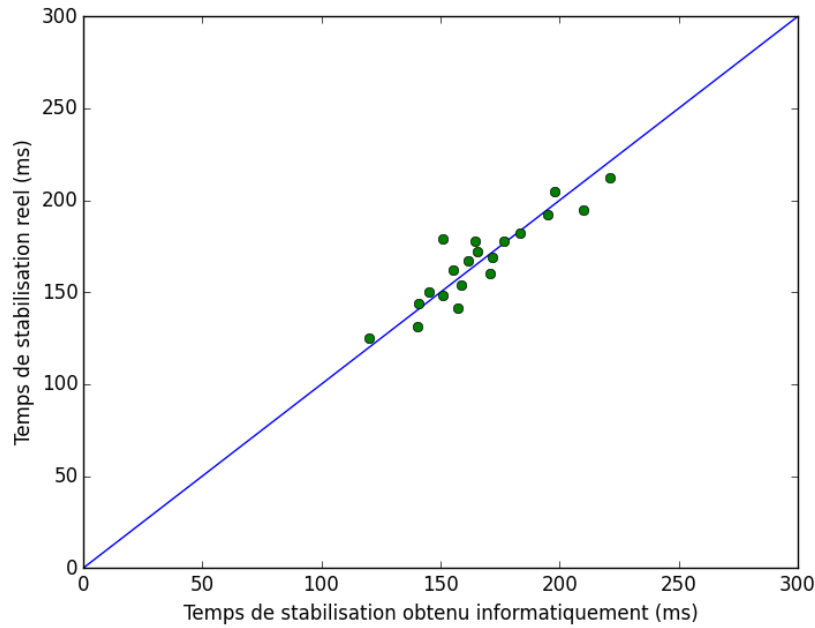


FIGURE 2.17 – Valeurs du temps de stabilisation relevées expérimentalement en fonction de celles obtenues numériquement.

Les figures précédentes montrent que les valeurs s’alignent autour d’une droite de pente unité, et ce pour chaque temps caractéristique étudié. Au global, le modèle développé par ailleurs capture raisonnablement la dynamique de retournement du volant après coup de raquette.

## 2.3 Sur la forme du volant

### 2.3.1 Approche expérimentale

La question que nous adressons ici est : Comment les caractéristiques physiques des volants influencent-elles la dynamique de retournement ? Afin de répondre à cette question, on a construit une série de volants modèles constitués d’une bille dense en acier (bouchon) et d’une fine jupe en plastique. Ainsi, on peut facilement faire varier les propriétés des volants : longueur, diamètre, masse et angle d’ouverture. Une photographie de ces modèles de volant est présentée à la figure 2.18 .



FIGURE 2.18 – Modèles de volant construits avec des billes d’acier et des jupes en plastique. Les objets sont d’ouvertures angulaires différentes.

Pour chaque modèle, les temps caractéristiques de retournement et de stabilisation ont été évalués. Cette dynamique est observée en lâchant les objets à l'envers dans une colonne de 1,2 litre d'eau. L'acquisition des images est réalisée par une caméra CASIO réglée à une fréquence de 600 images par seconde. Le traitement des films obtenus est lui réalisé à l'aide du logiciel *ImageJ*.

Les différents modèles sont lâchés sans vitesse initiale et ont tous la masse  $M = 3,1\text{ g}$ . Ce dispositif expérimental global permet de réduire l'échelle de longueur et d'agrandir celle de temps. Bien que le nombre de Reynolds associé à l'écoulement de l'eau autour du volant soit inférieur à celui correspondant à un écoulement d'air, dans tous les lâchers les écoulements se produisent dans la limite des grands nombres de Reynolds ( $Re > 10^3$ ), où les effets du fluide sont décrits par les mêmes lois. Ainsi les phénomènes observés dans le cadre de cette manipulation sont équivalents à ceux observés lors d'un vol dans de l'air.

### 2.3.2 Analyse des résultats

Dans la suite on présente les résultats et interprétations issues de l'expérience présentée à la section précédente. En particulier, la figure 2.19 montre une chronophotographie d'un volant modèle se retournant dans la colonne d'eau.



FIGURE 2.19 – Chronophotographie d'un volant modèle lâché à l'envers en haut de la colonne d'eau. Les images sont séparées de 150 ms.

Ces expériences permettent de déterminer les temps de retournement et de stabilisation pour les différents modèles de volant. Ainsi, il est possible d'observer l'évolution de ces grandeurs en fonction des propriétés physiques des projectiles lâchés. Par exemple, nous pouvons nous demander pourquoi tous les volants - qu'il s'agisse des volants utilisés en compétition ou de ceux vendus dans le commerce - présentent la même ouverture angulaire, alors même que cette propriété n'est pas spécifiée par les règlements officiels. Afin de répondre à la question de l'influence de l'angle d'ouverture sur le retournement, c'est ce paramètre qui est modifié d'un prototype à l'autre. Les variations des temps de retournement et de stabilisation avec l'angle d'ouverture sont présentées dans la suite.

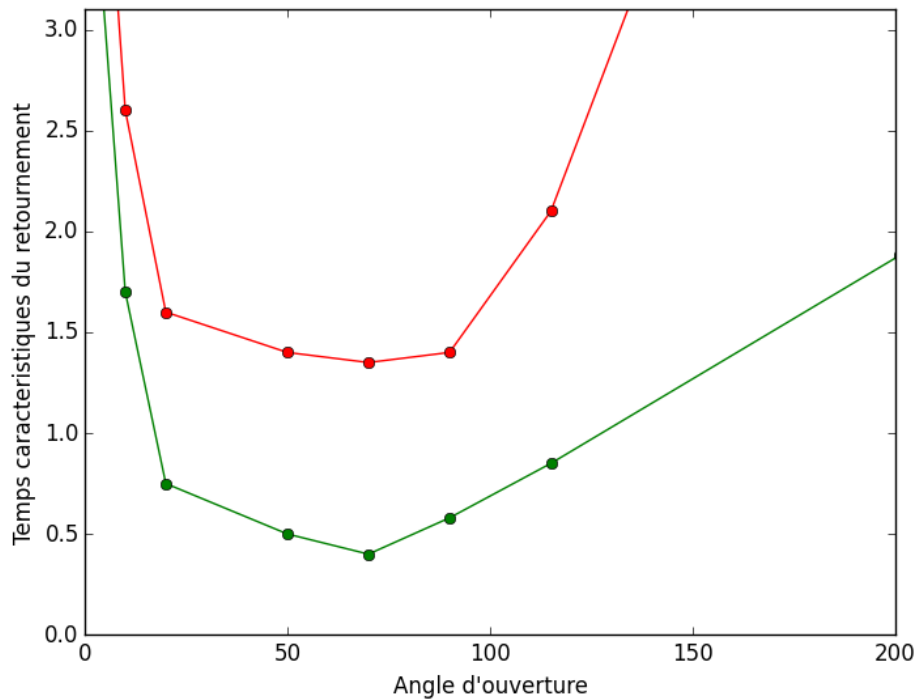


FIGURE 2.20 – Évolution des temps caractéristiques (en s) des modèles de volant en fonction de leur angle d'ouverture (en °). Les variations rouges sont celles du temps de stabilisation, les variations vertes sont celles du temps de retournement.

Cette courbe montre une évolution non monotone des quantités mises en jeu. On remarque l'existence d'un minimum pour des angles d'ouverture compris entre  $45^\circ$  et  $70^\circ$ . Ceci corrobore les angles d'ouverture des modèles commerciaux, de l'ordre de  $50^\circ$ . Cette étude montre donc qu'il est possible d'optimiser les paramètres physiques du volant afin de ralentir sa dynamique de retournement.

En effet, pour les faibles angles d'ouverture, le volant est allongé et la jupe possède un grand moment d'inertie. Pour cette raison il est difficile de le mettre en mouvement. Ceci explique que les différents temps caractéristiques soient importants dans cette limite. À l'inverse, pour les grands angles d'ouverture, le volant est plus court. Son moment d'inertie est donc relativement faible et, par conséquent, le couple imposé par la résultante aérodynamique est faible. Dans cette limite, le retournement du volant est également lent. Notre étude établit que, entre ces deux régimes, il existe une région optimale d'angle pour laquelle le retournement du volant est le plus rapide. Il semble que, pour les volants de badminton actuellement utilisés dans le jeu, cet angle prend une valeur qui minimise les temps caractéristiques de la phase de retournement.



# Partie 3

## Influence des caractéristiques du volant et conditions initiales sur le jeu

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Stratégie du service</b>	<b>45</b>
3.1.1	Cadre du travail	45
3.1.2	Le service long	46
3.1.3	Le service court	49
<b>3.2</b>	<b>Influence de la dynamique de retournement</b>	<b>51</b>
3.2.1	Étude expérimentale	51
3.2.2	Classification des coups	52
<b>3.3</b>	<b>Smashes et kill shots</b>	<b>53</b>
3.3.1	Étude expérimentale et numérique	53
3.3.2	Zone de réalisation de smashes	54

---

## Dans l'histoire

9 août 2013. Quart de finale des championnats du monde de badminton à Guangzhou, Chine. Le danois Jan Jorgensen et le vietnamien Tien Minh Nguyen réalisent le point le plus exceptionnel de l'histoire du jeu. Un échange d'une intensité rare durant lequel 108 coups sont réalisés pour une durée de 2 minutes, ce qui reste à ce jour la plus longue passe d'arme jamais observée !



FIGURE 3.1 – Cliché de l'échange historique Nguyen-Jorgensen. Le point est remporté par le danois à la suite d'un smash terminant hors du terrain.

Évidemment, avec un nombre si élevé de coups de raquette, le volant influence fortement le déroulé de l'échange. Les deux parties précédentes ont été consacrées au comportement particulier du volant après impact avec la raquette et lors de son vol. Dans la partie qui suit, nous tirons profit de ce travail pour en tirer des conclusions en termes de choix et de stratégies dans le cadre du match, et donc avec les contraintes que représente le court de badminton.

### 3.1 Stratégie du service

#### 3.1.1 Cadre du travail

Il existe de nombreux coups au badminton. Chacun de ces coups traduit une stratégie plutôt offensive et agressive ou défensive et prudente du joueur lors de l'échange. Tout échange, justement, débute par le service. C'est le premier coup tactique au badminton, et c'est un coup d'attaque. Pour cette raison, les joueurs doivent y attacher une grande importance lors de leur préparation. Pour notre étude, on se place dans le cas du jeu en simple (1 vs 1). Sauf mention contraire, les volants considérés seront a priori en plumes.

Afin d'allier recherche d'optimisation et compréhension physique, on se place d'un haut point de vue au sens propre. Il faut s'imaginer ce que capterait une « spider cam » positionnée au dessus du terrain. Les trajectoires sont bidimensionnelles, mais les dimensions ne sont pas les mêmes que celles de la figure 1.4 de la première partie. Comme nous l'avons vu, il est nécessaire pour caractériser la trajectoire d'introduire l'angle  $\theta$  de projection. Désormais, on introduit également un angle  $\Phi$  dit « angle de direction » et qui s'apparente en fait à l'angle homonyme d'une représentation en coordonnées sphériques. Cet angle de direction représente précisément la direction de la trajectoire dans le plan contenant le terrain de badminton. Ce paramétrage est représenté à la figure 3.2 .

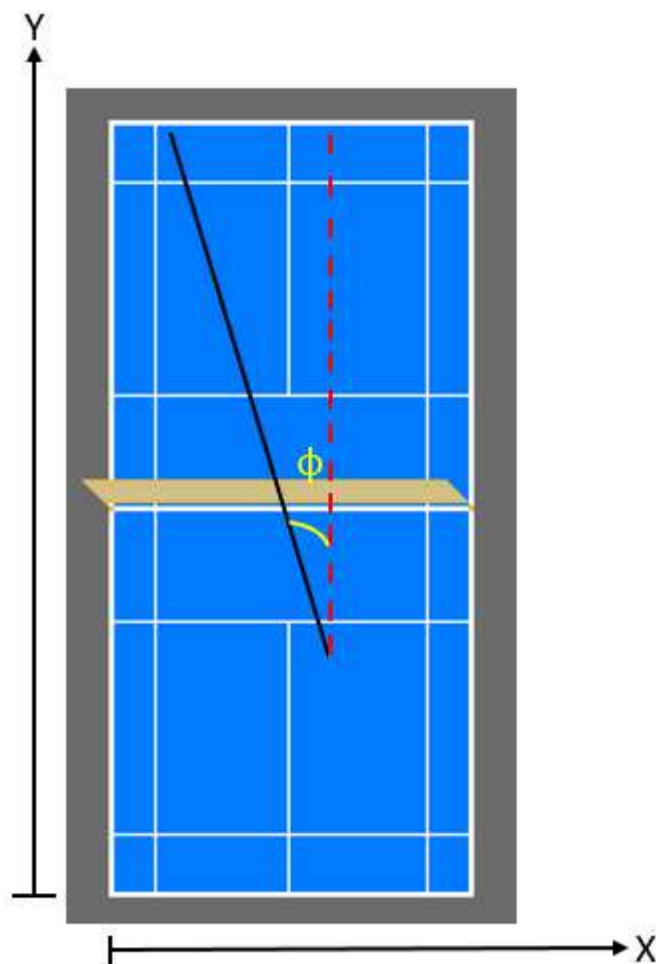


FIGURE 3.2 – Représentation d'un coup de badminton dans le plan du terrain. L'angle  $\Phi$  représente l'angle de direction du volant.

Notons que ce cadre ne se limite pas au cas du service. Il peut être étendu à n'importe quel coup joué depuis n'importe quelle position dans son camp. S'agissant du service, il en existe 2 grands types : le service long et le service court. Le service long est le service le plus classique. Il cherche à repousser l'adversaire au fond de son terrain sans pour autant lui donner l'occasion d'attaquer. Sa trajectoire permet d'envoyer le volant vers la ligne du fond de façon à ce qu'il tombe verticalement, rendant ainsi le retour de service plus délicat (le couloir du fond compte au service et en échange en simple, tandis qu'il ne compte pas au service en double). Le service court, quant à lui, doit empêcher le receveur d'attaquer et l'obliger à relever le volant, donnant ainsi au serveur l'opportunité d'attaquer. La trajectoire doit être plongeante et au ras du filet.

Le but de cette section est d'étudier, pour les 2 types de service, les zones optimums à toucher pour mettre le serveur dans de bonnes dispositions pour la suite de l'échange. On discute des paramètres de la trajectoire permettant d'optimiser cette phase de jeu, conformément au règlement officiel et en tenant compte de la position du serveur (nous supposons que le receveur est positionné de façon neutre dans sa zone).

### 3.1.2 Le service long

Pour le service long on considère deux positions typiques caractérisant le service : la position dite proche et celle dite longue. La première correspond au voisinage immédiat de la limite supérieure de service telle que décrite dans les règlements internationaux.

La seconde en est la limite inférieure. Pour simplifier l'étude, on se place également au voisinage de la limite gauche de la zone de service. Nous verrons dans la suite que toute autre position de service peut s'obtenir à partir de cette position caractéristique.

Dans tous les cas, la meilleure zone à atteindre pour mettre l'adversaire en difficulté est le carré de 72 cm de côté situé à la limite du couloir de fond réglementaire. L'angle de direction est ainsi connu pour chaque position initiale dans le court. Pour les types de position décrits plus haut, on étudie le lien entre vitesse de frappe et angle de projection. Une procédure informatique présentée dans l'annexe a permis de mettre en évidence l'évolution de la vitesse de frappe optimale en fonction de cet angle de projection. D'un mot, il s'agit, pour chaque angle de projection, de déterminer la vitesse de frappe permettant de toucher la zone optimale précédente. La figure suivante présente le résultat pour la position proche.

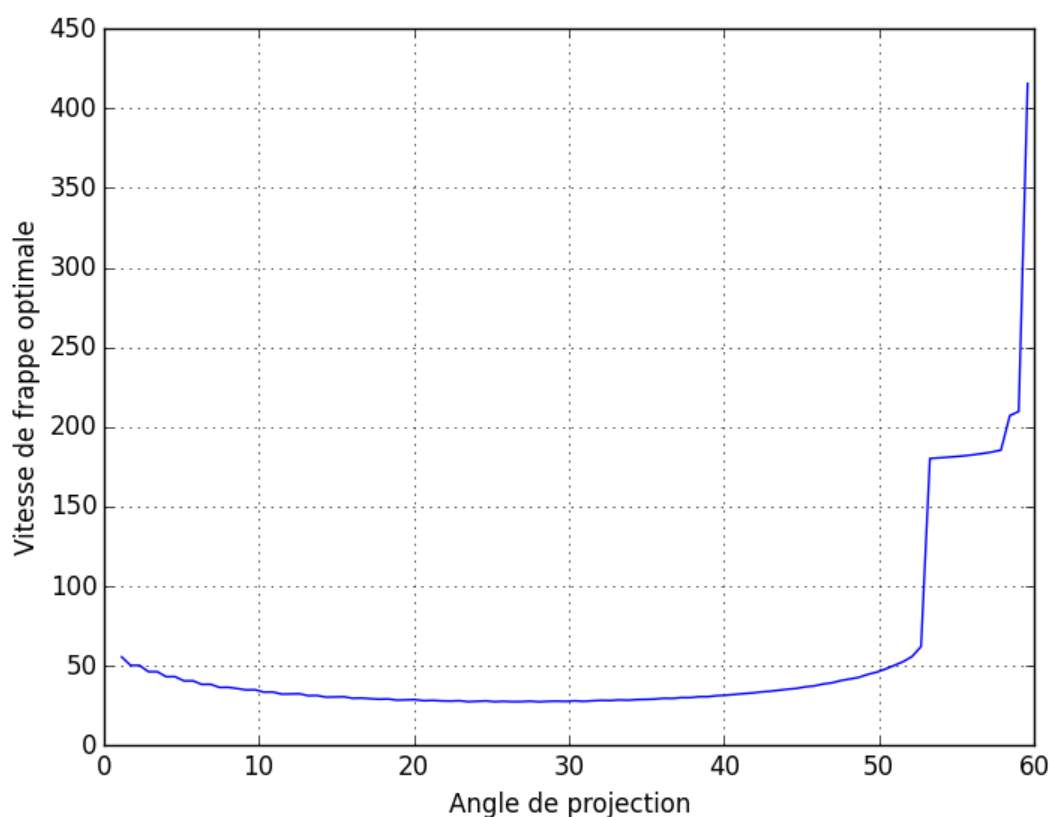


FIGURE 3.3 – Vitesse de frappe optimale (m/s) en fonction de l'angle de tir (°) pour le service long en position « proche ».

On observe des variations complexes dans la limite des grands et faibles angles de projection, avec des vitesses théoriques dépassant souvent le mur du son, et encore plus souvent la vitesse maximale jamais enregistrée de  $137 \text{ m.s}^{-1}$  qui, rappelons-le, était celle d'un smash. Les vitesses usuelles correspondent aux angles entre 10 et 50 °. En outre, pour une même vitesse initiale, il existe deux angles de frappe convenables, ce qui permet au joueur d'avoir un choix important.

Moyennant une translation verticale, on obtient la courbe correspondant à n'importe quelle position proche ou longue sur le terrain. Les vitesses optimales deviennent en effet plus ou moins importante selon la proximité du serveur avec la limite gauche de la zone de service ainsi qu'avec les limites supérieures et inférieures.



Pour représenter au mieux les coups dans le cadre du match, nous avons construit une modélisation 3D du terrain permettant d'observer les trajectoires. Un exemple de modélisation 3D du service long est présenté aux figures 3.4 et 3.5 .

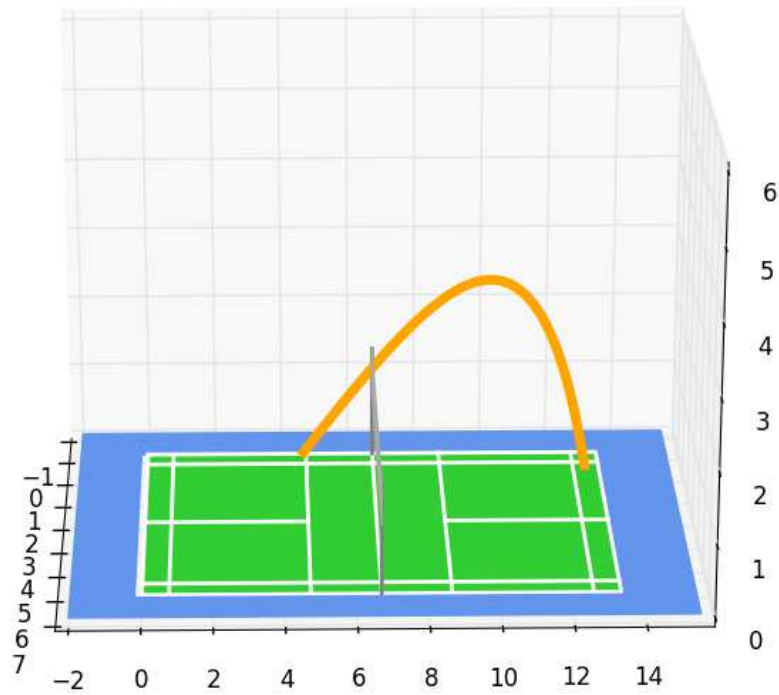


FIGURE 3.4 – Modèle de service long optimal en position « proche ». La vitesse initiale est de  $V_0 = 27 \text{ m.s}^{-1}$  et l'angle de tir vaut  $\theta_0 = 27.3^\circ$ .

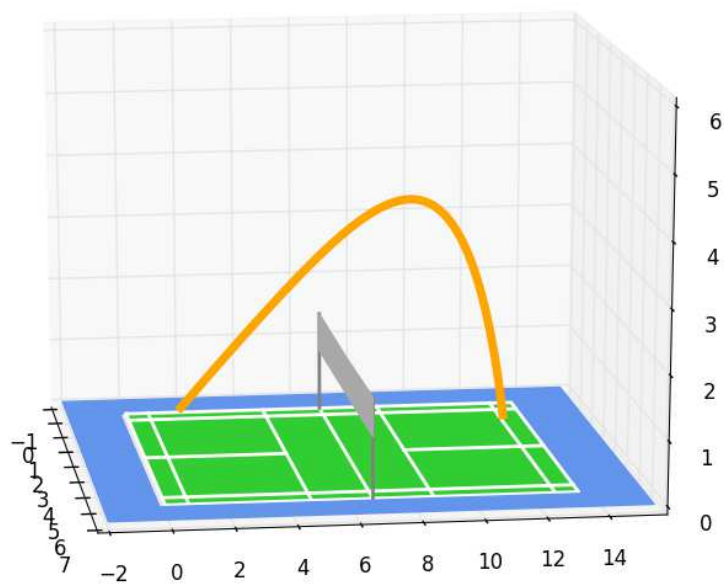


FIGURE 3.5 – Modèle de service long optimal en position « longue ». La vitesse initiale est de  $V_0 = 55 \text{ m.s}^{-1}$  et l'angle de tir vaut  $\theta_0 = 23^\circ$ .

### 3.1.3 Le service court

Comme pour le service long, l'étude considère les positions proche et longue au service court. Pour simplifier l'étude, les résolutions informatiques se placent là encore au voisinage de la limite gauche de la zone de service. En revanche, la meilleure zone à atteindre pour mettre l'adversaire en difficulté est le voisinage immédiat de la ligne de service adverse. L'angle de direction est ainsi connu pour chaque position initiale dans le court. Pour les types de position décrits plus haut, on étudie le lien entre vitesse de frappe et angle de projection à l'aide de la même procédure informatique que celle de la figure 3.2 . La figure suivante présente le résultat pour la position proche.

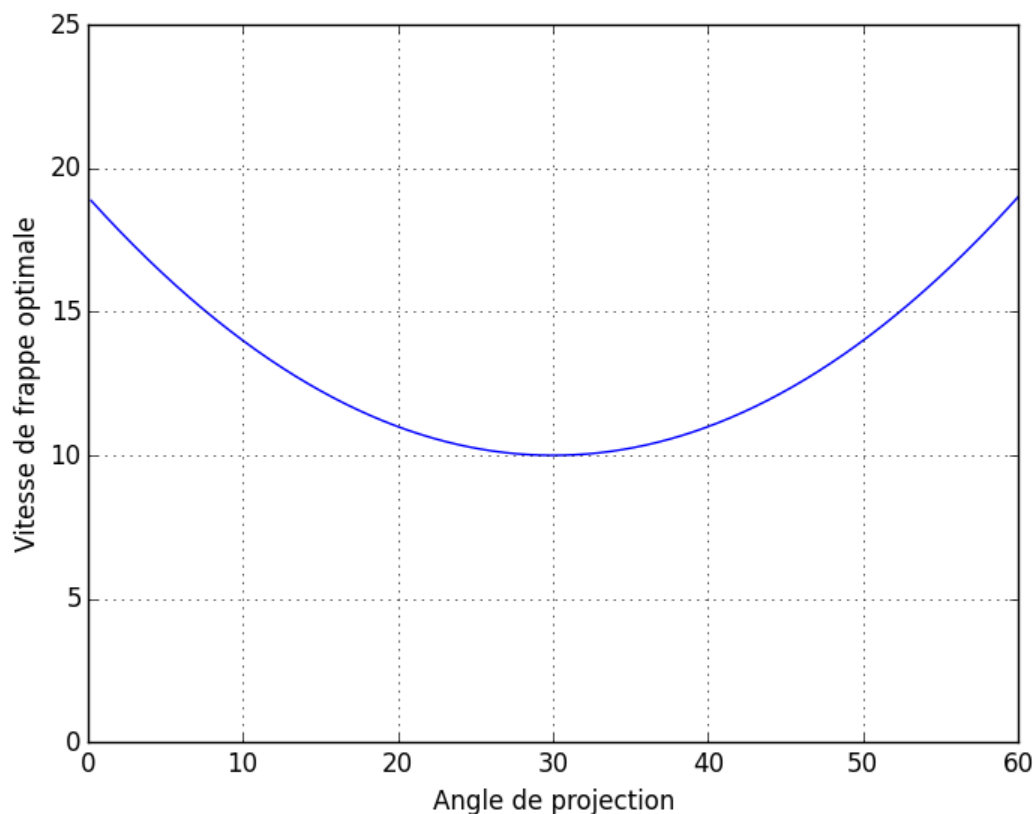


FIGURE 3.6 – Vitesse de frappe optimale (m/s) en fonction de l'angle de tir (°) pour le service court en position « proche ».

Comme pour le premier service, on peut obtenir la courbe correspondant à n'importe quelle position proche ou longue par translation verticale. Comme pour le premier service, les variations offrent deux choix au serveur, avec toutefois des vitesses bien plus faibles, ce qui est cohérent avec l'intuition que l'on s'en fait.

Le modèle 3D que nous avons évoqué par ailleurs a été également utilisé pour étudier le service court. Deux exemples de simulation pour des positions différentes sont proposés aux figures 3.7 et 3.8 .

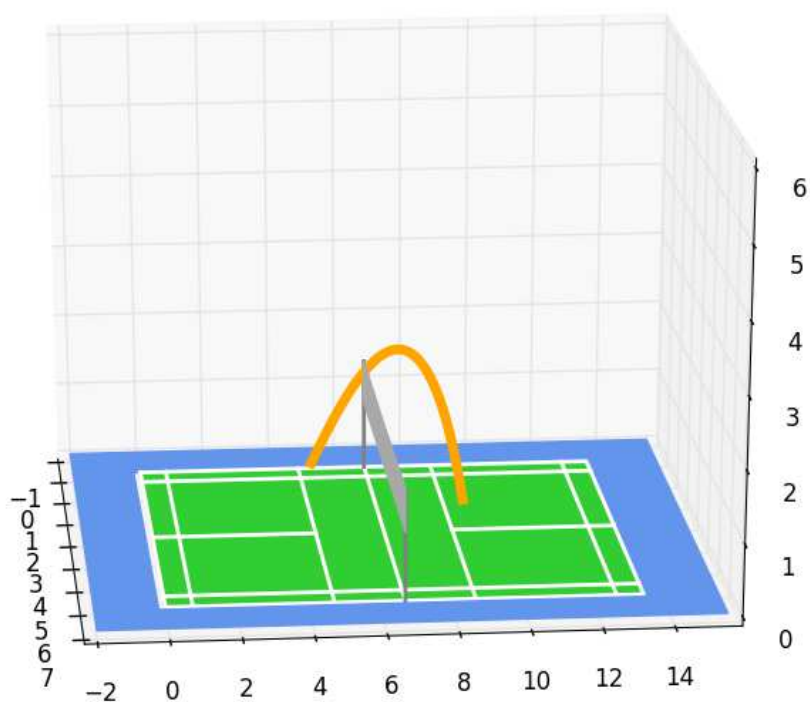


FIGURE 3.7 – Modèle de service court optimal en position « proche ». La vitesse initiale est de  $V_0 = 11 \text{ m.s}^{-1}$  et l'angle de tir vaut  $\theta_0 = 40.1^\circ$ .

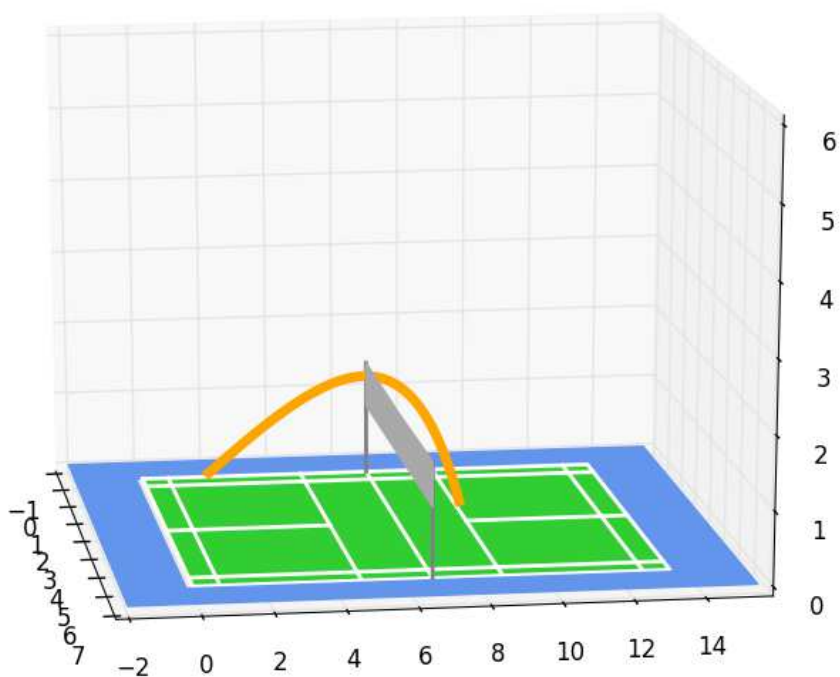


FIGURE 3.8 – Modèle de service court optimal en position « longue ». La vitesse initiale est de  $V_0 = 25 \text{ m.s}^{-1}$  et l'angle de tir vaut  $\theta_0 = 17.8^\circ$ .

## 3.2 Influence de la dynamique de retournement

### 3.2.1 Étude expérimentale

Cette partie s'intéresse, parmi les différents coups utilisés en match, à ceux qui sont particulièrement influencés par la dynamique du volant que nous avons étudié à la section 2. La dynamique de retournement et de stabilisation du volant est ressentie par le joueur seulement si le temps de stabilisation du projectile est comparable avec le temps de vol total du volant.

Pour mieux comprendre le phénomène, une série de coups a été réalisée. On a à chaque fois fait varier les paramètres initiaux afin de faire varier les temps de vol et de stabilisation du volant. Les images sont acquises selon le dispositif de la figure 1.10 à une fréquence d'acquisition de 1000 images par seconde. Les images sont traitées par *ImageJ*. Pour chaque lancer, on détermine les temps de stabilisation et de vol d'une part, ainsi que la portée du volant d'autre part. Pour établir l'influence de la phase de stabilisation du projectile, on a tracé l'évolution du rapport adimensionné du temps de stabilisation sur le temps de vol en fonction du rapport adimensionné de la portée du volant sur la longueur du terrain (qui vaut 13,40 m). Les résultats sont présentés à la figure 3.9 .

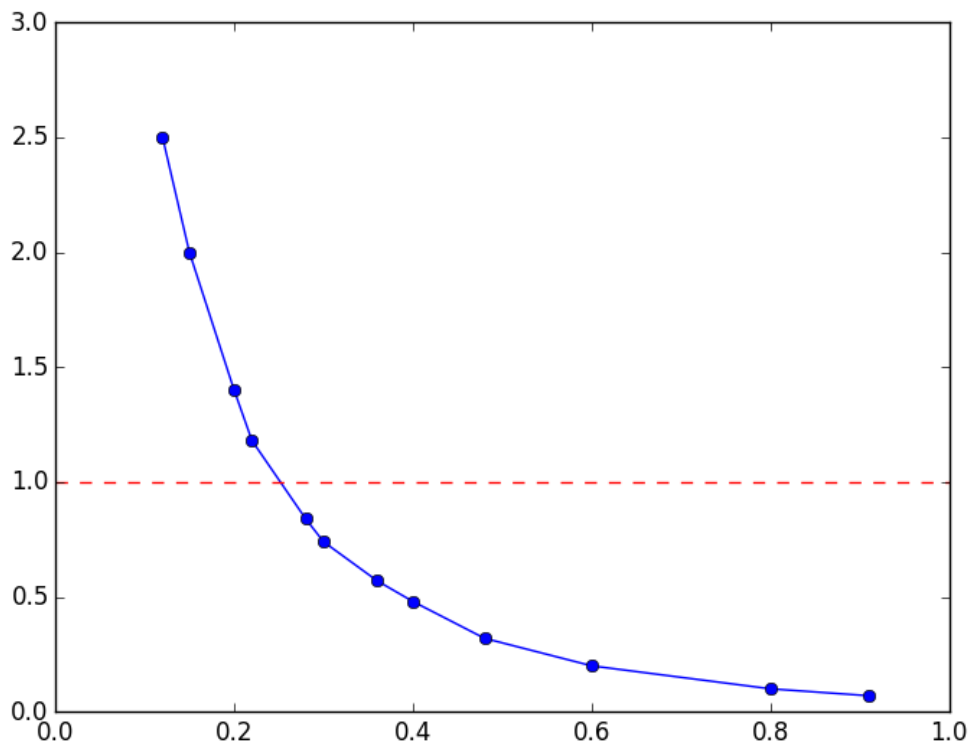


FIGURE 3.9 – Évolution du rapport  $(\tau_{sta}/\tau_{vol})$  en fonction de  $(x_0/L_{terrain})$ .

Ce graphe montre qu'il existe une petite portion de terrain où les joueurs peuvent recevoir un volant qui n'est pas encore aligné avec la direction de sa vitesse. Ce domaine correspond à  $x_0 \leq 0,25 L_{terrain} = 3,35 m$ . Il s'agit essentiellement de coups joués proche du filet. Pour ces derniers, le badiste doit jouer sur les conditions initiales afin d'optimiser la trajectoire du volant. Ainsi, l'adversaire se retrouve à devoir taper la robe et pas le bouchon, rendant le retour très délicat. Des vitesses de frappe et angulaire suffisamment faibles permettent de maximiser la durée de la phase de stabilisation du volant, comme nous l'avons vu dans la partie 2.

Pour aller plus dans l'appréhension du jeu, on se propose dans la suite de classer les types de coups du badminton, et ainsi d'en optimiser les performances et d'en tirer un modèle d'efficacité.

### 3.2.2 Classification des coups

Selon la position des joueurs et du volant, différents coups peuvent être utilisés. Chaque coup est caractérisé par une portée, un temps de vol et un sommet (qui caractérise la direction du coup : si le sommet est le point initial, c'est un coup joué vers le bas comme le smash). Les coups que nous considérons sont les suivants : dégagé offensif (cherche à repousser l'adversaire vers le fond du court), dégagé défensif (sommet plus haut que l'offensif, donne du temps au joueur pour se replacer), amorti et coup au filet (coups lents qui doivent mourir juste au niveau du filet dans le camp adverse), lift (coup joué proche du filet vers le fond du court, c'est un lob très haut avec une trajectoire en cloche), drive (coup parallèle au sol devant passer juste au-dessus du filet), smash (coup très rapide dont la trajectoire rectiligne vise une zone du court ou bien le corps de l'adversaire) et kill shot. Notre étude précédente permet de classer chacun de ses coups selon leurs portées adimensionnées et leurs temps de vol, et ainsi d'établir un découpage optimal du terrain de badminton en fonction du coup joué. La figure 3.10 expose cette classification.

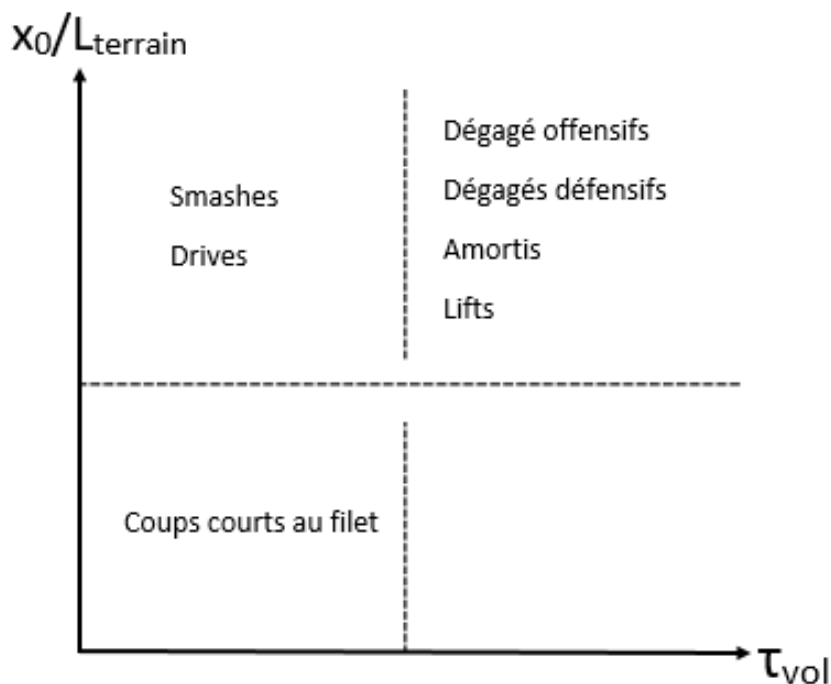


FIGURE 3.10 – Découpage optimal du terrain de badminton en fonction des types de coups.

Une fois l'échange installé, une stratégie offensive consiste donc à éloigner l'adversaire du centre de son camp en utilisant des dégagés, des amortis ou encore des lifts avant de terminer l'échange sur un coup rapide tel qu'un smash ou un coup au filet. Dans un article pour l'université de Hong-Kong, Yuen-Ming Tong et Youlian Hong ont étudié les coups utilisés par les badistes lors de l'Open de Hong-Kong de 1996. Ils ont en fait montré que cette stratégie offensive était celle qui permettait presque sûrement de remporter le point et, à l'échelle du match, de le remporter. Cette stratégie apporte en moyenne plus de coups efficaces et moins de coups inefficaces (le vainqueur par rapport au perdant) dans un match. Cette étude universitaire est présentée en annexe.

Il est intéressant, pour valider notre étude, de simuler quelques coups caractéristiques à l'aide de notre modèle 3D. Seule la simulation de l'amorti est présentée dans la suite, à la figure 3.11 . Toutefois, tous les coups évoqués plus haut correspondent bien au découpage réalisé en figure 3.10 .

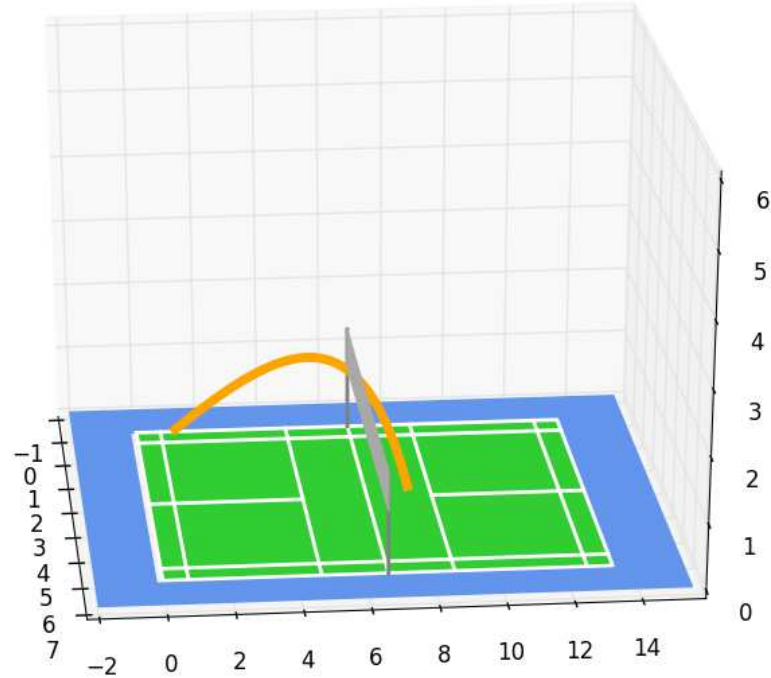


FIGURE 3.11 – Modèle d'amorti joué du fond du court. Le temps de vol est de 1.14 s et la portée de 7.3 m .

### 3.3 Smashes et kill shots

#### 3.3.1 Étude expérimentale et numérique

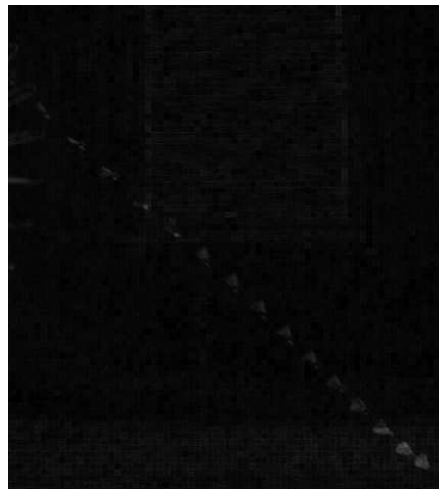


FIGURE 3.12 – Chronophotographie de smash. Le coup est joué à 2 m de hauteur avec une vitesse initiale  $V_0 = 30 \text{ m.s}^{-1}$  et un angle de tir  $\theta_0 = -41^\circ$ . Le temps de vol est de 114 ms. Les images sont séparées de 7 ms.

On étudie à présent le coup particulier du smash, très souvent un kill shot. La figure précédente montre une acquisition chronophotographique d'un smash. Elle correspond aux développements précédents sur les différents coups du badminton, notamment avec la figure 3.10 . Pour compléter l'étude, une simulation numérique du coup est réalisée et les résultats sont regroupés dans la figure suivante.

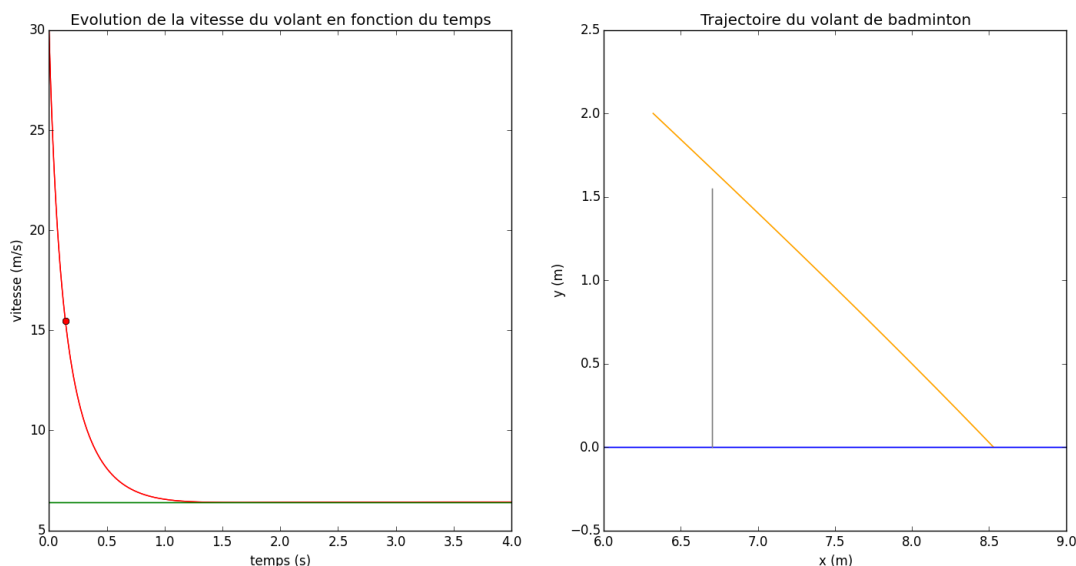


FIGURE 3.13 – Trajectoire et vitesse du volant lors du smash.

Ce coup, en plus de minimiser le temps de vol, optimise la vitesse d'impact et permet de minimiser la décélération du volant. Contrairement aux différents coups étudiés dans la partie 1, la vitesse du volant ne passe jamais en dessous de sa vitesse terminale. Ainsi, la vitesse d'impact au sol est d'autant plus grande que le smash est joué fort et vers le sol.

Tout ceci fait du smash un kill shot, c'est à dire un coup particulièrement adapté et efficace pour finir un échange et remporter le point : la clé du succès est la vitesse. On peut alors s'interroger sur les caractéristiques propres à la bonne réalisation d'un smash. C'est l'objet de la partie qui vient.

### 3.3.2 Zone de réalisation de smashes

En raison des contraintes physiques que représente le terrain de badminton avec ses dimensions, seul un smash convenablement frappé permettra au joueur de passer le filet d'une part, et de rester dans les limites du terrain d'autre part.

La caractéristique importante dont il convient de discuter ici est celle de la portion d'où le volant est frappé par la raquette. Cette portion est limitée par les contraintes physiques que sont la taille du frappeur, sa hauteur de saut ainsi que la longueur de la raquette (65 cm). Ainsi, il est possible de déterminer les zones optimales de réalisation de smashes pour chaque joueur et ainsi maximiser les chances de remporter le point. Pour un joueur type de 1,85 m et dont la hauteur de saut est de 70 cm, cette zone de réalisation optimale de smash est représentée en figure 3.14 .

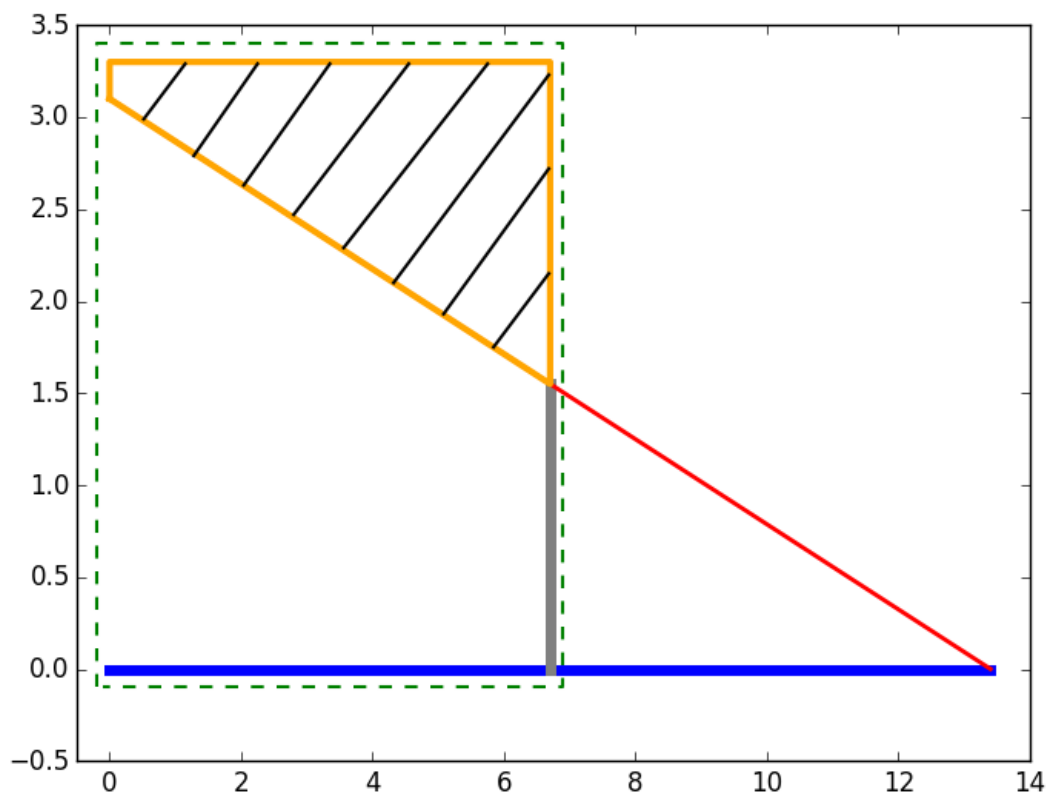


FIGURE 3.14 – Portion typique du terrain dans laquelle les smashes doivent être joués par un joueur de 1.85 m .

Chaque joueur peut donc optimiser son smash selon sa position sur le terrain. La figure précédente montre que le smash est d'autant plus efficace et facile à réaliser que le joueur est proche du filet, ce qui permet d'optimiser les stratégies de jeu.





# Annexe A

## Code Python - Angle de projection optimal

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from math import *
from pylab import *

def g(x,T):
    return 4*(T**2)*np.sin(x)

def f(x,T):
    return np.arctan(np.sqrt((g(x,T))/((1+g(x,T))*np.log(1+g(x,T))))) - x

def zero(T,precision):
    a=0.02
    b=pi/2.0
    while b-a>2.0*precision:
        milieu=(a+b)/2.0
        if f(a,T)*f(milieu,T)<0.0:
            b=milieu
        else:
            a=milieu
    return milieu

def traceoptimal():
    origine=0.01
    abs=[0.01]
    ord=[180*zero(0.01,0.00000001)/np.pi]
    h=0.0014999
    for i in range(100000):
        origine=origine+h
        abs.append(origine)
        ord.append(180*zero(origine,0.00000001)/np.pi)
    plt.plot(abs,ord,'r')
    plt.grid(True)
    plt.xscale('log')
    plt.show()
    xlim(0,150)
    ylim(0,50)
```

# Annexe B

## Code Python - Trajectoire et vitesse des volants

```
from math import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

g=9.81
vinf=...
theta0=...
v0=...

def tracetrajectoire():
    t=0
    vx=v0*cos(theta0)
    vy=v0*sin(theta0)
    v=np.sqrt(vx**2+vy**2)
    h=4.0/100000
    temps=[0]
    Vitessex=[v0*cos(theta0)]
    Vitessey=[v0*sin(theta0)]
    Vitesse=[np.sqrt(vx**2+vy**2)]
    for i in range(100000):
        vx,vy,v=vx+h*(-g*v*v*(vinf)**(-2)),vy+h*(-g-g*v*vy*(vinf)**(-2)),
sqrt((vx+h*(-g*v*v*(vinf)**(-2)))**2+(vy+h*(-g-g*v*vy*(vinf)**(-2)))**2)
        t=t+h
        temps.append(t)
        Vitessex.append(vx)
        Vitessey.append(vy)
        Vitesse.append(v)
    plt.figure(1)
    plt.subplot(121)
    plt.plot(temps,Vitesse,color='red')
    plt.plot([0,4],[vinf,vinf],color='green')
    plt.title('Evolution de la vitesse du volant en fonction du temps')
    plt.xlabel("temps (s)")
    plt.ylabel("vitesse (m/s)")
    plt.show()
x=0
y=1
```

```

Positionx=[0]
Positiony=[1]
for j in range(100000):
    if Positiony[j]<0:
        ximpact=Positionx[j-1]
        vimpact=np.sqrt(Vitessesex[j-1]**2.0+Vitessey[j-1]**2.0)
        tempsvol=(j-1)*(4.0/100000)
        break
    else:
        x,y=x+h*Vitessesex[j],y+h*Vitessey[j]
        Positionx.append(x)
        Positiony.append(y)
print ("la portee du volant est de", ximpact-Positionx[0], "m")
print ("la vitesse d'impact au sol est de", vimpact, "m/s")
print ("le temps de vol est de", tempsvol, "s")
plt.subplot(122)
plt.plot(Positionx,Positiony,color='orange')
plt.plot([0,13.4],[0,0],color='blue') #terrain de badminton
plt.plot([6.7,6.7],[0,1.55],color='grey') #filet
plt.title('Trajectoire du volant de badminton')
plt.xlabel("x (m)")
plt.ylabel("y (m)")
plt.subplot(121)
plt.plot([tempsvol],[vimpact], 'ro')
plt.show()

```

# Annexe C

## Code Python - Résolution numérique du retournement

```
from __future__ import division
from scipy import *
from pylab import *
from scipy.integrate import odeint
from math import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def deriv(syst, t):
    phi = syst[0]
    phip = syst[1]
    return [phip, -A*phip-B*sin(phi)]

start = 0
end = 10
numsteps = 1000000
t = linspace(start, end, numsteps)
b=linspace(0,0.02,1000000)

phi0=np.pi
phip0=...
syst_CI=array([phi0, phip0])
Sols=odeint(deriv, syst_CI, t)

phi = Sols[:, 0]
phip = Sols[:, 1]

plt.plot(t, 180*phi/pi, 'k')
plt.show()
```

# Annexe D

## Code Python - Vitesse de frappe optimale et angle de projection

```
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from mpl_toolkits.mplot3d.art3d import Poly3DCollection
import matplotlib.pyplot as plt
from math import *
import numpy as np
from scipy import *
from pylab import *

g=9.81
vinf=...
phi0=...

def impact(v0,theta0):
    #la trajectoire du volant
    t=0
    vx=v0*cos(theta0)*cos(phi0)
    vy=v0*cos(theta0)*sin(phi0)
    vz=v0*sin(theta0)
    v=np.sqrt(vx**2+vy**2+vz**2)
    h=4.0/100
    temps=[0]
    Vitessex=[v0*cos(theta0)*cos(phi0)]
    Vitessey=[v0*cos(theta0)*sin(phi0)]
    Vitessez=[v0*sin(theta0)]
    Vitesse=[np.sqrt(vx**2+vy**2+vz**2)]
    for i in range(100):
        vx,vy,vz,v=vx+h*(-g*v*vx*(vinf)**(-2)),
vy+h*(-g*v*vy*(vinf)**(-2)),
vz+h*(-g*v*vz*(vinf)**(-2)),
np.sqrt((vx+h*(-g*v*vx*(vinf)**(-2)))**2+(vy+h*(-g*v*vy*(vinf)**(-2)))**2+
(vz+h*(-g*v*vz*(vinf)**(-2)))**2)
        t=t+h
        temps.append(t)
        Vitessex.append(vx)
        Vitessey.append(vy)
        Vitessez.append(vz)
```

```

        Vitesse.append(v)
x=3.05
y=4.6
z=1
Positionx=[3.05]
Positiony=[4.6]
Positionz=[1]
for j in range(100):
    if Positionz[j]<0:
        yimpact=Positiony[j-1]
        break
    else:
        x,y,z=x+h*Vitessex[j],y+h*Vitessej[j],z+h*Vitessej[j]
        Positionx.append(x)
        Positiony.append(y)
        Positionz.append(z)
return yimpact

def vitesseoptimale():
    v0=0
    theta0=0.02
    Vitesse=[]
    Angle=[]
    while theta0<pi/2.0:
        Angle.append(180*theta0/pi)
        v0=0
        while (impact(v0,theta0)<8.8):
            v0=v0+0.01
            Vitesse.append(v0)
            theta0=theta0+0.01
plt.plot(Angle,Vitesse)
plt.xlabel("Angle de projection")
plt.ylabel("Vitesse de frappe optimale")
plt.grid(True)
xlim(0,60)
ylim(0,100)
plt.show()

```

# Annexe E

## Code Python - Modélisation 3D du terrain et des trajectoires

```
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from mpl_toolkits.mplot3d.art3d import Poly3DCollection
import matplotlib.pyplot as plt
from math import *
import numpy as np

g=9.81
vinf=...
theta0=...
phi0=...
v0=...

def tracetrajectoire3d():
    fig = plt.figure()
    ax = Axes3D(fig)

    x = [0,0,6.1,6.1]
    y = [0,13.4,13.4,0]
    z = [0,0,0,0]
    verts = [zip(x,y,z)]
    ax.add_collection3d(Poly3DCollection(verts,color='limegreen'))

    x1=[-1,-1,0,0]
    y1=[-2,15.5,15.5,-2]
    z1=[0,0,0,0]
    verts1 = [zip(x1,y1,z1)]
    x2=[0,7,7,0]
    y2=[-2,-2,-0.2,-0.2]
    z2=[0,0,0,0]
    verts2=[zip(x2,y2,z2)]
    x3=[6.2,6.2,7,7]
    y3=[-0.2,15.5,15.5,-0.2]
    z3=[0,0,0,0]
    verts3=[zip(x3,y3,z3)]
    x4=[0,6.2,6.2,0]
    y4=[13.4,13.4,15.5,15.5]
    z4=[0,0,0,0]
```



```

verts4=[zip(x4,y4,z4)]
ax.add_collection3d(Poly3DCollection(verts1,color='cornflowerblue'))
ax.add_collection3d(Poly3DCollection(verts2,color='cornflowerblue'))
ax.add_collection3d(Poly3DCollection(verts3,color='cornflowerblue'))
ax.add_collection3d(Poly3DCollection(verts4,color='cornflowerblue'))

plt.plot([0,0,6.1,6.1,0],[0,13.4,13.4,0,0],[0,0,0,0,0],
         color='w',linewidth=2)
plt.plot([0.46,0.46],[0,13.4],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([6.1-0.46,6.1-0.46],[0,13.4],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([0,6.1],[6.7-1.98,6.7-1.98],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([0,6.1],[6.7+1.98,6.7+1.98],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([0,6.1],[6.7,6.7],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([0,6.1],[0.76,0.76],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([0,6.1],[13.4-0.76,13.4-0.76],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([3.05,3.05],[0,6.7-1.98],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([3.05,3.05],[6.7+1.98,13.4],[0,0],color='w',linewidth=2)
plt.plot([0,0],[6.7,6.7],[0,1.55],color='grey',linewidth=2)
plt.plot([6.1,6.1],[6.7,6.7],[0,1.55],color='grey',linewidth=2)

xfilet = [0,3.05,6.1,6.1,0]
yfilet = [6.7,6.7,6.7,6.7,6.7]
zfilet = [1.55,1.524,1.55,0.95,0.95]
vertsfilet = [zip(xfilet,yfilet,zfilet)]
ax.add_collection3d(Poly3DCollection(vertsfilet,color='darkgrey'))

t=0
vx=v0*cos(theta0)*cos(phi0)
vy=v0*cos(theta0)*sin(phi0)
vz=v0*sin(theta0)
v=np.sqrt(vx**2+vy**2+vz**2)
h=4.0/100000
temps=[0]
Vitessex=[v0*cos(theta0)*cos(phi0)]
Vitessey=[v0*cos(theta0)*sin(phi0)]
Vitessez=[v0*sin(theta0)]
Vitesse=[np.sqrt(vx**2+vy**2+vz**2)]
for i in range(100000):
    vx,vy,vz,v=vx+h*(-g*v*v*(vinf)**(-2)),
vy+h*(-g*v*vy*(vinf)**(-2)),
vz+h*(-g-g*v*vz*(vinf)**(-2)),
np.sqrt((vx+h*(-g*v*v*(vinf)**(-2)))**2+
(vy+h*(-g*v*vy*(vinf)**(-2)))**2+(vz+h*(-g-g*v*vz*(vinf)**(-2)))**2)
    t=t+h
    temps.append(t)
    Vitessex.append(vx)
    Vitessey.append(vy)
    Vitessez.append(vz)
    Vitesse.append(v)
x=4
y=1
z=1

```

```

Positionx=[4]
Positiony=[1]
Positionz=[1]
for j in range(100000):
    if Positionz[j]<0:
        yimpact=Positiony[j-1]
        vimpact=np.sqrt(Vitessex[j-1]**2.0+Vitessey[j-1]**2.0+
            Vitessez[j-1]**2.0)
        tempsvol=(j-1)*(4.0/100000)
        break
    else:
        x,y,z=x+h*Vitessex[j],y+h*Vitessey[j],z+h*Vitessez[j]
        Positionx.append(x)
        Positiony.append(y)
        Positionz.append(z)
print ("la portee du volant est de", yimpact-Positiony[0], "m")
print ("la vitesse d'impact au sol est de", vimpact, "m/s")
print ("le temps de vol est de", tempsvol, "s")
ax.plot(Positionx,Positiony,Positionz,color='orange',linewidth=5)
ax.set_zlim(0,6)
ax.set_xlim(-1,7)
ax.set_ylim(-2,15.5)
plt.show()

```

## Annexe F

### Rapport scientifique de Yuen-Ming Tong et Youlian Hong

# THE PLAYING PATTERN OF WORLD'S TOP SINGLE BADMINTON PLAYERS

Yuen-Ming Tong and Youlian Hong

Department of Sports Science and Physical Education,  
The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong SAR

A total of 10 matches from the 1996 Hong Kong Badminton Open Tournament were video taped and notated. The analysis profiled the percentage distribution of shots with respect to court-areas; the frequency the players used the different serves; the area the players returned the most shots to; a rank order of the different return shots; and the playing effectiveness in relation to each court-area. The study further identified the types of strokes used for killing shots and isolated the critical factors influencing winning or losing a match.

**KEY WORDS:** notation, badminton, playing pattern, game strategy, tactics

**INTRODUCTION:** Methods of notation have been widely used to analyze the playing pattern in sports (Horobin, Kitchen and Hughes, 1995; Miller and Bartlett, 1994; Hughes and Tillin, 1995; Hong, Robinson and Chan, 1998). Badminton is a fast and dynamic sport. To win a game, the proper use of tactics is of vital importance (Downey, 1982). Scientific studies on tactics, strategy, or playing patterns of international level badminton, are, however, very limited. The purpose of this study was to profile playing patterns of international male badminton players in single games and to establish a comprehensive database of badminton tactics.

**METHODS:** A total of ten single matches played in the 1996 Hong Kong Badminton Open were analyzed. To reduce bias, in addition to the four players competed in the semi-finals and final matches, seven other players from the quarterfinals and second round matches were also selected as subjects. All the players were right-handed. Games were recorded using a 3-CCD video camera placed at the back or at the side of the court. After the games, the videotapes were notated.

Court was divided into six areas: right forecourt, left forecourt, right mid-court, left mid-court, right rear court and left rear court. Strokes were identified according to serves and return shots. The serves were: serve low, serve high, and the return shots were: smash, clear, drop, block, lob, drive, push, net, and hit. Each of the return strokes was in turn identified as either straight or cross court shots. In order to depict the quality of strokes, each stroke was classified into one of six categories of effectiveness: effective, ineffective, unconditional winner, conditional winner, forced failure and unforced failure. Each category was defined as: effective, ineffective, unconditional winner, conditional winner, forced failure, and unforced failure shots.

The data were analysed by calculating the percentage distribution of shots in relation to the six effectiveness-categories, the 20 kinds of strokes and the six court areas. One-way analysis of variance (ANOVA) was applied for multiple comparison to identify statistically significant difference. Post hoc analysis was conducted by Scheffé Significant Difference Test to evaluate the significant mean differences. T-tests were used to evaluate the significant mean difference between two groups. The 0.05 probability level was used for all tests as the criterion value when determining the presence or absence of statistically significant results. Reliability of the method was evaluated by comparing the results of a repeated analysis of a match containing 108 rallies and 619 shots. (Hong et al., 1996).

**RESULTS AND DISCUSSION: The serve.** It has been pointed out in literature that the high-deep serve is used more often in single than in doubles badminton games (Poole, 1991; Bloss & Hales, 1994; Downey, 1982). The aim is to force the opponent to move to the rear court, blunting the attacking power and developing open space in the forecourt. A weak return allows the server to take the offensive. Data from this study, however, showed that the world's top single badminton players served virtually the same number of low-short serve

(512) as the high-deep serve (516). Moreover, among the eleven players involved, seven played more low-short than high-deep serves. These seven players served low, eliminating their opponent's chance of hitting the shuttle downward. With good blocking at the net, it forced the opponent to lift the shuttle upward, giving the server the opportunity to implement their offensive strategy, for example a smash or a drop. This explanation can be substantiated as the data of this study indicated that the smash (straight and cross-court) was the second most popular shot played. Based on the analysis made, it was concluded that more players preferred to used low-shot serves to facilitate offensive strategy in the male single matches of Hong Kong Badminton Open Championships 1996.

**The rally.** Table 1 shows that, as would be expected for this level of competition, a much higher rate of "effective" shots was found than that of the "ineffective" shots. Among the six court areas, the left rear court contained the highest rate of "ineffective" shots, with the left forecourt receiving the highest rate of "effective" shots.

**Table 1**      **Percentage distribution of the six effectiveness-category shots in each of the six court-areas (%). (N=20. Values are Means $\pm$ SD)**

	Effective	Ineffective	Unconditional Winner	Conditional Winner	Forced Failure	Unforced Failure	Sum
Fore Left	76.07 $\pm 6.44$	11.05 $\pm 4.87$	4.45 $\pm 2.98$	0.00 $\pm 0.00$	2.40 $\pm 2.02$	6.04 $\pm 3.56$	100
Fore Right	74.22 $\pm 5.68$	10.90 $\pm 5.73$	4.63 $\pm 3.01$	0.14 $\pm 0.46$	2.05 $\pm 1.85$	8.07 $\pm 3.46$	100
Mid Left	66.11 $\pm 9.28$	13.71 $\pm 6.33$	9.89 $\pm 4.53$	0.18 $\pm 0.58$	4.84 $\pm 2.56$	5.27 $\pm 4.61$	100
Mid ight	63.52 $\pm 11.15$	15.12 $\pm 6.85$	8.57 $\pm 5.13$	0.24 $\pm 0.75$	7.86 $\pm 4.22$	4.68 $\pm 4.40$	100
Rear eft	67.72 $\pm 8.99$	18.75 $\pm 6.21$	4.65 $\pm 3.32$	0.08 $\pm 0.34$	0.26 $\pm 0.65$	8.54 $\pm 4.92$	100
Rear Right	72.15 $\pm 10.07$	14.96 $\pm 9.36$	4.50 $\pm 3.92$	0.12 $\pm 0.43$	0.11 $\pm 0.36$	8.15 $\pm 5.53$	100

As shown in Table 2, for winning shots, the rate of "unconditional winner" was much higher than that of the "conditional winner" for the whole court, with the greatest rate of the "unconditional winner" shots being found in the mid court. The highest rate of "forced failure" shots was found on the mid-court with the greatest rate of the "unforced failure" shots found in the rear court.

The one-way ANOVA test indicated a significant difference ( $p < 0.05$ ) in the percentage distribution of shots among fore, mid and rear court areas using. While the Post Hoc tests showed to be between the fore and mid-court and between the fore and rear court. No significant difference was found between mid- and rear court. These findings indicated that players preferred to return shots to the opponent's forecourt as placement there is considered to be safe and offensive. By playing a shot close to the net eliminates the opponent's chance to hit the shuttle downward; and when a good net shot is followed by blocking, it forces the opponent to lift the shuttle up, offering the chance to attack.

**Table 2** Percentage distribution of the six effectiveness-categories shots in the fore, mid, rear and whole court (%). (N=20. Values are Means $\pm$ SD)

	Effective	Ineffective	Unconditional Winner	Conditional Winner	Forced Failure	Unforced Failure	Sum
Fore-Court	74.99 $\pm 5.18$	10.95 $\pm 4.81$	4.51 $\pm 2.08$	0.07 $\pm 0.24$	2.29 $\pm 1.30$	7.18 $\pm 3.01$	100
Mid-Court	64.73 $\pm 8.19$	14.62 $\pm 6.04$	9.02 $\pm 2.77$	0.24 $\pm 0.52$	6.41 $\pm 2.23$	4.98 $\pm 3.48$	100
Rear-Court	69.80 $\pm 7.80$	16.94 $\pm 6.75$	4.63 $\pm 2.92$	0.10 $\pm 0.38$	0.19 $\pm 0.36$	8.33 $\pm 3.99$	100
Whole Court	70.34 $\pm 4.82$	14.02 $\pm 4.69$	5.76 $\pm 1.91$	0.13 $\pm 0.20$	2.82 $\pm 0.76$	6.92 $\pm 2.75$	100

The backhand rear court is considered by many as the players' weakest area (Breen & Paup, 1991; Bloss & Hales, 1994; Poole, 1991). When playing a backhand stroke, the body has to twist and the grip changed from the forehand to the backhand position. As a result, time is needed to attain the standby position. Also the backhand is usually less powerful than the forehand stroke and often offer the opponent an offensive opportunity. This study shows that of all returns, 51.94% were played from backhand side, revealing that offensive players preferred to return more shots to the opponent's backhand side (left forecourt, left mid and left rear court for the right-handed players), thus putting pressure on the opponent's backhand. The study further revealed that amongst the six court-areas, returns from the left rear court had the highest "ineffective" rate (Table 1), showing that even in high level competition, the backhand rear court tends to be the weakest one.

Table 3 demonstrated that the number of "effective" shots was much higher than that of "ineffective" shots. Among all the shots, the highest "effective" rate was with the net, block and drop shots.

**Table 3** Comparative relationship of effective and ineffective rate with the 9 main shots. (N=20. Value = Means $\pm$ SD)

	Effective	Ineffective
Smash	77.87 $\pm$ 17.99	22.13 $\pm$ 17.99
Clear	74.57 $\pm$ 28.21	25.43 $\pm$ 28.21
Drop	91.12 $\pm$ 12.95	8.88 $\pm$ 12.95
Block	92.20 $\pm$ 8.01	7.80 $\pm$ 8.01
Lob	69.18 $\pm$ 23.19	30.82 $\pm$ 23.19
Drive	82.90 $\pm$ 28.55	17.10 $\pm$ 28.55
Push	78.83 $\pm$ 33.99	21.17 $\pm$ 33.99
Net	95.79 $\pm$ 24.88	4.21 $\pm$ 24.88
Hit	59.26 $\pm$ 46.17	40.74 $\pm$ 46.17

The net shot was found to have the highest "effective" rate. It has been shown that a good net return can be very useful as it can finish a rally and win a point, in fact it has been found that the net shot was the second ranking killing shot (Table 4). With net blocking, the opponent is forced to lift the shuttle, thus providing opportunity of a smash which was found the top ranking killing shot (Table 4). If, however, a player plays an "ineffective" net return, the opponent will have a chance to hit the shuttle down at the forecourt.

The block shot or underhand drop was ranked second in its "effective" rate (Table 3). This shot is usually used to return a smash from the opponent, which is usually executed from the opponent's rear court or mid-court. Using the block shot to make a net return, the opponent is forced to move a long distance to play which places the opponent in an off balance

position and causes them to expend considerable energy.

The drop shot was the third ranking shot in the “effective” category (Table 3). It is usually played from the rear or mid court, with the aim of hitting the shuttle downward softly to the opponent’s forecourt. Returning a good drop usually requires the use of deception to create situations to the player’s advantage. For example, when the shuttle is high in the rear or mid court, faking a smash, can cause the opponent to adopt a defensive stance, which makes him more difficult to move quickly to the rear or forecourt. The offensive player then has the option of playing an attacking clear or attacking drop to force a weak return (Downey, 1982). Meanwhile it would be too energy consuming if the smash was used all the time.

Comparing the straight and cross court shot, it was found that 66.81% of returns were straight shots and 33.19% were cross court shots. Breen and Paup (1983) stated that the ability to change the direction of shuttle flight is one of the crucial aspects in the strategies of single badminton. For example, if the opponent plays a straight shot the best return is cross court shot. Changing directions makes the opponent run farther but the cross court shot is more difficult and dangerous to return. If the cross court clear is not played high and deep, the opponent may have an easy smash. The straight return of the shuttle is generally the simplest error-free shot to play and it can also give a better positioning for subsequent shots. This study indicated that  $84.16 \pm 10.33$  % of the straight court shots were “effective” and  $81.19 \pm 12.02$  % of the cross court shots were “effective”, which showed that the high level single badminton players studied preferred to play the more safe and conservative straight shots rather than the high risk crosscourt shots.

**The kill shots.** In order to profile the commonly used playing strategy that leads to winning, the last five shots played in the “unconditional winner” and “forced failure” rallies were analysed. Table 4 shows that the smash was the most frequently used kill shot with net the second and hit the third. This highlights the fact that the smash is a very important shot in badminton game. Although the smash is frequently used to win a rally, it is impossible to smash all the time, as the opponent may not provide such an opportunity. Knowing, therefore, how to “set up” the opponent for a smash is essential.

**Table 4 Percentage distribution of killing shot and the preceding returns (%)**

Killing shot			Preceding shots (including serves)							
			1		2		3		4	
1	Smash	53.9	Net	21.89	Lob	21.87	Lob	24.35	Lob	24.04
2	Net	14.56	Lob	19.93	Smash	15.46	Net	16.85	Net	21.32
3	Hit	11.27	Smash	18.93	Clear	14.40	Clear	14.61	Smash	15.85
4	Push	5.03	Drop	8.68	Net	13.06	Smash	13.86	Block	10.38
5	Lob	4.16	Clear	8.48	Block	9.87	Drop	8.61	Clear	8.74
6	Clear	3.47	Block	7.89	Drop	7.20	Block	6.37	SH	6.56
7	Drop	2.95	SL	4.93	SH	5.87	SH	6.37	SL	6.01
8	Drive	2.42	Push	3.75	SL	5.33	SL	5.23	Drop	5.46
9	Block	2.24	SH	2.76	Drive	3.47	Push	2.25	Drive	1.09
10			Drive	1.38	Push	3.47	Drive	1.50	Push	0.55
11			Hit	1.38						
N=577			N=507		N=375		N=267		N=183	

There are different playing styles, for example the strong player, the touch player, or the fast player. To smash, one must have an overhead return from the opponent. To force the opponent to make an overhead return, a good net shot is the best choice. Findings of this study support this statement as all the shots used in the second last return, the net shot ranked the first, the lob the second, and smash the third. Although the lob is a defensive shot, it can make use of the deep part of badminton court and force the opponent to run a long way to get the shuttle, resulting in a high energy consumption of the opponent. The smash, which ranked third in the second last returns, is usually employed by using power. A strong smash followed by a good net or hit shot is commonly used by the “strong players”

(Downey, 1982).

The first three ranking shots used for the third last return were lob, smash, and clear. The net shot was ranked closely at the forth. If the first ranking shots in the last three returns are linked, a commonly used pattern can be found. First, the player plays a lob, forcing the opponent to the rear court; the player plays a good net shot, making the opponent run to the forecourt. If the good net shot is followed by net blocking, the opponent must lift the shuttle up. And if the return is not long enough, the player has the opportunity for a smash.

**The winning strategy.** The mean and standard deviation of shots returned by match winners and losers with different effectiveness categories in an average match were computed (Table 5). Among all the effectiveness category shots returned, only the “unconditional winner” showed a significant difference ( $p < 0.01$ ) between the winner and loser, reflecting the fact that the pressure and attack game was the most important strategy for the top level international players. Players who play with good skill, patience, stamina and a variety of different tactics set up the rally for a kill - an “unconditional winner” shot. The more effective the player, the less error appears.

**Table 5**      **Comparison of different number of shots played by winner and loser in each category of an average game. (N = 10. Values are Means $\pm$ SD. T is between the Winner and Loser. T critical value for  $p < 0.05$  is 1.96 and  $p < 0.01$  is 2.576)**

	Winner	Loser	Difference	t
Effective	247.40 $\pm$ 87.27	243.50 $\pm$ 92.39	3.90	0.13
Ineffective	45.50 $\pm$ 24.90	53.70 $\pm$ 25.28	-8.20	0.90
Unconditional Winner	22.70 $\pm$ 7.75	16.20 $\pm$ 6.05	6.50	3.29 <sub>c</sub>
Conditional Winner	0.50 $\pm$ 0.85	0.50 $\pm$ 0.71	0	0.00
Forced Failure	9.30 $\pm$ 3.59	9.60 $\pm$ 2.80	-0.30	0.21
Unforced Failure	21.20 $\pm$ 10.27	25.30 $\pm$ 8.23	-4.10	0.97

**CONCLUSION:** More male badminton single players studied preferred to serve low-short shots to facilitate an offensive strategy. The players returned a higher percentage of shots to the forecourt than the mid- and rear court in order to play an offensive game. The lob was the most preferable return played by the players, followed by the smash, net and clear. Among all the effectiveness categories, the “effective” shots took the predominant place. More “effective” shots were returned from the forecourt, while more “ineffective” shots were returned from the rear court with the left rear court containing the highest “ineffective” index. The smash was the most frequently used shot to kill and win a rally, net the second, hit the third. Among all the effectiveness categories of shots returned, only the “unconditional winner” showed a significant difference between the winner and loser, reflecting the fact that the pressure and attack game was the most important strategy for top level international players in producing a winning performance.

#### REFERENCES:

- Bloss, M.V., & Hales, R.S. (1994). Badminton. (Seven Edition). *Wisconsin: WCB Brown & Benchmark Publishers.*
- Breen J.L., & Paup, D.L. (1991). *Winning Badminton. FL: The Athletic Institute.*
- Downey, J. (1982). *Winning Badminton Singles. Lodon: E.P. Publications.*
- Hong, Y., Robinson, P.D., & Chan, W.K. (1998). Game strategy used by the world's top female squash players in international competitions - A notational analysis. *Women in Sport and Physical Activity Journal*, 7(1): 27-44.
- Hong, Y., Robinson, P. D. Chan, W. K., Clark, C.R., & Choi, T. (1996). Notational analysis on game strategy used by the world's top male squash players in international competition. *The Australian Journal of Science and Medicine in Sport*, 28(1): 17-22.
- Horobin, A., Kitchen, S., & Hughes, M.D. (1995). An analysis of women's international rugby



union. *Journal of Sports Science*, **13**(1): 84.

Hughes, M.D., & Tillin, P. (1995). An analysis of the attacking strategies in female elite tennis players at Wimbledon. *Journal of Sports Science*, **13**(1): 86.

Miller, S.A., & Bartlett, R.M. (1994). Notational analysis of the physical demands of basketball. *Journal of Sports Science*, **12**(2): 181.

Poole, J. (1991). Badminton. (Third Edition). *Illinois: Waveland Press, Inc.*

Annexe G

Rapport final de TIPE

# Présentation du travail

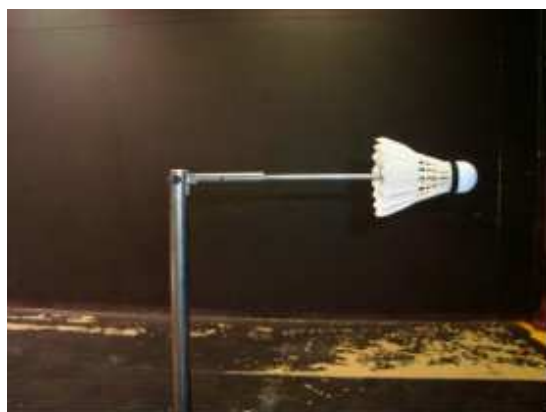
Mon travail, dans le cadre de ce TIPE, concerne les trajectoires si particulières du badminton. Mon étude s'inscrit dans le cadre plus général de la physique du sport et de la balistique extérieure, branche de la dynamique des fluides.

En match, toute la stratégie du badiste consiste à imprimer au volant une trajectoire qui lui permette de passer le filet et de rendre le retour le plus délicat possible pour l'adversaire. La bonne connaissance des trajectoires du volant se révèle ainsi très importante pour les joueurs, désireux de dominer l'échange et marquer des points. C'est précisément l'ambition au cœur de mon travail : décrire le comportement du volant et étudier son influence sur le jeu, tant d'un point de vue «spectateur» que joueur.

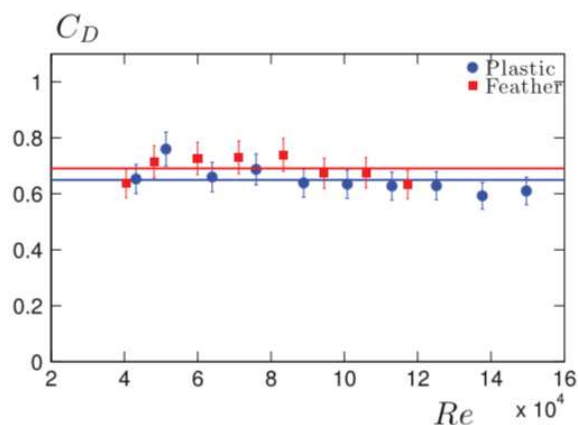
Conformément à la Mise en Cohérence des Objectifs, j'ai, en premier lieu, étudié la trajectoire en vol du volant en fonction de ses caractéristiques. Le cadre des particules denses à hauts nombres de Reynolds est ici rappelé. L'analyse du comportement du volant après impact avec la raquette est l'objet de la deuxième partie du travail. Enfin, j'ai caractérisé le jeu en termes de choix et de stratégie pour le joueur. L'étude de l'influence des caractéristiques du volant et des conditions initiales est également menée.

## 0.1 Trajectoire globale du volant

J'ai d'abord construit un modèle d'étude de la dynamique du volant, concernant notamment l'équation du mouvement et ses implications. Dans ce cadre, bien que je n'ai pu déterminer l'évolution du coefficient de traînée des volants de badminton (limitations techniques), mon contact, qui avait réalisé cette expérience, m'a fourni et expliqué le dispositif et les résultats [1].



(a)



(b)

FIGURE 1 – Mesure du coefficient de traînée : (a) Montage en soufflerie avec le volant. (b) Mesure du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement. Les ronds bleus correspondent au volant en plastique et les carrés rouges à celui en plume. Les lignes continues représentent les valeurs moyennes des coefficients de traînée pour chacun des deux volants.

J'ai alors analysé le modèle dynamique en termes d'optimisation et de caractéristiques du volant, puis ai confronté celui-ci à l'étude expérimentale et numérique du comportement de volants dans leur vol. J'ai réalisé les expériences dans les locaux du Laboratoire d'Hydrodynamique de l'école Polytechnique (LadHyx), en compagnie de Mme Caroline Cohen, membre de ce laboratoire [2]. Pour deux volants de badminton - l'un en plume, l'autre en plastique - on a réalisé une série de 10 lancers. Précisons que l'étude a été faite en extérieur un jour du mois de mars 2017, où le vent était relativement négligeable.

Ces lancers ont ensuite été analysés à l'aide du logiciel de traitement d'images *ImageJ*. L'acquisition des images a été réalisée par une caméra rapide PHOTRON à une fréquence d'acquisition de 250 images par seconde.



FIGURE 2 – Suivi du vol des volants : (a) Modèle de caméra rapide utilisé. (b) Dispositif global d'acquisition.

Par ailleurs, j'ai conçu et programmé une résolution numérique du problème (par Python), que j'ai confronté aux résultats des expériences sus-citées. Le modèle global a été finalement validé.

## 0.2 Comportement du volant après impact avec la raquette

Après l'étude globale, j'ai étudié le comportement du volant après le coup de raquette. J'ai ici analysé et étudié un modèle permettant de décrire la dynamique de retournement de ce projectile.

Par la suite, j'ai confronté ce modèle aux résultats expérimentaux. Le dispositif est le même que celui de la figure 2. Néanmoins, la fréquence d'acquisition a été modifiée de façon à capturer la dynamique du volant dans cette phase. Le réglage est effectué à 1000 images par secondes. Pour renforcer la validité du modèle, j'ai conçu une nouvelle procédure informatique de résolution.

Enfin, j'ai étudié plus précisément l'influence des caractéristiques physiques des volants sur leur dynamique de retournement. Pour répondre à cette question, j'ai construit plusieurs modèles de volant. Ils sont constitués d'une bille d'acier et d'une jupe en plastique. Ce procédé de construction permet de faire varier les caractéristiques physiques des volants. Pour chaque modèle, les différents temps caractéristiques de la dynamique de retournement ont été évalués. Pour ce faire, j'ai observé leur comportement lors d'une chute dans une colonne d'eau, sans vitesse initiale. Les images ont été acquises par une caméra de marque CASIO à la fréquence de 600 images par secondes, puis traitées à l'aide de *ImageJ*.



FIGURE 3 – Modèles de volant construits avec des billes d'acier et des jupes en plastique.

## 0.3 Influence des caractéristiques du volant et des conditions initiales sur le jeu

Ici, je me suis intéressé à la façon dont les comportements décrits dans les deux premières sections se traduisent en match pour le joueur. Dans ce cadre, j'ai réalisé une modélisation du terrain de badminton en 3 dimensions sous Python afin d'étudier précisément les trajectoires en situation de jeu.

J'ai d'abord étudié le service, dont la trajectoire diffère selon le plan de jeu offensif ou prudent du serveur. J'ai notamment pu déterminer les zones optimums à atteindre afin d'être dans de bonnes dispositions pour la suite de l'échange, et discuter des paramètres d'optimisation de cette phase de jeu conformément aux règlements officiels et en tenant compte de la position du serveur.

J'ai ensuite caractérisé le jeu par les coups qui sont particulièrement influencés par la dynamique de retournement du volant. Dans ce cadre, un « découpage » optimal du terrain a été réalisé. De plus, par la même mise en œuvre expérimentale que celle de la figure 2, j'ai pu étudier l'évolution du temps de vol et de la portée de coups donnés, notamment le smash. J'ai réutilisé les programmes informatiques décrits précédemment pour analyser ces données numériquement.

J'ai enfin distingué les différents coups de badminton selon le signe de leur angle de tir. Dans le cas des coups dirigés vers le bas, j'ai étudié expérimentalement et numériquement le comportement du volant. La modélisation 3D m'a permis de mettre en évidence une zone de réalisation des coups, dont les caractéristiques extrêmes ont été déterminées. Un modèle de jeu a finalement pu être construit, notamment en m'appuyant sur des rapports scientifiques présentant l'efficacité de tel ou tel coup joué [3].

## Conclusion générale

La dynamique du volant ainsi que son influence sur le jeu ont été étudiées. L'étude du vol global du volant a mis en évidence un comportement fortement fonction des conditions initiales. Les expériences réalisées au LadHyx ont ainsi permis de confronter trajectoires expérimentales et numériques d'une part, et de valider le modèle dynamique d'autre part.

La dynamique de retournement du projectile, étudiée au Ladhyx expérimentalement et également sous Python, m'a permis de corroborer le comportement très versatile du volant après impact avec la raquette. L'expérience de la figure 3 m'a en outre permis de déterminer l'influence des paramètres physiques du volant et d'optimiser ces derniers.

Enfin, la caractérisation du jeu en termes de choix ainsi que le modèle tridimensionnel conçu sous Python ont permis de tirer au mieux profit des deux premières sections de ce TIPE. Les acquisitions expérimentales relatives aux divers coups existant ont finalement été utilisées pour classer ces derniers et ainsi déterminer les stratégies optimales relatives à leur utilisation.

## Références

- [1] Baptiste Darbois Texier : *Tartaglia, Zig Zag et Flips : les particules denses à haut Reynolds*. Thèse de doctorat de l'université Paris 7, 2013.
- [2] Caroline Cohen, Post-doctorante, Laboratoire d'Hydrodynamique de l'école Polytechnique, premier contact le 10 mars 2017.
- [3] Yuen-Ming Tong et Youlian Hong : *The playing pattern of world's top single badminton players*. The Chinese University of Hong Kong.