

Travail de Maturité

Trajectoire de la balle lors d'un tir de tchoukball

Florian Welti



Physique
Mentor: Didier Chatteard
Lycée Blaise-Cendrars
La Chaux-de-Fonds
30 Janvier 2009

Table des matières

Avant propos.....	3
Motivations.....	3
Remerciements.....	3
Résumé.....	4
Introduction.....	5
Brève présentation du tchoukball.....	5
Le cadre de tchoukball.....	5
Problématique.....	6
Hypothèse.....	7
Expériences.....	8
Montage de l'expérience.....	8
Déroulement de l'expérience.....	8
Méthode de l'analyse vidéo.....	9
Méthode de l'analyse numérique.....	10
Analyse de différents facteurs.....	10
Présentation des résultats.....	11
Résultats de l'analyse 1: Dix essais pour définir l'imprécision des points.....	11
Résultats de l'analyse 2: deux tirs avec variation de vitesse.....	12
Résultats de l'analyse 3a: Deux tirs avec variation de l'emplacement de l'impact (v faible).....	13
Résultats de l'analyse 3b: Deux tirs avec variation de l'emplacement de l'impact (v élevée).....	13
Résultats de l'analyse 4a: Deux tirs avec variation de l'angle θ_1 (v élevée).....	14
Résultats de l'analyse 4b: Deux tirs avec variation de l'angle θ_1 (v faible).....	14
Discussions des résultats	15
Analyse 1: Dix essais pour définir l'imprécision des points.....	15
Analyse 2: Deux tirs avec variation de vitesse.....	16
Analyse 3a et b: Deux tirs avec variation de l'emplacement de l'impact.....	18
Analyse 4a: Deux tirs avec variation de l'angle θ_1 (v élevée).....	20
Analyse 4b: Deux tirs avec variation de l'angle θ_1 (v faible).....	20
Comparaison des résultats.....	21
Conclusion.....	24
Synthèse des résultats.....	24
Bilan critique du travail	24
Perspectives ultérieures.....	25
Bibliographie.....	26
Annexes.....	27
Annexe 1: Mesures et résultats.....	27
Mesures de l'analyse 1: Dix essais pour définir l'imprécision des points.....	27
Mesures simplifiées de l'analyse.....	29
Mesures de l'analyse.....	31
Annexe 2: règlement d'utilisation de la marque de garantie « tchoukball ».....	37
Annexe 3: CD des vidéos et des résultats.....	38

Avant propos

Motivations

Lorsque j'ai du choisir un thème pour ce travail de maturité, je n'ai pas eu la moindre hésitation sur le thème principal: Le tchoukball. Sport que je pratique depuis maintenant plus de 3 ans et demi et qui s'est immédiatement avéré être une passion. Mais ensuite il m'a fallu préciser mon choix en indiquant la branche souhaitée et là deux possibilités se sont offertes à moi. Premièrement la continuation des ATI sport éthique, car le tchoukball se veut très fair-play. Il est bien au delà du dopage sévissant dans beaucoup d'autres sports, essentiellement à cause de raisons financières et médiatiques. Deuxièmement je pouvais m'orienter d'un point de vue physique et ainsi analyser les lancers, les rebonds au cadre, ... Mais ces deux optiques avaient des points négatifs, la première pouvait rapidement devenir un travail philosophique, ce qui ne m'aurait pas convenu et le second avait été traité une année plus tôt dans le même établissement par un de mes coéquipier Chaux-de-Fonnier, David Sandoz. A la lecture de son travail, je me suis rendu compte qu'il n'avait pas exploré tout le sujet. Il avait tenté principalement de définir les forces agissant dans le cadre au moment de l'impact. Il me restait donc la possibilité d'explorer une autre voie, le rebond d'une balle sur un cadre de tchoukball. Ensuite la problématique vint d'elle même. Durant les vacances d'été, je me suis documenté sur le sujet et, à ma grande satisfaction, j'ai trouvé un document de l'OFSP (Office fédéral du sport), exposant une théorie qui au premier abord me sembla obsolète. Elle consistait à affirmer que la trajectoire de la balle était symétrique avant et après le rebond sur le cadre. C'est ainsi que j'ai calqué mon travail de maturité sur l'analyse de cette théorie. Ainsi ma problématique consistera à vérifier si elle tient la route ou non.

Remerciements

A Didier Chattelard, mon mentor, qui pu me fournir de précieux conseils pour la réalisation de ce travail.

A Michel Favre et au Lycée Blaise Cendrars, pour les prêts de matériel, sans lesquels ce travail n'aurait pu aboutir.

A Carole Greber, qui s'est tenue disponible pour les différentes questions que je lui ai posées, principalement sur le document de l'OFSP qu'elle avait écrit et la théorie qu'elle avait proposé.

A David Sandoz, qui m'a donné accès à son travail de maturité.

A Benoit Vermot, mon modèle pour le page de titre

A Floriane Pellaton, qui a réalisé le montage de la page de titre et qui a relu et corrigé mon travail.

A Clotilde Welti et à Lise Gremion, qui ont relu et corrigé mon travail.

Résumé

Ce travail de maturité a pour but de définir les lois physiques régissant le rebond d'une balle sur un cadre de tchoukball et l'importance des différents facteurs tel que la vitesse, l'angle d'impact avec le cadre, l'emplacement de l'impact,... Pour ce faire j'ai filmé, avec un appareil haute vitesse, différents tirs sur un cadre de tchoukball en veillant à pouvoir les analyser en deux dimensions. Après avoir placé un point de référence sur chaque image pour connaître les coordonnées de la balle dans un plan, j'ai pu analyser les courbes et en déduire leurs vitesses, leurs angles d'impact avec le cadre,... Puis j'ai comparé les courbes entre elles, en tenant compte de ces paramètres séparément. J'ai pu constater que la trajectoire de la balle avant et après le rebond n'était pas symétrique mais qu'elle variait dans ces expériences jusqu'à 20° . Ainsi il s'est avéré que cette loi était valable uniquement dans quelques tirs exceptionnels tel qu'un tir exactement face au cadre. Suite à ces observations, j'ai pu en déduire que la trajectoire de la balle avant l'impact ne dépendait pas uniquement de l'angle défini entre le cadre et la trajectoire de la balle avant l'impact mais aussi de la vitesse et de l'emplacement de l'impact sur le cadre. De plus, j'ai pu observer de manière indirecte que la force de frottement entre le cadre et la balle jouait aussi un rôle pour définir cette trajectoire finale. Toutefois il n'est pas exclu que d'autres facteurs n'ayant pas été étudiés dans ce travail aient leur place dans la formule qui définit l'angle entre la trajectoire de la balle après l'impact et le cadre de tchoukball.

Introduction

Brève présentation du tchoukball.

Le tchoukball est un sport inventé dans les années 60 par le docteur Brandt. Conçu dans un souci de réduction du nombre et de la gravité des blessures sportives, il se veut très fair-play et respectant une éthique propre à lui-même. Pour ce qui est du jeu, 14 joueurs de deux équipes différentes sont répartis sur un terrain de même dimensions que celui de basketball. N'ayant pas le droit de marcher avec la balle, les joueurs font un maximum de trois passes avant d'aller la lancer sur un des deux cadres de tchoukball disposés à chaque extrémité du terrain, sans empiéter dans une zone interdite de 3 mètres autour du cadre. Pour l'obtention d'un point, la balle doit toucher le sol avant que l'équipe adverse ne la maîtrise, sans quoi l'autre équipe a la possibilité d'aller tenter de marquer un point. Si la balle sort du terrain ou tombe dans la zone interdite lors d'un tir, un point est octroyé à l'équipe adverse.

Le cadre de tchoukball

C'est au moment du lancer de la balle sur le cadre que toute l'interaction entre les deux équipes se produit. Ce cadre, comporte un filet de 68cm de côté tendu par des sandows (sorte d'élastique) à l'intérieur d'une armature métallique carrée d'un mètre de côté. La partie destinée au rebond est inclinée à 55° par rapport au sol et doit, selon les normes d'homologation, pouvoir s'enfoncer entre 1 et 2 centimètres pour une pression de 1kg en son centre. Pour plus d'information sur le cadre de tchoukball, veuillez consulter l'annexe N°2 « Règlement d'utilisation de la marque de garantie tchoukball ».

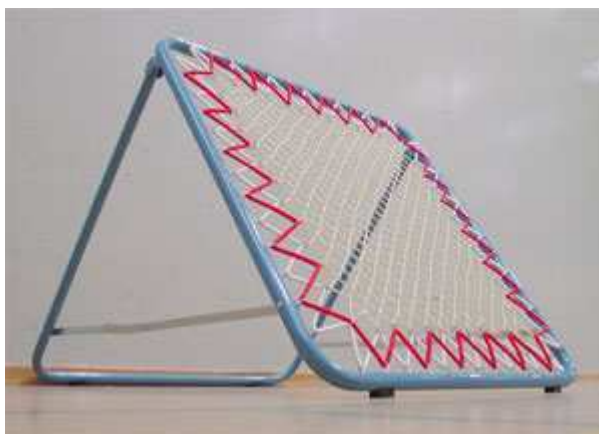


fig 1: cadre de tchoukball

Problématique

Je tire ma question de recherche d'un document de l'**OFSP**, distribué à toutes personnes passant un brevet de moniteur Jeunesse et Sport ainsi que l'illustration s'y référant (fig 2):

La trajectoire de la balle après avoir touché le filet est symétrique à la trajectoire de la balle avant l'impact, tant dans le plan horizontal que dans le plan vertical.

L'**OFSP** (office fédéral du sport Macolin) est le centre de compétences de la Confédération en matière de sport. Il est rattaché au Département de la défense, de la protection de la population et des sports.

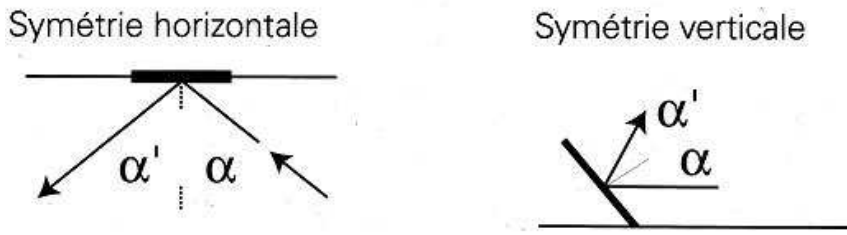


Fig 2: théorie de la symétrie du rebond

J'ai demandé à Carole Greber, auteur de ce document, quelles étaient ses sources. Elle m'a répondu qu'il n'y avait pas de démarche scientifique à cette affirmation et qu'il n'y avait *Pas de références autres que le bouche à oreille*. C'est pourquoi j'ai défini que la problématique de mon travail de maturité consisterait à vérifier cette affirmation, autrement dit:

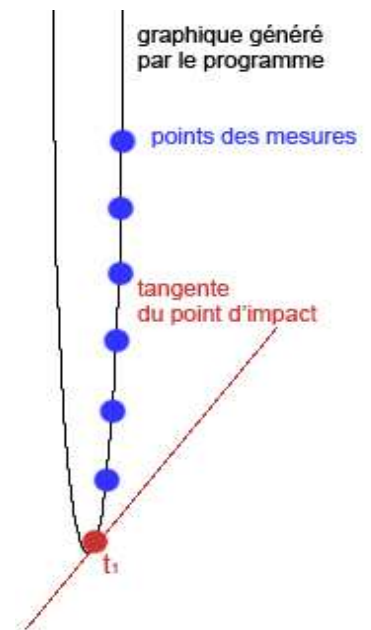
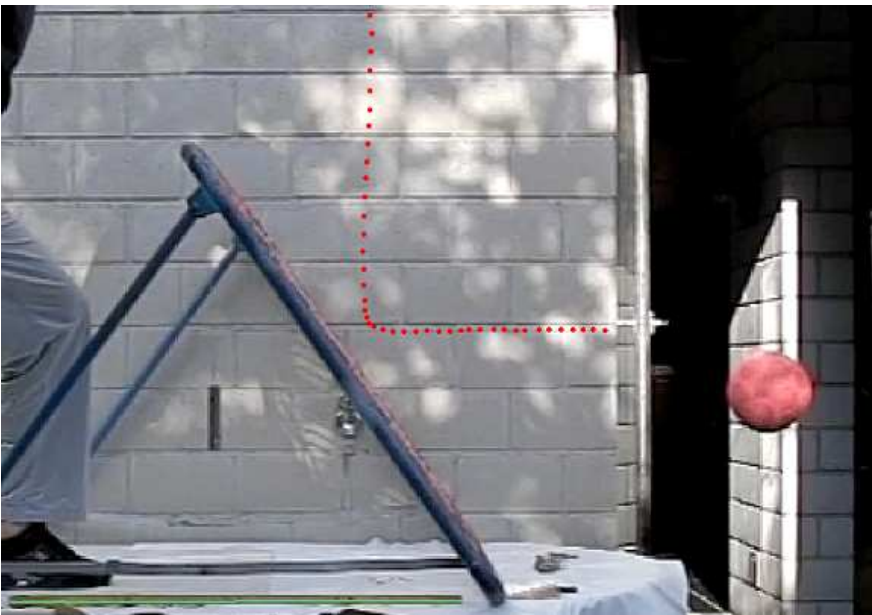
L'angle entre le plan défini par le filet du cadre de tchoukball et la trajectoire de la balle avant l'impact est-il égal à l'angle entre ce même plan et la trajectoire de la balle après l'impact?

Pour tenter de résoudre cette problématique je vais, à l'aide d'une caméra permettant de filmer à **300fps**, faire une vidéo de la trajectoire que décrira la balle lors d'un tir de tchoukball. Je décomposerai cette vidéo en images, ce qui me permettra sur chacune d'elles de placer des points correspondants à l'emplacement de la balle dans l'espace. A l'aide de ces derniers, je pourrai tracer un graphique correspondant au mouvement balistique de la balle avant, pendant et après l'impact avec le cadre de tchoukball. Avec ces courbes, je serai en mesure de trouver les deux angles utiles à mon analyse. Il ne me restera qu'à les comparer l'une à l'autre pour confirmer ou réfuter la citation ci-dessus.

fps (frames per secondes) est l'unité de mesure relative au nombre d'image par seconde d'une vidéo. Un film au cinéma est diffusé entre 24 et 30 fps

Hypothèse

Cette citation est réelle dans la mesure où la balle rebondit sur le cadre, en son centre. Dès qu'elle s'en éloigne, la tension exercée lors de l'impact sur les portions de sandows les plus proches de la balle sera plus importante que sur les plus lointaines. La déformation du filet sera donc inégale. En reprenant sa position initiale, le cadre exercera une force n'étant pas parallèle à sa normale et donc la trajectoire après l'impact ne sera pas proportionnelle à celle avant l'impact.



Expériences

Montage de l'expérience

J'ai posé un cadre de tchoukball sur une table. Parallèlement au cadre, j'ai placé une caméra sur un trépied mis à la même hauteur que le milieu du filet du cadre de façon à éviter les déformations induites lorsque l'objectif n'est pas centré. J'y ai ensuite disposé un mètre pour avoir une idée des distances dans mon analyse et un fil à plomb de façon à connaître la direction de la gravité (fig 3).

Lors des premières expériences, j'avais placé le cadre par terre. Mais le trépied étant trop long je n'arrivais pas à centrer l'objectif. J'avais aussi omis de placer un fil à plomb, sans lequel je n'avais pas l'axe de référence de la gravité.

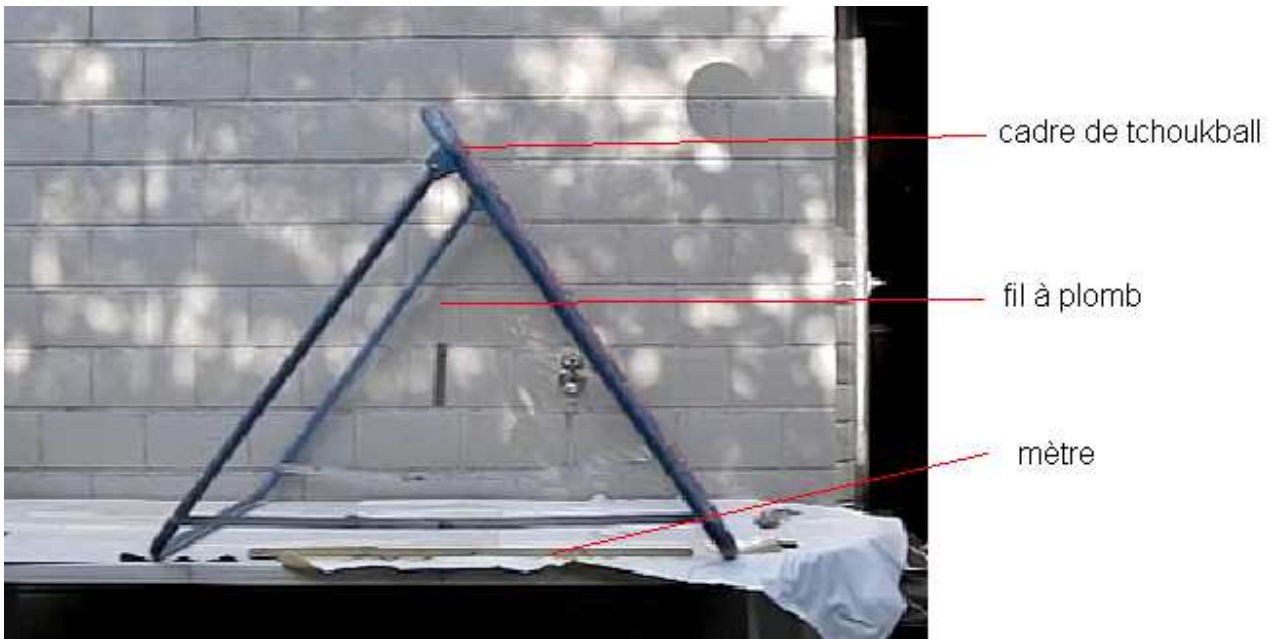


Fig 3: montage de l'expérience vue de l'objectif

Déroulement de l'expérience

Après avoir enclenché la caméra, je lance la balle sur le cadre de façon à ce que la balle décrive un mouvement perpendiculaire au vecteur découlant de l'objectif de la caméra (fig 4). Ceci permettra d'analyser le mouvement non pas en trois dimensions, ce qui serait impossible à réaliser avec une seule caméra mais en deux dimensions (y et z car $\Delta x \approx 0$). Je recommence l'expérience plusieurs fois en faisant varier les paramètres suivants: vitesse initiale, endroit de l'impact sur le cadre, angle initial (voir analyse des différents facteurs).

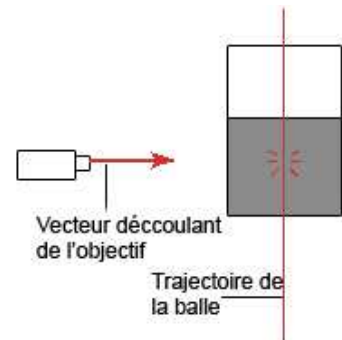


Fig 4: montage de l'expérience vue du dessus

Méthode de l'analyse vidéo

Une fois la vidéo exportée dans Logger Pro©, je place l'unité de mesure par rapport au mètre et l'axe par rapport au fil à plomb. Ensuite sur chaque image de la vidéo, je place un point au sommet de la balle (fig 5). Une fois les points collectés, je regarde le temps t_1 , correspondant à la première image où la balle est en contact avec le cadre et t_2 , la dernière image où la balle est en contact avec le cadre. Ensuite je ne sélectionne que les points avant t_1 et je demande au programme de me calculer à l'aide de ceux-ci **une fonction $f(x)=Bx+C$ si la pente est supérieure à 85°** et $f(x)=Ax^2+Bx+C$ si elle est inférieure. Puis je répète cette opération avec les points après t_2 . Je vais aussi calculer la vitesse moyenne entre l'avant-dernier point avant l'impact et le précédent ainsi que la vitesse moyenne entre le deuxième et le troisième point après l'impact.

Pour plus de précisions, je vais recommencer 3 fois chaque analyse de vidéo et utiliser la moyenne de ces trois. De plus, pour me donner une meilleure idée de la précision humaine sur les mesures, je vais recommencer 10 fois la même vidéo et ainsi comparer les résultats sur chaque point pour trouver une marge d'erreur raisonnable (analyse 1).

fig 5: placement des points sur la vidéo

Logger Pro © est un programme ayant pour fonction principale la création et l'analyse de graphiques.

Lors de mes premières analyses, j'avais toujours utilisé une courbe Ax^2+Bx+C mais elle avait toujours tendance à avoir son point à tangente horizontale proche du point t_1 , c'est pourquoi j'ai dû utiliser une droite linéaire:

fig 6: illustration du problème occasionné lors de l'utilisation d'une courbe Ax^2+Bx+C

Méthode de l'analyse numérique

On peut écrire la citation de la problématique en langage mathématique. n étant la **norme du plan**, θ_1 l'angle entre la droite avant l'impact et l'axe y (l'horizon) et θ_2 l'angle entre la droite après l'impact et l'axe y : $n-\theta_1 = -(\theta_2-n)$

Le premier angle recherché dépend de la pente de mon graphique au point t_1 qui peut être obtenu par la première dérivée de la fonction

$$f_1(x).$$
$$f_1(x) = Ax_1^2 + Bx_1 + C$$
$$f_1'(x) = 2Ax_1 + B$$

Ensuite l'angle vaut l'arc tangente de la pente.

$$p_1 = 2A(t_1) + B$$

$$\theta = \arctan(p_1) = \arctan(2A(t_1) + B)$$

J'utilise la même formule pour l'angle après l'impact.

Selon la problématique, l'angle avant devrait être égal à l'angle après l'impact. Toutefois, dans mon expérience, les axes ne sont pas sur le cadre (l'abscisse perpendiculaire au cadre) mais sur la gravité (l'abscisse perpendiculaire au sol). Pour que la problématique soit valable si les axes sont disposés sur la gravité, il faut poser la formule suivante: la différence entre t_1 et la norme du cadre doit être équivalente à la différence entre t_2 et la norme du cadre, autrement dit:

$$n - \theta_1 = \theta_2 - n$$
$$2n - \theta_1 - \theta_2 = 0$$

Analyse de différents facteurs

Pour pouvoir mieux analyser le mouvement, j'ai divisé mon analyse de façon à isoler le mieux possible 3 facteurs différents: la vitesse, l'emplacement de l'impact et l'angle θ_1 . J'ai analysé ces 3 facteurs séparément en essayant de garder les autres constants.

Pour la vitesse, j'ai analysé 2 tirs qui ont t_1 au milieu du cadre et $\theta_1 = 90^\circ$ en faisant varier la vitesse. (analyse 2)

Pour l'emplacement de l'impact, j'ai analysé deux fois deux tirs à vitesse et à θ_1 égal mais avec un emplacement différent sur le cadre, dans un premier temps à une vitesse faible (analyse 3a) et dans un second temps à vitesse élevée. (analyse 3b)

Pour l'angle θ_1 , j'ai gardé un point d'impact t_1 au milieu du cadre et une vitesse égale. Ensuite j'ai fait varier l'angle θ_1 , d'abord à vitesse élevée (analyse 4a) puis à vitesse faible (analyse 4b)

Dans l'espace, la **norme du plan** est la droite

perpendiculaire à un plan.

Dans le cas d'un cadre de tchoukball, la norme de la surface de rebond forme un angle de 35° avec le sol.

D'abord je voulais chercher l'angle θ en traçant une droite entre les premiers points de la droite. Il y aurait eu une erreur due à l'effet de la gravité, mais avec une dizaine de points de

$\frac{1}{300}$ seconde chacun, la

différence n'aurait été que de $0.5gt^2$ soit 5mm sur ~30 cm de longueur soit $\sim 1^\circ$. Ce qui paraissait raisonnable au vu des différences de plus de 20° . Mais je me suis orienté sur la méthode de la dérivée car la marge d'erreur est ainsi due aux mesures plutôt qu'aux calculs eux-mêmes.

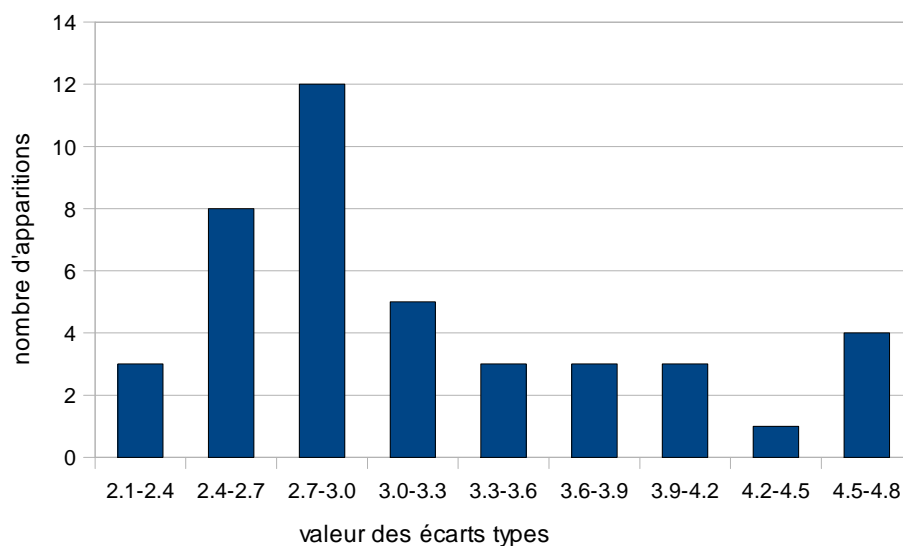
Présentation des résultats

Les résultats sont présentés de manière concise. Ils comportent uniquement les résultats importants à la compréhension du travail. Ils sont accompagnés d'une brève analyse simplifiée, de manière à rendre accessible à tout le monde ce travail. Elle sera ensuite développée plus amplement dans la partie discussion des résultats. Pour avoir accès à tous les résultats, veuillez vous référer aux annexes.

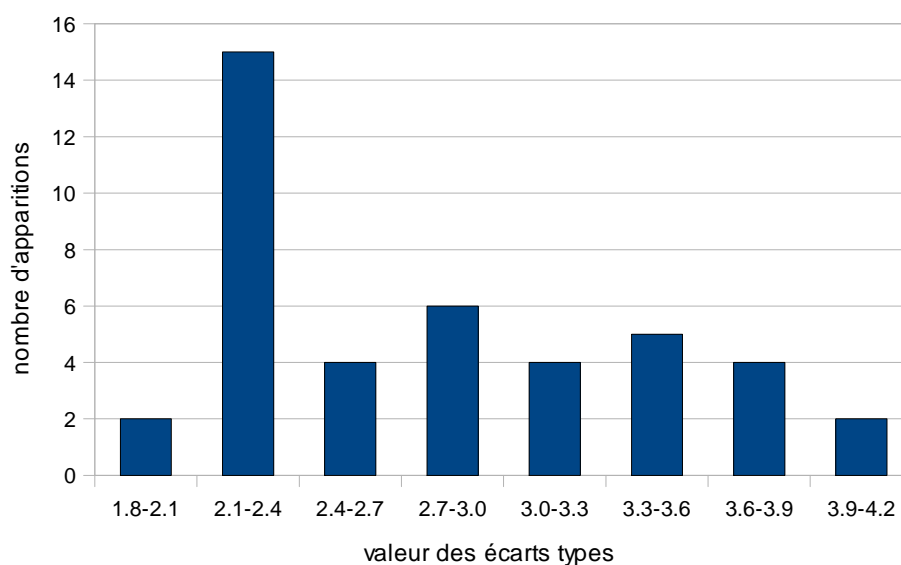
Résultats de l'analyse 1: Dix essais pour définir l'imprécision des points

	Moyen	minimum	maximum
Point... [m]	1.2219	1.0975	1.5420
Écart type selon x... [m]	0.0032	0.0021	0.0048
Écart type selon y... [m]	0.0028	0.0020	0.0041

distribution des écarts type selon x



distribution des écarts type selon y



Sur ces deux courbes de distribution des points, on observe un grand rassemblement de points dans une même zone: entre 2.4 et 3.3 selon x et entre 2.1 et 3.0 selon y. Ce qui correspond bien à la moyenne et donc ce qui prouve que mes points sont précis. Car ~3mm d'erreur sur un ballon de 18 cm de diamètre, c'est moins 2% d'erreur. Mais ce qui semble étrange c'est que les écarts types varient autant: 2.1 à 4.8 millimètres selon x et 1.8 à 4.2 millimètres selon y, alors qu'après avoir fait des moyennes de 10 points dans des mêmes conditions et sur une même vidéo, ils devraient être très proches, voir même égaux. C'est en fait dû à la qualité de l'appareil photo qui restitue certaines images avec netteté et d'autres non.

En plaçant un écart type moyen sur chaque point du graphique, il est possible de trouver un écart type sur une courbe et donc sur l'angle entre la trajectoire de la balle et le cadre: 2.38° . C'est donc l'écart type de cette expérience que je vais réutiliser pour comparer mes futurs résultats.

Résultats de l'analyse 2: deux tirs avec variation de vitesse

Vidéo	CIMG 2640		CIMG 2651	
Vitesse avant impact [m/s]	3.03		9.21	
Angle θ_1 avant l'impact [$^\circ$]	89.33		87.62	
Point t_1 (x;y) [m]	1.098	1.001	1.098	1.001
Vitesse après l'impact	3.58		6.26	
Angle θ_2 après l'impact [$^\circ$]	-8.91		1.85	
Point t_2 après l'impact (x;y) [m]	1.252	0.872	1.192	0.888
Différence entre la théorie et la réalité [$^\circ$]	11.76		19.47	

La différence entre la théorie et la réalité est importante, plus importante que la marge d'erreur concédée qui est de 4.76° (2.38° pour la courbe avant l'impact et 2.38° pour celle après l'impact. Ce qui semble déjà remettre en cause la véracité de l'affirmation de Mme Greber. On peut aussi constater que dans la première expérience, la balle est accélérée lors de son impact avec le cadre, alors que dans la seconde, elle perd environ un tiers de sa vitesse. Dans le premier cas, la force d'attraction de la terre sur la balle est plus importante que les forces qui freinent la balle. Tandis que dans le second elle est plus faible. Ce phénomène est dû à la vitesse. Les forces freinant la balle, comme la force de frottement, sont plus importantes si la vitesse est plus élevée. Quant à elle, la gravité est toujours constante. On constate aussi que plus la vitesse est élevée, plus la déviation est importante. Car la force de la gravité est constante et la force exercée par le cadre sur la balle est plus importante lorsque la vitesse est plus importante. Donc plus la vitesse est élevée, plus la force exercée par le cadre aura d'influence par rapport à la gravité, ce qui va dévier la balle en direction de cette force.

Résultats de l'analyse 3a: Deux tirs avec variation de l'emplacement de l'impact (v faible)

Vidéo	CIMG 2638		CIMG 2640	
Vitesse avant impact [m/s]	3.08		3.03	
Angle θ_1 avant l'impact [°]	87.58		89.33	
Point t_1 (x;y) [m]	1.039	1.178	1.098	1.001
Vitesse après l'impact	2.34		3.58	
Angle θ_2 après l'impact [°]	-18.97		-8.91	
Point t_2 après l'impact (x;y) [m]	1.088	1.113	1.252	0.872
Différence entre la théorie et la réalité [°]	3.45		11.76	

La première expérience, qui est décentré, a, pour un même angle de départ, une balle qui redescend beaucoup plus que celle de la deuxième expérience. C'est parce qu'elle est beaucoup plus haute dans le cadre, et donc que les sandows les plus proches d'elle auront une plus grande influence sur elle que les autres. Comme les forces exercées par les sandows dans le haut du cadre (qui ont une force dirigée vers le bas du cadre) sont plus élevées que celles exercées par les sandows du bas du cadre (qui ont une force dirigée vers le haut du cadre), la somme des forces sera dirigée légèrement contre le bas. Tous les sandows auront une influence égale sur un balle lancée en plein centre et donc la résultante de toutes les forces sera parallèle au cadre. On peut donc en déduire que plus elle sera lancée dans le bas du cadre, plus elle remontera.

Résultats de l'analyse 3b: Deux tirs avec variation de l'emplacement de l'impact (v élevée)

Vidéo	CIMG 2644		CIMG 2651	
Vitesse avant impact [m/s]	8.15		9.21	
Angle θ_1 avant l'impact [°]	87.24		87.62	
Point t_1 (x;y) [m]	1.049	1.161	1.138	0.980
Vitesse après l'impact	5.62		6.26	
Angle θ_2 après l'impact [°]	-0.86		1.85	
Point t_2 après l'impact (x;y) [m]	1.126	1.043	1.192	0.888
Différence entre la théorie et la réalité [°]	15.15		19.47	

On peut faire les mêmes constats que pour l'expérience 3b. De plus, en comparant les résultats de cette analyse avec ceux de la précédente, on peut confirmer notre analyse 2: plus la vitesse est élevée, plus la différence avec la théorie est importante.

Résultats de l'analyse 4a: Deux tirs avec variation de l'angle θ_1 (v élevée)

Vidéo	CIMG 2651		CIMG 2652	
Vitesse avant impact [m/s]	9.21		10.39	
Angle θ_1 avant l'impact [°]	87.62		31.01	
Point t_1 (x;y) [m]	1.138	0.980	1.165	0.952
Vitesse après l'impact	6.26		9.01	
Angle θ_2 après l'impact [°]	1.85		35.22	
Point t_2 après l'impact (x;y) [m]	1.192	0.888	1.141	0.939
Différence entre la théorie et la réalité [°]	19.47		3.77	

L'angle de la deuxième vidéo est presque perpendiculaire au cadre, tandis que sur la première pas du tout. Comme les autres facteurs ne varient pas ou peu, on peut en déduire que la différence entre la théorie et la réalité dépend aussi de l'angle. Plus on se rapproche de la perpendiculaire au cadre, moins il y aura de variation par rapport à la théorie. De plus la variation de vitesse est, elle aussi, bien différente: 30% de perte dans le premier cas et seulement 10% dans le deuxième. Tout cela est dû à la force de frottement qui est presque nulle dans le second cas car la balle ne roule pas le long du cadre comme elle le fait dans le premier. Elle se contente de s'enfoncer dans le cadre. Donc la force de frottement ne freine pas la balle ni ne modifie sa trajectoire.

Résultats de l'analyse 4b: Deux tirs avec variation de l'angle θ_1 (v faible)





Vidéo	CIMG 2640		CIMG 2647	
Vitesse avant impact [m/s]	3.03		5.82	
Angle θ_1 avant l'impact [°]	89.33		-12.72	
Point t_1 (x;y) [m]	1.098	1.001	1.138	0.980
Vitesse après l'impact	3.58		4.31	
Angle θ_2 après l'impact [°]	-8.91		67.53	
Point t_2 après l'impact (x;y) [m]	1.252	0.872	1.090	1.042
Différence entre la théorie et la réalité [°]	11.76		15.19	

Les angles paraissent très différents, et pourtant ils ne le sont pas tant que ça. Car par rapport au plan du cadre ils n'ont que 7° de différence, ce qui devrait avoir pour conséquence une différence pratiquement égale, mais pourtant elle n'est pas proche. En réalité c'est dû à la vitesse qui est loin d'être égale. Dans le second cas la vitesse, plus élevée, augmente l'erreur par rapport à la théorie, comme vu à la première expérience. On peut donc penser que si ces dernières avaient été égales, la différence d'angle entre la réalité et la théorie l'aurait aussi été.

Discussions des résultats

Analyse 1: Dix essais pour définir l'imprécision des points

L'écart type de l'erreur que j'ai pu commettre en plaçant les points est raisonnable, 3.2 millimètres en moyenne selon x et 2.8 selon y sur des points répartis dans un espace de 50 centimètres de côté. La plupart des écarts types selon x se situent entre 2.4 et 3.3 millimètres. Mais ce qui semble étonnant est que, au bout de 10 mesures, l'écart type de certains points ne dépasse pas 2.3 mm tandis que certains autres sont plus importants que 4.5 mm. Après avoir mesuré autant de points, l'écart type devrait presque être plus proche car je devrais avoir la même précision sur chaque point puisque les conditions de mesure sont les mêmes. On retrouve des résultats similaires selon y: beaucoup de résultats entre 2.1 et 3 millimètres mais toujours des écarts aussi importants: de 2 à 4.1 millimètres. Pour trouver la cause de ces différences, j'ai comparé les images de la vidéo sur lesquels l'écart type des points placés est faible à celles où il est plus élevé. Le résultat est surprenant:

	
<i>Fig 7: image de la vidéo ayant un écart type sur les points de 3.129mm selon x et 2.255mm selon y</i>	<i>Fig 8: image de la vidéo ayant un écart type sur les points de 3.110 mm selon x et 3.604mm selon y</i>
	
<i>Fig 9: image de la vidéo ayant un écart type sur les points de 2.976 mm selon x et 2.383mm selon y</i>	<i>Fig 10: image de la vidéo ayant un écart type sur les points de 4.562 mm selon x et 2.633mm selon y</i>

L'appareil photo ne donne pas toujours la même qualité d'image. Certaines fois l'image est plus nette que d'autre, ce qui explique la variation de l'écart type selon y. Par exemple entre les deux images en haut, la figure 7 est la plus nette, ce qui entraîne une erreur moins élevée que sur la figure 8. Pour l'axe x, il y a aussi un autre phénomène. L'appareil n'ayant pas une résolution assez élevée, l'image se pixelise, ce qui donne sur la figure 10, 5 ou 6 pixels à la même hauteur. Il est donc plus difficile de distinguer le point le plus haut de la balle qui s'avère être aussi le milieu de la balle selon x que sur la figure 9.

Cette différence sur les points entraîne une erreur sur l'angle θ . Si l'on applique l'erreur sur les points de la courbe avec l'impact comme suit, on pourra déterminer l'écart type sur l'angle de cette courbe:

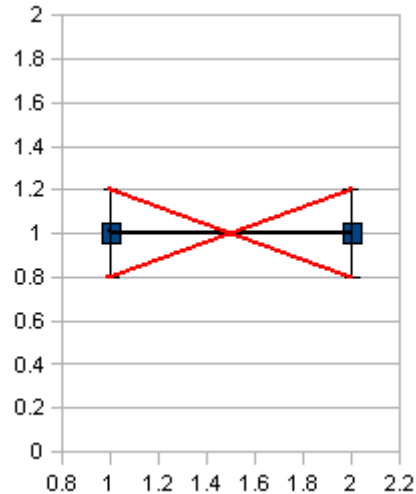


fig 11: exemple de l'influence de l'écart type sur 2 des points d'une courbe

Sur la figure 11, la droite reliant ces points est horizontale, mais si on applique une erreur sur les points, elle se répercute sur la courbe. Ainsi, avec ces deux points et leurs erreurs, on obtient une palette de courbes contenues entre les deux lignes rouges bien différentes de la ligne reliant ces deux points.

Si l'on applique cet écart type sur la courbe avant l'impact de la vidéo prise pour cette expérience (CIMG 2651) qui s'avère être quasiment verticale, le premier et le dernier point de cette droite sont distants selon y de 43 cm. L'écart type étant de 3.2 mm selon x sur chacun des points il peut y avoir une pente variant de $\tan(43/2*0.32) = 2.38^\circ$. Je vais prendre cet angle de référence comme erreur sur les différentes courbes lors des expériences. Car aucun des programmes essayés (graphical analysis 3.1, logger pro 3.2 et xmgrace) n'a été en mesure de prendre en compte l'erreur de mesure au moment de tracer la courbe du graphique de mes expériences. Cette courbe, tendant à être une droite linéaire, se prêtait facilement au calcul manuel de cette erreur.

Analyse 2: Deux tirs avec variation de vitesse

Premièrement, on voit qu'il y a une importante différence entre la théorie énoncée dans la citation de la problématique et la réalité. Respectivement 11.76° et 19.47° degré de différence. Même en y ajoutant le double de l'écart sur l'angle trouvé ci-dessus (car ces résultats sont issus de deux courbes différentes), on obtient : $11.76^\circ \pm 4.76^\circ$ et $19.47^\circ \pm 4.76^\circ$. A partir de ces résultats on peut déjà clairement mettre en doute l'affirmation de Mme Greber sur la symétrie des angles lors du rebond de la balle sur le cadre.

La balle lancée à une vitesse élevée perd $1/3$ de sa vitesse pendant l'impact, tandis que l'autre balle, arrivant sur la cadre avec une vitesse plus faible que la première, gagne $1/6$ de sa vitesse initiale. Cela peut s'expliquer par les forces agissant sur la balle durant l'impact avec le cadre. Il y a premièrement la force de gravité \vec{g} , dirigée à la verticale en direction du sol. La deuxième force agissant sur la balle est la force de frottement \vec{v} entre le revêtement de la balle et le filet du cadre de tchoukball. Cette force est parallèle à la tangente de la balle sur tous les points en contact avec le

filet du cadre et dans le sens inverse de la vitesse. La troisième force agissant sur la balle est la force de renvoi du cadre, dû aux sandows autour du cadre, similaire à un ressort \vec{n} .

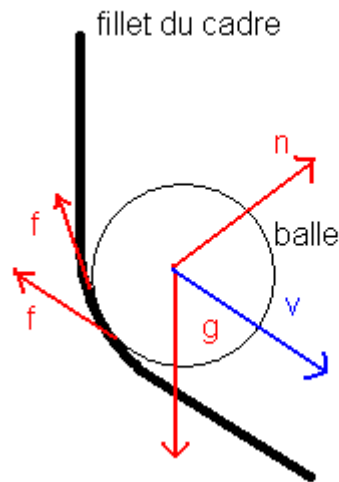


fig 12: exemple des forces agissant sur la balle lors du rebond

Dans un premier temps, en ralentissant la balle lorsqu'elle s'enfonce dans le cadre, la force n ne modifie pas la valeur de la vitesse. Dès qu'elle repart, une partie de cette vitesse est restituée à la balle jusqu'à ce que la balle ne soit plus en contact avec le cadre, mais il y a une légère perte d'énergie. La force de frottement f a pour conséquences le ralentissement de la balle, car elle est de sens contraire à la vitesse, et une modification de la rotation de la balle sur elle-même. Elle dépend des matériaux des surfaces en contact (ici le fillet et le cuir de la balle) mais aussi de la vitesse des objets en contact. La force de gravitation g , quant à elle, accélère la balle en direction du sol. Dans le cas de cette analyse, elle augmente sa vitesse. Dans le second cas, la balle, qui perd 1/3 de la vitesse, a une grande force de frottement car elle va vite ainsi que la force n exercée par les sandows sur la balle pour la freiner mais qui en lui restituant cette force, perd un peu d'énergie sous forme notamment de bruit. Certes il y a la force de gravitation qui l'accélère, mais celle-ci est plus faible que les deux autres forces réunies, c'est pourquoi elle perd de la vitesse. Par contre, lors du premier lancer, la force de frottement est beaucoup moins importante car la balle va moins vite et elle s'enfonce moins dans le cadre, la force de frottement agit donc sur une moins grande surface. C'est donc la gravité, plus importante que les deux autres forces, qui fera s'accélérer la balle.

Il est également intéressant de constater que plus la vitesse avant l'impact est élevée moins l'angle après l'impact est symétrique à celui avant l'impact. La balle ayant la plus grande vitesse avant l'impact a tendance à avoir un angle après l'impact plus proche de la norme du cadre que celui ayant une vitesse plus faible. Mais les deux droites ont un angle plus proche que celle de la théorie énoncé par la citation de Mme Greber.

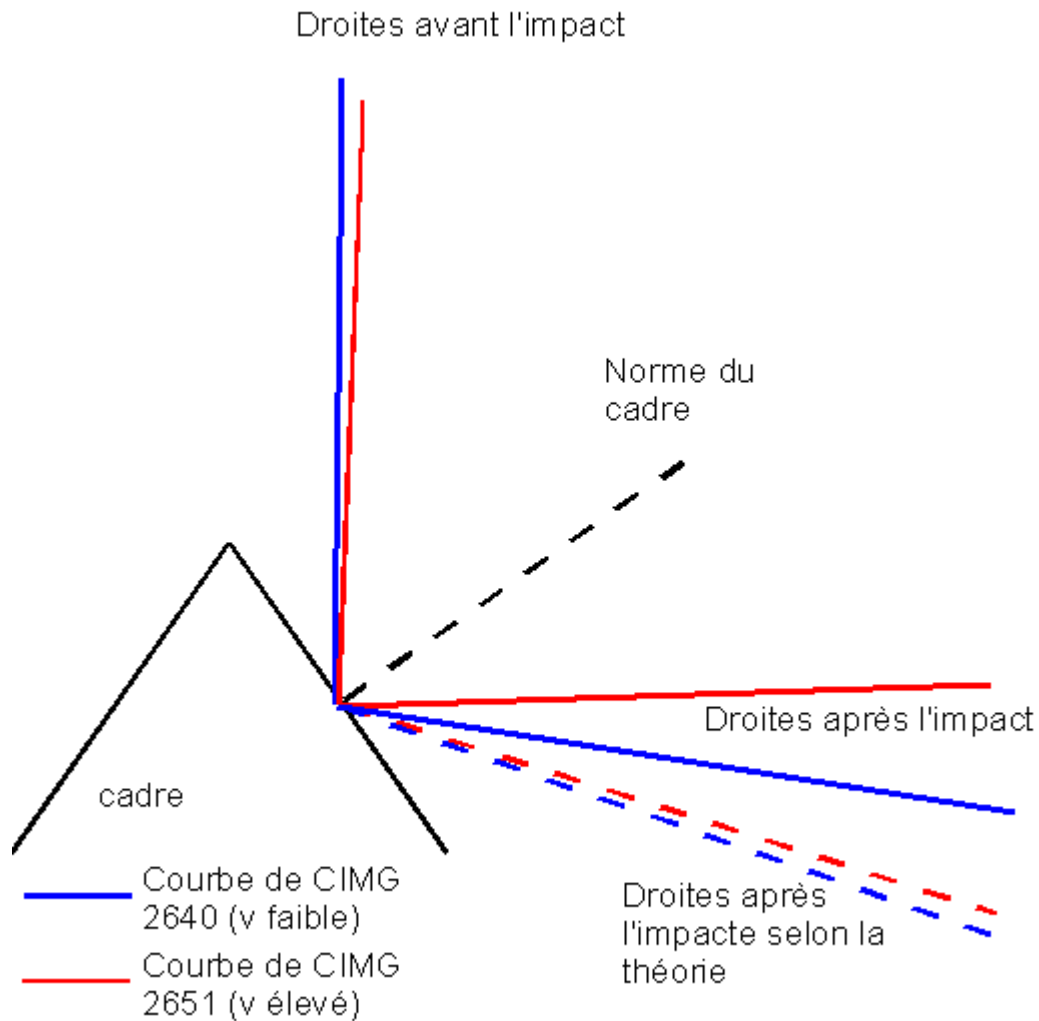


Fig 13: pentes des courbes décrites par la balle au temps t_1 et t_2 selon la vitesse

Ce phénomène associé à l'enfoncement de la balle dans le cadre est, selon l'hypothèse de David Sandoz, similaire à la réaction d'un ressort. La formule du ressort est $F=kd$. Ainsi la force libérée par le ressort lorsque la balle est propulsée hors du cadre vaut la constante d'élasticité du ressort multiplié par la distance de déformation. Donc, plus la balle aura de la vitesse, plus elle s'enfoncera dans le cadre de tchoukball. Ainsi n sera plus importante et aura tendance à modifier la résultante des forces dans sa direction. Donc, plus la vitesse de la balle est élevée au moment de l'impact, plus la trajectoire de la balle après l'impact sera proche de la force n dont le vecteur s'avère être contenu dans la norme du plan du cadre de tchoukball (fig 13).

Analyse 3a et b: Deux tirs avec variation de l'emplacement de l'impact

Dans les deux expériences, le tir qui se rapproche le plus du bord supérieur a tendance à avoir un angle plus petit que celui qui tape au centre du cadre. Cela est probablement dû à la tension plus élevée dans les sandows proches de la balle que ceux qui s'en trouvent plus éloignés. Ainsi une balle envoyée dans la partie supérieure du cadre aura tendance à descendre plus qu'une balle en plein centre. Alors qu'une balle envoyée dans la partie inférieure du cadre aura tendance à remonter plus

qu'une balle en plein centre. Ceci s'explique par le fait que la force est répartie inégalement sur la balle pendant l'impact:

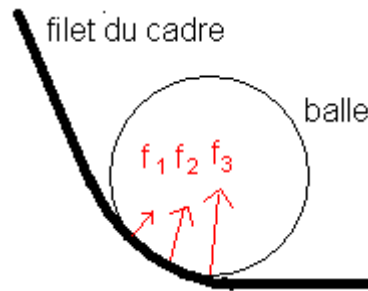


fig14: force normal agissant sur une balle lancée dans la partie inférieure du cadre

Dans ces deux cas, les mesures décentrées tendent vers un résultat plus proche de la théorie que ceux qui se trouvent au centre. Comme nous venons de le voir à la deuxième analyse, plus la vitesse est élevée, plus la courbe de la balle a tendance à se rapprocher de la norme et donc à s'éloigner de la théorie. Ce qui explique que les mesures de l'analyse 3b aient une différence plus grande avec la théorie que celles de l'analyse 3a. D'autre part, les balles touchant le cadre dans sa partie supérieure auront tendance à redescendre. C'est pourquoi leur trajectoires se rapprocheront plus de la théorie qu'une balle lancée de manière identique en tout point sauf en son emplacement qui s'avère être dans la partie supérieure du cadre. On peut dire que plus la balle s'approche d'un côté du cadre, plus elle aura tendance à avoir une trajectoire en direction du côté opposé du cadre, comme l'illustre ci-dessous un schéma possible de trois tirs n'ayant que l'emplacement sur le cadre qui varie (fig 15).

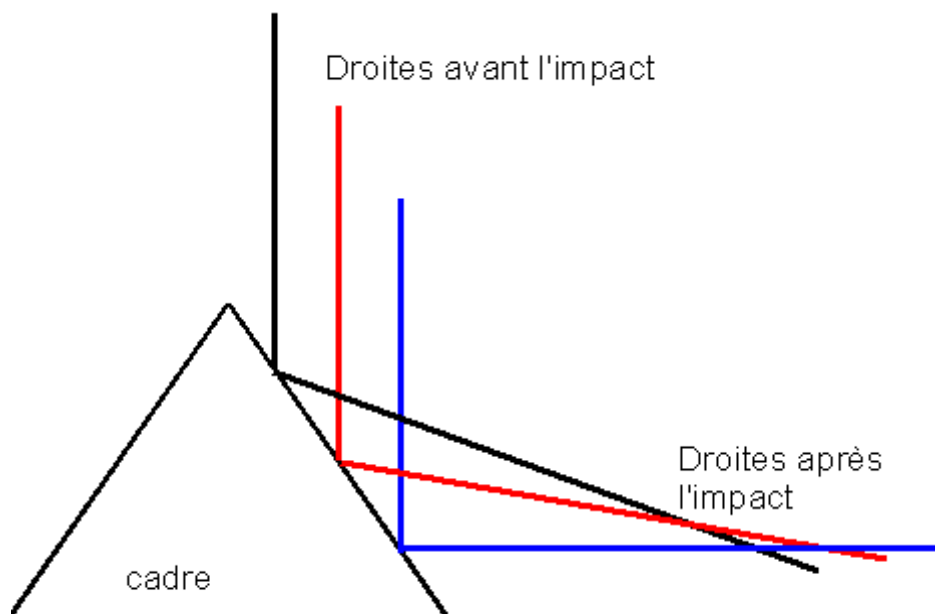


Fig 15: pentes des courbes décrites par la balle avant et après l'impact selon l'emplacement de l'impact

Analyse 4a: Deux tirs avec variation de l'angle θ_1 (v élevée)

Malgré sa vitesse élevée, une balle lancée presque parallèlement à la norme n'est que peu déviée par rapport à la théorie, de plus cette déviation peut être comprise dans l'erreur définie au premier point de l'analyse. Tandis que celle arrivant à 87.62° est beaucoup déviée. On peut en déduire que plus la différence entre l'angle initial et la norme est faible, moins la balle sera déviée, car cette balle n'a pas ou peu de frottement avec le cadre car elle arrive et repart perpendiculaire à ce dernier. D'autre part la force exercée par les sandows est parallèle à la norme du cadre, car, comme le montre l'analyse 3, une balle tirée en plein centre aura des forces s'équilibrant et donnant une résultante perpendiculaire au cadre. La balle ne sera donc déviée que par la gravité. Ca n'est pourtant pas suffisant pour faire dévier significativement notre projectile.

De plus, cette expérience nous démontre que les deux facteurs de déviation: la vitesse et l'angle θ_1 ne sont pas indépendants car sinon le deuxième tir, plus puissant que le premier, aurait été dévié par la vitesse comme je l'ai défini à la deuxième analyse. Si on établit une formule pour trouver θ_2 avec la vitesse v , les angles θ_2 et θ_1 et le reste des facteurs r , elle n'aura pas une allure $\theta_2 = \theta_1 + v + r$ mais plutôt $\theta_2 = \theta_1 \cdot v + r$ ou $\theta_2 = \theta_1 \cdot v \cdot r$

Pour ce qui est de la vitesse, la balle lancée parallèlement à la norme ne perd que 1/10 de sa vitesse tandis que l'autre en perd 1/3. Ce qui peut s'expliquer par la force de frottement. En effet, une balle arrivant perpendiculairement au cadre ne roulera pas ou peu sur la surface de rebond, contrairement à une balle ayant un angle avec la norme élevée, qui roulera beaucoup sur le cadre. Ce roulement de la balle, visible sur certaines vidéos, s'obtient par un frottement de la balle sur le filet du cadre. Cela démontre que la balle lancée avec un angle élevé perd beaucoup de vitesse, à cause de la force de frottement avec le cadre, car elle subit cette force de manière intense. Tandis que qu'une balle lancée perpendiculairement au cadre perdra peu de vitesse, car il y aura peu de frottements. Les 1/10 perdus par la deuxième balle ne sont donc pas issus de la force de frottement. Ils sont dus à une perte d'énergie lors du rebond. Une partie de l'énergie dégagée par la balle lors du rebond est transformée en une autre énergie car « rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme ». On peut observer cette perte d'énergie simplement par le bruit que produit la balle lorsqu'elle heurte le cadre de tchoukball. Car une partie de l'énergie cinétique de la balle se transforme en énergie sonore. En théorie, elle se transforme également notamment en énergie thermique, mais aucune mesure ou observation ne peut le certifier.

Analyse 4b: Deux tirs avec variation de l'angle θ_1 (v faible)

Les deux tirs ont un angle θ_1 très différents par rapport à l'horizontal (le sol), mais ils sont proches si on le calcule depuis la norme du cadre, à savoir respectivement 54.33° et 47.72° . Leur déviation respective par rapport à la théorie est pourtant bien différente: 11.76 et 15.19, mais cette différence est probablement due à leurs vitesses qui s'avèrent aussi être bien différentes: 0.303 et 0.582 m/s. Ce qui me permet d'affirmer que c'est la vitesse qui est la cause principale de cette différence. Si on compare cette vitesse à celles de la deuxième analyse, nous trouvons une vitesse de 0.921 pour une différence de 19.47° . Si l'on compare la différence entre les mesures des analyses 2 et 4b. On s'aperçoit que les vitesses des deux tirs de l'analyse 4b valent 48.38% de ceux de l'analyse 2. Tandis que pour la différence d'angle entre la théorie et la réalité on obtient 45.15%:

$$\frac{19.47 - 11.76}{15.19 - 11.76} = \frac{3.73}{7.71} = 0.483787$$

$$\frac{9.21 - 3.03}{5.82 - 3.03} = \frac{6.18}{2.79} = 0.451456$$

Ces deux résultats, presque identiques prouvent que la différence est presque entièrement due à la différence de vitesses et donc que pour deux angles différents selon l'horizontal, mais identiques selon la norme, la déviation par rapport à la théorie sera presque identique. Il y a toutefois une légère différence de ~3% sur nos deux calculs ci-dessus. Elle est probablement due à l'angle par rapport à la norme qui est légèrement différent (~6.5°).

A partir de ces résultats on peut aussi émettre l'hypothèse que la déviation est proportionnelle à la vitesse et donc que la partie de la formule prenant en compte la vitesse aura l'allure d'une fonction linéaire.

Quant à la vitesse, dans la première vidéo, elle croît pendant l'impact. C'est dû à la gravitation qui se trouve dans le même sens que la vitesse selon l'axe des x. Elle a pour effet d'accélérer la balle plus que ce que le frottement et la perte d'énergie la décélère. Alors que pour la deuxième vidéo, la vitesse de la balle, étant de sens contraire à la gravité selon l'axe x, décroît. Car, dans ce cas, la gravitation s'ajoute à la force de frottement et la perte d'énergie pour freiner la balle.

Comparaison des résultats

Après toutes ces expériences sur les facteurs isolés, nous allons tenter de trouver la formule du rebond d'une balle sur un cadre de tchoukball en réunissant tout ces facteurs. A cause du nombre limité d'expériences, cette formule restera probablement empirique et ne sera pas forcément complète. Ce sera néanmoins un pas supplémentaire dans l'analyse de ce phénomène et ce sera l'aboutissement de toutes ces expériences longuement menées.

On peut affirmer que la trajectoire de la balle après l'impact, comme l'affirme la théorie, est définie par la symétrie de la trajectoire avant l'impact, mais à cela vient s'ajouter une différence dépendant des facteurs analysés précédemment. Ainsi si on considère la norme du cadre comme l'angle 0, l'angle final θ_f dépend de l'angle initial de la balle θ_i auquel vient s'ajouter une différence qu'on nommera pour l'occasion $\Delta\theta$. On peut donc écrire l'équation.

$$\theta_f = -\theta_i + \Delta\theta$$

Mais la différence entre la théorie et la réalité $\Delta\theta$ dépend, comme détaillé ci-dessus, de la vitesse, de l'emplacement de l'impact et de la trajectoire initiale de la balle. Voici un bref condensé de ce que nous avons déduit des expériences:

- L'influence de la vitesse est linéaire
- La vitesse s'additionne à la différence entre le centre du cadre (c) et l'emplacement de l'impact (i)
- L'angle initial multiplie tous les autres facteurs

Suite à ces trois points principaux on peut poser l'équation:

$$\Delta\theta = \theta_i(v + (c - i))$$

Cependant, à cause du peu d'expériences, il n'a pas été défini si l'influence de l'angle initial et de l'emplacement était de type linéaire, exponentiel ou ressemblant à une autre fonction quelconque mathématique. C'est pourquoi j'ai placé deux inconnues a et b à la puissance de ces deux facteurs, de façon à n'exclure aucune éventualité:

$$\Delta\theta = \theta_i^a (v + (c-i)^b)$$

Comme unités, nous avons des mètres pour l'emplacement et pour la vitesse des mètres par seconde, il est nécessaire de placer une constante k , de façon à étalonner notre résultat par rapport au résultat recherché en degrés:

$$\Delta\theta = k\theta_i^a (v + (c-i)^b)$$

Pour finir, si l'on remplace la valeur de $\Delta\theta$ dans l'équation de base, on obtient:

$$\theta_f = -\theta_i + k\theta_i^a (v + (c-i)^b)$$

Même si cette équation ne tienne pas compte de la force de frottement et d'autres forces pouvant agir lors du rebond, nous allons tenter de trouver nos 3 inconnues a , b et k en utilisant trois mesures de trois vidéos différentes. Cependant l'endroit de l'impact sur le cadre n'est pas très précis sur les mesures, notamment car la balle ne touche pas en un seul point mais en plusieurs points différents. C'est pourquoi nous allons utiliser des vidéos où la balle a un impact pratiquement en plein centre, ce qui permettra de négliger l'emplacement de l'impact. Malheureusement cela aura pour conséquence l'impossibilité de résoudre l'équation pour b . Il n'y aura donc plus que deux inconnues.

$$\begin{array}{lll} \text{CIMG2640: } \theta_i = 54.33 & \theta_f = -43.91 & v = 3.03\text{m/s} \\ \text{CIMG2651: } \theta_i = 52.62 & \theta_f = -33.15 & v = 9.21\text{m/s} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} -43.91 = -54.33 + k \cdot 54.33^a (3.03 + (0)^b) \\ -33.15 = -52.62 + k \cdot 52.62^a (9.21 + (0)^b) \end{array}$$

Si on isole k dans la première équation l'on obtient:

$$k = \frac{43.91 - 54.33}{3.03 \cdot 54.33^a} = \frac{-10.42}{3.03 \cdot 54.33^a}$$

Ensuite on remplace k dans la deuxième équation:

$$-33.15 = -52.62 + \left(\frac{-10.42}{3.03 \cdot 54.33^a} \right) \cdot 52.62^a \cdot 3.03$$

On isole le a pour trouver sa valeur:

$$\begin{aligned} \left(\frac{-10.42}{3.03 \cdot 54.33^a}\right) \cdot 52.62^a \cdot 9.21 &= -19.47 \\ -95.968 \cdot \left(\frac{52.62}{54.33}\right)^a &= -19.47 \\ 95.968 \cdot 0.9685^a &= 19.47 \\ \log(95.968) + a \cdot \log(0.9685) &= \log(19.47) \\ a = \frac{\log(19.47) - \log(95.97)}{\log(0.9685)} &= 49.84 \end{aligned}$$

Pour finir on remplace le a trouvé dans l'équation du k

$$k = \frac{-10.42}{3.03 \cdot 54.33^{-19.53}} = -1.15 \cdot 10^{-86}$$

Pour vérifier si les résultats sont à peu près correct je vais résoudre l'équation avec deux autres courbes:

$$\begin{array}{llll} \text{CIMG2647} & \theta_i = -47.72 & \theta_f = 32.53 & v = 5.82\text{m/s} \\ \text{CIMG2652} & \theta_i = -3.99 & \theta_f = 0.22 & v = 10.39\text{m/s} \end{array}$$

$$\begin{aligned} 32.53 &= 47.72 + k \cdot 47.72^a (5.82 + (0)^b) \\ 0.22 &= 3.99 + k \cdot 3.99^a (10.39 + (0)^b) \end{aligned}$$

Et l'on obtient comme résultat:

$$\begin{aligned} a &= 0.79 \\ k &= 0.12 \end{aligned}$$

Ces résultats, très différents, prouvent, dans le meilleur des cas, que l'emplacement de l'impact n'est pas égal partout. Ils peuvent aussi signifier que la formule n'est pas complète. En effet nous n'avons pas pris en compte la force de frottement et il n'est pas impossible que d'autres forces agissent sur la balle. Dans le pire des cas, cela peut signifier que la formule est fautive, ce qui semble étonnant car tout laisse à penser qu'elle dépend principalement des trois facteurs étudiés.

Conclusion

Synthèse des résultats

Après ces quatre expériences, nous avons déjà pu isoler trois facteurs principaux qui régissent la trajectoire de la balle après l'impact. A savoir la vitesse initiale, l'angle initial avec la norme du cadre et l'emplacement de l'impact sur le cadre. Un quatrième facteur a été observé lors de l'expérience 4a mais n'a pas pu être mesuré: la force de frottement. Ainsi il a été possible de conclure l'importance de ces trois facteurs et d'esquisser une formule régissant le rebond de la balle. Grâce à la première expérience, nous avons pu mesurer une marge d'erreur sur les mesures. Elle influençait les résultats, mais pas énormément car elle ne représentait que 25% de l'erreur par rapport à la théorie de certaines expériences. De plus comme nos expériences étaient répétées trois fois, l'erreur était significativement réduite.

Lors de la seconde expérience, nous avons pu observer l'influence de la vitesse sur la trajectoire de la balle après l'impact. Plus la vitesse de la balle était élevée, plus la trajectoire de la balle se rapprochait de la norme du cadre. Avec la quatrième expérience nous avons observé que la déviation de la balle en fonction de la vitesse était linéaire. Le facteur vitesse s'applique quelque soit l'emplacement de l'impact sur le cadre, nous ont démontré les expériences 3a et 3b.

Grâce à la troisième expérience, nous avons pu observer que la déviation de la balle par rapport à la théorie de madame Greber dépend également de l'emplacement de l'impact sur le cadre. Plus l'emplacement de l'impact est proche d'une portion de sandows, plus la trajectoire repartira à l'opposée du cadre. Cette loi n'est pas proportionnelle à la vitesse car lors de l'analyse de la troisième expérience nous avons pu observer que plus l'impact était dans le haut du cadre, plus le résultat était proche de la théorie de madame Graber. Il semble donc réaliste de prétendre que ce soit une soustraction entre la vitesse et la hauteur de la balle dans le cadre. Cependant, lorsque la balle tape le bas du cadre, elle aura tendance à remonter. En réalité il s'agit donc d'une addition de la différence entre le centre du cadre et l'emplacement de l'impact de la balle.

La quatrième expérience nous a démontré que plus l'angle entre la norme du cadre et la trajectoire de la balle était élevé, plus la déviation de la balle par rapport à la théorie de madame Greber se faisait ressentir. Il s'agirait donc d'une multiplication des facteurs précédents.

Suite à ces analyses, nous avons essayer de trouver la formule régissant le rebond sur le cadre d'une balle de tchoukball. Toutefois, une fois appliquée aux résultats obtenus lors des expériences, elle ne correspondait pas d'une expérience à l'autre. Ce qui nous démontre que soit cette formule n'est pas la bonne, soit il manque certains paramètres cruciaux pour qu'elle soit exacte.

Bilan critique du travail

Je suis dans l'ensemble très satisfait de ce travail. Mon objectif premier, consistant à affirmer ou à réfuter l'affirmation de Mme Greber à été parfaitement rempli et j'ai même pu aller plus loin en essayant de trouver les facteurs principaux qui régissaient le rebond de la balle et en esquisser une formule. Toutefois j'ai perdu un peu de temps au début en essayant d'analyser mes courbes et leurs angles non pas par la première dérivée mais en reliant les points les uns aux autres. Ce temps aurait pu m'être utile notamment pour analyser une septième vidéo d'un tir dans la partie inférieure du cadre pour compléter et confirmer mon analyse 3. J'aurais aussi pu tenter de faire ou de refaire l'expérience en plaçant l'appareil photo au dessus du cadre et ainsi pouvoir observer les dimensions x et y en négligeant z et la gravité. Cependant je ne l'ai pas fait car le cadre de tchoukball étant conçu de manière symétrique, le rebond selon y et z doit être le même que celui selon x et y . J'aurais

aimé pouvoir prendre en compte la force de frottement en faisant une expérience en ne faisant varier que la balle et sa texture. Mais je ne me suis rendu compte de l'importance de cette force qu'au moment de la rédaction de l'analyse de ce travail et il était trop tard pour recommencer les expériences. J'aurais aussi dû mettre un fond uni lors de l'expérience pour mieux distinguer la balle et ainsi avoir une erreur de mesure plus faible. Au final, l'erreur obtenue est satisfaisante par rapport aux mesures obtenues. Un écart type plus faible aurait plus été un perfectionnement qu'une nécessité.

J'ai toutefois le regret de ne pas avoir pu trouver une formule satisfaisante du rebond de la balle sur le cadre de tchoukball, mais ce n'est que partie remise.

Perspectives ultérieures

Il y a certains points que l'on pourrait traiter ou approfondir quant au rebond d'une balle sur un cadre de tchoukball et que je n'ai pas traité dans ce travail de maturité principalement par sélection mais aussi par manque de temps ou de matériel. En voici quelques uns.

-Prendre en compte le frottement d'une balle plus précisément en utilisant différentes balles plus neuves ou plus usées de la même manière que les différents facteurs que j'ai analysé durant ce travail.

-Étudier les moments de forces agissants sur la balle lors de l'impact.

-Utiliser différentes caméras sous différents angles pour analyser et reproduire par informatique le mouvement d'une balle de tchoukball en 3 dimensions. De la même manière que le challenge que peuvent réclamer les joueurs de tennis lors d'incertitudes sur le jugement de l'arbitre.

-Essayer de varier l'inclinaison du cadre pour voir si il serait plus intéressant pour le jeu d'avoir un angle différent. Car lors de sa conception, le choix de l'angle de 55° du cadre a été décidé par affinité des joueurs et non par une analyse des différents mouvements décrits par la balle selon l'angle adopté.

-comparer les rebonds de la balle sur le filet du cadre aux rebonds sur la partie métallique pour voir si les fautes de cadre sont toujours justifiées, car les arbitres se réfèrent à la trajectoire de la balle pour décider si il y a eu une faute de cadre ou non. Mais comme nous venons de le voir, cette trajectoire peut passablement varier selon les tirs.

Mais la perspective primordiale à ce travail de maturité est bel et bien la résolution de la formule du rebond de la balle sur la cadre de tchoukball et elle risque de nous donner encore bien du fil à retordre.

Bibliographie

Par ordre alphabétique

- GREBER Carole, *Comprendre et enseigner le tchoukball*, Haute école fédérale de sport, Macolin 2005
- OMPI, *Règlement d'utilisation de la marque « tchoukball »*, Enregistrement suisse N°474411, 20 janvier 2000
- SANDOZ, David, *Le rebond droit d'une balle sur un cadre de tchoukball*, La Chaux-de-Fonds, 25 janvier 2008
- site de l'OFSPPO, <http://www.baspo.admin.ch/internet/baspo/fr/home.html>, [consulté le 14 décembre 2008]
- site de tchoukball promotion, <http://tchoukballpromotion.ch/images/cadre.jpg> [consulté le 24 janvier 2009]

Annexes

Annexe 1: Mesures et résultats

Mesures de l'analyse 1: Dix essais pour définir l'imprécision des points

Temps mesure	Selon x										Moyenne	écart type
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.0701	1.1154	1.1060	1.1162	1.1153	1.1148	1.1182	1.1182	1.1202	1.1170	1.1134	1.1154	0.003669
0.0734	1.1154	1.1096	1.1162	1.1153	1.1148	1.1182	1.1164	1.1202	1.1170	1.1134	1.1156	0.002689
0.0767	1.1154	1.1078	1.1144	1.1135	1.1130	1.1164	1.1145	1.1183	1.1170	1.1116	1.1142	0.002853
0.0801	1.1154	1.1060	1.1126	1.1117	1.1130	1.1146	1.1127	1.1183	1.1152	1.1116	1.1131	0.003082
0.0834	1.1154	1.1060	1.1108	1.1117	1.1112	1.1129	1.1127	1.1165	1.1135	1.1098	1.1120	0.002800
0.0868	1.1154	1.1060	1.1108	1.1099	1.1094	1.1129	1.1127	1.1147	1.1135	1.1098	1.1115	0.002704
0.0901	1.1154	1.1042	1.1090	1.1099	1.1076	1.1111	1.1109	1.1129	1.1117	1.1081	1.1101	0.002939
0.0934	1.1136	1.1024	1.1072	1.1081	1.1076	1.1093	1.1091	1.1110	1.1099	1.1063	1.1084	0.002838
0.0968	1.1100	1.1006	1.1054	1.1064	1.1058	1.1075	1.1091	1.1092	1.1099	1.1045	1.1068	0.002809
0.1001	1.1082	1.0988	1.1035	1.1046	1.1058	1.1058	1.1091	1.1074	1.1081	1.1027	1.1054	0.002976
0.1034	1.1082	1.0969	1.1017	1.1028	1.1040	1.1040	1.1073	1.1055	1.1064	1.1010	1.1038	0.003186
0.1068	1.1029	1.0951	1.0999	1.1010	1.1023	1.1022	1.1054	1.1037	1.1064	1.1010	1.1020	0.002967
0.1101	1.1029	1.0951	1.0999	1.0992	1.1023	1.1022	1.1036	1.1037	1.1046	1.0992	1.1013	0.002732
0.1134	1.1011	1.0933	1.0999	1.0975	1.1005	1.1004	1.1036	1.1019	1.1046	1.0974	1.1000	0.003110
0.1168	1.0993	1.0951	1.0999	1.0975	1.0987	1.0987	1.1018	1.1019	1.1046	1.0974	1.0995	0.002565
0.1201	1.0957	1.0951	1.0981	1.0957	1.0969	1.0987	1.1018	1.1000	1.1028	1.0957	1.0981	0.002600
0.1235	1.0975	1.0969	1.0981	1.0939	1.0969	1.0969	1.1000	1.1000	1.1010	1.0939	1.0975	0.002285
0.1268	1.0993	1.0969	1.0999	1.0957	1.0969	1.0969	1.0982	1.1000	1.1010	1.0939	1.0979	0.002102
0.1301	1.1011	1.1006	1.1017	1.0992	1.0969	1.0987	1.0982	1.1019	1.1028	1.0957	1.0997	0.002207
0.1335	1.1082	1.1042	1.1054	1.1064	1.1005	1.1058	1.1036	1.1092	1.1046	1.1027	1.1050	0.002425
0.1368	1.1190	1.1132	1.1126	1.1170	1.1130	1.1164	1.1182	1.1202	1.1188	1.1151	1.1163	0.002611
0.1401	1.1369	1.1295	1.1306	1.1313	1.1308	1.1342	1.1345	1.1366	1.1313	1.1275	1.1323	0.002934
0.1435	1.1530	1.1476	1.1523	1.1508	1.1505	1.1537	1.1527	1.1568	1.1508	1.1487	1.1517	0.002478
0.1468	1.1745	1.1675	1.1722	1.1704	1.1719	1.1732	1.1764	1.1769	1.1757	1.1717	1.1730	0.002764
0.1502	1.1942	1.1893	1.1939	1.1935	1.1916	1.1963	1.1982	1.1971	1.1935	1.1911	1.1938	0.002623
0.1535	1.2139	1.2092	1.2137	1.2131	1.2130	1.2176	1.2182	1.2190	1.2166	1.2123	1.2147	0.002933
0.1568	1.2336	1.2309	1.2354	1.2344	1.2345	1.2389	1.2364	1.2391	1.2380	1.2335	1.2355	0.002505
0.1602	1.2622	1.2508	1.2535	1.2558	1.2559	1.2602	1.2582	1.2593	1.2611	1.2565	1.2573	0.003367
0.1635	1.2801	1.2707	1.2769	1.2771	1.2756	1.2797	1.2782	1.2812	1.2824	1.2777	1.2780	0.003140
0.1668	1.2962	1.2852	1.2968	1.2949	1.2952	1.2974	1.2982	1.3014	1.3020	1.2954	1.2963	0.004367
0.1702	1.3195	1.3051	1.3149	1.3145	1.3131	1.3170	1.3182	1.3215	1.3216	1.3148	1.3160	0.004600
0.1735	1.3392	1.3305	1.3402	1.3358	1.3345	1.3383	1.3418	1.3435	1.3411	1.3378	1.3383	0.003659
0.1768	1.3607	1.3486	1.3618	1.3554	1.3559	1.3578	1.3618	1.3636	1.3607	1.3572	1.3584	0.004181
0.1802	1.3822	1.3703	1.3799	1.3749	1.3774	1.3773	1.3836	1.3837	1.3803	1.3767	1.3786	0.003980
0.1835	1.4001	1.3866	1.3998	1.3963	1.3970	1.3968	1.4036	1.4021	1.4016	1.3961	1.3980	0.004562
0.1869	1.4215	1.4119	1.4196	1.4159	1.4167	1.4181	1.4218	1.4222	1.4194	1.4155	1.4183	0.003128
0.1902	1.4377	1.4300	1.4413	1.4372	1.4381	1.4394	1.4418	1.4423	1.4407	1.4368	1.4385	0.003419
0.1935	1.4627	1.4517	1.4648	1.4603	1.4596	1.4625	1.4636	1.4661	1.4603	1.4580	1.4610	0.003881
0.1969	1.4842	1.4735	1.4828	1.4799	1.4810	1.4838	1.4854	1.4881	1.4834	1.4792	1.4821	0.003822
0.2002	1.5039	1.4916	1.5027	1.5012	1.5006	1.5051	1.5073	1.5082	1.5066	1.4986	1.5026	0.004697
0.2035	1.5218	1.5097	1.5226	1.5208	1.5203	1.5246	1.5254	1.5265	1.5261	1.5180	1.5216	0.004767
0.2069	1.5433	1.5314	1.5424	1.5439	1.5417	1.5442	1.5436	1.5466	1.5439	1.5393	1.5420	0.003981
										moyenne	1.2219	0.0032
										minimum	1.0975	0.0021
										maximum	1.5420	0.0048

Time	selon y												
mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne	écart type	
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
0.0701	1.4609	1.4554	1.4594	1.4621	1.4649	1.4643	1.4673	1.4679	1.4639	1.4597	1.4626	0.003667	
0.0734	1.4287	1.4228	1.4287	1.4301	1.4328	1.4306	1.4345	1.4350	1.4301	1.4262	1.4299	0.003522	
0.0767	1.4001	1.3902	1.3943	1.3963	1.3988	1.3968	1.4000	1.4002	1.3981	1.3926	1.3967	0.003256	
0.0801	1.3643	1.3558	1.3618	1.3625	1.3649	1.3649	1.3673	1.3691	1.3643	1.3590	1.3634	0.003660	
0.0834	1.3320	1.3196	1.3257	1.3287	1.3309	1.3276	1.3309	1.3343	1.3287	1.3254	1.3284	0.003943	
0.0868	1.2980	1.2852	1.2914	1.2949	1.2970	1.2957	1.3000	1.2996	1.2949	1.2936	1.2950	0.004125	
0.0901	1.2640	1.2562	1.2589	1.2629	1.2648	1.2619	1.2673	1.2684	1.2629	1.2600	1.2627	0.003524	
0.0934	1.2318	1.2237	1.2282	1.2309	1.2327	1.2318	1.2345	1.2355	1.2309	1.2265	1.2306	0.003434	
0.0968	1.1995	1.1911	1.1993	1.1989	1.2005	1.1998	1.2000	1.2025	1.2024	1.1946	1.1989	0.003319	
0.1001	1.1691	1.1621	1.1668	1.1668	1.1666	1.1679	1.1691	1.1696	1.1704	1.1646	1.1673	0.002383	
0.1034	1.1333	1.1277	1.1288	1.1330	1.1344	1.1342	1.1345	1.1366	1.1330	1.1293	1.1325	0.002753	
0.1068	1.1047	1.0933	1.0963	1.1010	1.1023	1.1022	1.1036	1.1055	1.1028	1.0992	1.1011	0.003620	
0.1101	1.0671	1.0607	1.0638	1.0672	1.0665	1.0667	1.0691	1.0744	1.0672	1.0656	1.0668	0.003328	
0.1134	1.0348	1.0300	1.0313	1.0352	1.0380	1.0348	1.0382	1.0433	1.0334	1.0338	1.0353	0.003604	
0.1168	1.0044	0.9974	1.0024	1.0032	1.0040	1.0028	1.0073	1.0085	1.0032	1.0002	1.0033	0.003001	
0.1201	0.9757	0.9684	0.9717	0.9747	0.9754	0.9726	0.9764	0.9774	0.9712	0.9720	0.9736	0.002668	
0.1235	0.9507	0.9413	0.9446	0.9481	0.9486	0.9478	0.9509	0.9518	0.9463	0.9455	0.9475	0.003074	
0.1268	0.9292	0.9232	0.9265	0.9285	0.9308	0.9283	0.9309	0.9335	0.9285	0.9260	0.9285	0.002730	
0.1301	0.9149	0.9105	0.9139	0.9143	0.9147	0.9158	0.9164	0.9188	0.9160	0.9137	0.9149	0.002053	
0.1335	0.9059	0.8996	0.9031	0.9036	0.9040	0.9034	0.9036	0.9079	0.9036	0.9031	0.9038	0.001991	
0.1368	0.8988	0.8942	0.8958	0.8982	0.8986	0.8999	0.9000	0.9024	0.8982	0.8960	0.8982	0.002241	
0.1401	0.8952	0.8888	0.8922	0.8947	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8929	0.8924	0.8939	0.002257	
0.1435	0.8916	0.8852	0.8904	0.8894	0.8932	0.8910	0.8945	0.8950	0.8894	0.8889	0.8909	0.002798	
0.1468	0.8898	0.8852	0.8904	0.8894	0.8932	0.8910	0.8927	0.8932	0.8911	0.8889	0.8905	0.002309	
0.1502	0.8898	0.8852	0.8904	0.8894	0.8932	0.8910	0.8945	0.8950	0.8911	0.8889	0.8909	0.002769	
0.1535	0.8916	0.8870	0.8922	0.8894	0.8932	0.8910	0.8945	0.8950	0.8911	0.8889	0.8914	0.002397	
0.1568	0.8916	0.8852	0.8940	0.8911	0.8932	0.8928	0.8964	0.8950	0.8911	0.8907	0.8921	0.002909	
0.1602	0.8934	0.8852	0.8940	0.8911	0.8950	0.8945	0.8964	0.8950	0.8929	0.8907	0.8928	0.003053	
0.1635	0.8952	0.8870	0.8940	0.8929	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8939	0.002645	
0.1668	0.8952	0.8888	0.8940	0.8947	0.8968	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002283	
0.1702	0.8952	0.8888	0.8940	0.8947	0.8968	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002283	
0.1735	0.8952	0.8888	0.8940	0.8947	0.8968	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002283	
0.1768	0.8952	0.8888	0.8940	0.8947	0.8968	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002283	
0.1802	0.8952	0.8870	0.8940	0.8947	0.8968	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8943	0.002749	
0.1835	0.8952	0.8870	0.8940	0.8947	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8941	0.002632	
0.1869	0.8952	0.8888	0.8940	0.8965	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002255	
0.1902	0.8952	0.8888	0.8940	0.8965	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002255	
0.1935	0.8970	0.8888	0.8922	0.8965	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002479	
0.1969	0.8952	0.8888	0.8940	0.8965	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002255	
0.2002	0.8934	0.8888	0.8940	0.8965	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8943	0.002261	
0.2035	0.8952	0.8888	0.8958	0.8947	0.8950	0.8945	0.8964	0.8969	0.8947	0.8924	0.8944	0.002205	
0.2069	0.8934	0.8870	0.8940	0.8929	0.8932	0.8945	0.8945	0.8950	0.8929	0.8907	0.8928	0.002273	
										moyenne	1.0191	0.0028	
										minimum	0.8905	0.0020	
										maximum	1.4626	0.0041	

Mesures simplifiées de l'analyse

	CIMG2638								
	Mesure 1			Mesure 2			Mesure 3		
	t	x	y	t	x	y	t	x	y
premier point d'impact ($t_1; x_1; y_1$)	1.5349	1.0428	1.1801	1.5349	1.0420	1.1799	1.5349	1.0334	1.1740
dernier point d'impact ($t_2; x_2; y_2$)	1.9353	1.0874	1.1141	1.9353	1.0921	1.1136	1.9353	1.0850	1.1099
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
courbe avant l'impacte ($y_1=ax_1^2+bx_1+c$)		-20.39	22.49		-22.56	24.71		-29.99	32.18
courbe après l'impacte ($y_1=ax_2^2+bx_2+c$)	-0.9413	1.7230	0.3577	-0.9126	1.6340	0.4206	-0.9349	1.6810	0.3903
	p			p			p		
pende juste avant l'impacte ($p_1=y_1'=2ax_1+b$)	-20.3900			-22.5600			-29.9900		
pende juste après l'impacte ($p_2=y_2'=2ax_2+b$)	-0.3241			-0.3594			-0.3478		
	Φ			Φ			Φ		
angle avant l'impacte $\theta_1=\arctan(p_1)$	-87.1923			-87.4620			-88.0902		
angle après l'impacte $\theta_2=\arctan(p_2)$	-17.9586			-19.7662			-19.1773		
Δ angle avant selon la norme du cadre ($\alpha_1=35-\theta_1$)	122.1923			122.4620			123.0902		
Δ angle après selon la norme du cadre ($\alpha_2=35-\theta_2$)	52.9586			54.7662			54.1773		
Δ différence norme-trajectoire ($\alpha_1+\alpha_2=\beta$)	175.15			177.23			177.27		
	CIMG2640								
	Mesure 1			Mesure 2			Mesure 3		
	t	x	y	t	x	y	t	x	y
premier point d'impact ($t_1; x_1; y_1$)	1.8018	1.1985	0.9534	1.8018	1.1950	0.9479	1.8018	1.1979	0.9537
dernier point d'impact ($t_2; x_2; y_2$)	2.2356	1.2543	0.8759	2.2356	1.2475	0.8673	2.2356	1.2532	0.8717
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
courbe avant l'impacte ($y_1=ax_1^2+bx_1+c$)		-79.56	96.36		-80.67	97.40		-100.90	121.90
courbe après l'impacte ($y_1=ax_2^2+bx_2+c$)	-0.8011	1.8690	-0.2060	-0.4175	0.8516	4.4586	-0.6255	1.4280	0.0671
	p			p			p		
pende juste avant l'impacte ($p_1=y_1'=2ax_1+b$)	-79.5600			-80.6700			-100.9000		
pende juste après l'impacte ($p_2=y_2'=2ax_2+b$)	-0.1407			-0.1901			-0.1397		
	θ			θ			θ		
angle avant l'impacte $\theta_1=\arctan(p_1)$	90.7201			90.7102			90.5678		
angle après l'impacte $\theta_2=\arctan(p_2)$	-8.0073			-10.7623			-7.9538		
Δ angle avant selon la norme du cadre ($\alpha_1=35-\theta_1$)	-55.7201			-55.7102			-55.5678		
Δ angle après selon la norme du cadre ($\alpha_2=35-\theta_2$)	43.0073			45.7623			42.9538		
Δ différence norme-trajectoire ($\alpha_1+\alpha_2=\beta$)	12.71			9.95			12.61		
	CIMG2644								
	Mesure 1			Mesure 2			Mesure 3		
	t	x	y	t	x	y	t	x	y
premier point d'impact ($t_1; x_1; y_1$)	0.3340	1.0444	1.1565	0.3340	1.0538	1.1640	0.3340	1.0501	1.1612
dernier point d'impact ($t_2; x_2; y_2$)	0.6680	1.1245	1.0390	0.6680	1.1264	1.0458	0.6680	1.1268	1.0448
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
courbe avant l'impacte ($y_1=ax_1^2+bx_1+c$)		16.93	-16.55		21.45	-21.44		25.57	-25.71
courbe après l'impacte ($y_1=ax_2^2+bx_2+c$)	-0.1885	0.4069	0.8203	-0.1525	0.3086	0.8919	-0.1481	0.2954	0.8981
	p			p			p		
pende juste avant l'impacte ($p_1=y_1'=2ax_1+b$)	16.9300			21.4500			25.5700		
pende juste après l'impacte ($p_2=y_2'=2ax_2+b$)	-0.0170			-0.0349			-0.0384		
	Φ			Φ			Φ		
angle avant l'impacte $\theta_1=\arctan(p_1)$	86.6197			87.3308			87.7604		
angle après l'impacte $\theta_2=\arctan(p_2)$	-0.9758			-2.0016			-2.1974		
Δ angle avant selon la norme du cadre ($\alpha_1=35-\theta_1$)	-51.6197			-52.3308			-52.7604		
Δ angle après selon la norme du cadre ($\alpha_2=35-\theta_2$)	35.9758			37.0016			37.1974		
Δ différence norme-trajectoire ($\alpha_1+\alpha_2=\beta$)	-15.64			-15.33			-15.56		

	CIMG2647								
	Mesure 1			Mesure 2			Mesure 3		
	t	x	y	t	x	y	t	x	y
premier point d'impact ($t_1; x_1; y_1$)	0.9676	1.1397	0.9789	0.9676	1.1362	0.9808	0.9676	1.1390	0.9804
dernier point d'impact ($t_2; x_2; y_2$)	1.2679	1.0891	1.0422	1.2679	1.0880	1.0415	1.2679	1.0939	1.0435
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
courbe avant l'impacte ($y_1=ax_1^2+bx_1+c$)	-0.1427	0.1061	1.0440	-0.1197	0.0375	1.0930	-0.1446	0.1060	1.0490
courbe après l'impacte ($y_1=ax_2^2+bx_2+c$)	-1.2330	5.1320	-3.0870	-1.3330	5.3210	-3.1640	-1.1860	4.9820	-2.9720
	p			p			p		
pente juste avant l'impacte ($p_1=y_1'=2ax_1+b$)	-0.2192			-0.2345			-0.2234		
pente juste après l'impacte ($p_2=y_2'=2ax_2+b$)	2.4462			2.4205			2.3872		
	Φ			Φ			Φ		
angle avant l'impacte $\theta_1=\arctan(p_1)$	-12.3620			-13.1976			-12.5928		
angle après l'impacte $\theta_2=\arctan(p_2)$	67.7656			67.5528			67.2711		
Δ angle avant selon la norme du cadre ($\alpha_1=35-\theta_1$)	47.3620			48.1976			47.5928		
Δ angle après selon la norme du cadre ($\alpha_2=35-\theta_2$)	-32.7656			-32.5528			-32.2711		
Δ différence norme-trajectoire ($\alpha_1+\alpha_2=\beta$)	14.6			15.64			15.32		

	CIMG2651								
	Mesure 1			Mesure 2			Mesure 3		
	t	x	y	t	x	y	t	x	y
premier point d'impact ($t_1; x_1; y_1$)	1.1678	1.0993	1.0044	1.1678	1.0951	0.9974	1.1678	1.0999	1.0024
dernier point d'impact ($t_2; x_2; y_2$)	1.5015	1.1942	0.8898	1.5015	1.1893	0.8852	1.5015	1.1939	0.8904
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
courbe avant l'impacte ($y_1=ax_1^2+bx_1+c$)		25	-27		24.6	-25.9		22.6600	23.8500
courbe après l'impacte ($y_1=ax_2^2+bx_2+c$)	-0.1469	0.4091	0.6112	-0.0611	0.1741	0.7647	-0.0252	0.0706	0.8448
	p			p			p		
pente juste avant l'impacte ($p_1=y_1'=2ax_1+b$)	25.1700			24.6300			22.6600		
pente juste après l'impacte ($p_2=y_2'=2ax_2+b$)	0.0583			0.0282			0.0104		
	θ			θ			θ		
angle avant l'impacte $\theta_1=\arctan(p_1)$	87.7248			87.6750			87.4731		
angle après l'impacte $\theta_2=\arctan(p_2)$	3.3339			1.6132			0.5937		
Δ angle avant selon la norme du cadre ($\alpha_1=35-\theta_1$)	-52.7248			-52.6750			-52.4731		
Δ angle après selon la norme du cadre ($\alpha_2=35-\theta_2$)	31.6661			33.3868			34.4063		
Δ différence norme-trajectoire ($\alpha_1+\alpha_2=\beta$)	21.06			19.29			18.07		

	CIMG2652								
	Mesure 1			Mesure 2			Mesure 3		
	t	x	y	t	x	y	t	x	y
premier point d'impact ($t_1; x_1; y_1$)	0.4338	1.1661	0.9513	0.4338	1.1620	0.9525	0.4338	1.1678	0.9531
dernier point d'impact ($t_2; x_2; y_2$)	0.7674	1.1430	0.9389	0.7674	1.1369	0.9382	0.7674	1.1430	0.9407
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
courbe avant l'impacte ($y_1=ax_1^2+bx_1+c$)	-0.0505	0.7189	0.1818	-0.0578	0.7409	0.1691	-0.0271	0.6598	0.2199
courbe après l'impacte ($y_1=ax_2^2+bx_2+c$)	-0.0251	0.7540	0.1122	-0.0489	0.8216	0.0670	-0.0665	0.8639	0.0431
	p			p			p		
pente juste avant l'impacte ($p_1=y_1'=2ax_1+b$)	0.6012			0.6060			0.5964		
pente juste après l'impacte ($p_2=y_2'=2ax_2+b$)	0.6966			0.7098			0.7118		
	Φ			Φ			Φ		
angle avant l'impacte $\theta_1=\arctan(p_1)$	31.0131			31.2145			30.8123		
angle après l'impacte $\theta_2=\arctan(p_2)$	34.8610			35.3660			35.4447		
Δ angle avant selon la norme du cadre ($\alpha_1=35-\theta_1$)	3.9869			3.7855			4.1877		
Δ angle après selon la norme du cadre ($\alpha_2=35-\theta_2$)	0.1390			-0.3660			-0.4447		
Δ différence norme-trajectoire ($\alpha_1+\alpha_2=\beta$)	4.13			3.42			3.74		

Mesures de l'analyse

Vidéo: CIMG 2638

Mesure	1		2		3		Mesure	1		2		3	
Time	X	Y	X	Y	X	Y	Time	X	Y	X	Y	X	Y
s	m	m	m	m	m	m	s	m	m	m	m	m	m
0.000	1.025	1.570	1.026	1.568	1.021	1.564	1.668	1.046	1.141	1.044	1.142	1.037	1.138
0.003	1.027	1.562	1.026	1.561	1.021	1.558	1.702	1.046	1.134	1.046	1.133	1.041	1.129
0.007	1.027	1.556	1.026	1.556	1.021	1.551	1.735	1.046	1.130	1.047	1.130	1.046	1.124
0.010	1.027	1.551	1.026	1.549	1.021	1.546	1.768	1.054	1.128	1.053	1.128	1.048	1.122
0.013	1.027	1.544	1.028	1.542	1.021	1.539	1.802	1.061	1.125	1.058	1.126	1.055	1.121
0.017	1.027	1.535	1.028	1.534	1.021	1.533	1.835	1.068	1.121	1.065	1.123	1.060	1.119
0.020	1.027	1.529	1.028	1.527	1.023	1.524	1.869	1.073	1.118	1.074	1.119	1.067	1.115
0.023	1.027	1.522	1.028	1.521	1.023	1.517	1.902	1.082	1.116	1.081	1.115	1.074	1.113
0.027	1.029	1.517	1.028	1.516	1.023	1.510	1.935	1.087	1.114	1.092	1.114	1.085	1.110
0.030	1.029	1.510	1.029	1.508	1.023	1.503	1.969	1.098	1.112	1.099	1.112	1.090	1.108
0.033	1.030	1.501	1.029	1.500	1.023	1.496	2.002	1.103	1.111	1.103	1.112	1.099	1.106
0.037	1.030	1.494	1.029	1.495	1.023	1.489	2.035	1.112	1.109	1.112	1.108	1.108	1.105
0.040	1.030	1.487	1.029	1.486	1.023	1.480	2.069	1.119	1.105	1.119	1.105	1.113	1.101
0.043	1.032	1.480	1.029	1.477	1.023	1.473	2.102	1.127	1.102	1.126	1.103	1.121	1.099
0.047	1.032	1.474	1.029	1.470	1.025	1.467	2.135	1.134	1.100	1.135	1.099	1.130	1.096
0.050	1.032	1.464	1.029	1.463	1.025	1.460	2.169	1.141	1.098	1.144	1.096	1.137	1.094
0.053	1.032	1.458	1.029	1.456	1.025	1.453	2.202	1.150	1.095	1.149	1.090	1.144	1.090
0.057	1.032	1.449	1.031	1.448	1.025	1.444	2.236	1.157	1.091	1.155	1.089	1.149	1.087
0.060	1.032	1.440	1.031	1.441	1.025	1.435	2.269	1.164	1.087	1.164	1.087	1.156	1.085
0.063	1.032	1.433	1.031	1.432	1.025	1.428	2.302	1.175	1.084	1.169	1.083	1.165	1.081
0.067	1.034	1.424	1.033	1.423	1.026	1.419	2.336	1.184	1.080	1.178	1.078	1.174	1.076
0.070	1.034	1.415	1.033	1.414	1.026	1.412	2.369	1.191	1.075	1.187	1.074	1.183	1.073
0.073	1.034	1.406	1.033	1.407	1.026	1.405	2.402	1.198	1.071	1.194	1.072	1.190	1.069
0.077	1.034	1.399	1.033	1.400	1.028	1.396	2.436	1.205	1.068	1.203	1.065	1.197	1.065
0.080	1.034	1.390	1.035	1.391	1.028	1.387	2.469	1.212	1.062	1.210	1.062	1.202	1.060
0.083	1.036	1.383	1.035	1.382	1.028	1.379	2.503	1.216	1.059	1.217	1.058	1.210	1.057
0.087	1.037	1.374	1.035	1.371	1.028	1.370	2.536	1.228	1.055	1.225	1.053	1.217	1.051
0.090	1.037	1.365	1.035	1.364	1.028	1.359	2.569	1.235	1.050	1.234	1.049	1.224	1.048
0.093	1.037	1.357	1.035	1.355	1.028	1.350	2.603	1.242	1.046	1.241	1.046	1.231	1.042
0.097	1.037	1.348	1.035	1.345	1.028	1.341	2.636	1.248	1.041	1.248	1.040	1.240	1.037
0.100	1.037	1.341	1.035	1.337	1.028	1.334	2.669	1.255	1.037	1.253	1.035	1.247	1.033
0.103	1.037	1.330	1.035	1.328	1.028	1.325	2.703	1.264	1.032	1.260	1.029	1.254	1.028
0.107	1.037	1.319	1.037	1.320	1.028	1.316	2.736	1.273	1.027	1.268	1.024	1.263	1.023
0.110	1.037	1.310	1.037	1.312	1.030	1.307	2.769	1.278	1.021	1.277	1.019	1.268	1.017
0.113	1.039	1.301	1.037	1.302	1.030	1.298	2.803	1.283	1.018	1.284	1.013	1.275	1.012
0.117	1.041	1.292	1.037	1.291	1.030	1.288	2.836	1.292	1.013	1.291	1.008	1.282	1.009
0.120	1.041	1.283	1.038	1.280	1.030	1.277	2.870	1.298	1.007	1.298	1.003	1.290	1.003
0.123	1.041	1.273	1.040	1.271	1.030	1.266	2.903	1.307	1.000	1.303	0.999	1.295	0.998
0.127	1.041	1.264	1.040	1.262	1.030	1.258	2.936	1.314	0.995	1.309	0.994	1.302	0.993
0.130	1.041	1.251	1.040	1.251	1.030	1.249	2.970	1.319	0.989	1.316	0.988	1.309	0.987
0.133	1.041	1.242	1.040	1.241	1.030	1.238	3.003	1.328	0.986	1.325	0.985	1.318	0.982
0.137	1.041	1.234	1.040	1.232	1.032	1.229	3.036	1.335	0.980	1.330	0.979	1.325	0.977
0.140	1.043	1.221	1.040	1.223	1.032	1.218	3.070	1.341	0.975	1.337	0.974	1.332	0.973
0.143	1.043	1.212	1.042	1.212	1.032	1.210	3.103	1.348	0.972	1.345	0.967	1.339	0.966
0.147	1.043	1.201	1.042	1.200	1.033	1.199	3.136	1.355	0.964	1.352	0.961	1.348	0.959
0.150	1.043	1.193	1.042	1.191	1.033	1.186	3.170	1.364	0.959	1.359	0.956	1.354	0.953
0.153	1.043	1.180	1.042	1.180	1.033	1.174	3.203	1.371	0.952	1.366	0.949	1.359	0.948
0.157	1.043	1.171	1.042	1.169	1.033	1.167	3.237	1.378	0.947	1.373	0.944	1.366	0.943
0.160	1.043	1.160	1.042	1.158	1.033	1.153	3.270	1.383	0.941	1.379	0.936	1.373	0.936

mesure	1		2		3	
Time	X	Y	X	Y	X	Y
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.097	1.197	1.236	1.193	1.230	1.194	1.488
0.100	1.197	1.225	1.193	1.219	1.194	1.481
0.103	1.197	1.218	1.193	1.211	1.194	1.476
0.107	1.197	1.207	1.193	1.202	1.194	1.469
0.110	1.197	1.195	1.193	1.190	1.194	1.460
0.113	1.197	1.184	1.193	1.181	1.194	1.451
0.117	1.197	1.175	1.193	1.169	1.194	1.444
0.120	1.197	1.162	1.193	1.156	1.194	1.435
0.123	1.197	1.152	1.193	1.148	1.194	1.426
0.127	1.197	1.139	1.193	1.135	1.194	1.417
0.130	1.197	1.128	1.193	1.123	1.194	1.410
0.133	1.197	1.117	1.193	1.113	1.194	1.403
0.137	1.197	1.108	1.193	1.102	1.194	1.396
0.140	1.197	1.098	1.193	1.093	1.194	1.387
0.143	1.197	1.087	1.193	1.081	1.194	1.380
0.147	1.197	1.076	1.193	1.069	1.194	1.371
0.150	1.197	1.061	1.195	1.057	1.194	1.364
0.153	1.197	1.049	1.195	1.046	1.194	1.353
0.157	1.198	1.038	1.195	1.036	1.194	1.344
0.160	1.198	1.027	1.195	1.023	1.194	1.335
0.163	1.198	1.013	1.195	1.009	1.194	1.326
0.167	1.198	1.002	1.195	0.999	1.194	1.317
0.170	1.198	0.991	1.195	0.986	1.194	1.307
0.173	1.198	0.979	1.195	0.974	1.194	1.298
0.177	1.198	0.966	1.195	0.962	1.194	1.287
0.180	1.198	0.953	1.195	0.948	1.196	1.278
0.183	1.198	0.941	1.195	0.936	1.196	1.267
0.187	1.198	0.930	1.195	0.925	1.196	1.257
0.190	1.200	0.917	1.197	0.911	1.196	1.244
0.193	1.204	0.906	1.198	0.901	1.196	1.234
0.197	1.207	0.897	1.202	0.895	1.196	1.221
0.200	1.207	0.890	1.207	0.885	1.196	1.214
0.203	1.211	0.887	1.211	0.883	1.196	1.201
0.207	1.216	0.885	1.212	0.881	1.196	1.193
0.210	1.220	0.881	1.219	0.876	1.196	1.182
0.213	1.227	0.883	1.225	0.874	1.196	1.171
0.217	1.234	0.879	1.230	0.871	1.196	1.160
0.220	1.245	0.878	1.239	0.869	1.196	1.148
0.223	1.254	0.876	1.248	0.867	1.196	1.137
0.227	1.267	0.874	1.258	0.867	1.196	1.127
0.230	1.280	0.874	1.269	0.866	1.196	1.119
0.233	1.290	0.872	1.281	0.866	1.198	1.107
0.237	1.299	0.870	1.291	0.864	1.198	1.096
0.240	1.308	0.869	1.302	0.862	1.198	1.086
0.243	1.319	0.867	1.311	0.859	1.198	1.073
0.247	1.328	0.863	1.319	0.855	1.198	1.061
0.250	1.337	0.861	1.328	0.853	1.198	1.050
0.253	1.344	0.858	1.335	0.850	1.198	1.037
0.257	1.352	0.856	1.346	0.848	1.198	1.023
0.260	1.362	0.854	1.356	0.846	1.198	1.013
0.263	1.371	0.851	1.367	0.841	1.198	1.002

Mesure	1		2		3	
Time	X	Y	X	Y	X	Y
s	m	m	m	m	m	m
0.000	1.060	1.432	1.065	1.436	1.061	1.434
0.003	1.060	1.405	1.065	1.406	1.061	1.405
0.007	1.060	1.378	1.065	1.379	1.058	1.378
0.010	1.058	1.346	1.062	1.352	1.058	1.349
0.013	1.055	1.319	1.062	1.325	1.058	1.323
0.017	1.052	1.295	1.062	1.296	1.055	1.296
0.020	1.052	1.266	1.059	1.269	1.055	1.267
0.023	1.052	1.239	1.059	1.245	1.053	1.241
0.027	1.050	1.213	1.057	1.218	1.053	1.217
0.030	1.047	1.183	1.054	1.191	1.053	1.190
0.033	1.044	1.157	1.054	1.164	1.050	1.161
0.037	1.044	1.133	1.054	1.137	1.050	1.132
0.040	1.044	1.106	1.054	1.113	1.050	1.111
0.043	1.044	1.090	1.054	1.091	1.047	1.090
0.047	1.044	1.074	1.057	1.078	1.047	1.071
0.050	1.050	1.066	1.057	1.067	1.050	1.063
0.053	1.052	1.058	1.059	1.059	1.058	1.055
0.057	1.066	1.050	1.073	1.051	1.074	1.047
0.060	1.087	1.044	1.091	1.048	1.087	1.047
0.063	1.106	1.044	1.108	1.048	1.106	1.045
0.067	1.124	1.039	1.126	1.046	1.127	1.045
0.070	1.141	1.039	1.148	1.046	1.145	1.042
0.073	1.159	1.039	1.167	1.043	1.167	1.042
0.077	1.175	1.039	1.183	1.043	1.182	1.040
0.080	1.194	1.036	1.202	1.043	1.198	1.040
0.083	1.210	1.036	1.218	1.043	1.214	1.040
0.087	1.229	1.036	1.234	1.040	1.230	1.037
0.090	1.247	1.034	1.253	1.038	1.246	1.034
0.093	1.266	1.031	1.269	1.038	1.267	1.034
0.097	1.285	1.034	1.288	1.038	1.286	1.034
0.100	1.303	1.031	1.309	1.035	1.301	1.032
0.103	1.319	1.028	1.325	1.032	1.320	1.029
0.107	1.336	1.028	1.341	1.032	1.338	1.029
0.110	1.352	1.026	1.358	1.030	1.354	1.026
0.113	1.368	1.026	1.376	1.027	1.375	1.026
0.117	1.386	1.023	1.395	1.027	1.391	1.021
0.120	1.405	1.020	1.411	1.024	1.413	1.018
0.123	1.424	1.018	1.427	1.022	1.431	1.018
0.127	1.442	1.012	1.444	1.019	1.447	1.016
0.130	1.461	1.012	1.465	1.016	1.465	1.013
0.133	1.477	1.010	1.484	1.013	1.487	1.010
0.137	1.496	1.007	1.503	1.011	1.502	1.008
0.140	1.514	1.004	1.524	1.008	1.518	1.005
0.143	1.530	1.002	1.540	1.005	1.534	1.003
0.147	1.547	0.999	1.559	1.003	1.550	1.000
0.150	1.563	0.996	1.575	1.000	1.566	0.997

Time	1		2		3		Time	1		2		3	
	X	Y	X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	X	Y
s	m	m	m	m	m	m	s	m	m	m	m	m	m
0.027	1.535	0.871	1.631	0.836	1.595	0.851	0.190	1.190	1.277	1.163	1.220	1.175	1.244
0.030	1.514	0.878	1.613	0.843	1.575	0.858	0.193	1.196	1.288	1.168	1.233	1.182	1.254
0.033	1.497	0.885	1.592	0.850	1.555	0.865	0.197	1.201	1.302	1.174	1.243	1.186	1.265
0.037	1.477	0.889	1.570	0.856	1.535	0.870	0.200	1.207	1.311	1.179	1.254	1.189	1.276
0.040	1.458	0.896	1.552	0.863	1.516	0.876	0.203	1.210	1.322	1.183	1.265	1.195	1.289
0.043	1.438	0.901	1.536	0.866	1.501	0.883	0.207	1.219	1.335	1.188	1.276	1.200	1.301
0.047	1.420	0.907	1.517	0.874	1.483	0.888	0.210	1.223	1.344	1.192	1.286	1.206	1.312
0.050	1.398	0.912	1.499	0.883	1.462	0.894	0.213	1.228	1.356	1.197	1.299	1.211	1.323
0.053	1.378	0.919	1.477	0.888	1.444	0.899	0.217	1.235	1.365	1.202	1.311	1.216	1.335
0.057	1.360	0.925	1.460	0.893	1.424	0.905	0.220	1.241	1.376	1.208	1.322	1.222	1.346
0.060	1.342	0.930	1.440	0.899	1.402	0.912	0.223	1.244	1.385	1.213	1.333	1.227	1.355
0.063	1.324	0.936	1.418	0.904	1.384	0.917	0.227	1.248	1.394	1.218	1.343	1.233	1.366
0.067	1.304	0.939	1.397	0.909	1.366	0.925	0.230	1.252	1.407	1.224	1.354	1.238	1.375
0.070	1.286	0.943	1.381	0.916	1.346	0.932	0.233	1.257	1.416	1.231	1.367	1.242	1.386
0.073	1.270	0.950	1.361	0.924	1.328	0.935	0.237	1.261	1.427	1.236	1.377	1.247	1.397
0.077	1.250	0.954	1.342	0.929	1.308	0.939	0.240	1.266	1.440	1.242	1.386	1.251	1.406
0.080	1.230	0.959	1.324	0.934	1.290	0.946	0.243	1.273	1.449	1.247	1.395	1.256	1.417
0.083	1.212	0.964	1.304	0.938	1.272	0.952	0.247	1.277	1.458	1.252	1.406	1.260	1.427
0.087	1.196	0.968	1.284	0.945	1.254	0.955	0.250	1.282	1.468	1.258	1.415	1.265	1.438
0.090	1.178	0.972	1.267	0.949	1.236	0.961	0.253	1.288	1.479	1.263	1.426	1.271	1.447
0.093	1.158	0.974	1.247	0.954	1.215	0.964	0.257	1.291	1.488	1.268	1.436	1.276	1.456
0.097	1.140	0.979	1.227	0.959	1.197	0.968	0.260	1.295	1.496	1.274	1.447	1.281	1.465
0.100	1.122	0.986	1.211	0.963	1.179	0.971	0.263	1.299	1.505	1.277	1.456	1.287	1.476
0.103	1.109	0.990	1.192	0.968	1.159	0.977	0.267	1.306	1.514	1.283	1.467	1.294	1.487
0.107	1.096	0.993	1.174	0.972	1.139	0.980	0.270	1.309	1.521	1.288	1.477	1.299	1.496
0.110	1.091	0.993	1.156	0.975	1.121	0.986	0.273	1.317	1.528	1.293	1.488	1.305	1.505
0.113	1.086	0.997	1.136	0.981	1.110	0.989	0.277	1.320	1.537	1.299	1.495	1.308	1.514
0.117	1.082	1.008	1.122	0.984	1.098	0.993	0.280	1.326	1.546	1.302	1.504	1.312	1.521
0.120	1.080	1.019	1.109	0.986	1.090	0.997	0.283	1.329	1.555	1.308	1.513	1.316	1.528
0.123	1.082	1.031	1.099	0.991	1.090	1.000	0.287	1.333	1.564	1.311	1.522	1.319	1.537
0.127	1.089	1.042	1.093	0.995	1.089	1.007	0.290	1.338	1.570	1.315	1.529	1.323	1.544
0.130	1.095	1.055	1.086	0.999	1.087	1.016	0.293	1.344	1.579	1.320	1.538	1.328	1.553
0.133	1.100	1.069	1.081	1.006	1.090	1.029	0.297	0.439	1.517	1.326	1.547	1.332	1.563
0.137	1.104	1.080	1.079	1.015	1.094	1.043							
0.140	1.111	1.095	1.083	1.025	1.098	1.058							
0.143	1.118	1.107	1.088	1.042	1.101	1.071							
0.147	1.122	1.118	1.093	1.056	1.103	1.083							
0.150	1.129	1.132	1.099	1.070	1.108	1.096							
0.153	1.134	1.145	1.102	1.083	1.114	1.110							
0.157	1.140	1.156	1.108	1.097	1.117	1.121							
0.160	1.145	1.172	1.115	1.109	1.125	1.134							
0.163	1.151	1.185	1.118	1.124	1.130	1.146							
0.167	1.156	1.197	1.125	1.136	1.135	1.161							
0.170	1.163	1.208	1.131	1.147	1.143	1.173							
0.173	1.167	1.221	1.136	1.159	1.148	1.184							
0.177	1.172	1.234	1.142	1.172	1.153	1.197							
0.180	1.176	1.243	1.147	1.183	1.159	1.207							
0.183	1.181	1.253	1.152	1.197	1.164	1.220							
0.187	1.187	1.264	1.158	1.209	1.170	1.231							

Mesure	1		2		3	
Time	X	Y	X	Y	X	Y
s	m	m	m	m	m	m
0.070	1.115	1.461	1.106	1.455	1.116	1.459
0.073	1.115	1.429	1.110	1.423	1.116	1.429
0.077	1.115	1.400	1.108	1.390	1.114	1.394
0.080	1.115	1.364	1.106	1.356	1.113	1.362
0.083	1.115	1.332	1.106	1.320	1.111	1.326
0.087	1.115	1.298	1.106	1.285	1.111	1.291
0.090	1.115	1.264	1.104	1.256	1.109	1.259
0.093	1.114	1.232	1.102	1.224	1.107	1.228
0.097	1.110	1.200	1.101	1.191	1.105	1.199
0.100	1.108	1.169	1.099	1.162	1.104	1.167
0.103	1.108	1.133	1.097	1.128	1.102	1.129
0.107	1.103	1.105	1.095	1.093	1.100	1.096
0.110	1.103	1.067	1.095	1.061	1.100	1.064
0.113	1.101	1.035	1.093	1.030	1.100	1.031
0.117	1.099	1.004	1.095	0.997	1.100	1.002
0.120	1.096	0.976	1.095	0.968	1.098	0.972
0.123	1.097	0.951	1.097	0.941	1.098	0.945
0.127	1.099	0.929	1.097	0.923	1.100	0.927
0.130	1.101	0.915	1.101	0.910	1.102	0.914
0.133	1.108	0.906	1.104	0.900	1.105	0.903
0.137	1.119	0.899	1.113	0.894	1.113	0.896
0.140	1.137	0.895	1.130	0.889	1.131	0.892
0.143	1.153	0.892	1.148	0.885	1.152	0.890
0.147	1.174	0.890	1.168	0.885	1.172	0.890
0.150	1.194	0.890	1.189	0.885	1.194	0.890
0.153	1.214	0.892	1.209	0.887	1.214	0.892
0.157	1.234	0.892	1.231	0.885	1.235	0.894
0.160	1.262	0.893	1.251	0.885	1.253	0.894
0.163	1.280	0.895	1.271	0.887	1.277	0.894
0.167	1.296	0.895	1.285	0.889	1.297	0.894
0.170	1.319	0.895	1.305	0.889	1.315	0.894
0.173	1.339	0.895	1.330	0.889	1.340	0.894
0.177	1.361	0.895	1.349	0.889	1.362	0.894
0.180	1.382	0.895	1.370	0.887	1.380	0.894
0.183	1.400	0.895	1.387	0.887	1.400	0.894
0.187	1.422	0.895	1.412	0.889	1.420	0.894
0.190	1.438	0.895	1.430	0.889	1.441	0.894
0.193	1.463	0.897	1.452	0.889	1.465	0.892
0.197	1.484	0.895	1.473	0.889	1.483	0.894
0.200	1.504	0.893	1.492	0.889	1.503	0.894
0.203	1.522	0.895	1.510	0.889	1.523	0.896
0.207	1.543	0.893	1.531	0.887	1.542	0.894

Mesure	1		2		3	
Time	X	Y	X	Y	X	Y
s	m	m	m	m	m	m
0.000	1.541	1.170	1.538	1.171	1.542	1.175
0.003	1.512	1.154	1.509	1.155	1.516	1.155
0.007	1.482	1.134	1.477	1.140	1.487	1.139
0.010	1.454	1.120	1.450	1.121	1.459	1.123
0.013	1.423	1.106	1.420	1.106	1.429	1.109
0.017	1.400	1.088	1.393	1.090	1.400	1.093
0.020	1.370	1.072	1.364	1.071	1.374	1.076
0.023	1.336	1.054	1.334	1.053	1.342	1.056
0.027	1.308	1.037	1.305	1.038	1.313	1.040
0.030	1.280	1.015	1.277	1.019	1.285	1.019
0.033	1.255	1.005	1.250	1.006	1.255	1.006
0.037	1.226	0.987	1.221	0.988	1.228	0.989
0.040	1.196	0.971	1.192	0.970	1.198	0.973
0.043	1.166	0.951	1.162	0.952	1.168	0.953
0.047	1.139	0.934	1.137	0.935	1.143	0.935
0.050	1.116	0.918	1.106	0.918	1.116	0.919
0.053	1.090	0.898	1.085	0.902	1.092	0.903
0.057	1.077	0.889	1.078	0.892	1.079	0.891
0.060	1.076	0.886	1.072	0.890	1.074	0.891
0.063	1.074	0.886	1.076	0.892	1.076	0.891
0.067	1.083	0.896	1.087	0.897	1.090	0.900
0.070	1.097	0.907	1.096	0.908	1.099	0.909
0.073	1.120	0.925	1.108	0.922	1.122	0.926
0.077	1.143	0.939	1.137	0.938	1.143	0.941
0.080	1.168	0.958	1.166	0.958	1.170	0.962
0.083	1.189	0.974	1.187	0.974	1.189	0.978
0.087	1.218	0.992	1.216	0.992	1.216	0.994
0.090	1.239	1.006	1.239	1.008	1.241	1.012
0.093	1.260	1.024	1.260	1.024	1.264	1.026
0.097	1.285	1.042	1.284	1.040	1.285	1.042
0.100	1.313	1.058	1.305	1.058	1.310	1.063
0.103	1.335	1.070	1.328	1.072	1.331	1.077
0.107	1.356	1.088	1.350	1.090	1.354	1.093
0.110	1.377	1.102	1.370	1.103	1.375	1.106
0.113	1.402	1.125	1.400	1.123	1.404	1.125
0.117	1.425	1.138	1.423	1.135	1.427	1.143
0.120	1.450	1.152	1.452	1.151	1.454	1.155
0.123	1.471	1.168	1.466	1.169	1.473	1.171
0.127	1.500	1.184	1.490	1.183	1.496	1.187
0.130	1.521	1.203	1.513	1.201	1.521	1.203
0.133	1.541	1.214	1.540	1.216	1.539	1.219
0.137	1.562	1.228	1.561	1.228	1.574	1.235
0.140	1.590	1.244	1.588	1.248	1.596	1.248
0.143	1.612	1.262	1.608	1.262	1.619	1.264
0.147	1.633	1.278	1.638	1.277	1.642	1.283
0.150	1.654	1.292	1.660	1.294	1.665	1.297
0.153	1.679	1.308	1.681	1.311	1.688	1.312
0.157	1.702	1.322	1.703	1.325	1.707	1.326

Annexe 2: règlement d'utilisation de la marque de garantie « tchoukball »

Annexe 3: CD des vidéos et des résultats

Contient:

1. Annexe 1 : *Mesures et résultats (.ods)*
Mesures et résultats (.xls)
2. Travail de Maturité: *Travail de Maturité (.pdf)*
3. vidéos: *CIMG2638 (.mov)*
CIMG2640 (.mov)
CIMG2644 (.mov)
CIMG2647 (.mov)
CIMG2651 (.mov)
CIMG2652 (.mov)