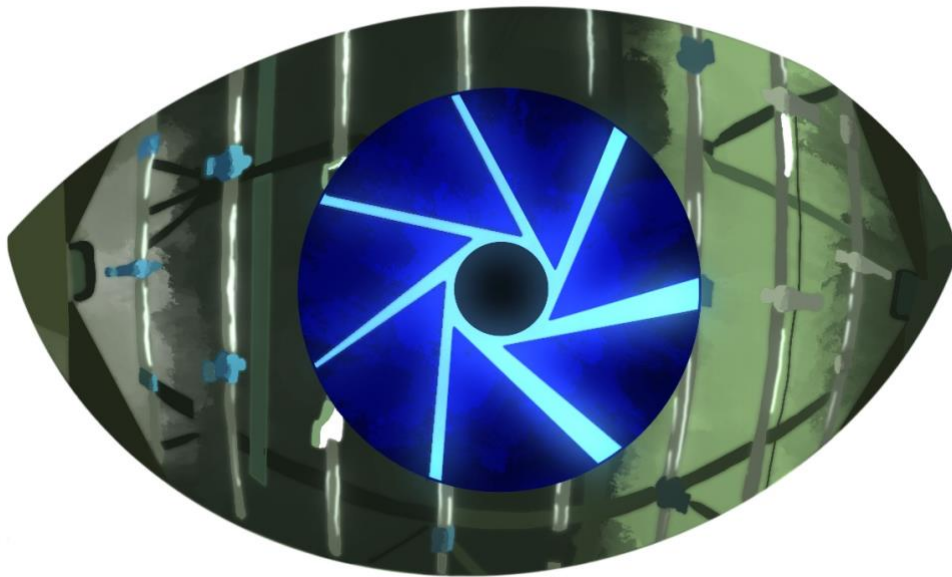


# EPFL

## Babyfoot : Nouvelle Vision

Projet de semestre Master



Printemps 2024

Auteur : Guillaume KEUSCH

Supervision : Christophe SALZMANN

<b>1. RÉSUMÉ</b>	<b>2</b>
<b>2. INTRODUCTION</b>	<b>2</b>
ÉTAT INITIAL	2
OBJECTIF DU PROJET	3
<b>3. NOUVELLES CALIBRATIONS</b>	<b>4</b>
PRINCIPE	4
NI VISION	4
MATLAB	6
PINHOLE MODEL	7
<b>4. CORRECTIONS POST-CALIBRATION</b>	<b>10</b>
MATRICE DE DÉFORMATION	10
CHAMP D'OFFSET	10
<b>5. OBSERVATIONS SUR LA VISION DE LA CAMÉRA</b>	<b>12</b>
ZONES DE HAUTE DÉFORMATION	12
RECOURBEMENT	12
CENTRE DE CAMÉRA	13
PARALLAXE	14
LUMINOSITÉ	15
<b>6. RÉSULTATS</b>	<b>16</b>
<b>7. MÉTHODOLOGIE</b>	<b>17</b>
LASER	17
BALLE ET JOUEUR	18
BALLE SEULE	18
DÉFINITION EMPIRIQUE DU CHAMP D'OFFSET	19
ESSAIS DU CHAMP D'OFFSET	19
TESTS DE LUMINOSITÉ	19
<b>8. REMERCIEMENTS</b>	<b>23</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>24</b>
A. PATTERNS	25
B. VI	29
C. MESURES EXCEL	33
D. BIBLIOGRAPHIE	40

# 1. Résumé

Le but de ce travail était de permettre l'emploi d'une nouvelle caméra pour le babyfoot automatisé du laboratoire d'automatique de L'EPFL, de manière à améliorer sa précision en jeu.

Afin d'améliorer la précision du système de vision, une nouvelle calibration a été produite. Différentes méthodes ont été essayées : NI vision, Matlab et une calibration manuelle via un pinhole model. Ces deux dernières ont été abandonnées car leur intégration n'a pas abouti.

Par la suite, des corrections ont été appliquées pour compenser les erreurs de parallaxe due au plexiglas du terrain du babyfoot ainsi que des erreurs résiduelles de calibration. Deux méthodes de correction ont été essayées :

- Des décalages empiriques sur le déplacement des joueurs
- La déformation de la vision par multiplication matricielle

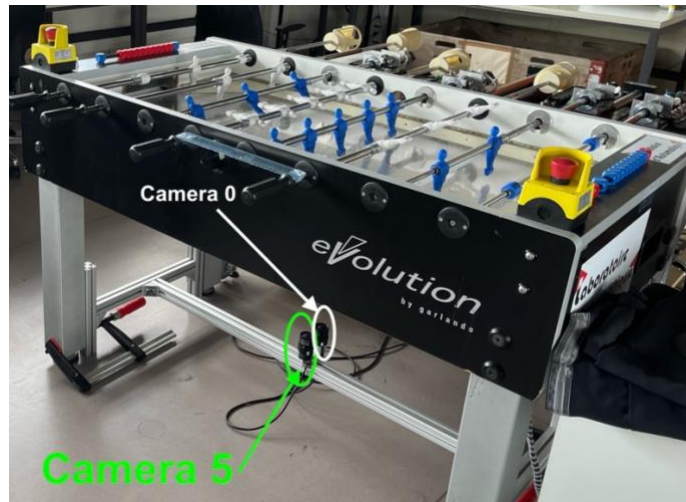
L'emploi en situation réelle de cette dernière s'est avéré impossible

A la suite de ce projet, la nouvelle calibration de la caméra a apporté une amélioration par rapport à l'ancienne et peut désormais être employée en jeu avec satisfaction.

# 2. Introduction

## État initial

Le babyfoot automatisé du laboratoire d'automatique de l'EPFL est un projet commencé en 2012. Un robot contrôle une équipe (les bleus) grâce à une combinaison de moteurs linéaires et de rotation. Le suivi de la balle est obtenu par un système de vision placé sous le fond en plexiglass transparent du babyfoot.



*Le babyfoot et ses caméras*

Deux caméras de caractéristiques différentes sont fixées sous le babyfoot et peuvent être employées alternativement.

La nouvelle caméra (caméra 5) était peu précise dû à une calibration suboptimale et aux défauts optiques inhérents à la plaque de plexiglass (erreurs de parallaxe, déformations, luminosité...).

## Objectif du projet

L'objectif était de rendre la caméra 5 fonctionnelle et de déterminer s'il est plus avantageux de l'employer par rapport à la caméra 0.

Le deuxième intention était d'évaluer l'effet de l'augmentation de résolution, c'est à dire la précision maximale, au détriment de nombre d'images par secondes et donc la vitesse maximale de suivi.

Un but annexe était d'identifier les limitations liées aux problèmes de vision pour en simplifier leur résolution ultérieurement.

Caméra	Résolution	Image par secondes
5 (nouvelle)	1152x726	250 FPS
0 (ancienne)	640x48	500 FPS

## 3. Nouvelles calibrations

### Principe

Les calibrations sont obtenues grâce à des feuilles à motif<sup>1</sup> (patterns à damier ou à pois) qui sont des points de repères cotés. Ces motifs ainsi que leur taille étant connus, l'ordinateur peut redresser l'image et calculer les distances réelles.

En employant plusieurs images et en variant la position du pattern ainsi que la luminosité on peut en éliminer les défauts optiques ce qui améliore la précision.

Trois méthodes de calibration ont été essayées :

- Le programme NI vision de national instrument
- Matlab et la toolbox *Computer vision*
- Une calibration manuelle à partir des paramètres de camera et d'un Pinhole model

### NI vision

Les calibrations précédentes ayant été obtenues via NI vision, la procédure a été revue et améliorée.

La compatibilité de ces calibrations avec le système existant permet de ne pas avoir à implémenter de nouveaux systèmes de lecture de calibration.

Les patterns précédents n'étant plus utilisables de nouveaux patterns, plus réguliers ont été imprimés. Les patterns à pois ont été employés pour les calibrations NI vision.

Plusieurs procédures ont été employées pour obtenir une calibration :

Dans un premier temps une calibration *camera model* a été tentée, qui mesure les paramètres de caméra et de lentille à partir d'au moins 5 images. Mais cela n'a eu aucun succès pour des raisons qui n'ont pas pu être déterminées.

Ensuite l'accent a été mis sur des calibration *distortion model*, qui corrige les distorsions de lentille à partir d'une ou plusieurs images. En variant le choix de patterns et les éclairages. Jusqu'à obtenir une image de calibration suffisamment précise pour l'emploi.

Les patterns ont été employés de deux manières :

- Un grand pattern couvrant tout le terrain.

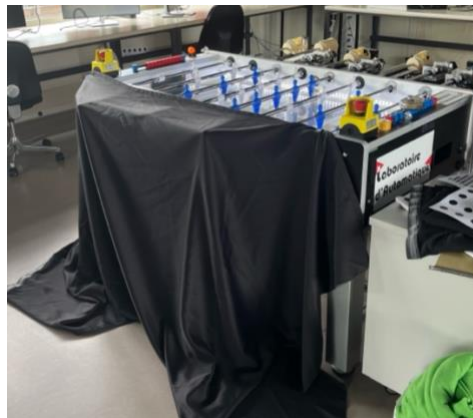
---

<sup>1</sup> Un détail des patterns employés se trouve en annexe A

- Un petit pattern réutilisé sur plusieurs images de telle manière que le terrain complet soit recouvert par l'ensemble des images.

Différentes combinaisons d'éclairages ont été essayés :

- Avec ou sans éclairage du laboratoire
- Avec ou sans LED du Babyfoot sur le périmètre du terrain
- Avec ou sans lumière extérieure (bloquée grâce à des couvertures sur le côté du babyfoot).



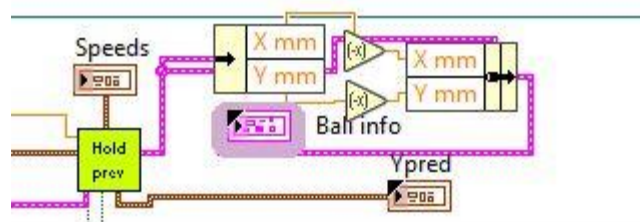
*Le babyfoot avec les couvertures*

Une calibration est sortie du lot :

- *Calibration multiple petits patterns*, une calibration effectuée avec 23 images de petit pattern. Avec les lumières des LED, sans éclairage du laboratoire et sans lumière extérieure (couvertures sur le côté)

*Calibration multiple petits patterns* a été choisie pour la suite du projet car plus précise.

Cette calibration possède néanmoins le défaut d'avoir les sens des axes inversés par rapport à la calibration précédente. Il a donc fallu ajouter une inversion des coordonnées de la balle pour assurer un bon fonctionnement.



*L'inversion de coordonnée*

Un grand pattern et une faible luminosité ont créé les calibrations de plus mauvaise qualité.

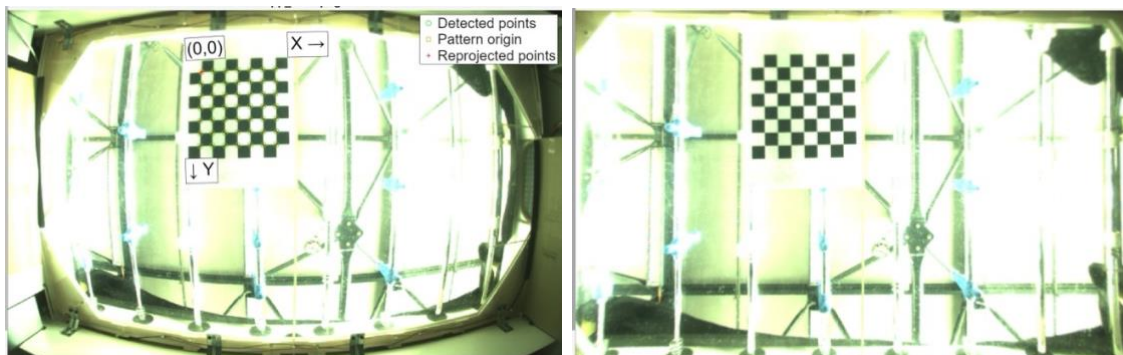
## Matlab

La première a été d'employer l'outil *Camera Calibrator* de la *Computer vision toolbox* de Matlab.

**Méthodes :** un pattern à damier est déplacé pour que sur l'ensemble des images de calibrations, la surface entière du babyfoot soit couverte. Le tout sous une haute exposition de la caméra avec les LED du babyfoot et sans éclairage du laboratoire.

Les images ont ensuite été calibrées dans Matlab avec un *camera model* standard à 3 coefficients.

**Résultats :** la correction effectuée sur Matlab semblait prometteuse en observant l'aperçu de l'image corrigée.



*Une image avant (à gauche) et après correction*

De plus la fonction *undistortPoints* semblait pouvoir donner les coordonnées réelles des pixels avec une bonne précision. Malheureusement la vitesse à laquelle fonctionne le babyfoot est trop élevée pour pouvoir lancer un code Matlab à chaque itération.

Pour compenser ce problème, il est nécessaire de lancer *undistortpoints* sans passer par Matlab c'est-à-dire en imitant fonction dans LabVIEW. Il a donc fallu trouver les opérations effectuées par la fonction *undistortPoints*.

Un ensemble de fonction similaires avait été trouvé par un parallèle avec le model caméra OpenCV. Mais les résultats n'étaient pas satisfaisants. Toutes les tentatives pour imiter cette fonction sont restées sans succès.

La faible compatibilité entre LabVIEW et les calibrations Matlab rend l'intégration peu pratique. C'est pourquoi ces calibrations ont été abandonnées pour ce projet

## Pinhole model

En tentant d'imiter la fonction *undistortPoints* de Matlab, l'idée est venue de tenter une calibration manuelle à partir d'un modèle mathématique existant : le modèle Pinhole

**Les Paramètres :** Une caméra est définie par plusieurs paramètres : La matrice intrinsèque  $[K]^2$  regroupant les paramètres propres à la caméra : la focale et les coordonnées du point principal. (Le point perpendiculaire à la vision de la caméra)

Cette matrice est de forme :  $\begin{pmatrix} Fx & 0 & Cx \\ 0 & Fy & Cy \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  avec  $Fx$  et  $Fy$  la taille de focale en x et en y et  $Cx$ ,  $Cy$  les coordonnées du point principal.

La matrice extrinsèque  $[A]$  contenant des informations sur la position (rotation, translation) obtenue par assemblage d'une matrice de rotation  $[R]$  (de dimension  $3 \times 3$ ) et d'un vecteur de translation  $[T]$  (de dimension  $3 \times 1$ )

Cette matrice est de forme :  $(R|T)$  (de dimension  $3 \times 4$ )

A noter que dans Matlab uniquement, cette matrice est définie avec une quatrième ligne contenant  $(0 \ 0 \ 0 \ 1)$ .

A ceci s'ajoutent les coefficients  $k$  qui servent à approximer les coefficients de distorsion radiale de la caméra. Le nombre dépend du type de déformation,

## Le Principe

Les paramètres définis précédemment permettent d'effectuer un changement de coordonnée entre le monde réel et les coordonnées en pixel

La déformation étant telle que le centre est moins écrasé que les côtés, une déformation en tonneau a été supposée.

---

<sup>2</sup> Les notations employées ici sont celles de Matlab

La première étape est la conversion des coordonnées réelles du système cartésien en un système homogène.

$$\begin{pmatrix} X_{Réel} \\ Y_{Réel} \\ Z_{Réel} \end{pmatrix} \text{ devient } \begin{pmatrix} X_{Réel} \\ Y_{Réel} \\ Z_{Réel} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Une multiplication matricielle est appliquée pour redresser l'image :

$$\begin{pmatrix} X_{Redresse,Homogene} \\ Y_{Redresse,Homogene} \\ Z_{Redresse,Homogene} \end{pmatrix} = (K)(A) \begin{pmatrix} X_{Réel} \\ Y_{Réel} \\ Z_{Réel} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Le retour au coordonnées cartésiennes donne:

$$\begin{pmatrix} X_{Redresse} \\ Y_{Redresse} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{X_{Redresse,Homogene}}{Z_{Redresse,Homogene}} \\ \frac{Y_{Redresse,Homogene}}{Z_{Redresse,Homogene}} \end{pmatrix}$$

Enfin les coefficients k permettent la correction de l'effet baril.

Soit r la distance euclidienne du point par rapport au centre :

$$r = \sqrt{X_{Redresse}^2 + Y_{Redresse}^2}$$

$$\begin{pmatrix} X_{Corrige} \\ Y_{Corrige} \end{pmatrix} = (1 + k_1 * r + k_2 * r^4 + k_3 * r^6 + \dots + k_n * r^{2*n}) \begin{pmatrix} X_{Redresse} \\ Y_{Redresse} \end{pmatrix}$$

Dans le modèle complet une deuxième partie est ajoutée à cette équation, mais dépendant d'un paramètre P qui a été trouvé comme nul pour le babyfoot, elle a été négligée.

Ce système de calibration a été abandonné car il prenait trop de temps de développement et que la nouvelle calibration NI vision disponible et développé en parallèle donnait de bons résultats. Un des principaux problèmes se trouve dans le choix des paramètres de caméra et des coefficients k

Par la suite en comparant les paramètres de caméra entre LabVIEW (avec la calibration NI Vision) et Matlab, il a été observé que les valeurs sont très différentes pour un même paramètre de caméra. Ce qui complique encore le choix des paramètres

Cependant il pourrait être intéressant de réessayer cette méthode dans un travail futur. Ce modèle devrait permettre de corriger manuellement la calibration depuis les

matrices et ainsi augmenter la précision sans avoir à effectuer de correction post calibration.

## 4. Corrections Post-calibration

Pour avoir une meilleure précision dans les calibrations, des corrections ont été appliquées après la calibration. Deux méthodes ont été testées : une matrice de déformation ainsi qu'un champ de corrections empiriques sur les joueurs (Champ d'offset)

### Matrice de déformation

Le premier type de correction a été d'appliquer une multiplication matricielle aux coordonnées pour compenser les déformations résiduelles.

Un VI *matrice deformation*<sup>3</sup> a été créé pour appliquer une combinaison de rotation, agrandissement, translation et perspective aux coordonnées.

Malheureusement, la mise en place de ces paramètres de matrice s'est avérée peu pertinente dans un contexte de jeu réel pour deux raisons :

- Les variations de luminosité ambiante (nuage, positions du soleil...) qui demandent de recalculer les paramètres entièrement.
- La difficulté de mesurer les paramètres diminuant la précision des déformations.

### Champ d'offset

L'autre méthode a été de compenser les erreurs de parallaxe afin que les joueurs se retrouvent alignés avec la balle. Ceci est effectué en ajoutant un décalage dans la position des joueurs

L'idée était qu'une calibration parfaite n'était pas nécessaire sur tout le terrain, et que seule la ligne de déplacement des joueurs est critique. Car une haute précision n'est nécessaire que pour frapper la balle.

Pour ce faire le décalage entre la balle et les joueurs est mesuré puis une correction est calculée<sup>4</sup>. Les corrections sont calculées en position 0 (la position neutre) pour chaque joueur. Ces corrections sont interpolées par le VI *Correction\_interpolees\_2\_2024\_GK*. L'interpolation linéaire a donné de bons résultats durant la phase de test.

---

<sup>3</sup> Un détail des VI se trouve dans l'annexe B

<sup>4</sup> Le détail de la mise en place des mesures se trouve dans le chapitre 7 : méthodologie

Cette méthode possède l'avantage d'être facile à mettre en œuvre, l'acquisition des corrections étant relativement rapide.

## 5. Observations sur la vision de la caméra

Au cours de ce projet différents problèmes de vision ont pu être mis en évidence.

### Zones de haute déformation

La déformation de la caméra n'est pas uniforme et plusieurs zones de fortes déformations ont été observées. Leur position variait légèrement. Ces variations de position pourraient être liées à la lumière ambiante dont l'angle peut varier au cours de la journée. Il est également possible que la déformation soit causée par des défauts dans le plexiglass. Il serait intéressant de faire une analyse de biréfringence pour voir si les zones de déformation coïncident avec des zones de contraintes élevées. Enfin il est possible que le problème soit simplement dû à un biais dans la méthode de calibration.

Ce problème pourrait être corrigé par l'emploi de plusieurs caméras opérant ensemble.

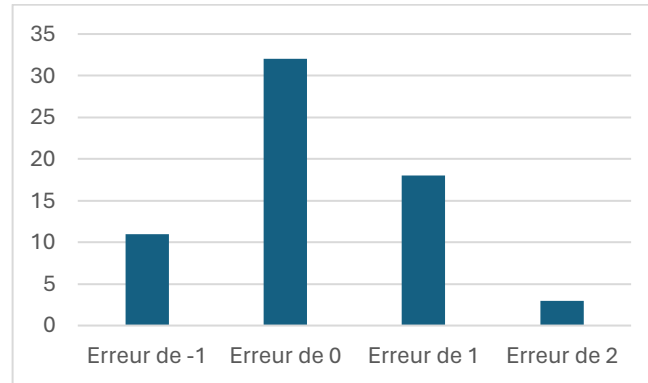
### Recourbement

Certains pixels correspondent à plusieurs coordonnées ce qui a été mis en évidence par le VI *createur ligne*. Ce VI affiche des lignes horizontales dans leurs coordonnées réelles qui après une conversion en coordonnées pixels semblent se recourber sur les coins.



*La zone de superposition est très visible sur le coin en bas à droite*

Ces déformations affectent peu l'axe Y (l'axe de déplacement des joueurs). L'expérience Laser, qui mesure les erreurs sur une suite déplacement de 20mm confirme que les déviations en Y sont faibles (le maximum mesuré est de 3 pixels sur les attaquants).



*Répartition des erreurs pour le défenseur gauche après 4 tests*

## Centre de caméra

L'origine de la caméra est décalée de 2,7mm selon l'axe X et 5,8mm selon l'axe Y par rapport au centre du Babyfoot

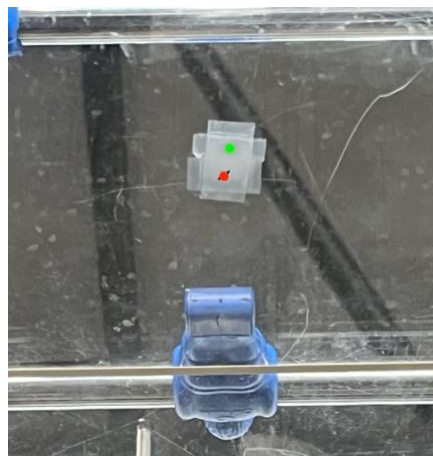


*Origine de la caméra (point vert) par rapport au centre du babyfoot (point rouge)*

Ce décalage entraîne une augmentation de l'imprécision dans le côté opposé à la caméra. Ce problème est particulièrement visible dans les coins. Il est probablement une des causes du recourbement mentionné précédemment.

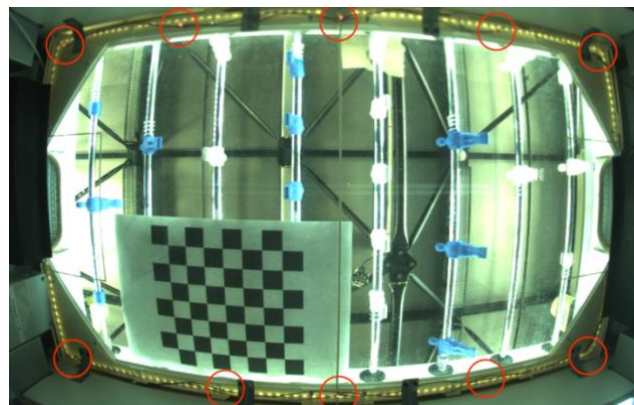
## Parallaxe

Il a été observé que la plaque plexiglas n'était pas de 6mm comme supposé mais en réalité deux plaques de 4,8 et 15,5mm. Les lignes du babyfoot se trouvant entre ces deux plaques il n'est pas possible de s'en servir efficacement comme point de repère, car les erreurs de parallaxe font que les points sous le plexiglass semblent plus proches que ce que ceux du dessus.



*Illustration du décalage dû à la perspective, le point rouge est sur le bas du plexiglass le vert sur le haut. La photo est prise de vue de la caméra et les points sont au niveau des défenseurs robots.*

Ce décalage cause des erreurs dans l'estimation de la position de la balle qui ont pu être compensées par le champ d'offset

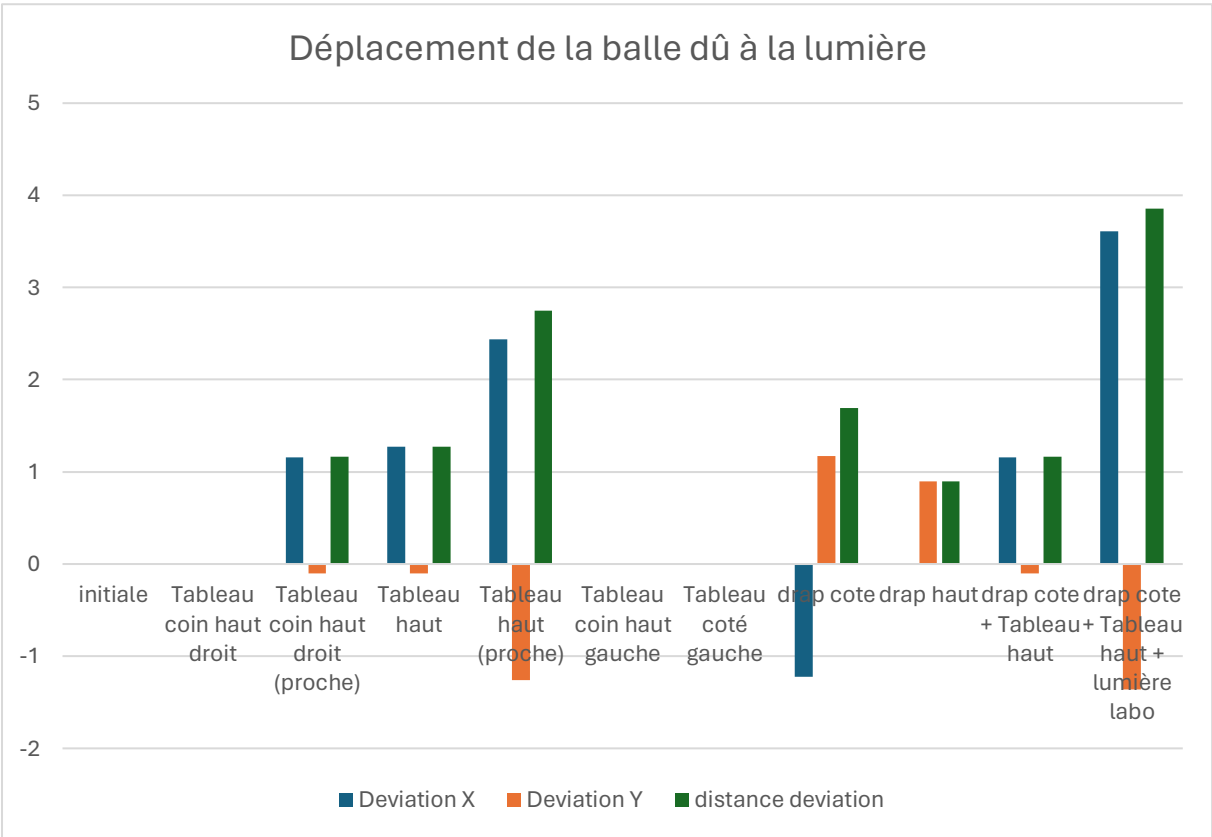


Les LED rouges sous le babyfoot

Un ensemble de 10 LED rouges sous le babyfoot avait été prévu pour une potentielle automatisation de la calibration. Les erreurs de parallaxe, rendent les LED peu efficace comme point de repère pour la calibration. Car celles-ci se trouvent du côté opposé à la surface de jeu et sont placé sur le cadre du babyfoot, là où la parallaxe est le plus élevé.

### Luminosité

Les ombres et lumières extérieures exercent une influence sur la perception de la position de la balle. La lumière cause des reflets ou des ombres qui faussent la perception du centre de la balle. Des tests ont été fait en posant des obstacles autour de babyfoot et en notant le changement de position de la balle. Des « déplacement » allant jusqu'à 3.8 mm ont été observés.



#### Déplacements apparents de la balle causés la lumière dans différentes configurations

On observe que les déviations sont le plus forte quand la lumière venant dans l'axe du babyfoot est bloquée, il s'agit également de la source de lumière extérieur la plus proche. D'où l'importance de bloquer la lumière extérieure.

Modifier l'éclairage sur le côté du babyfoot, en changeant l'intensité et ou la couleur de la lumière pourrait limiter ces effets. Le manque de temps a malheureusement rendu impossible des essais réels sur ce sujet.

## 6. Résultats

Ce travail a permis de créer une nouvelle calibration plus précise que la précédente.

Le champ d'offset a amélioré l'efficacité de jeu, en permettant de meilleures interceptions et de tirs plus souvent perpendiculaires au joueur.

Les essais ont montré que la caméra 5 est légèrement plus efficace que la caméra 0.

La précision de mesure de position de la balle déterminée par la caméra haute précision devrait permettre de nouveaux développements dans les stratégies de passes et de jongle qui ont jusqu'à présent nécessité des paramètres empiriques qui réduisaient le potentiel d'emploi.

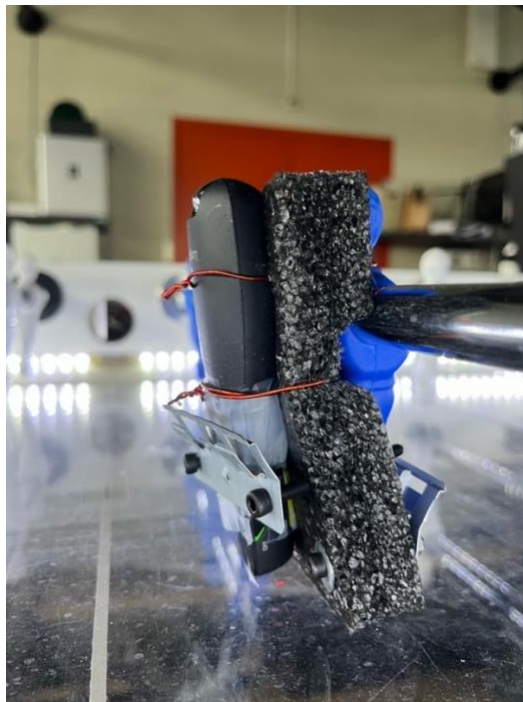
## 7. Méthodologie

### Laser

*Un laser est fixé sur un joueur qui est ensuite déplacé sur toute son amplitude par incréments*

**But :** identifier les erreurs de la calibration.

**Procédure :** Le pointeur laser est fixé sur un joueur grâce au socle.



*Le laser monté sur son socle, fixé au joueur*

Des mouvements de 20mm selon l'axe de la barre sont imposés au joueur depuis le VI *Demo\_Rods\_pos\_ChS\_2024<sup>5</sup>*. Les coordonnées du centre du laser sont ensuite mesurées via le VI de calibration *Babyfoot2021-Calibration\_ChS-Copie-Keusch*.

Un point faible de cette expérience réside dans le besoin d'identifier visuellement le centre du laser ce qui peut causer de légères erreurs lorsque la diffusion est forte.

Cependant cette expérience a fourni des résultats satisfaisants

---

<sup>5</sup> Un détail des VI se trouve en annexe B

## Balle et joueur

*La balle est fixée face à un joueur grâce à un support, le décalage est ensuite mesuré entre le centre de la balle et le centre du joueur.*

**But :** identifier le décalage dû aux erreurs de perspective et de calibration entre les joueurs et la balle.

**Procédure :** depuis le VI principal (les tests ont été fait sur =*Keusch\_spring\_2024*=)

1. Effectuer le homing pour avoir une constance dans la position
2. Fixer la balle au défenseur gauche. Ceci permet de diminuer les variations dans la position initiale
3. Sélectionner la balle selon la procédure définie dans *Automated Babyfoot : Vision* (encadrer la balle en laissant un pixel autour)
4. Sélectionner la stratégie *mesure balle*. Cette stratégie permet le contrôle en position et an angle de chaque joueur.
5. Noter la position X et Y de la balle pour le joueur
6. Fixer la balle au joueur suivant
7. Répéter les étapes 5 et 6 jusqu'à ce que tous les joueurs aient été mesurés
8. Noter les X et Y du centre des pieds de chaque joueur depuis le VI de calibration *Babyfoot2021-Calibration\_ChS-Copie-Keusch*

Le décalage est obtenu en soustrayant la position de la balle à celle des joueurs

La procédure pourrait être améliorée en ajoutant un repère visuel sur le centre du pieds des joueurs Cela permettrait de diminuer les variations dans l'identification provenant des erreurs de parallaxe et de l'imprécision générale causées par l'observation humaine.



*Support créé pour la mesure du décalage. Le joueur vient se fixer sur la pièce noire*

## Balle seule

L'expérience balle et joueur ci-dessus ont permis de mettre en évidence de grandes variations dues à l'erreur humaine dans la mesure du centre du joueur qui causait des

variations dans le champ de correction. Il s'est avéré nécessaire de définir une méthode plus rapide et laissant moins de place à l'erreur humaine.

**Procédure** : identique à la précédente, à la différence que le centre des joueurs (étape 8) a été mesuré physiquement au préalable depuis le VI *Dimensions*.

Cette procédure a permis de mettre en place les premières versions efficaces du champ d'offset.

## Définition empirique du champ d'offset

Les deux expériences de mesure de décalage de balle précédente ont confirmé l'efficacité du champ d'offset. Mais dans sa version finale les corrections ont été définies par une autre méthode.

**Procédure** : les étapes 1 à 3 sont communes avec l'expérience balle et joueur

La stratégie employée est la stratégie *defence all players 2*. La balle est posée devant le joueur et depuis le VI *Correction\_interpolees\_2\_2024\_GK* la correction est choisie pour que le joueur soit face à la balle.

## Essais du Champ d'offset

**But** : observer les améliorations dues à l'activation champ d'offsets et estimer leur effet en condition réelles. Ce type d'essai a également été employé pour estimer les différences entre la caméra 0 et la caméra 5

**Procédure** : deux types de tests ont été effectués :

- Du jeu successivement avec et sans champ d'offset en observant si l'efficacité du babyfoot change
- Lancer la balle à différentes vitesses et observer si la balle est interceptée et si oui, avec quel type de trajectoire (droite, à l'angle...)

## Tests de Luminosité

**But** : déterminer les variations de la position de la balle causé par la lumière.

**Procédure** : Un obstacle est placé de façon à bloquer la lumière extérieure du soleil

La position X et Y de la balle est notée.

Deux types d'obstacles sont employés :

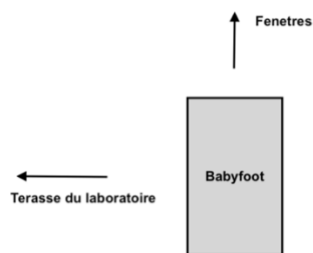
- Un tableau blanc monté sur roulette trouvé dans le laboratoire
- La couverture noire utilisée pour bloquer la lumière pour les calibrations

Avec ces deux obstacles il est possible de bloquer la lumière venant du haut et du bas du babyfoot.

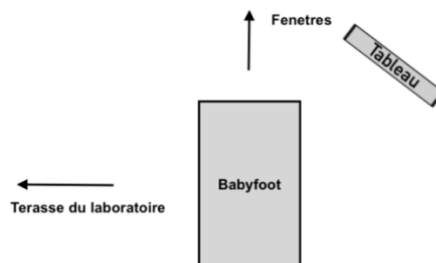
Les tests ont été effectués proche des attaquants une zone qui avait eu de grandes variations lors des mesures de décalages.

11 configurations ont été testées :

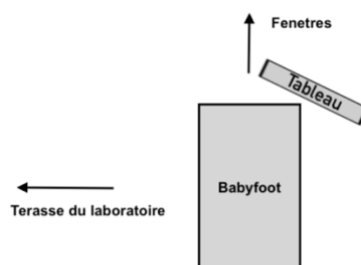
- La configuration initiale sans obstacle



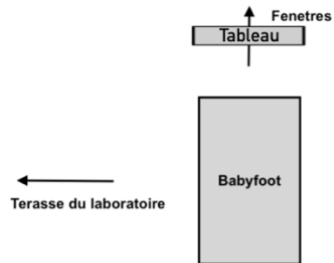
- Tableau coin haut



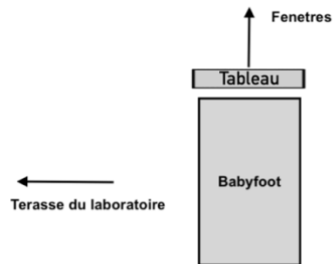
- Tableau coin haut (proche)



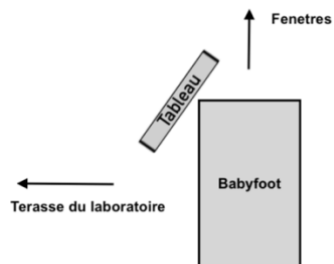
- Tableau haut



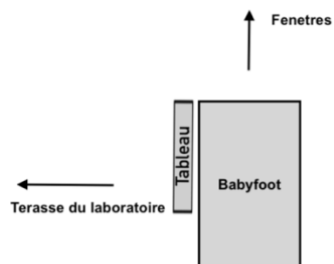
- Tableau haut (proche)



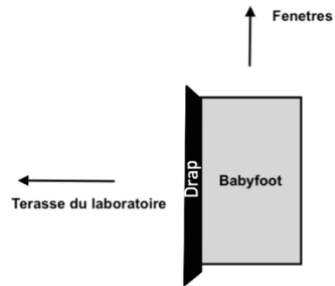
- Tableau coin haut gauche



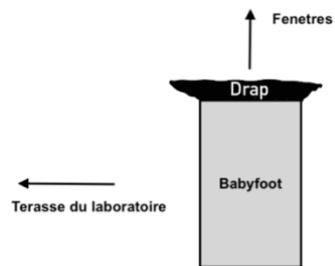
- Tableau côté gauche



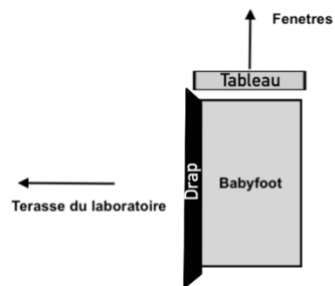
- Drap côté



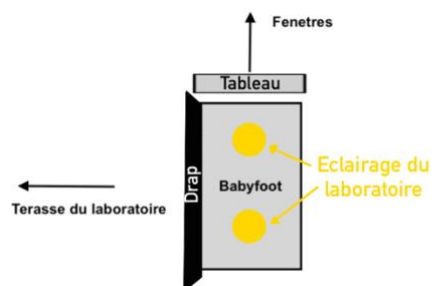
- Drap haut



- Drap côté + Tableau haut



- Drap côté + Tableau haut + éclairage laboratoire



## 8. Remerciements

Merci à Christophe Salzmann pour son aide et conseils lors de ce projet qui m'ont permis de travailler dans des conditions optimales.

Merci également à Philippe Schuchert pour son rôle de mentor et ses idées.

# ANNEXES

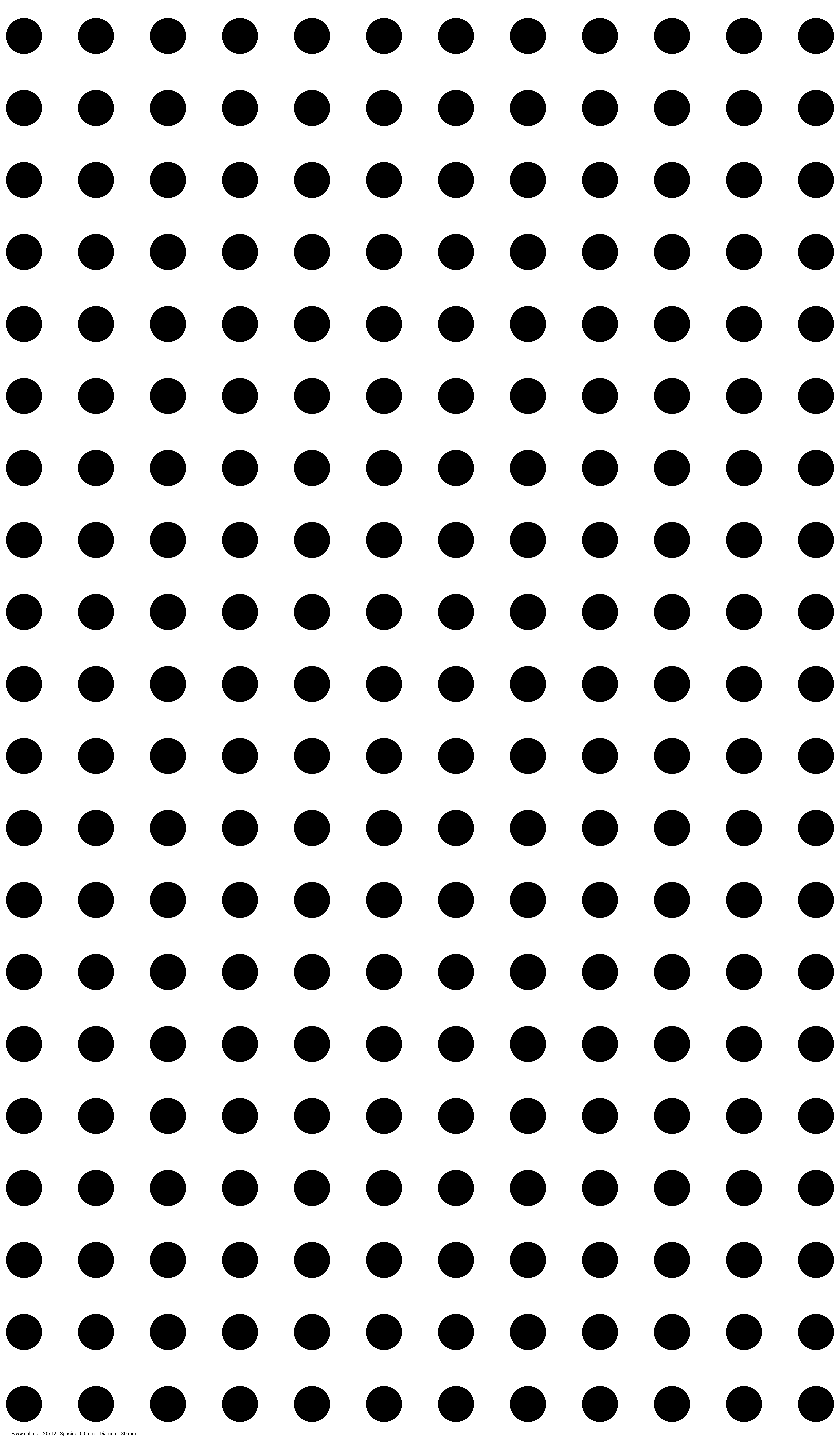
## A. Patterns

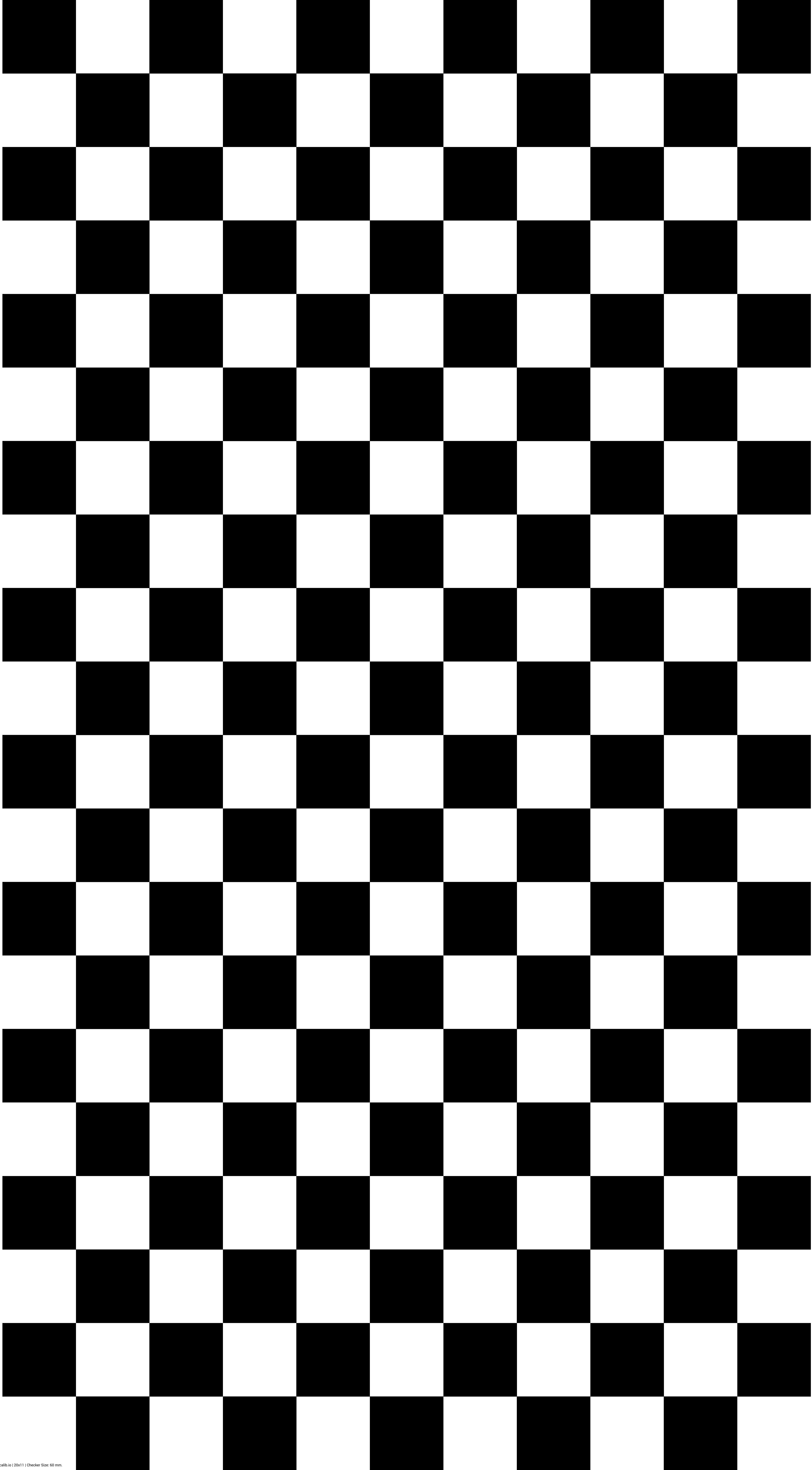
4 patterns principaux ont été employés pour les calibrations, 2 à pois et 2 damiers

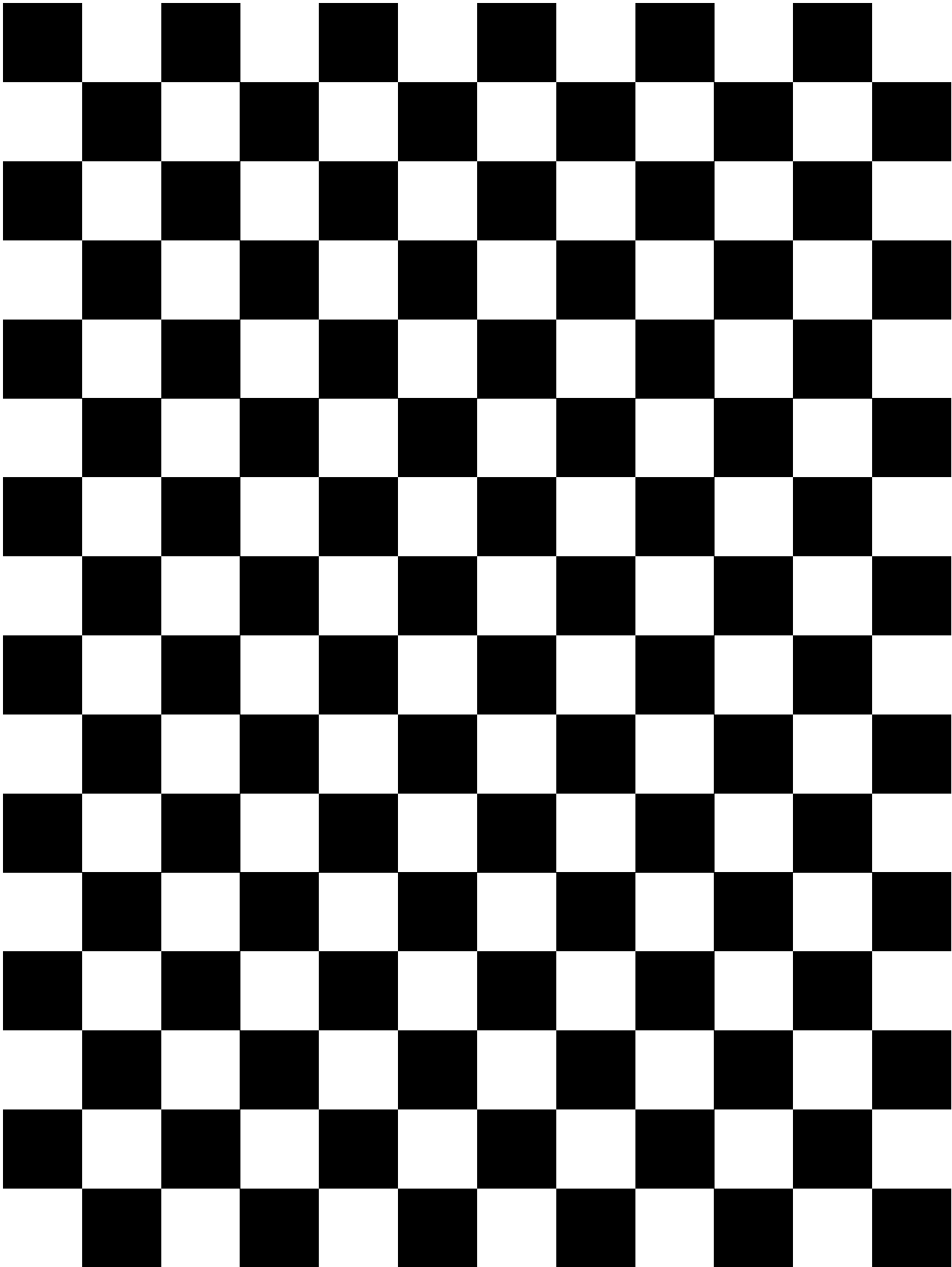
A exception du Pois 2, les patterns ont été générés sur <https://calib.io/pages/camera-calibration-pattern-generator>

Le pattern pois 2 a été obtenu par réduction d'une section du pattern pois 1

PATTERN	Type	Taille	Ligne	Colonne	Espacement	Diamètre/Coté
Pois 1	Circles	700x1200m m	20	12	60mm	30mm
Pois 2	Circles	210x297mm (A4)	4	6	48mm	24mm
Damier 1	Checkerboard	700x1200m m	20	11	-	60mm
Damier 2	Checkerboard	210x297mm (A4)	8	8	-	13mm

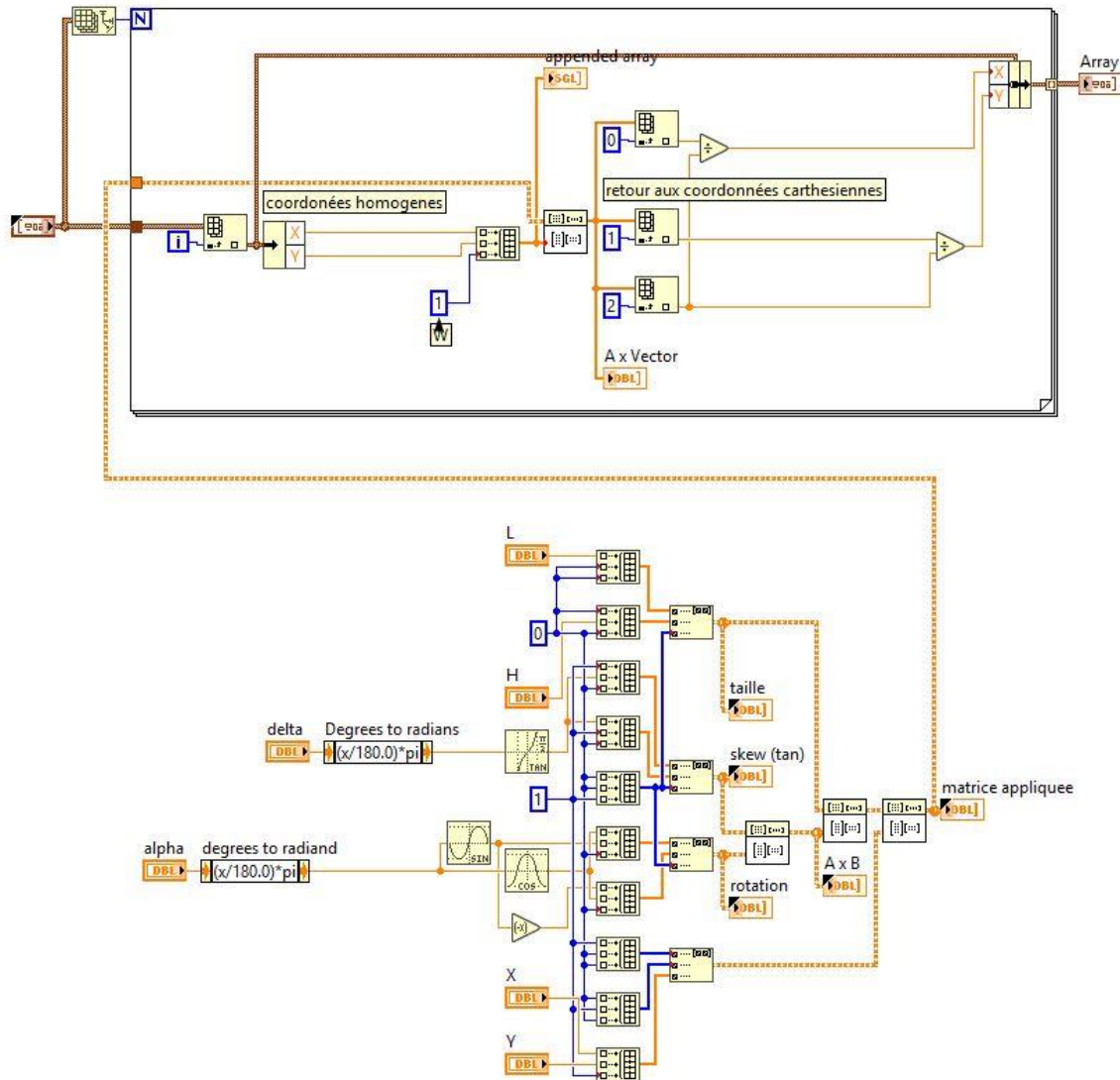






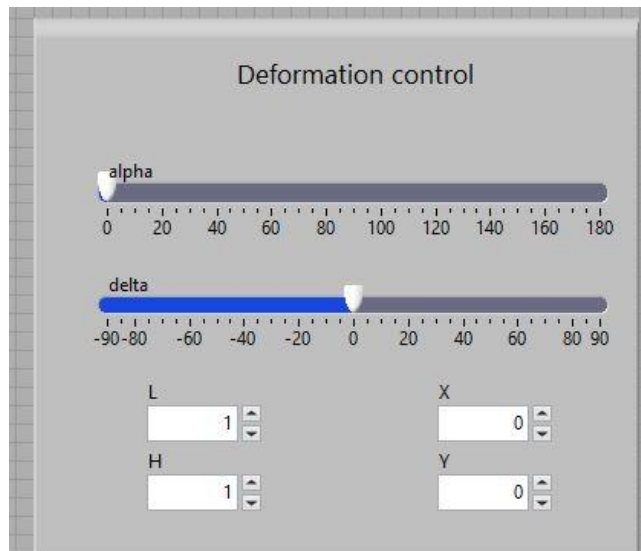
## B. VI

### Matrice de déformation



Ce VI prend en entrée un tableau de coordonnées, ainsi que les paramètres de déformation. Puis il construit la matrice de déformation (en bas), isole chaque coordonnée, les convertit en coordonnée homogène et applique la matrice.

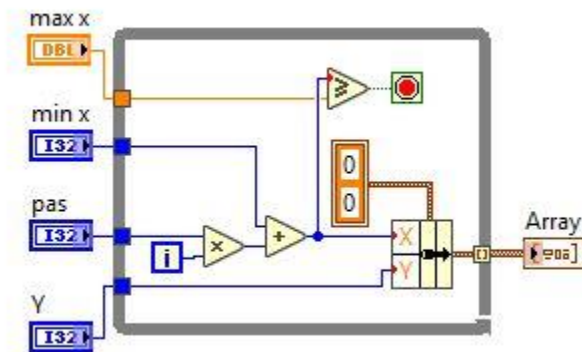
Enfin il ramène aux coordonnées cartésiennes et retourne un nouveau tableau de coordonnées



*Le panneau de contrôle de déformation dans le VI Babyfoot2021-Calibration\_ChS-Copie-Keusch*



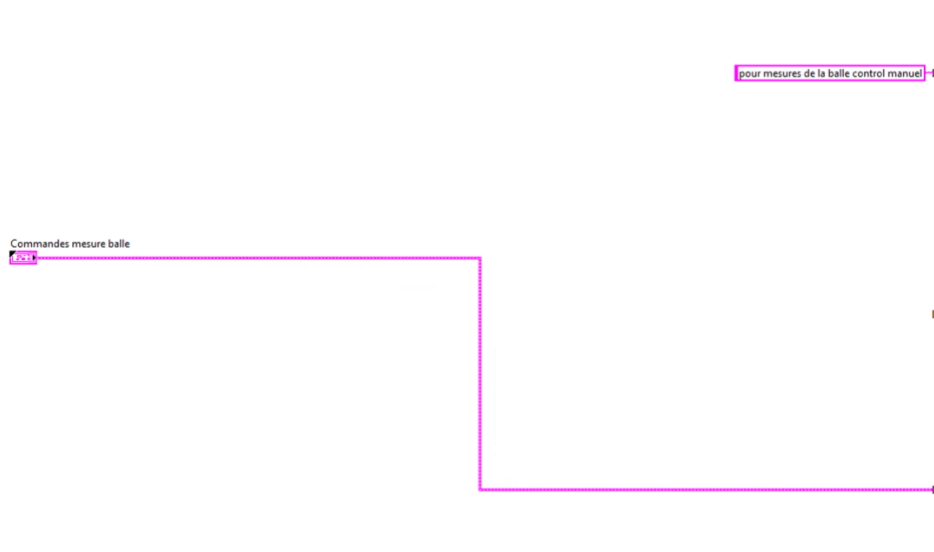
## Createur ligne



Ce VI génère un tableau de points séparé d'un pas constant, sur un Y constant.

Pour créer un maillage complet ce VI est placé dans une boucle pour faire varier le Y.

## Stratégie mesure Balle



Cette stratégie reçoit des positions et des angles pour chaque barre et les applique.

## C. Mesures Excel

Les résultats des mesures sont ici à l'état brut

Dans l'ordre :

- Laser
- Mesure Balle et Balle seule
- Tests de Luminosité

def pos	x	y	variation	def2 pos	X	Y	variation	def3 pos	calib 5 X	fixation finale Y	variation	atk pos	X	Y	variation
-160	-360	-280		-160	-329	-267		-160	-344	-272		-80	242	-276	
-140	-360	-260	0	-140	-331	-248	-1	-140	-344	-252	0	-60	241	-256	0
-120	-361	-239	1	-120	-335	-230	-2	-120	-344	-232	0	-40	241	-235	1
-100	-362	-220	-1	-100	-335	-209	1	-100	-343	-211	1	-20	240	-218	-3
-80	-362	-200	0	-80	-337	-191	-2	-80	-343	-193	-2	0	241	-198	0
-60	-363	-180	0	-60	-337	-172	-1	-60	-347	-173	0	20	241	-179	-1
-40	-365	-160	0	-40	-340	-153	-1	-40	-347	-154	-1	40	241	-159	0
-20	-365	-141	-1	-20	-340	-132	1	-20	-347	-135	-1	60	241	-138	1
0	-367	-120	1	0	-340	-113	-1	0	-347	-114	1	80	241	-120	-2
20	-368	-101	-1	20	-341	-93	0	20	-348	-95	-1	rod 2			
40	-368	-81	0	40	-342	-73	0	40	-348	-75	0	-80	239	-73	
60	-369	-61	0	60	-343	-53	0	60	-348	-55	0	-60	239	-52.5	0.5
80	-370	-41	0	80	-344	-34	-1	80	-349	-36	-1	-40	239	-32	0.5
100	-371	-21	0	100	-343	-14	0	100	-349	-16	0	-20	239	-13	-1
120	-371	-1	0	120	-345	5	-1	120	-350	4	0	0	239	6	-1
140	-372	20	1	140	-345	24	-1	140	-350	23	-1	20	239	26	0
160	-372	39	-1	160	-354	45	1	160	-350	43	0	40	239	46	0
rod 2			-59	rod 2			-65	rod2				60	239	65	-1
-80	-355	41	21	-80	-345	40	20	-80	-350	39		80	238	85	0
-60	-355	62	1	-60	-345	59	-1	-60	-350	60	1	rod 3			
-40	-355	82	0	-40	-346	78	-1	-40	-350	80	0	-80	238	133	
-20	-355	102	0	-20	-345	97	-1	-20	-351	99	-1	-60	238	153	0
0	-356	123	1	0	-348	118	1	0	-350	120	1	-40	238	173	0
20	-356	141	-2	20	-349	137	-1	20	-352	140	0	-20	238	192	-1
40	-357	162	1	40	-348	157	0	40	-351	159	-1	0	238	212	0
60	-358	184	2	60	-350	177	0	60	-353	179	0	20	237	230	-2
80	-358	204	0	80	-350	197	0	80	-353	199	0	40	237	251	1
100	-358	224	0	100	-352	217	0	100	-353	219	0	60	237	270	-1
120	-358	243	-1	120	-352	236	-1	120	-353	238	-1	80	237	290	0
140	-358	264	1	140	-353	255	-1	140	-353	257	-1				
160	-358	284	0	160	-353	275	0	160	-354	277	0				

Test efficacité socle première version

test tenue temps	test sauts
5min +2pix (a gauche par rapport a initial)	5saut +-1 aucun changement
10min +0pix	beaucoup pet +2pix
15min +0pix	1 saut +10 (Al +10pix)

mesure peu précises haute diffusion

Resultats

CMD	X				Valeur Attendue	moyenne
	test 1	test 2	test 3	test 4		
-160	-360	-329	-344	-372	-376.65	-351.25
-140	-360	-331	-344	-372	-376.65	-351.75
-120	-361	-335	-344	-372	-376.65	-353
-100	-362	-335	-343	-372	-376.65	-353
-80	-362	-337	-343	-373	-376.65	-353.75
-60	-363	-337	-347	-374	-376.65	-355.25
-40	-365	-340	-347	-375	-376.65	-356.75
-20	-365	-340	-347	-375	-376.65	-356.75
0	-367	-340	-347	-377	-376.65	-357.75
20	-368	-341	-348	-377	-376.65	-358.5
40	-368	-342	-348	-377	-376.65	-358.75
60	-369	-343	-348	-377	-376.65	-359.25
80	-370	-344	-349	-377	-376.65	-360
100	-371	-343	-349	-377	-376.65	-360
120	-371	-345	-350	-376	-376.65	-360.5
140	-372	-345	-350	-377	-376.65	-361
160	-372	-354	-350	-377	-376.65	-363.25

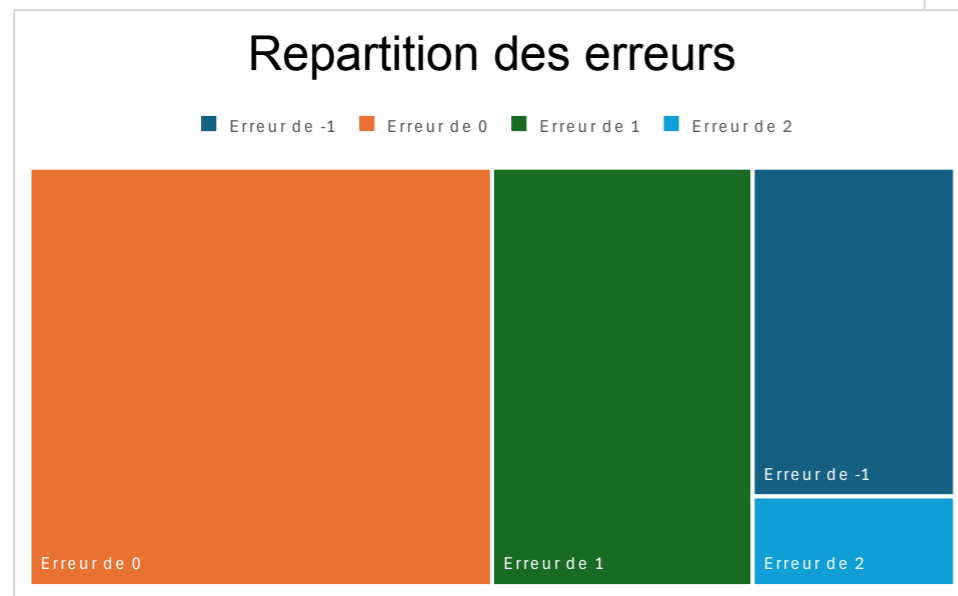
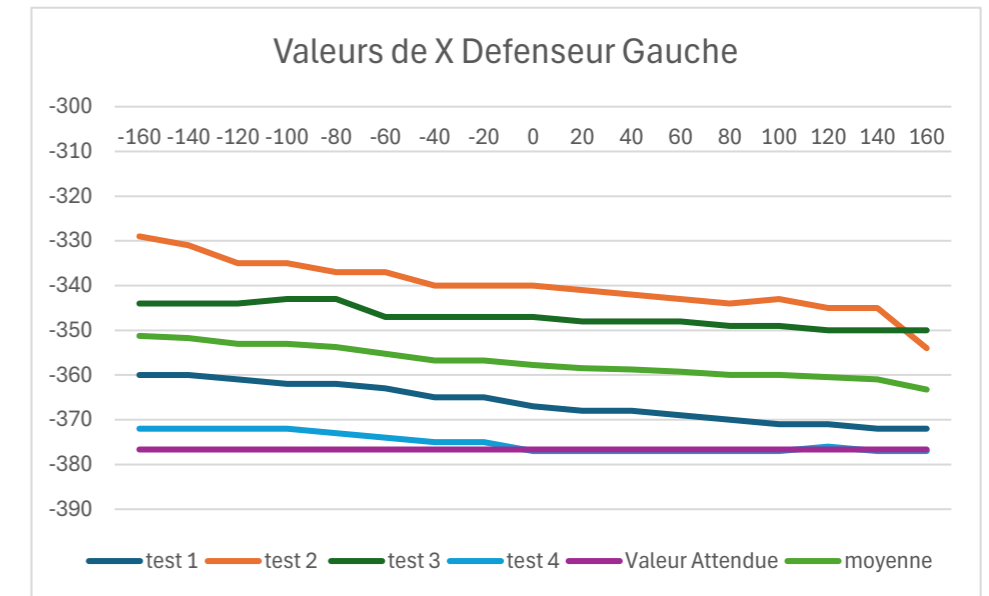
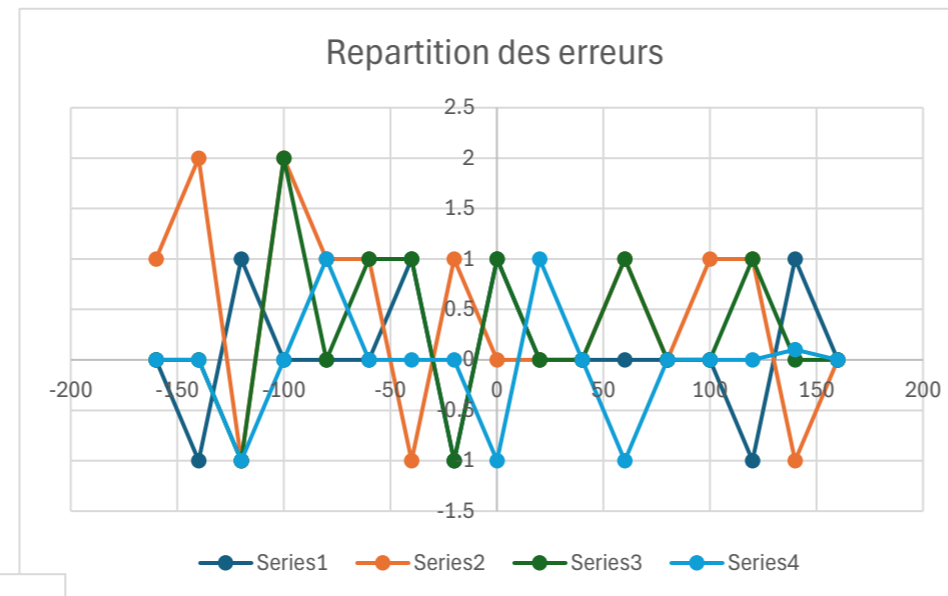
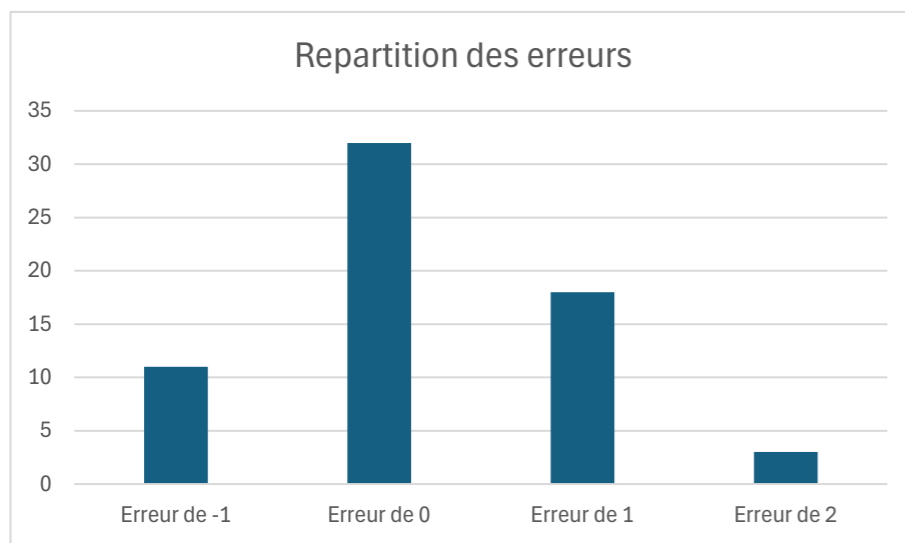
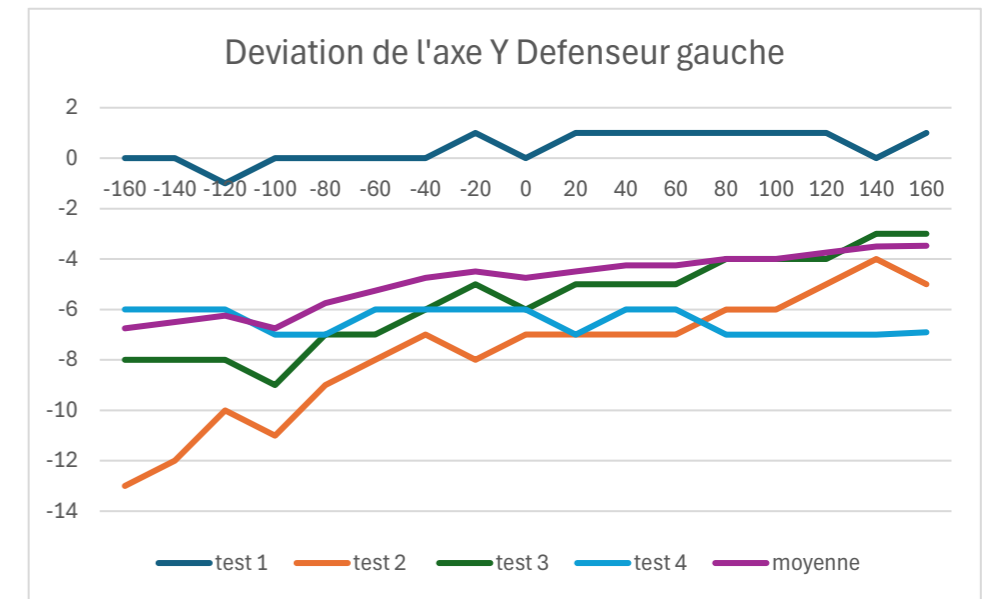
DEF G

CMD	Y				Valeur Attendue	Deviation Y				
	test 1	test 2	test 3	test 4		test 1	test 2	test 3	test 4	moyenne
-160	-280	-267	-272	-274	-280	0	-13	-8	-6	-6.75
-140	-260	-248	-252	-254	-260	0	-12	-8	-6	-6.5
-120	-239	-230	-232	-234	-240	-1	-10	-8	-6	-6.25
-100	-220	-209	-211	-213	-220	0	-11	-9	-7	-6.75
-80	-200	-191	-193	-193	-200	0	-9	-7	-7	-5.75
-60	-180	-172	-173	-174	-180	0	-8	-7	-6	-5.25
-40	-160	-153	-154	-154	-160	0	-7	-6	-6	-4.75
-20	-141	-132	-135	-134	-140	1	-8	-5	-6	-4.5
0	-120	-113	-114	-114	-120	0	-7	-6	-6	-4.75
20	-101	-93	-95	-93	-100	1	-7	-5	-7	-4.5
40	-81	-73	-75	-74	-80	1	-7	-5	-6	-4.25
60	-61	-53	-55	-54	-60	1	-7	-5	-6	-4.25
80	-41	-34	-36	-33	-40	1	-6	-4	-7	-4
100	-21	-14	-16	-13	-20	1	-6	-4	-7	-4
120	-1	5	4	7	0	1	-5	-4	-7	-3.75
140	20	24	23	27	20	0	-4	-3	-7	-3.5
160	39	45	43	46.9	40	1	-5	-3	-6.9	-3.475

DEF G

Variation ecart					
-160	0	1	0	0 Erreur de -1	11
-140	-1	2	0	0 Erreur de 0	32

-120	1	-1	-1	-1	Erreur de 1	18
-100	0	2	2	0	Erreur de 2	3
-80	0	1	0	1	Erreur de 0.1	considéré comme 0
-60	0	1	1	0		
-40	1	-1	1	0		
-20	-1	1	-1	0		
0	1	0	1	-1		
20	0	0	0	1		
40	0	0	0	0		
60	0	1	1	-1		
80	0	0	0	0		
100	0	1	0	0		
120	-1	1	1	0		
140	1	-1	0	0.1		
160	0	0	0	0		



def avec vis

Première version du test

pos

X

Y

-160	-372	-274
-140	-372	-254
-120	-372	-234
-100	-372	-213
-80	-373	-193
-60	-374	-174
-40	-375	-154
-20	-375	-134
0	-377	-114
20	-377	-93
40	-377	-74
60	-377	-54
80	-377	-33
100	-377	-13
120	-376	7
140	-377	27
160	-377	46.9

la mesure est effectuée avec une via collée a un joueur au lieu du laser  
la precision est moindre

Mesure Balle et Joueur test avant procédure standardisée

test 1				mesure centre joueur								
no joueur	X balle	Yjoueur	pos joueur	no joueur	X balle	Yballe	cmd joueur	rod mes	X	Y	delta X	delta Y
Gardien				Gardien	-513.55	0.62	0	96	-514	-1	0.45	1.62
DEF Gauche	-360.37	-137.36	17	DEF Gauche	-360.9	-117.86	0	100	-371	-117	10.1	-0.86
DEF Droit	-364.69	102.3	17	DEF Droit	-364.57	123.43	0	100	-376	-117	11.43	6.43
MID Gauche	-55.28	-250.19	-21	MID Gauche	-57.17	-231.48	0	-52	-76	-225	18.83	-6.48
MID Centre G	-56.98	-130.3	-21	MID Centre G	-57.94	-111.31	0	-52	-77	-110	19.06	-1.31
MID Centre	-57.46	-11.75	-21	MID Centre	-59.44	10.17	0	-52	-78.2	7	18.76	3.17
MID Centre D	-58.77	108.79	-21	MID Centre D	-60.01	130.66	0	-52	-80	124	19.99	6.66
MID Droit	-60.67	217	-21	MID Droit	-60.22	239.62	0	-52	-80	228	19.78	11.62
ATK Gauche				ATK Gauche	245.58	-202.54	0	14	212	-196	33.58	-6.54
ATK Centre				ATK Centre	242.38	8.93	0	14	210	6	32.38	2.93
ATK Droit				ATK Droit	240.78	219.04	0	14	208	209	32.78	10.04

template mesure Balle et joueur

mesure	date	heure	exposition	exposition 2	mesure centre joueur							
no joueur	X balle	Yballe	cmd joueur	rod mes	X	Y	delta X	delta Y				
Gardien					0	0	0	0				
DEF Gauche					0	0	0	0				
DEF Droit			0	0	0	0	0	0				
MID Gauche					0	0	0	0				
MID Centre Gauche			0	0	0	0	0	0				
MID Centre			0	0	0	0	0	0				
MID Centre Droit			0	0	0	0	0	0				
MID Droit			0	0	0	0	0	0				
ATK Gauche			0	0	0	0	0	0				
ATK Centre			0	0	0	0	0	0				
ATK Droit			0	0	0	0	0	0				

RESULTATS

Definition des dimensions pour la procédure Balle seule

Joueur	Mesuré		VI Dimension	
	X	Y	X	Y
Gardien	522	-1	-526.5	0
DEF Gauche	-372	-120	-376.5	-120
DEF Droit	-374	118	-376.5	120
MID Gauche	-72	-234	-76.5	-240
MID Centre G	-72	-115	-76.5	-120
MID Centre	-73	4	-76.5	0
MID Centre D	-74	122	-76.5	120
MID Droit	-75	231	-76.5	240
ATK Gauche	220	-202	226.5	-208
ATK Centre	219	4	226.5	0
ATK Droit	218	198	226.5	208

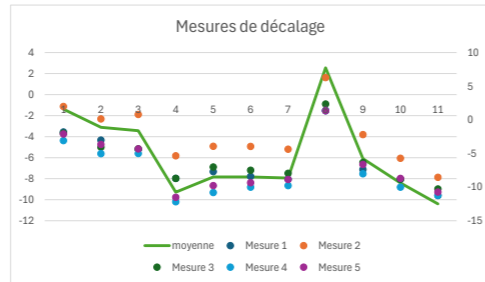
Comparaison Tests 1 à 5					
	Mesure		VI Dimensions		
	moyenne	ecart type	moyenne	ecart type	
Gardien	-2.39	2.20796097	-1.39	2.20796097	
DEF Gauche	-3.116	2.23771275	-3.116	2.23771275	
DEF Droit	-5.434	2.69676813	-3.434	2.69676813	
MID Gauche	-3.2778	2.79260576	-9.2778	2.79260576	
MID Centre G	-2.834	2.81433237	-7.834	2.81433237	
MID Droit	-3.832	2.55844354	-7.832	2.55844354	
MID Centre D	-5.94	2.36171371	-7.94	2.36171371	
MID Droit	-6.45	2.34197032	2.55	2.34197032	
ATK Gauche	-0.1	2.61267902	-6.1	2.61267902	
ATK Centre	-4.406	1.84270634	-8.406	1.84270634	
ATK Droit	-20.392	1.26380378	-10.392	1.26380378	
ecart type moyen		2.33915424			

AUTRE RESULTATS

	Delta y				
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5
Gardien	-2.8	0.99	-2.97	-4.07	-3.1
DEF Gauche	-3	0.14	-4.06	-5.01	-3.65
DEF Droit	-6.37	-1.2	-6.3	-7	-6.3
MID Gauche	-2.689	0.67	-2.7	-6.17	-5.5
MID Centre G	-2.68	1.07	-2	-5.79	-4.77
MID Centre	-4.39	0.05	-3.48	-6	-5.34
MID Centre D	-6.8	-2.35	-5.94	-7.76	-6.85
MID Droit	-7.63	-2.71	-6.64	-7.63	-7.64
ATK Gauche	-1.36	3.81	-0.34	-2	-0.61
ATK Centre	-4.84	-1.7	-4.8	-6	-4.69
ATK Droit	-21.22	-18.54	-20.26	-21.22	-20.72

	VI Dimensions				
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5
Gardien	-1.8	1.99	-1.97	-3.07	-2.1
DEF Gauche	-3	0.14	-4.06	-5.01	-3.65
DEF Droit	-4.37	0.8	-4.3	-5	-4.3
MID Gauche	-8.689	-5.33	-8.7	-12.17	-11.5
MID Centre G	-7.68	-3.93	-7	-10.79	-9.77
MID Centre	-8.39	-3.95	-7.48	-10	-9.34
MID Centre D	-8.8	-4.35	-7.94	-9.76	-8.85
MID Droit	1.37	6.29	2.36	1.37	1.36
ATK Gauche	-7.36	-2.19	-6.34	-8	-6.61
ATK Centre	-8.84	-5.7	-8.8	-10	-8.69
ATK Droit	-11.22	-8.54	-10.26	-11.22	-10.72

Variation dans la mesure des joueurs					
	mesure 2-3		Variation de variation		
	X	Y	TEST et mesure 1	Mesure 1 et 2	Mesure 2 et 3
Gardien	0	0	-0.18	2.79	-3.96
DEF Gauche	-1	1	-1.86	6.14	-5.2
DEF Droit	-2	0	-2.94	7.17	-5.1
MID Gauche	-2	1	-1.169	3.359	-4.37
MID Centre G	-3	0	1.01	2.75	-3.07
MID Centre	-2	0	1.28	3.94	-3.53
MID Centre D	-3	0	-1.14	5.45	-3.59
MID Droit	-3	1	0.99	4.92	-4.93
ATK Gauche	0	0	-1.9	5.17	-4.15
ATK Centre	0	0	0.09	3.14	-3.1
ATK Droit	6	0	-1.18	3.68	-1.72



Mesure Balle et Joueur

mesure 1		mesure centre joueur									
date	01.mai heure	14:35									
exposition	1015	exposition 2	2015								
no joueur	X balle	Yballe	cmd joueur	rod mes	X	Y	delta X	delta Y			
Gardien	-511.96	1.8	0	-84	-511	0	-0.96	1.8			
DEF Gauche	-354.71	-117	0	-7	-372	-118	17.29	1			
DEF Droit	-360.96	124.37	0	-7	-396	115	35.04	9.37			
MID Gauche	-50.33	-231.311	0	-1.3	-75	-226	24.67	-5.311			
MID Centre Gauche	-57.93	-112.32	0	-1.3	-77	-110	19.07	-2.32			
MID Centre	-55.81	8.39	0	-1.3	-79	6.5	23.19	1.89			
MID Centre Droit	-56.35	128.8	0	-1.3	-80	121	23.65	7.8			
MID Droit	-56.46	238.63	0	-1.3	-80	228	23.54	10.63			
ATK Gauche	248.82	-200.64	0	4.50	213	-196	35.82	-4.64			
ATK Centre	245.76	8.84	0	4.50	211	6	34.76	2.84			
ATK Droit	243.07	219.22	0	4.50	191	208	52.07	11.22			

mesure 2		mesure centre joueur									
date	02.mai heure	15:05									
exposition	1015	exposition 2	2015								
no joueur	X balle	Yballe	cmd joueur	rod mes	X	Y	delta X	delta Y			
Gardien	-501.3	-1.99	0	0	-513	-1	11.7	-0.99			
DEF Gauche	-352.55	-120.14	0	0	-364	-115	11.45	-5.14			
DEF Droit	-352.19	119.2	0	0	-367	117	14.81	2.2			
MID Gauche	-44.47	-234.67	0	-0.16	-75	-226	30.53	-8.67			
MID Centre Gauche	-45.86	-116.07	0	-0.16	-77	-111	31.14	-5.07			
MID Centre	-46.73	3.95	0	-0.16	-78	6	31.27	-2.05			
MID Centre Droit	-48.13	124.35	0	-0.16	-80	122	31.87	2.35			
MID Droit	-51.71	233.71	0	-0.16	-80	228	28.29	5.71			
ATK Gauche	253.03	-205.81	0	0.10	213	-196	40.03	-9.81			
ATK Centre	252.68	5.7	0	0	211	6	41.68	-0.3 oscillations environ 1 pix en X et Y			
ATK Droit	248.59	216.54	0	0	215	209	33.59	7.54			

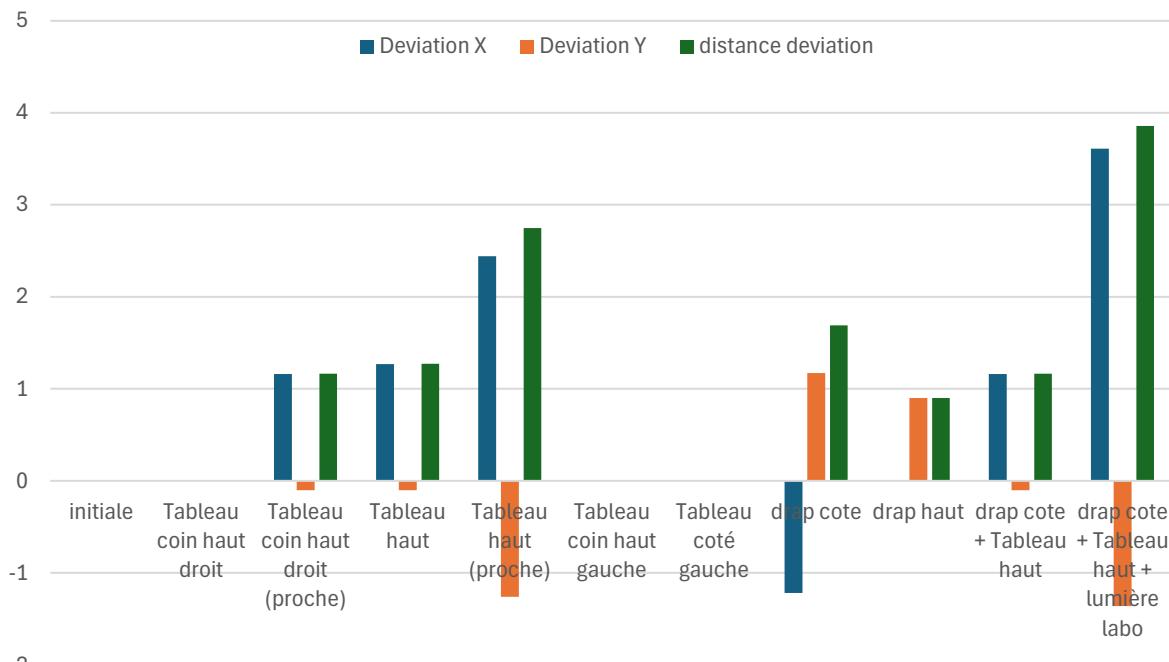
mesure 3		mesure centre joueur									
date	02.mai heure	15:40									
exposition	1015	exposition 2	2015								
no joueur	X balle	Yballe	cmd joueur	rod mes	X	Y	delta X	delta Y			
Gardien	-508	1.97	0	0	-513	-1	5	2.97 oscillation en x et y	1.26		
DEF Gauche	-353.38	-115.94	0	0	-363	-116	9.62	0.06	2.465		
DEF Droit	-357.31	124.3	0	0	-365	117	7.69	7.3 oscillation en x	0.43421429		
MID Gauche	-49	-231.3	0	-0.16	-73	-227	24	-4.3 oscillation en x	1.325		
MID Centre Gauche	-54	-113	0	-0.16	-74	-111	20	-2 oscillation en x			
MID Centre	-55.8	7.48	0	-0.16	-76	6	20.2	1.48			
MID Centre Droit	-56.34	127.94	0	-0.16	-77	122	20.66	5.94			
MID Droit	-56.44	237.64	0	-0.16	-77	227	20.56	10.64 oscillation en x			
ATK Gauche	247.79	-201.66	0	0.10	213	-196	34.79	-5.66			
ATK Centre	246	8.8	0	0	211	6	35	2.8 oscillation en x et y			
ATK Droit	244.14	218.26	0	0	209	209	35.14	9.26			

Changement de procédure pour Balle Seule

mesure 4		mesure centre joueur									
date	06.mai heure	16:10									
exposition	2000	exposition 2	-								
no joueur	X balle	Yballe	cmd joueur	rod mes	X	Y	delta X	delta Y			
Gardien	-508.82	3.07	0	0	-508.82	3.07					
DEF Gauche	-354.51	-114.99	0	0	-354.51	-114.99					
DEF Droit	-361	125	0	0	-361	125					
MID Gauche	-49.36	-227.83	0	0	-49.36	-227.83					
MID Centre Gauche	-50.52	-109.21	0	0	-50.52	-109.21					
MID Centre	-56.7	10	0	0	-56.7	10					
MID Centre Droit	-57.27	129.76	0	0	-57.27	129.76	</				

Configuration	X	Y	Deviation X	Deviation Y	distance deviation
initiale	254.21	-109.9	0	0	0
Tableau coin haut droit	254.21	-109.9	0	0	0
Tableau coin haut droit (proche)	255.37	-110	1.16	-0.1	1.164302366
Tableau haut	255.48	-110	1.27	-0.1	1.273930924
Tableau haut (proche)	256.65	-111.16	2.44	-1.26	2.746124542
Tableau coin haut gauche	254.21	-109.9	0	0	0
Tableau coté gauche	254.21	-109.9	0	0	0
drap cote	252.99	-108.73	-1.22	1.17	1.690354992
drap haut	254.21	-109	0	0.9	0.9
drap cote + Tableau haut	255.37	-110	1.16	-0.1	1.164302366
drap cote + Tableau haut + lumière labo	257.82	-111.26	3.61	-1.36	3.85768065

Déplacement de la balle du à la lumière



## D. Bibliographie

ALLGEUER Philipp. nimb-ro-op-ros . 2013. GitHub repository

Disponible à l'adresse :

[https://github.com/NimbRo/nimb-ro-op-ros/tree/a286de0de30b8e36ba1cbb0d2e4a083d9f1325e2/src/nimb-ro/cv/soccer\\_vision/matlab](https://github.com/NimbRo/nimb-ro-op-ros/tree/a286de0de30b8e36ba1cbb0d2e4a083d9f1325e2/src/nimb-ro/cv/soccer_vision/matlab)

BERGAMASCO, Filippo. The pinhole camera model. Slides de cours, Ca' Foscari University of Venice. 2017-2018

Disponible à l'adresse :

[https://www.dsi.unive.it/~bergamasco/teachingfiles/cvslides2018/11\\_pinhole\\_camera\\_model.pdf](https://www.dsi.unive.it/~bergamasco/teachingfiles/cvslides2018/11_pinhole_camera_model.pdf)

FDXLABS. *Calculate X, Y, Z Real World Coordinates from image Coordinate using OpenCV*. 2019

Disponible à l'adresse :

<https://www.fdxlabs.com/calculate-x-y-z-real-world-coordinates-from-a-single-camera-using-opencv/>

KONISHI, Séverin. *Automated Babyfoot : Vision*. 2023

MATHWORKS. *Calibration Patterns*. (sans date) (s'applique à R2024a)

Disponible à l'adresse :

<https://ch.mathworks.com/help/vision/ug/calibration-patterns.html>

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. *IMAQ Vision for LabWindows/CVI User manual*. 2004

Disponible à l'adresse :

<https://download.ni.com/support/manuals/371266a.pdf>

OPENCV. Camera calibration. (sans date)

Disponible à l'adresse :

[https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial\\_py\\_calibration.html](https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html)

OPENCV. *Camera calibration and 3D reconstitution*. (sans date)

Disponible à l'adresse :

[https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.html](https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html)

SALZMANN, Christophe. *Programmation pour ingénieur, Projet, Oscillio2data*.  
Slides de cours, EPFL. 2022