

Seuil minimum à partir duquel la décision des footballeurs d'élite de rediriger un coup de pied lors d'un penalty est encore possible

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du titre de
Master of Science en sciences du sport
Option enseignement

déposé par

Andrea Alli

à

l'Université de Fribourg, Suisse
Faculté des sciences et de médecine
Section Médecine
Département des neurosciences et sciences du mouvement

en collaboration avec la
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent
Prof. Jean-Pierre Bresciani

Conseiller
Dr. Jean-Luc Bloechle

Fribourg, Juin 2022

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont collaboré avec moi et ont permis la réalisation de ce projet de master, sans lesquelles il n'aurait pu être concrétisé. L'engagement, le sérieux, le professionnalisme et la communication qui ont eu lieu avec elles ont permis de réaliser et de mettre en pratique cette étude scientifique.

- ◆ Tout d'abord, un grand merci au Professeur Jean-Pierre Bresciani de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet sur les penaltys. Je tiens en particulier à le remercier pour sa disponibilité et sa gentillesse, ainsi que pour le soutien qu'il m'a apporté pendant toute la période de supervision.
- ◆ Je tiens également à remercier le Dr Jean-Luc Bloechle, tout d'abord pour le temps qu'il a investi dans la réalisation, la programmation du projet et pour la résolution des problèmes techniques rencontrés. Je le remercie également de m'avoir enseigné l'utilisation de l'équipement et pour m'avoir soutenu pendant toute la période de mesure.
- ◆ Un merci également au Dr Julien Audiffren pour ses conseils en matière d'expérimentation et son travail d'analyse des résultats.
- ◆ Je tiens ensuite à remercier le club du FC Lucerne pour m'avoir donné l'opportunité de travailler avec une association professionnelle, pour m'avoir accueilli et pour avoir fourni tout le matériel nécessaire à l'exécution des tirs au but.
- ◆ Je tiens à remercier tout particulièrement Gabriel Wüthrich, d'abord parce qu'il s'est intéressé à notre projet, l'a présenté au FC Lucerne et a permis qu'il soit accepté par le club. Ensuite parce qu'il s'est occupé de l'organisation de toute la période de mesure, s'est toujours rendu disponible pour tout problème et m'a soutenu.
- ◆ Mes sincères remerciements vont également à Christian Schmidt, le préparateur physique du FC Lucerne, qui a aidé à la réalisation du projet en suggérant de précieux conseils. Je tiens également à le remercier pour sa coopération durant toute la période de mesure, ainsi que pour ses compétences et ses enseignements qui m'ont formé dans le domaine de la préparation physique des joueurs.

- ◆ Merci à tous les joueurs et entraîneurs des équipes M16 et M17 du FC Lucerne qui se sont mis à disposition pour l'exécution des tirs au but, qui ont été très flexibles en me donnant de leur temps pendant l'entraînement. Leur sérieux et leur engagement ont créé des conditions optimales de coopération et de mesure.
- ◆ Je tiens à remercier l'Université de Fribourg pour m'avoir formé dans mes disciplines, pour m'avoir accueilli durant ces cinq années d'études académiques et pour m'avoir fait grandir personnellement pour mon avenir.
- ◆ Un dernier remerciement dédié à toutes les personnes, in particulier à ma famille, qui m'ont accompagné, encouragé et soutenu durant mon parcours universitaire, sans lesquelles je n'aurais pas pu réaliser mon parcours.

Résumé

Introduction

Le penalty lors de 90min de jeu, pourrai être la seule occasion pour marquer un but (Palacios Huerta, 2003). Le succès d'un penalty dépend de nombreux facteurs, tels que : la technique, la tactique, les aspects psychologiques, cognitifs et liés à la chance (Jordet et al., 2007). Optimiser les habilités et trouver des stratégies efficaces est fondamentaux pour le future de football. En considérant que le gardien est obligé d'anticiper le tir du joueur (Van der Kamp et al., 2018), ce dernier est contraint d'apprendre la stratégie dépendent du gardien pour rediriger le tir du côté opposé à son plongeon (Bowtell et al., 2009 ; Morya et al., 2003 ; Van Der Kamp, 2006).

Objectif

L'objectif de ce travail sera d'étudier le seuil minimum de temps auquel un footballeur d'élite, lors d'un penalty, est encore capable de rediriger le tir en fonctionne de l'anticipation du gardien. Un deuxième objectif sera de savoir si le seuil de temps des joueurs peut être réduit par une phase d'entraînement. Un dernier objectif sera de comprendre si les joueurs ont un meilleur côté pour rediriger le tir.

Méthode

Des footballeurs d'élite (n=6) des équipées suisse FC Lucerne U16 et U17, âgé entre 16 et 17 ans, ont participé à l'expérience. Les sujets ont effectué à la semaine 3 sessions de 20 penaltys de durée de 15-20 min, pour une période totale de 4 semaine. Les rôles des joueurs ont été choisis arbitrairement et 4 joueurs étaient droitier et 2 gauchie.

Résultats

Le seuil minimal à un taux de réussite supérieur à 50 % était de 301,11 ms. Entre Pre et Post session elle a diminué significativement ($\chi^2(1) = 19.22$, $p < .001$). Il n'y avait pas d'effet principal pour le tir croisée (365,56 ms) et non croisée (341,90 ms), $\chi^2(1) = 1,92$, $p > .05$) et pas d'interaction entre les deux facteurs ($\chi^2(1) = 0,01$, $p > .05$).

Discussion

Les résultats des seuils minimaux de re direction, ainsi que la possibilité de les améliorer avec l'entraînement sont surprenants compte tenu de notre expérience en conditions réelles où la limite de temps de réaction du joueur était associée à des limites de perception-cognition-action.

Conclusion

La découverte du seuil minimal de redirection de 301,15 ms des footballeurs d'élite et la certitude de pouvoir l'améliorer constituent l'avenir de l'entraînement et succès des penaltys.

Table de matières

1 Introduction	5
1.1 Histoire du tir penalty au football	5
1.2 Importance du penalty dans le football moderne	7
1.3 Facteurs intervenant dans l'exécution d'un tir de penalty	8
1.4 Quelle stratégie adopter pour avoir plus de succès dans les penaltys ?	14
1.5 Stratégie dépendant du gardien	16
1.6 Enjeux de la problématique	22
1.7 Objectif du travail	24
1.8 Hypothèse	25
2 Méthode	28
2.1 Description de l'échantillon	28
2.2 Design de l'étude	28
2.3 Description des méthodes	30
2.4 Description détaillée des instruments de recherche	35
2.5 Analyse statistique des données	41
3 Résultats	42
3.1 Résultats globaux des seuils de redirection	42
3.2 Résultats des seuils de redirection de tirs croisés et non croisés en Pre et Post session	42
3.3 Résultats cinématiques des captures vidéo des penaltys des joueurs	45
4 Discussion	49
4.1 Analyse et interprétation des résultats en fonction des objectifs	49
4.2 Discussion des résultats sur la base des hypothèses	54
4.3 Forces et faiblesses de l'étude	56
4.4 Améliorations futures	58
5 Conclusion	60
Bibliographie	61
Annexes	69

1 Introduction

1.1 Histoire du tir penalty au football

L'origine du football remonte au 18^e siècle, lorsque les différents clubs anglais ont éprouvé le besoin d'établir un ensemble uniforme de règles de football permettant de jouer sur la base de règles convenues. En fait, c'est en 1863 qu'est née la première fédération nationale de football : le football d'association, qui a établi pour la première fois un règlement précis avec des règles et des conditions de jeu universelles. Pour le monde du football et du sport, ce fait a été une véritable révolution, car à partir de ce moment-là, le football est devenu un sport réglementé et joué de la même manière dans tous les pays du monde. Cependant, comme toute règle ou loi, celles du football ont également évolué. Aujourd'hui l'International Football Association Board (IFAB) est l'organe international suprême qui s'occupe des changements ou des innovations dans les règles du jeu (IFAB, 2022).

Le football joué avec les règles respectives que nous connaissons aujourd'hui n'est donc pas le même qu'à l'époque ; de nombreuses règles ont été modifiées et le jeu lui-même a progressé. La codification de plus en plus minutieuse du football a entraîné un important processus de développement et de professionnalisation (Kitching, 2015). À l'origine, le premier règlement du football ne prévoyait pas de coup de pied de réparation. En 1872, le coup franc indirect a été introduit pour toute infraction résultant d'une manipulation illégale du ballon, mais cette sanction a immédiatement été jugée inadaptée aux infractions provoquées par des fautes de main dans la surface adverse. Pour cette raison, il a été décidé en 1882, en cas de faute de main empêchant une action de but, d'accorder un but à l'équipe adverse (The Football Association: Alterations of Rules, 1882).

L'introduction de la règle du coup de pied de réparation ne remonte qu'à 1890, après que deux incidents footballistiques aient suscité de nombreuses discussions sur les règles en vigueur à l'époque. Le premier incident s'est produit en décembre 1890 lors du match de quart de finale de la coupe entre East Stirlingshire et Heart of Midlothian, après qu'un joueur ait mis le ballon dans le filet. La seconde s'est produite quelques mois plus tard, en mars 1891, lors du quart de finale de la FA Cup entre Notts County et Stoke City, lorsqu'un tir au but a été délibérément arrêté sur la ligne par la main d'un défenseur empêchant le but. Un coup franc a été clairement accordé par l'arbitre mais il n'a pas été marqué (Hearts and Scottish Football Reports For Sat, 1890). La règle du coup franc a donc été jugée inadaptée pour sanctionner des incidents tels

que ceux énumérés ci-dessus. C'est alors l'Irlandais William McCrum qui a proposé la règle du coup de pied de réparation pour rendre le jeu de football objectif. La règle a été approuvée et officiellement introduite par l'IFAB le 2 juin 1891 (IFAB, 1891).

1.1.1 Évolution de la règle du penalty

À l'origine, la règle introduite en 1891 permettait à l'arbitre d'accorder un coup de pied de réparation à l'équipe adverse, soit de tirer depuis n'importe quel endroit situé à 11 mètres de la ligne de but, après qu'un joueur ait commis une infraction intentionnelle envers un adversaire. Les infractions peuvent être commises lorsque le joueur tient, fait trébucher ou touche délibérément le ballon avec sa main. Pendant le coup de pied de réparation, le gardien de but adverse ne peut pas s'éloigner de plus de 5,5 mètres de la ligne de but, tandis que tous les joueurs, à l'exception de celui qui exécute le penalty, doivent rester à 5,5 mètres derrière la point du penalty (IFAB, 1891).

À partir de cette année-là, la règle des tirs au but a connu un processus d'évolution majeur. De nouvelles règles ont été introduites concernant le point de penalty, les distances entre les joueurs et le gardien, la surface de réparation et enfin le comportement du gardien et des joueurs (IFAB, 1902 ; 1905 ; 1937 ; 1923).

En ce qui concerne le comportement du joueur, les années 1970 représentent une période de débats et de discussions pour le football, du point de vue des règlements, car dans ces années-là, un épisode a créé des remous parmi les responsables des règlements du football. L'épisode en question concerne un penalty tiré par le célèbre footballeur Pelé, qui a marqué le penalty en utilisant une course lente avec un arrêt final comme une sorte de feinte pour frapper le ballon. Cette feinte a été surnommée "paradinha", ce qui signifie "petit arrêt". De nombreuses discussions ont eu lieu au cours des années suivantes pour savoir si la feinte pouvait ou non être faite pendant l'élan. Ainsi, à partir de 2010, suite à une décision de l'IFAB, un joueur peut faire une feinte pendant son élan, mais n'est plus autorisé à la faire à la fin de son élan, sinon l'action est contraire à la règle 14 et le comportement du joueur peut être jugé antisportif par l'arbitre et un avertissement peut être donné par l'arbitre (IFAB, 2010).

De nos jours dans un match de football, les coups de pied de réparation sont utilisés de deux manières : premièrement, pendant le match, lorsqu'un joueur intervient de manière irrégulière contre un adversaire dans sa propre surface de réparation ou en dehors du terrain, comme décrit dans les règles 12 et 13, la faute commise par le joueur est sanctionnée par un coup franc direct depuis le point de réparation (IFAB, 2022). Deuxièmement, ils peuvent être utilisés lorsqu'un

jeu doit désigner un vainqueur, après les 120 minutes de jeu effectif et que le jeu se termine sur un score égal (IFAB, 2022).

Le coup de pied de réparation est exécuté au point de penalty, à 11 mètres de la ligne de but, par un joueur qui doit être reconnu et identifié par l'arbitre. Le joueur chargé de tirer le coup de pied de réparation placera alors le ballon sur le point de penalty, quelle que soit la zone de l'infraction. Seul le joueur qui court se trouve dans la surface de réparation, tous les autres doivent se trouver à une distance minimale de 9,15 mètres du point de réparation. Le gardien de but est autorisé à se déplacer vers la ligne de but avant que le ballon ne soit botté, mais il ne peut toucher aucun élément du but (filet, poteaux, barre transversale) et doit impérativement avoir un pied sur la ligne de but au moment où le ballon est frappé. Toutes ces règles sont contrôlées par l'arbitre et ses assistants (IFAB, 2022).

1.2 Importance du penalty dans le football moderne

Les penaltys sont devenus décisifs dans le football moderne depuis qu'ils ont été introduits par l'Union of European Football Associations (UEFA) dans les grands tournois à partir de 1976 pour décider des matches en cas de match nul en phase éliminatoire, et peu après, à partir de 1978, ils ont été introduits par The Fédération Internationale de Football Association : FIFA (Brinkschulte et al., 2020).

Si l'on considère les règles d'exécution d'un penalty, selon lesquelles le joueur doit frapper le ballon sans bouger, à une distance de 11 mètres et sans être contesté par un adversaire, on comprend que le coup de pied de réparation est une occasion cruciale de marquer un but et qu'il est difficile à parer.

Si l'on considère le nombre moyen de buts (2,54 buts) marqués au cours d'un match de 90 minutes, un penalty pourrait être la seule occasion pour une équipe de marquer un but contre l'équipe adverse (Palacios Huerta, 2003). Tout cela nous fait réaliser à quel point il peut être décisif et important pour l'issue du match.

Il est scientifiquement prouvé que le coup de pied de réparation donne lieu à une victoire dans 52 % des cas et à une défaite dans seulement 18 % des cas. De plus, pour une équipe, convertir et donc réussir le penalty est décisif car cela double les chances de victoire (61 % s'il est marqué contre 29 % s'il est manqué), à l'inverse, manquer le penalty augmenterait le pourcentage de perte d'environ trois fois (Dalton et al., 2015).

D'un point de vue économique, les penaltys sont également importants car les salaires et les primes des joueurs dépendent de leurs performances et les sommes en jeu se chiffrent en millions (Bar-Eli et al., 2007). Si l'on considère la participation à la Coupe du monde en 2010,

on constate que quatorze équipes sur les 32 équipes participantes ont participé à ce tournoi mondial moins de cinq fois, ce qui signifie que le niveau de compétence des équipes nationales est de plus en plus homogène et que la disparité des compétences entre elles se réduit. De nombreux tournois internationaux, tels que la finale de la Coupe du monde 2006 entre l'Italie et la France ou les finales de la Ligue des champions de 2005, 2008 et 2012, ont été décidés aux penaltys (Dalton et al., 2015). Les penaltys sont donc de plus en plus fréquents et décisifs pour l'issue des finales des tournois internationaux. Les statistiques que nous venons de mentionner nous montrent clairement l'importance de préparer les joueurs techniquement, psychologiquement et tactiquement à tirer des penaltys. Optimiser et trouver des stratégies efficaces pour les tirs au but sont donc quelque chose de fondamentaux dans le football moderne.

1.3 Facteurs intervenant dans l'exécution d'un tir de penalty

Bien qu'il soit plus avantageux pour le tireur du penalty que pour les sauveteurs, il est prouvé qu'un pourcentage étonnant de 20 à 35 % des tirs au but ne sont pas transformés (Morya et al., 2003).

Même si l'exécution d'un penalty soit une situation motrice qui se déroule selon des mesures standards, dans laquelle des éléments spécifiques tels que la distance du tir, la taille du but et la position du gardien ne changent jamais (IFAB, 2022), la capacité de marquer et de réussir dépend de nombreux facteurs, tels que la technique, la tactique, ainsi que les aspects psychologiques, cognitifs et ceux liés à la chance (Jordet et al., 2007).

1.3.1 Habileté ou chance ?

Lorsque nous avons l'occasion de regarder deux équipes s'affronter aux tirs au but à la télévision, nous constatons la plupart du temps que certains commentateurs, spécialistes, experts et anciens footballeurs affirment que les tirs au but sont une pure loterie et qu'ils dépendent donc du hasard et de la chance. Évidemment, quand on pense que quelque chose dépend du hasard, un certain scepticisme se crée immédiatement chez les gens, les joueurs eux-mêmes, les entraîneurs et les coaches. Tout cela, dans la réalité quotidienne du football, a une influence négative sur le comportement des personnes impliquées dans l'entraînement des tirs au but et entraîne donc indirectement une préparation sous-optimale des futurs penaltys.

Cependant, si les séances de tirs au but dépendaient uniquement de la chance, nous pourrions alors prédire le résultat final et la réussite uniquement par un calcul de probabilité. Les données

statistiques recueillies ne montrent cependant pas cette dépendance probabiliste, en effet l'Allemagne correspond à un taux de réussite de 85 % puisqu'elle a remporté la plupart des séquences de tirs au but dans les compétitions auxquelles elle a participé (1982, 1986, 1990, 1996 et 2006). A l'inverse, l'Angleterre correspond à un taux de réussite de 14 %. Ces résultats ont également été confirmés par les taux de réussite des joueurs individuels, où les joueurs allemands (92 %, $p = 0,03$) ont un taux de réussite significativement plus élevé que les joueurs anglais (67 %) qui, statistiquement, marquent moins de penaltys (Wood et al., 2015). Enfin, des recherches scientifiques ont montré que la probabilité de gagner les penaltys est plus élevée lorsque les joueurs appartiennent à des ligues supérieures, ce qui prouve que les joueurs plus qualifiés sont plus performants sur les penaltys (Krumer, 2020). D'où l'importance des compétences des footballeurs. Attribuer le succès uniquement à la probabilité et donc à la chance n'est pas judicieux, car ce n'est pas le facteur déterminant.

Si l'on considère également les caractéristiques objectives de l'exécution des tirs au but, on peut dire que la tâche du tireur est plus facile que celle du gardien de but, puisque chaque tireur doit envoyer le ballon d'une distance de 11 mètres dans un but d'une hauteur de 7,32 mètres et d'une largeur de 2,44 mètres (IFAB, 2022).

Bar-Eli & Azar (2009) ont analysé 311 tirs au but effectués lors de grands matchs de championnat du monde et ont constaté un taux d'arrêt nul (0 %) par le gardien de but lorsque le tir au but était dirigé vers le haut du but. Malgré ce résultat positif pour le joueur, seuls 13 % des penaltys ont été dirigés vers ce côté. Lorsqu'ils étaient dirigés vers le milieu du terrain (59 %), 26 % ont été interceptés par le gardien. Alors que les tirs qui ont atteint le but à 1,83 mètres à l'intérieur de chaque poteau (41 %), seuls 8 % ont été parés par le gardien. En effet, lorsque les tirs sont précis, c'est-à-dire orientés ou dirigés vers le haut du but et frappés avec la bonne puissance, le gardien a peu de chance de sauver le but, alors que lorsque les tirs sont imprécis, c'est-à-dire plus centrés et faibles, l'arrêt, en plus de l'habileté du gardien de but, dépend de la chance. Dans ce dernier cas, si le gardien plonge du mauvais côté, le joueur est considéré comme "chanceux", tandis que s'il plonge du bon côté, le joueur est considéré comme "malchanceux" (Bar-Eli & Azar, 2009).

1.3.2 L'aspect émotionnel

La dynamique du coup de pied de réparation est très complexe et des facteurs comme la sphère émotionnelle peuvent grandement influencer l'issue de l'action. En fait, il a été démontré que les aspects psychologiques sont la variable qui influence le plus le résultat des tirs au but. Avant tout, les tirs au but peuvent déterminer l'issue d'un match, d'un classement et permettre à une

équipe d'avancer ou d'être éliminée d'un tournoi, c'est pourquoi la pression psychologique vécue par un joueur peut être très marquante (Jordet et al., 2007). Basé sur l'hypothèse des théories scientifiques selon laquelle l'importance d'un événement est révélatrice de l'anxiété et du stress (Eubank & Collins, 2000), une enquête scientifique a montré que l'importance du coup de pied de réparation est négativement corrélée au résultat de l'exécution, tandis que d'autres aspects tels que la perception de ses propres capacités et la fatigue n'affectent pas le succès (Jordet et al., 2007). Outre les facteurs liés à la performance, tels que l'importance du tir au but, une pression accrue pour un joueur, et donc l'anxiété et le stress, peuvent résulter d'autres sources de distraction telles que le comportement verbal et non verbal du gardien, des adversaires, des spectateurs, mais aussi des aspects économiques du football (Dohmen, 2008 ; Wood & Wilson, 2010b). Il a été démontré que lorsque notre action motrice est soumise à une pression, même si l'habileté est bien apprise, comme cela peut être le cas pour un penalty tiré par un joueur expert, notre système moteur subit des interférences et, par conséquent, la transmission neuronale dans les différents centres de contrôle est plus inhibée et ralentie. En conséquence, nous aurions la perte du contrôle moteur et l'échec de l'action (Navarro et al., 2012). Plus précisément, les chercheurs soutiennent qu'indépendamment de la stratégie de pénalité, l'échec des penaltys dans les situations d'anxiété résulte d'une diminution de l'efficacité du traitement dans le processus de contrôle de l'attention, ce qui signifie qu'un joueur en situation de menace placera son attention plus tôt et plus longtemps vers des éléments de distraction plutôt que vers des éléments importants pour la réalisation de l'objectif, comme la cible. Souvent, l'anxiété amène même les joueurs à restreindre leur champ d'attention et à porter leur attention sur des éléments de distraction du gardien plutôt que de viser la cible. Même des petits changements peuvent avoir une influence distrayante sur le joueur ; l'agitation des bras, la centralité, la couleur du maillot sont des facteurs à considérer pour entraîner le contrôle de l'attention (Wilson et al., 2009).

1.3.3 Processus neurocognitifs : système visuel et centre d'attention

Le penalty est une tâche visuo-motrice qui nécessite l'exécution d'une réponse basée sur le traitement d'informations visuelles dans un temps limité, et pour cette raison, le coup de pied de réparation est avant tout soumis à des limitations spatio-temporelles (Piras et al., 2021). L'habileté d'anticipation dans les penaltys implique plusieurs compétences perceptivo-cognitives qui se chevauchent au cours de l'exécution, telles que : capter les intentions du gardien à un moment donné, saisir les informations de la scène visuelle et de la cible, ainsi qu'identifier la position du ballon en fonction de l'élan. Perception, cognition et action

interagissent donc de manière continue, dynamique et parallèle sous des contraintes temporelles, spatiales et motrices (William, 2009).

En général, lorsqu'on vise une cible à distance, on fait une fixation sur la position de la cible avant le mouvement finale. La science affirme que ces fixations anticipées permettent aux joueurs de détecter des informations importantes sur la position de la cible et de contrôler précisément leurs mouvements (Van Der Kamp, 2006). Cependant, des recherches scientifiques ont montré que la stratégie de recherche visuelle d'un joueur exécutant un penalty dépend des mouvements du gardien, de sa présence ou de la stratégie adoptée par le joueur lui-même (Wood & Wilson, 2010b ; Navarro et al., 2013 ; Van Der Kamp, 2006). Le type de pénalité est également un facteur important qui affecte l'étirement visuel du joueur. Une enquête scientifique a ainsi montré que lors d'un penalty de puissance, on passe plus de temps à fixer le ballon, alors que lors d'un penalty de précision, on passe plus de temps à fixer la périphérie de la cible du but (Timmis et al., 2014). Il est également avancé que les stratégies visuelles sont étroitement liées à la concentration de l'attention des joueurs, c'est-à-dire à leur capacité de sélectionner les principaux stimuli. La distinction des informations prédictives implique l'orientation de l'attention, qui peut être claire lorsque le regard est dirigé vers la cible/l'objet d'intérêt, ou cachée, lorsque l'attention est déplacée par rapport à la direction du regard (Piras et al., 2015). L'attention peut être considérée comme le moyen qui englobe les processus cognitifs des joueurs, qui sont responsables du niveau d'activation et du contrôle moteur du corps. Nous avons vu comment dans la plupart des penaltys, l'anxiété conditionne le centre d'attention (Wilson et al., 2009 ; Furley et al., 2017).

Cependant, l'organisation fonctionnelle différente du champ visuel fovéal et périphérique devient un tournant pour la formation du centre d'attention et des stratégies visuelles (Piras & Raffi, 2019). En fait, il est actuellement soutenu que c'est la capacité d'utiliser et d'extrapoler efficacement les informations fovéales et extra fovéales qui influence la collecte d'informations prédictives importantes et dirige efficacement l'attention (Piras et al., 2021).

1.3.4 Aspects techniques

Le facteur technique fait référence à la mise en œuvre la plus efficace de la tactique, qui se traduit souvent par des tirs d'une puissance et d'une précision optimales (Jordet et al., 2007). Il est prouvé qu'un penalty techniquement parfait dépend de l'angle et de la vitesse du tir. Si le ballon est frappé en angle sur le sol ou en l'air et avec la bonne vitesse pour gagner contre la réaction du gardien, le coup de pied de réparation sera gagnant (Leela & Comissiong, 2009). Il est toutefois important de réaliser que les compétences techniques d'un joueur dépendent

fortement de l'harmonie et du contrôle moteur de son corps. La biomécanique du tir au football nous montre à quel point le mouvement est complexe, car frapper le ballon nécessite l'implication de l'ensemble du corps et plus précisément requiert une coordination multi-articulaire et musculaire de l'ensemble du système corporel (Shan & Westerhoff, 2005 ; Davids et al., 2021). Malgré cela, notre système moteur est organisé de telle sorte qu'il peut effectuer des mouvements des plus simples aux plus compliqués grâce à une organisation hiérarchique et parallèle des centres de contrôle (Taube, 2021). Le moment et la manière dont l'information est traitée par les différents centres de commande du système nerveux dépendent essentiellement de deux types de processus de contrôle : le feedback ou boucle fermée et le feed forward ou boucle ouverte (Seidler et al., 2004). Le premier type désigne tous les mouvements qui sont régulés par un système de contrôle basé sur des informations afférentes. Le feedback, la détection et la correction des erreurs constituent donc la base de la régulation des mouvements. La correction a donc lieu lorsque l'exécution est en cours (Adams, 1971). Le deuxième type, en revanche, représente tous les mouvements qui impliquent une programmation complète avant l'exécution du mouvement au moyen des régions du cerveau et qui n'impliquent pas d'intégration directe des informations afférentes pendant l'exécution. Ce sont toutes les actions à exécution rapide qui ne sont pas corrigées pendant l'exécution (Seidler et al., 2004 ; Schmidt, 1975). Les compétences techniques peuvent être affinées. En effet la science montre qu'un joueur expérimenté par rapport à un novice a une meilleure facilitation et transmission du signal nerveux, ce qui entraîne une plus grande économie et automatisation des gestes moteurs qui deviennent moins contrôlés (Sanchez-Lopez et al., 2014).

Les théories classiques du passé suggèrent que l'entraînement aux gestes moteurs et donc l'affinement de la motricité contribuent à rendre le mouvement automatique et moins exigeant en termes de contrôle cognitif. La formation et l'expérience minimisent l'attention et maximisent le contrôle moteur (Cappuccio, 2013). Faire de l'adresse du tir au but un automatisme et être capable de contrôler le geste moteur sans être submergé par les distractions et la pression est très difficile mais très important pour les penaltys.

1.3.5 Aspects tactiques : stratégies de penaltys

La dimension tactique est un autre aspect crucial de la réussite des tirs au but. La tactique utilisée par les joueurs s'entend comme le choix d'attendre la réaction du gardien de but ou la décision des joueurs quant à l'endroit où diriger le ballon en cas de coup de pied anticipé (Jordet et al., 2007). Compte tenu des stratégies possibles qu'un joueur/gardien de but peut utiliser, on peut alors envisager l'hypothèse que le gardien de but et le footballeur exécutent en même temps

les stratégies qu'ils ont choisies, donc indépendamment des actions de l'autre, ou on peut considérer que l'action des deux est influencée par le comportement de l'adversaire (Kuhn, 1988).

Stratégies du gardien. En ce qui concerne les stratégies utilisées par le gardien de but, il est important de prendre en compte son temps de réaction et le temps que met le ballon tiré par le joueur pour atteindre le but. On peut clairement établir que le gardien n'a pas la possibilité d'attendre la décision du joueur, il ne peut donc pas attendre que le joueur entre en contact avec le ballon pour choisir la direction du tir. Pour la raison qui vient d'être mentionnée, le gardien est généralement obligé de choisir une option à l'avance. Les stratégies réelles que le gardien peut choisir sans être conditionné par le comportement du joueur sont essentiellement aux nombre de trois : plonger à droite, à gauche ou rester au centre du but (Bar-Eli et al., 2007). Une étude réalisée sur les tirs au but effectués lors des plus prestigieux championnats du monde a révélé que dans 93,7 % des cas, les gardiens de but plongeaient soit à droite, soit à gauche. Ce comportement est probablement influencé par le préjugé selon lequel un gardien de but qui reste au milieu et ne parvient pas à arrêter le penalty est un gardien de but inutile. Ce préjugé s'explique par la théorie de la norme selon laquelle le gardien de but éprouve un sentiment d'inutilité lorsqu'il ne parvient pas à arrêter un penalty après avoir choisi de rester immobile au centre et qu'un sentiment d'incomplétude est créé pour lui (Bar-Eli et al., 2007). Bien que le gardien de but soit obligé de sauter un peu à l'avance lors du tir de penalty, il peut toujours essayer de saisir les principales informations prédictives pour anticiper et deviner la direction du tir de penalty. Une étude scientifique a en effet mis en évidence plusieurs facteurs importants auxquels le gardien peut prêter attention, qui suggèrent à l'avance la direction du tir et qui sont : l'orientation des hanches, du tronc et du coup de pied avant et après le contact avec le ballon. Il s'est toutefois avéré que le facteur le plus déterminant pour prédire le tir lors d'un penalty est la direction du pied d'appui, dont la fiabilité de prédiction est de 80 %. La même étude a analysé le moment exact du mouvement du gardien et a constaté que, contrairement aux gardiens expérimentés et à ceux qui réussissent le mieux, les gardiens novices et ceux qui ne réussissent pas utilisent la stratégie du plongeon bien à l'avance (Savelsbergh et al., 2007). Il existe donc deux stratégies principales qu'un gardien de but peut entreprendre pour arrêter un coup de pied de réparation : la stratégie d'anticipation et la stratégie tardive (Noël et al., 2021). La première stratégie consiste à plonger bien à l'avance et à choisir avant, ou pendant la course d'élan, le côté du but où il veut se déplacer pour tenter d'intercepter le ballon ; cette stratégie repose sur l'expérience du gardien, sur des informations telles que l'angle de la course d'élan du joueur

(Löffing & Hagemann, 2014) et des informations concernant la préférence du côté du rigoriste (Navia et al., 2013). La deuxième stratégie, en revanche, consiste à retarder le plongeon le plus longtemps possible pour deviner la direction du tir. Cette stratégie met l'accent sur la capacité du gardien à détecter les mouvements du joueur pendant l'élan afin de donner de l'importance au choix du bon côté (Noël et al., 2021).

Stratégies des joueurs. Kuhn (1988) est le premier à avoir analysé le comportement des joueurs pendant l'exécution et à réussir à déterminer deux stratégies qui existent encore aujourd'hui et qui sont soutenues par d'autres chercheurs scientifiques. Les stratégies découvertes qui peuvent être entreprises par un footballeur lors d'un coup de pied de réparation sont dites "indépendantes du gardien" ou "dépendantes du gardien". La première stratégie consiste à choisir à l'avance l'endroit exact où tirer le ballon, indépendamment des actions du gardien de but. Le tireur de penalty frappe alors le ballon, s'en tient à ce qui a été planifié à l'avance et ignore complètement les actions du gardien de but adverse. Les préférences du gardien, son positionnement et le hasard sont autant de facteurs qui peuvent affecter la stratégie indépendante du gardien.

En fait, il a été démontré que le positionnement du gardien de but peut affecter la direction du tir parce que différents positionnements du gardien de but modifient la perception de la cible de différentes manières. Il est généralement difficile de savoir si les joueurs perçoivent ce changement, mais il est probable qu'ils dirigeront leur tir vers la partie du but la plus exposée (Masters et al., 2007).

La deuxième stratégie amène le tireur de penalty à choisir, avant l'exécution, une cible précise temporaire, puis, pendant la course d'élan, à essayer d'obtenir des informations sur les actions du gardien afin de percevoir le côté d'où il plongera ; ce n'est qu'au dernier moment que le joueur prendra la décision finale sur la direction du ballon. En adoptant cette stratégie, l'objectif du joueur est de diriger le ballon vers le côté opposé à celui où le gardien de but va plonger. Le temps pour changer la trajectoire du tir est donc le facteur crucial pour le succès et l'échec (Morya, et al., 2003). Kuhn (1988), suggère que 75 % des joueurs optent pour cette stratégie. En effet, on suppose que dans la plupart des cas, cette stratégie est préférée par les joueurs car elle est très efficace lorsque les gardiens plongent bien à l'avance (Van Der Kamp, 2006).

1.4 Quelle stratégie adopter pour avoir plus de succès dans les penaltys ?

Des études scientifiques ont analysé les stratégies utilisées par les joueurs en essayant d'en déduire les avantages et les inconvénients des deux. L'objectif était de déterminer quelle stratégie est la plus efficace dans le football moderne pour qu'un joueur puisse marquer un

penalty. En théorie, la stratégie indépendante du gardien semble généralement être la plus sûre (Van Der Kamp, 2006 ; Noël et al., 2015); biomécaniquement, sur la base de la vitesse du ballon et du temps de réaction du gardien, si le gardien plonge au moment où le pied du joueur entre en contact avec le ballon, ou si le joueur plonge 300 ms à l'avance, il est impossible pour le gardien de parer et le but est assuré. (Navarro et al., 2013) . En outre, il a été démontré que l'utilisation de la stratégie indépendante du gardien permet aux joueurs de diriger plus facilement leur attention visuelle vers la cible et d'induire un meilleur contrôle moteur, car le fait de ne pas tenir compte des actions du gardien permet aux joueurs de se concentrer sur des zones plus importantes qui conduisent à une exécution plus précise du tir au but (Noël & van der Kamp, 2012). Enfin, en adoptant cette stratégie, les joueurs n'ont plus la pression de prendre une décision instantanée en fonction des actions du gardien, mais évitent au contraire une augmentation du niveau de stress grâce à une exécution planifiée au préalable (Navarro et al., 2012). Cependant, la réalité footballistique des pénaltys est très complexe. Tout d'abord, la stratégie indépendante du gardien est principalement plus avantageuse en termes de précision du tir et non en termes de taux de réussite et donc de buts marqués ; en utilisant la stratégie dépendante du gardien, en revanche, la précision est relative puisque le tir doit être dirigé vers la zone vide du but, la précision n'étant donc pas essentielle (Noël et al., 2015). Par conséquent, en réalité, il est très difficile d'ignorer complètement les actions du gardien de but. Involontairement le joueur pendant l'exécution est influencé par les actions et la simple présence du gardien de but. Par exemple, le joueur percevra même un petit mouvement (6-10 cm) du gardien de but vers un côté du but, ce qui influencera son choix (Masters et al., 2007). Ou, comme le montre l'étude de (Masters & van der Kamp, 2008), le joueur perçoit la taille du gardien de but en fonction de la façon dont il se tient et se positionne dans le but. Le fait que le gardien agite les bras déplace également l'attention visuelle du joueur de la cible vers le gardien, ce qui entraîne une perte de concentration visuelle sur la cible et donc une réduction de la précision du tir (Wood & Wilson, 2010b).

En outre, en ce qui concerne la dynamique physique des pénaltys il a été démontré que le ballon, une fois frappé par le joueur, met au moins 300 ms pour atteindre la ligne de but (Palacios Huerta, 2003), jusqu'à un maximum de 500 ms (Morya et al., 2005 ; Franks & Harvey, 1997 ; Dicks et al., 2010). Dans le même temps le gardien expérimenté a un temps de réaction minimum de 0,250 ms et a besoin d'un minimum de 0,250 ms supplémentaires pour effectuer le mouvement d'arrêt (Dohmen, 2008). Jusqu'à présent les recherches scientifiques ont découvert que les gardiens ont besoin au moins des 600 ms pour arrêter le penalty (Franks & Harvey, 1997 ; Dicks et al., 2010). Concernant les gardiens experts, ils effectuent le mouvement

au plus tard 160 ms avant le contact du pied de joueur avec la balle, signifie donc qu'ils anticipaient leur mouvement environ 560 ms avant (Noël et al., 2021). Compte tenu du temps de déplacement du ballon et du temps de réaction et de mouvement du gardien expérimenté, les gardiens sont obligés de choisir d'abord l'angle où il se jettera et d'anticiper le coup de pied du joueur, sinon il leur devient physiquement impossible d'empêcher le joueur adverse de marquer (Van der Kamp et al., 2018). Kuhn (1988) a en effet montré que 75 % des tireurs de penalty utilisent la stratégie dépendante du gardien, probablement en raison de l'anticipation du mouvement du gardien.

On ne sait pas encore très bien quelle est la meilleure stratégie à adopter pour un joueur afin de mieux réussir, mais sur la base de ces considérations, il pourrait être important d'apprendre aux joueurs à utiliser la stratégie dépendant du gardien. Il est clair qu'il n'est pas facile de tirer un penalty dépendant du gardien de but, car un laps de temps excessif peut entraîner l'échec du penalty, en fait, pendant le penalty, plus le temps entre le jet du gardien de but et le contact du pied du joueur avec le ballon est similaire, plus la probabilité que le ballon soit tiré du même côté que le plongeon du gardien de but est grande. Toutefois, si le joueur parvient à rediriger le tir, le fait de tirer le ballon du côté opposé au plongeon du gardien exige moins de précision dans le tir de la part du joueur lui-même, car l'espace dont il dispose sera plus grand, et le gardien, plongeant du côté opposé, ne pourra en aucune façon intercepter le ballon. Entraîner la capacité des joueurs à rediriger le tir en fonction du côté choisi par le gardien de but pourrait conduire à une avancée majeure dans le football moderne (Van Der Kamp, 2006).

1.5 Stratégie dépendant du gardien

L'objectif de l'exécution d'un coup de pied de penalty de stratégie dépendant du gardien de but est de diriger le ballon dans la direction opposée au gardien de but. Par rapport à la stratégie indépendante du ballon, les joueurs utilisant cette stratégie ralentissent leur course vers la fin ou commencent à mettre en place un mouvement pour ensuite le changer au dernier moment et rediriger le tir dans la direction opposée au gardien de but. La décélération de la course est conforme à la règle 14 de l'IFAB; elle est donc autorisée pour les joueurs et est essentielle car elle permet au joueur de gagner du temps et donc de recueillir les dernières informations concernant la direction que prendra le gardien dans son mouvement. Aujourd'hui, dans le football professionnel international, certains joueurs : Robert Lewandowski (cf. Figure 1), Mario Ballotelli, Winton Rufer, adoptent cette stratégie dépendante du gardien avec des taux de réussite supérieurs à 90 % (Kibele & Neuhof, 2021).

Figure 1

Robert Lewandowski qui tire un penalty avec la stratégie dépendant du gardien



Note. Robert Lewandowski tire un penalty parfait en utilisant la stratégie dépendant du gardien. Sa vitesse d'élan et d'accélération de le début à la fin a été réduite à environ 8 km/h, ce qui démontre que la décélération de l'élan est un aspect crucial de cette stratégie de penalty (Kibele & Neuhofer, 2021).

Du point de vue du contrôle moteur, Kuhn (1988) a été le premier à spécifier comment la stratégie dépendante du gardien de but correspond à des actions en boucle fermée (contrôle par feedback) puisque nous avons une modification de l'exécution en cours correspondant à la réorientation du tir. Plus précisément, le retour visuel nécessaire pour réorienter le tir est complété par l'observation du gardien et de son propre membre en mouvement. La réussite du tir au but dépend étroitement de la capacité de l'individu à adapter et à contrôler son action motrice à l'environnement changeant (Prablanc & Martin, 1992).

Nous connaissons maintenant le mécanisme par lequel notre système moteur, lorsqu'il a l'intention d'atteindre un objet cible, traite en continu toutes les informations afférentes provenant de différents canaux sensoriels. Le rôle de la vision dans ces circuits sensori-moteurs dépendants du but est crucial (Desmurget & Grafton, 2000). Cependant, on ignore encore beaucoup de choses sur la capacité biomécanique à changer la direction du tir et peu d'études ont évalué cet aspect (Morya et al., 2003). Par la suite, le regard du joueur dans la stratégie dépendante du gardien est différent de celui dans la stratégie indépendante du gardien. Une

étude a montré que les tireurs de penaltys à stratégie dépendante du gardien passent plus de temps à regarder le gardien pendant la course et l'exécution que les tireurs de penaltys à stratégie indépendante du gardien qui fixent plus longtemps la zone cible dans la phase de préparation et le ballon pendant la course et l'exécution (Noël & van der Kamp, 2012). Les joueurs utilisent alors la stratégie visuelle consistant à se concentrer vers le centre du but. Plus précisément, les joueurs utilisent la position du gardien de but comme pivot visuel afin de capter les informations de la vision périphérique. Les joueurs ont donc tendance à faire davantage appel à leur vision périphérique, qui est plus efficace pour détecter les mouvements que la vision fovéale (Wood & Wilson, 2010). Des recherches scientifiques ont montré comment le joueur est capable d'anticiper la direction du mouvement du gardien de but grâce à la disposition des articulations du genou gauche et droit. En fait, la préparation biomécanique d'un saut sur un côté implique d'abord l'extension de la jambe controlatérale et immédiatement après celle de la jambe ipsilatérale (Kibele & Neuhof, 2021). En considérant la modification tardive du tir, la science montre que le moment de l'exécution d'une action motrice est clairement un facteur déterminant pour permettre l'adaptation et le traitement efficace du feedback sensoriel. Les mouvements trop rapides ne permettent pas d'impliquer un retour correctif pendant l'action motrice (Cluff & Scott, 2013). Lors de l'exécution d'un tir de penalty stratégique dépendant du gardien, il devient donc intéressant de découvrir le temps minimum nécessaire pour modifier le tir en fonction des nouvelles informations visuelles dérivées de la position et du mouvement du gardien, et si ce seuil peut être amélioré par l'entraînement.

1.6 Réorientation du coup de pied de réparation

Ces dernières années, la science a consacré beaucoup d'efforts à l'étude des circuits sensori-moteurs qui sous-tendent le contrôle du mouvement. Grâce à elle, nous connaissons maintenant le mécanisme par lequel notre système moteur, lorsqu'il a l'intention d'atteindre un objet cible, traite en continu toutes les informations afférentes provenant de différents canaux sensoriels (Desmurget & Grafton, 2000). En particulier, de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la modification de l'action du membre supérieur en mouvement en fonction de nouvelles informations visuelles-perceptives. Nombre de ces études ont montré que les sujets peuvent rapidement corriger et modifier le mouvement du bras en cours. Les premières études ont montré la nécessité d'un temps de latence de 200-300 ms pour corriger la trajectoire (Keele & Posner, 1968 ; Beggs & Howarth, 1970).

Ces résultats ont ensuite été confirmés par d'autres études menées plus récemment (Prablanc & Martin, 1992 ; Johnson et al., 2002 ; Sarlegna et al., 2003). En particulier, Reichenbach et al.

(2009), en plus d'avoir trouvé un intervalle de temps entre 280 et 350 ms en accord avec les études précédentes, ont noté une réponse électromyographique survenant dès 110 ms après la perturbation. En fait d'autres études ont même constaté des temps de latence plus courts. En particulier (Prablanc & Martin, 1992 ; Day & Lyon, 2000) ont démontré comment un mouvement initial subit une correction rapide de la position finale avec des temps de latence de l'ordre de 115-160 ms. Des résultats aussi surprenants étaient confirmés quelques années plus tard par l'étude de (Bresciani et al., 2009), où ils ont découvert le temps de latence des réponses à une perturbation visuelle de 110 ms lorsqu'aucun retour visuel de la main n'était disponible et de 100 ms avec un feedback visuel.

Les circuits sensori-moteurs qui opèrent dans le système nerveux central lorsque le joueur entreprend la stratégie dépendant du gardien, c'est-à-dire lorsqu'il effectue une modification de son geste moteur afin de rediriger le tir, nous pouvons les considérer comme analogues à la correction du geste moteur du bras en fonction des nouvelles réponses visuelles qui ont été étudiées dans la recherche mentionnée ci-dessus. L'action du coup de pied de réparation s'appuie également sur des informations visuelles pour modifier la première initiation et rediriger le tir. Cependant, il s'agit certainement d'une action motrice beaucoup plus complexe sur le plan biomécanique et de la coordination que le seul mouvement du membre supérieur (Shan & Westerhoff, 2005 ; Davids et al., 2021).

Comme le montre la figure 1, le temps de latence total nécessaire à un joueur pour modifier la direction de son tir est composé de trois intervalles spécifiques : la première phase correspond à la collecte et au traitement de l'information, la deuxième phase correspond à la composante de réaction, et la troisième phase correspond au temps d'ajustement (Bowtell et al., 2009). Compte tenu de la complexité du geste moteur avec les temps de détection du système neuromusculaire, on suppose que les temps des réponses motrices du penalty pour modifier le tir sont plus longs.

En outre, il est important de comprendre que lorsqu'un joueur est confronté à la nécessité de modifier son action en raison d'un changement soudain, le système moteur peut se retrouver soit à replanifier le mouvement, soit à le contrôler donc à ajuster l'action en cours. Il s'agit d'un facteur clé à comprendre ce dernier mécanisme car, comme le montre la science, la replanification complète et le contrôle en cours utilisent des représentations visuelles différentes, puis traitent l'information dans des parties différentes des centres de contrôle. Tout ça signifie que les deux mécanismes entraînent des temps de traitement des signaux nerveux différents (Glover, 2004). Donc, le manque de temps pour rediriger un tir peut être dû à une incapacité à replanifier l'action motrice ou à une incapacité à contrôler l'action en cours.

En plus de cela, il est soutenu qu'il y a une différence dans la redirection du tir vers la droite respectivement vers la gauche. Certaines recherches scientifiques ont en effet démontré que pour le joueur, le meilleur tir est le tir croisé, c'est-à-dire que ceux qui tirent à droite tirent plus précisément en redirigeant le ballon vers la gauche, et vice versa pour les gauchers (Chiappori et al., 2002).

Une étude scientifique a montré que lors du penalty, le pied d'appui est un élément important dans la prévision du tir pour le gardien, car il se produit environ 200-250 ms avant le contact avec le ballon, ce qui signifie que le joueur doit ajuster son tir au moins 200-250 ms avant le contact avec le ballon (Franks & Harvey, 1997). A cela, il faut ajouter le temps nécessaire à notre corps pour recueillir l'information de direction du plongeon du gardien et déclencher la nouvelle réponse motrice. Pour une action impliquant le corps entier, la transformation de l'information visuelle avec la réponse motrice qui en découle est estimée à environ 190 ms (McLeod, 1987), alors que pour le geste spécifique de frapper le ballon, Williams & Weigelt (2002) ont découvert un intervalle de temps correspondant à 115 ms. On peut donc dire que pour rediriger le tir, le joueur est obligé de prendre une décision au moins 300-500 ms avant le contact avec le ballon (cf. Figure 2). Un temps de latence plus court, retardant ainsi la décision, entraînerait plus facilement un échec de la réorientation du tir, une diminution de la précision et enfin une diminution de la vitesse du tir, donc un échec du pénalty (Van Der Kamp, 2006). Plus proches des conditions réelles ont donc été d'abord l'étude de (Van Der Kamp, 2006) et trois ans plus tard celle de (Bowtell et al., 2009), qui ont reproduit l'expérience sur un terrain de football. Les facteurs d'habileté conditionnelle et technique présents dans l'exécution d'un véritable coup de pied de penalty ont été pris en compte dans ces expériences.

Dans l'expérience de 2006, les participants devaient frapper le ballon le plus précisément possible dans la cible opposée au côté où la lumière était allumée. La lumière occupait la place du rôle du gardien de but et le faisait au moyen d'un interrupteur marche/arrêt. En outre, l'étude proposait une zone cible de 60x60cm, au moyen de laquelle la précision du tir était mesurée. Les résultats ont montré un taux de réussite de 75 % lorsque la cible visuelle changeait environ 600 ms avant le contact avec la balle et de 50 % lorsque le changement avait lieu 400 ms avant. Les résultats confirment des seuils minimaux plus élevés que ceux trouvés dans les expériences de laboratoire (Van Der Kamp, 2006).

L'étude réalisée quelques années plus tard a conclu qu'il fallait au moins 300-350 ms pour rediriger le tir et pour que le stratagème dépendant du gardien soit efficace. En plus de cela, non seulement l'efficacité de la stratégie dépendant du gardien a été examinée et le seuil de temps minimum a été recherché pour rediriger le coup de pied de réparation, mais une évaluation a

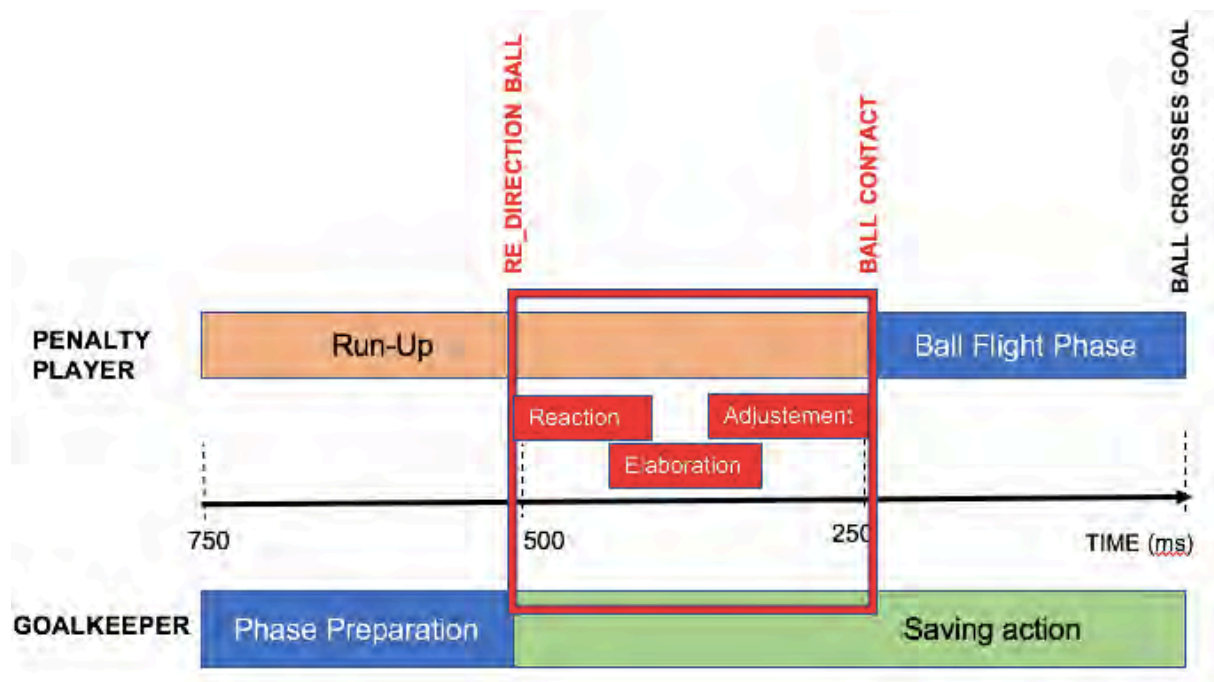
aussi été fait pour savoir s'il y avait un avantage à rediriger le tir entre le côté droit et le côté gauche. Ils ont examiné trois conditions différentes : dans la première condition, les participants choisissaient un côté à l'avance et devaient changer de plan lorsque l'ampoule s'allumait. Dans les deuxième et troisième conditions, les participants devaient se concentrer sur un seul côté du but et devaient rediriger leur tir lorsque l'ampoule s'allumait du côté choisi. L'étude a conclu qu'il n'y avait pas de différence significative entre les trois conditions spécifiques (Bowtell et al., 2009).

A ce stade, nous pouvons dire que les nombreuses études prises en considération ont trouvé des seuils de temps minimum similaires entre 300-400 ms pour rediriger le tir en fonction des informations visuelles (Morya et al., 2003 ; Van Der Kamp, 2006 ; Bowtell et al., 2009).

Cependant, il est important de se rendre compte de certaines limites dans les résultats trouvés. Dans les études mentionnées, outre le temps d'adaptation pour rediriger l'action du tir, seules les latences du temps de réaction au stimulus ont été prises en compte et le processus d'élaboration des informations visuelles recueillies à partir des signaux du gardien adverse n'a pas été impliqué (Van Der Kamp, 2006 ; Bowtell et al., 2009). Cet aspect limite dans une certaine mesure la validité de l'étude, puisque lors de l'exécution d'un tir au but avec stratégie dépendante, les joueurs s'appuient sur de telles informations anticipées. L'allumage et l'extinction des lumières en relation avec le mouvement effectif du gardien de but est une action directe qui n'implique aucun mouvement préparatoire. Étant donné que le gardien de but, avant de plonger, effectue généralement des mouvements préparatoires qui peuvent être repris par le joueur, cela pourrait avoir une influence importante sur la redirection du tir et augmenter le temps minimum.

Figure 2

Phases d'action du joueur et gardien lors du penalty à stratégie dépendante du gardien



Note. La figure montre les phases d'action du joueur et du gardien pendant l'exécution du penalty avec une stratégie dépendant du gardien. La ligne de temps (ms) définit le moment théorique des phases d'action respectives du joueur et du gardien pendant l'exécution. Le rectangle rouge nous montre le moment où le joueur doit rediriger son tir en fonction du plongeon du gardien et les trois phases du processus neuronal de redirection à partir du moment où le joueur collecte des informations sur l'anticipation du gardien (Kibele, 2022).

1.6 Enjeux de la problématique

Jusqu'à présent, la science s'est surtout intéressée au temps minimum nécessaire pour modifier au dernier moment une action motrice simple (Sarlegna & Mutha, 2015). Un certain nombre d'études (Morya et al., 2003) et des travaux de masters (Molisani, 2016 ; Rao, 2019 ; Correia, 2020) se sont focalisés sur le temps minimum nécessaire à un footballeur avant de frapper le ballon pour modifier son tir et rediriger le ballon du côté opposé au plongeon du gardien. Cependant les études mentionnées ont testé le sujet dans un contexte de laboratoire. Peu d'études scientifiques ont examiné le seuil de temps minimum dans un contexte de penaltys réels. Plus précisément deux études ont débuté sur un vrai terrain de jeu, mais ils ont utilisé l'allumage et l'extinction d'une ampoule électrique au lieu du mouvement du gardien (Van Der

Kamp, 2006 ; Bowtell et al., 2009). Une étude de master a récemment tenté de reproduire l'expérience dans des conditions réelles, avec le réel mouvement du gardien, mais a malheureusement rencontré des difficultés pour utiliser l'équipement dans l'environnement extérieur, de sorte que les mesures étaient biaisées et que les résultats obtenus ne pouvaient pas être utilisés (Richard, 2021).

Par conséquent, cette recherche scientifique contribuera à une plus grande validité et fiabilité en fournissant des résultats écologiquement valides, d'abord parce que le seuil de temps minimum pour la réorientation du tir sera étudié dans un contexte purement réel au moyen d'un plan expérimental dans lequel les tirs au but seront effectués sur un terrain de jeu et le mouvement réel du gardien sera simulé au moyen d'un avatar virtuel, produit grâce à la réalité augmentée. La perception visuelle du mouvements du gardien impliquera les processus neurocognitifs que la tâche visuo-motrice du penalty, et requiert amènera les joueurs à une situation réelle. Le plongeon du gardien, comparé à l'allumage et à l'extinction manuelle de l'ampoule électrique, sera également plus fiable car le mouvements de l'avatar aura lieu de manière aléatoire, calculé sur la base du temps de course moyen de chaque joueur, donc indépendant d'une action externe.

En outre, par rapport aux travaux précédents (Molisani, 2016 ; Rao, 2019 ; Correia, 2020 ; Richard, 2021), des sujets sportifs ayant des capacités supérieures et faisant partie de l'élite du football seront testés, notamment l'équipe de jeunes M-16 et M-17 du FC Lucerne, qui joue dans la première ligue suisse au niveau des jeunes. Les compétences footballistiques des joueurs d'élite sont supérieures à celles des joueurs amateurs et les limitations techniques et conditionnelles induites par la force, la précision et la coordination seront diminuées. En raison du niveau professionnel des équipes de jeunes de Lucerne, il y aura une fréquence d'entraînement plus élevée par rapport aux équipes amateurs, ce qui nous permettra de renforcer la méthodologie et la fiabilité conséquente des résultats, grâce à une alternance contrôlée entre les séances et la récupération.

Deuxièmement, la validité et la fiabilité des résultats sont également garanties par l'amélioration de l'équipement, tant en ce qui concerne le fonctionnement de la réalité augmentée (HoloLens) dans l'environnement extérieur que les dispositifs de mesure (Lidar) ainsi que les algorithmes respectifs qui faciliteront la collecte des données dans les programmes appropriés (*IntelJIDEA*). Les modifications apportées permettront certainement d'effectuer des mesures sans aucune sorte d'interférence et en toute tranquillité, nous fournissant ainsi des résultats en conditions réelles qui pourront être utilisés pour la première fois.

1.7 Objectif du travail

L'objectif de ce travail sera de rechercher le seuil minimum de temps auquel un footballeur d'élite lors d'un penalty, peut encore, juste avant de toucher le ballon, changer complètement l'action du coup de pied et rediriger son tir, après que le gardien ait plongé du même côté choisi par lui à l'avance de l'exécution. Ce type de stratégie dépendante du gardien oblige le joueur, pendant l'élan, à obtenir des informations à partir des actions du gardien afin de percevoir le côté depuis lequel le gardien va plonger et seulement au dernier moment, prendre la décision finale sur la direction de la balle. Le temps disponible est certainement un facteur déterminant dans le succès ou l'échec de la stratégie, tout comme la collecte d'informations visuelles, qui est cruciale pour l'issue de la sanction.

Un deuxième objectif de ce travail scientifique sera de savoir si le seuil de temps des joueurs peut être réduit par la répétition, c'est-à-dire par l'entraînement. En effet, étant donné les nombreuses séances de tirs au but auxquelles les joueurs seront soumis, l'objectif est de comparer les mesures prises lors de la première séance avec la dernière. Enfin, étant donné que la précision des joueurs augmente lorsque le tir est croisé, c'est-à-dire lorsque le ballon est dirigé vers le côté opposé au pied qui frappe (Chiappori et al., 2002), un objectif final sera de comprendre si les joueurs ont un meilleur côté pour rediriger le tir.

En fonction de notre intérêt et des objectifs recherchés dans ce travail, trois questions de recherche stipulées serviront de support à l'analyse des résultats et à la rédaction de l'article :

I : Quel est le seuil minimal de temps dont un joueur d'élite a besoin pendant le tir de penalty pour tirer son coup dans le côté opposé au plongeon du gardien?

II : Un entraînement spécifique sur les tirs au but à stratégie dépendante du gardien peut-il réduire le temps seuil minimum de redirection du tir et améliorer le taux de réussite ?

III : Y a-t-il une différence significative entre la réorientation pour droitiers et pour gauchers, c'est-à-dire entre la réorientation avec ouverture et fermeture du pied ?

Au cours de notre expérience, nous considérons les deux variables suivantes : le côté où le gardien peut plonger et le côté où le joueur veut diriger le ballon. Sur cette base, quatre conditions et huit situations finales possibles peuvent se créer (cf. Figure 3). Afin d'informatiser les variables et les situations qui en découlent, une lettre pour le côté où le ballon doit être dirigé par le joueur et une lettre pour le côté du plongeon du gardien sont transcrites et enregistrées

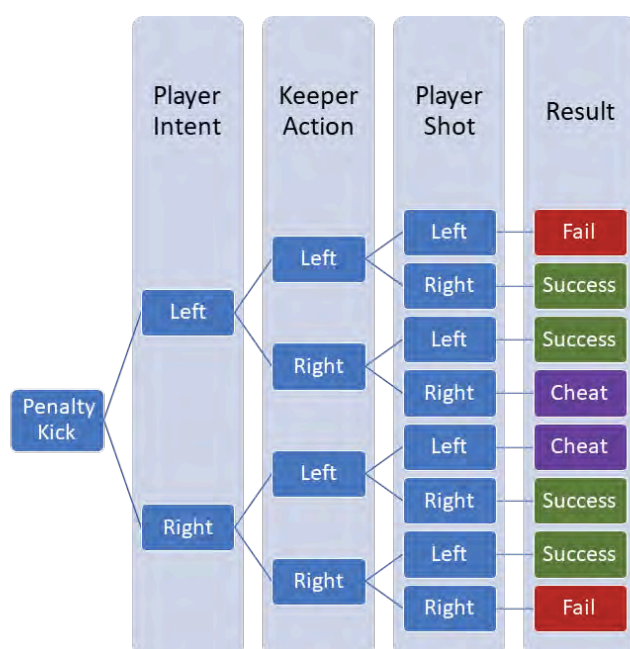
sur l'ordinateur de l'examineur. Les deux lettres sont indiquées dans l'ordinateur l'une après l'autre. Les quatre conditions spécifiques qui peuvent se produire sont : RL ; LR ; LL ; RR.

Dans les conditions : RL et LR le joueur ne redirige pas son tir pendant le tir de pénalité, alors que dans les conditions : RR et LL ,le joueur doit rediriger son tir.

Comme le montre la figure 3, le joueur peut donc se retrouver à devoir rediriger son tir comme à ne pas le faire. Si nous considérons également le taux de réussite, c'est-à-dire la chance de marquer ou non, nous pouvons conclure que le huit situations possibles peuvent arriver.

Figure 3

Les quatre conditions avec les huit scénarios possibles lors que le joueur veut rediriger sont tir lors d'un penalty



Note. Représentation schématique des scénarios possible lors d'un penalty à stratégie dépendant du gardien en considérant l'intention du joueur et l'action du gardien. Quatre conditions (Left-Left ; Left-Right ; Right-Left ; Right-Right) et huit scénarios finaux en fonction du côté où le ballon est dirigé avec les résultats possibles: Fail, Succes , Cheat (CopeLab, 2021).

1.8 Hypothèse

Jusqu'à présent, le seuil temporel minimum découvert dans la recherche scientifique se situe entre 300 et 400 ms (Morya et al., 2003 ; Van Der Kamp, 2006 ; Bowtell et al., 2009). Tout d'abord, il est important de prendre en compte la limitation physiologique de notre système

neuromusculaire liée au temps nécessaire pour conclure le cycle de réaction et de traitement de l'information visuelle. (Morya et al., 2003). Ensuite, notre recherche scientifique propose une expérimentation dans l'environnement extérieur, c'est-à-dire sur le terrain de jeu réel avec les caractéristiques physiques respectives ou le rôle du gardien est pour la première fois donné par un avatar virtuel effectuant le mouvement complet d'un gardien de but. Enfin, notre étude a porté sur des sujets qui font partie de l'élite du football et qui ont donc des compétences footballistiques importantes et donc d'excellentes compétences neurophysiologiques de réaction, de traitement de l'information et d'ajustement du tir (Bowtell et al., 2009).

Compte tenu de tout cela, nous pouvons donc soutenir une première hypothèse, à savoir que le seuil de temps minimum des footballeurs est proche de celui découvert dans la littérature scientifique susmentionnée. D'une part, on peut s'attendre à une augmentation du seuil temporel par rapport aux expériences en laboratoire, car l'exécution du tir de pénalité dans des conditions réelles suppose d'autres capacités de coordination, biomécaniques et psychologiques, plus importantes de la pratique en laboratoire (Davids et al., 2021), et une perception visuo-cognitive basée sur le mouvement réel du gardien qui est différente, ainsi que de la perception provoquée par l'allumage et l'extinction de l'ampoule électrique. D'autre part, le seuil de temps peut être diminué en raison des capacités neurophysiologiques supérieures des footballeurs d'élite par rapport aux amateurs.

Les 12 séances auxquelles les joueurs seront soumis nous amènent à considérer qu'il y aura une amélioration significative du seuil de temps minimum et du taux de réussite entre la première et la dernière séance de tirs au but, donc grâce au processus d'entraînement. Selon la loi de l'apprentissage moteur, la marge d'amélioration des joueur d'élite soit inférieure à celle des joueurs amateurs, car il est plus difficile pour un joueur expérimenté de progresser au même rythme qu'un joueur ayant moins d'expérience et d'aptitudes (Baker et al., 2003). Nous nous attendons donc à une différence significative car les sujets du test ne sont pas encore au sommet de leur développement moteur et leurs compétences peuvent encore s'améliorer. Cependant, les seuils de temps peuvent être plus bas chez les joueurs de l'équipe U17 que chez ceux de l'équipe U16 du FC Lucerne, car ils sont plus expérimentés et donc leurs capacités motrices à tirer un penalty peuvent être plus automatisées. Nous ne nous attendons pas à une diminution de la performance au penalty pour des raisons physiques ou dues à un manque de concentration et à l'ennui, car le design propose un nombre relativement faible de penaltys et les sujets, étant de l'élite, ont de très bonnes aptitudes physiques, mentales et motivationnelles et sont habitués au contexte.

Cependant, nous nous attendons également à ce que la marge de progression varie entre les joueurs, ce qui pourrait être dû à des raisons liées aux principes d'individualité. En effet, si l'on considère le domaine génétique, chaque joueur produisent des performances différentes même s'ils possèdent le même âge, de sorte que tous les athlètes ne progressent pas de la même manière (Missitzi et al., 2013). Il faut également tenir compte du fait que les athlètes ont des stratégies différentes pour tirer un coup de pied de réparation, c'est pourquoi, dans un premier temps, ceux qui utilisent habituellement la stratégie indépendante du gardien devront s'habituer à la nouvelle stratégie, notamment en ce qui concerne la stratégie visuelle pendant l'exécution, et cet aspect aura une influence sur les valeurs des seuils mesurées lors des premiers coups de pied de réparation et donc sur la progression du seuil.

Enfin, notre dernière hypothèse est liée au côté redirection du trio et au pied préféré du joueur. En considérant ce dernier point, nous supposons qu'il y aura une différence significative entre le fait de rediriger le tir vers la droite ou vers la gauche. Cette hypothèse découle de la structure anatomique du pied du joueur. Par exemple, d'un point de vue anatomique, lorsqu'un droitier tire vers le côté gauche, il doit fermer son pied, lorsqu'il doit tirer vers la droite, il doit l'ouvrir. Il sera donc plus naturel pour le joueur droit de fermer son pied et donc de diriger le tir vers la gauche (Chiappori et al., 2002 ; Palacios Huerta, 2003). Cependant, l'orientation du ballon ne dépend pas seulement de facteurs anatomiques, mais aussi de facteurs techniques, individuels et balistiques, de sorte que la réorientation peut dépendre d'une préférence, de son propre niveau de technique ou d'autres aspects comme le regard (Wilson & Wood, 2011).

2 Méthode

2.1 Description de l'échantillon

Des footballeurs d'élite des équipes de jeunes U16 et U17 du FC Lucerne, équipes suisses jouant dans la première ligue suisse de jeunes, ont participé à ce travail de recherche. Au total, 6 footballeurs masculins hautement qualifiés ont été testés, à savoir 3 joueurs de l'équipe M16 FC Lucerne (âge moyen = 16.0), dont deux droitiers et un gaucher, et 3 joueurs de l'équipe M17 FC Lucerne (âge moyen = 17.0), dont un gaucher et deux droitiers. Sur la base des indications des entraîneurs respectifs, 4 des 6 joueurs qui ont pris part à l'étude tirent régulièrement des penaltys dans leur propre équipe. L'échantillon de footballeurs provient de l'élite du football, ils ont donc d'importantes compétences footballistiques, et nous suggérons que cette enquête scientifique a franchi une étape supplémentaire dans la mesure où les compétences des sujets sont supérieures à l'échantillon utilisé dans les recherches précédentes. Les joueurs ont été choisis arbitrairement, de sorte que presque tous les rôles du football ont été inclus : défenseurs, milieux offensifs. Tous les joueurs ont reçu les mêmes instructions pour l'exécution des tirs au but et avant de commencer les sessions de l'expérience, les participants ont été autorisés à effectuer des penaltys d'essai pour se familiariser avec l'équipement et la nouvelle stratégie de tir dépendant du gardien.

Enfin, il est important de mentionner qu'aucun des participants ne souffrait de problèmes physiques et qu'il a été demandé aux participants, via leur association FC Lucerne, l'autorisation d'utiliser les données collectées à des fins de recherche expérimentale.

2.2 Design de l'étude

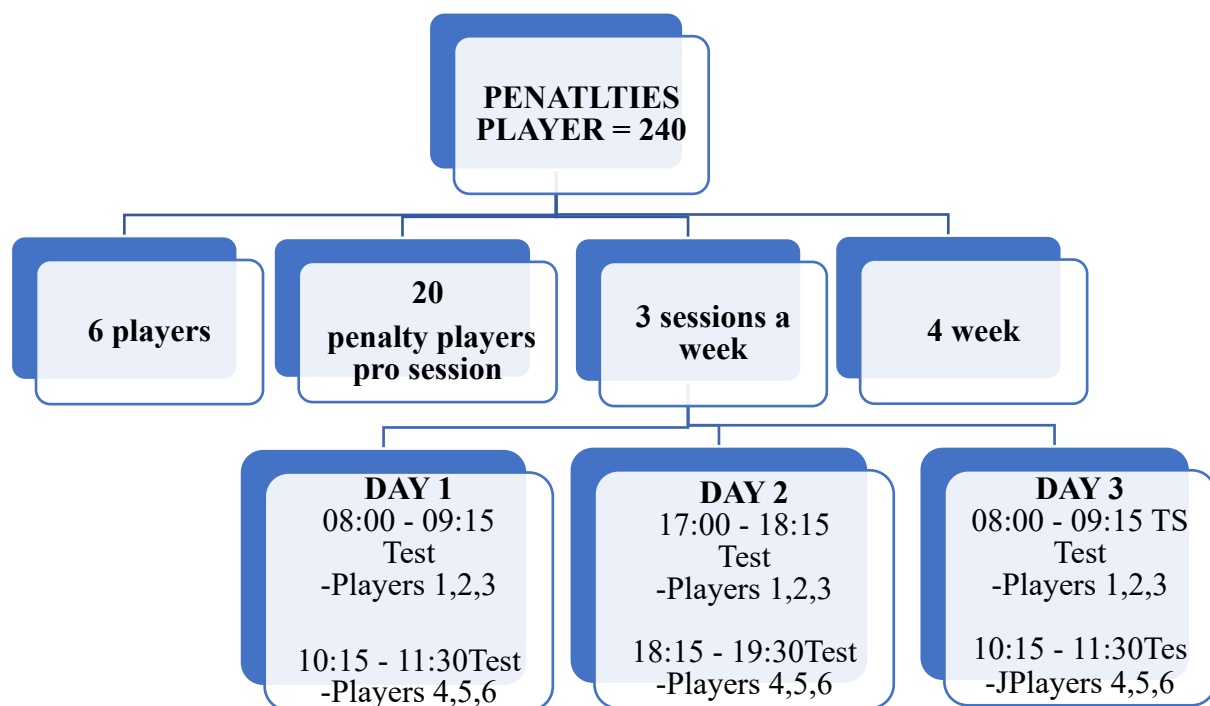
La procédure de recherche scientifique, comme le montre la figure 4, comprenait 12 sessions au cours desquelles chaque sujet (N=6) effectuait 20 tirs au but. 4 des sujets ont donné un coup de pied avec leur pied droite et 2 avec leur pied gauche. 3 sessions de formation ont été réalisées chaque semaine et l'expérience s'est étalée sur 4 semaines. Chaque participant devait donc prendre 240 pénalités à la fin des trois semaines, mais en raison des conditions météorologiques, seules 11 sessions ont eu lieu, pour un total de 220 penaltys. Par cette procédure, nous voulions d'abord donner de la fiabilité aux résultats, mais en même temps, vu le professionnalisme des joueurs, nous voulions éviter une charge musculaire trop importante aux joueurs. Enfin, on a voulu limiter d'autres facteurs susceptibles de modifier les résultats tels que l'ennui et la concentration. Le compromis a donc été d'effectuer un nombre "relativement faible" de penaltys

par session, mais la période de mesure a été prolongée. Les nombreuses sessions ont non seulement donné de la fiabilité aux résultats mais ont également permis d'observer une évolution des données mesurées.

Afin de créer une homogénéité dans les mesures, les 3 sessions hebdomadaires ont été effectuées les mêmes jours et les sujets sont allés faire l'expérience dans la même séquence et fréquence. Avec cette procédure, les temps de repos entre les sessions étaient pour tous le même. Le seul facteur limitant la régularité des séances était les conditions météorologiques, l'équipement ne pouvant être utilisé que par temps sec. La luminosité n'était plus un problème comme dans le travaux précédant (Richard, 2021), car s'il y a trop de lumière, un film protecteur sombre était appliqué sur les lunettes du casque HoloLens, permettant de voir clairement l'hologramme. Pendant les sessions de penaltys, chaque participant s'est vu présenter de manière aléatoire les 4 conditions (LR, RL, RR, LL). Plus précisément, chaque condition s'est produite 10 fois de manière aléatoire, de sorte que les sujets ne pouvaient pas prédire la condition dans laquelle ils se trouveraient lors de l'exécution du tir au but.

Figure 4

Design de l'étude sur les penaltys



Note. La figure montre le protocole expérimental utilisé dans cette étude scientifique.

2.3 Description des méthodes

Dans cette étude scientifique, l'expérience et les mesures respectives ont eu lieu au centre sportif professionnel du FC Lucerne, la Swisssporarena. Nous nous sommes rendus à Lucerne avec tout le matériel nécessaire pour les mesures, et lorsque les conditions météorologiques le permettaient, les analyses ont eu lieu pendant les entraînements des équipes (FC Lucerne U16 et U17). Le professionnalisme et le sérieux du club ont permis une organisation précise pendant la période de quatre semaines. Les mesures se sont donc déroulées avec une régularité contrôlée et le professionnalisme du football.

Les travaux antérieurs à celui-ci ont utilisé une conception similaire à celle que nous avons proposée en utilisant la réalité augmentée, mais comme c'était la première fois qu'ils étaient réalisés sur le terrain de jeu réel, il y a eu quelques difficultés liées à l'utilisation de l'équipement dans l'environnement extérieur, ce qui a rendu les mesures difficiles et les résultats respectifs inutilisables (Richard, 2021).

L'équipement de réalité augmentée (HoloLens), ainsi que l'équipement de détection du départ du ballon (Lidar) ont donc été améliorés afin qu'ils puissent supporter des mesures dans l'environnement extérieur avec des conditions de lumière variables (cf. Annexe 1). Nous avons également ajouté l'utilisation d'une caméra vidéo pour une analyse plus détaillée de la course d'élan et du comportement des joueurs lors des tirs au but, notamment pour analyser la cinématique dans les sessions Pre et Post.

En général, l'expérience par rapport aux travaux de maîtrise antérieurs qui ont étudié le même sujet en laboratoire (Molisani, 2016 ; Rao, 2019 ; Correia, 2020) a été réalisée dans des conditions beaucoup plus proches de la réalité, avec l'exécution de tirs au but sur un vrai terrain de football, donc à partir d'une distance de 11 mètres en direction d'un but de dimensions 7,32 mètres de long et 2,44 mètres de haut (cf. Annexe 1). Le passage du laboratoire au terrain de jeu a été rendu possible grâce à la réalité augmentée, et cet aspect différencie notre enquête scientifique d'autres études scientifiques qui ont déjà expérimenté sur le terrain de jeu, car la tâche visuo-motrice du penalty est plus proche de la réalité (cf. Annexe 2). La perception visuelle du gardien de but rendue possible par la réalité augmentée était plus réelle que l'allumage et l'extinction des lumières utilisées dans les recherches précédentes, ce qui a permis aux joueurs de subir les mêmes processus neurocognitifs que ceux qui se produisent dans la réalité d'un tir au but (Van Der Kamp, 2006 ; Bowtell et al., 2009).

Enfin, afin de stimuler également la composante émotionnelle, qui s'est avérée être l'un des facteurs déterminants dans les tirs au but, nous avons voulu créer un classement des

performances des sujets de l'expérience, en fait, on a dit aux joueurs qu'à la fin des quatre semaines, le meilleur joueur des sessions recevrait un cadeau (Dohmen, 2008).

Les sujets devaient participer à 3 séances hebdomadaires pendant 4 semaines consécutives (cf. Figure 4). A chaque session, chaque sujet (N=6) devait effectuer 20 penaltys d'une durée de 20 minutes, la session a donc duré au total environ 1 heure et 30 min.

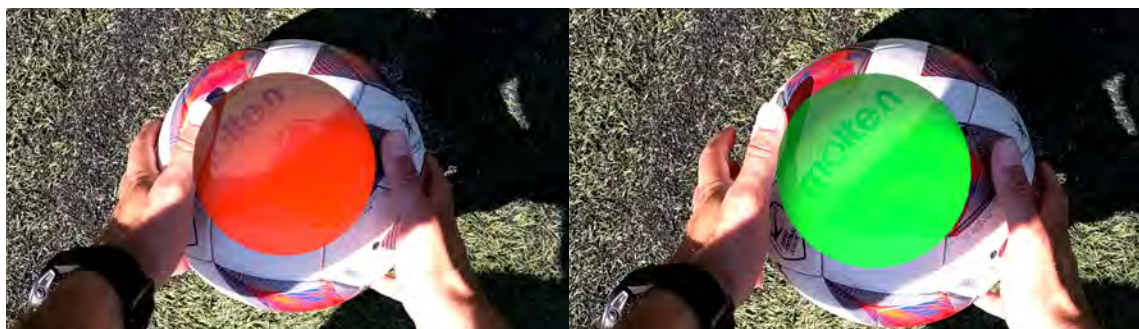
En ce qui concerne la procédure des penaltys, avant l'expérience proprement dite, chaque sujet a reçu les mêmes instructions afin que l'expérience se déroule dans des conditions homogènes.

Le protocole qui a été imposé aux joueurs du FC Lucerne était le même pour tous.

Les joueurs se situaient au point de penalty situé à 11 mètres du but et devaient porter le casque de réalité augmentée (HoloLens 2). Une fois le casque de réalité augmentée porté, grâce au logiciel Unity3D installé dans le dispositif de lunettes, le joueur percevait l'avatar virtuel, le point de penalty virtuel placé sur celle réelle grâce à un processus de calibrage, et deux grands cercles à côté du gardien de but, un à droite et un à gauche qui correspondaient à l'intention de premier tir du joueur. Ce stade est reconnue dans le software come : « State Idle » (cf. Annexe 2). Le ballon devait ensuite être placé sur le point de penalty, qui s'allumait en rouge lorsque le ballon était mal placé ou en vert lorsqu'il était correctement positionné (cf. Figure 5). Le bon placement du ballon était permis grâce au détection de la balle dans l'espace permis grâce au Lidar. A ce stade là, le joueur devait ensuite reculer pour trouver l'élan optimal. Pour atteindre la distance optimale, le joueur devait observer les grands cercles situés à côté du gardien de but, qui étaient colorés en rouge ou en orange lorsque le joueur était trop proche du ballon ou en vert lorsque la distance d'élan était suffisante. Une fois la distance optimale atteinte, un point petit apparaissait également qui pouvait se déplacer en fonction de la direction du regard du joueur (cf. Figure 6).

Figure 5

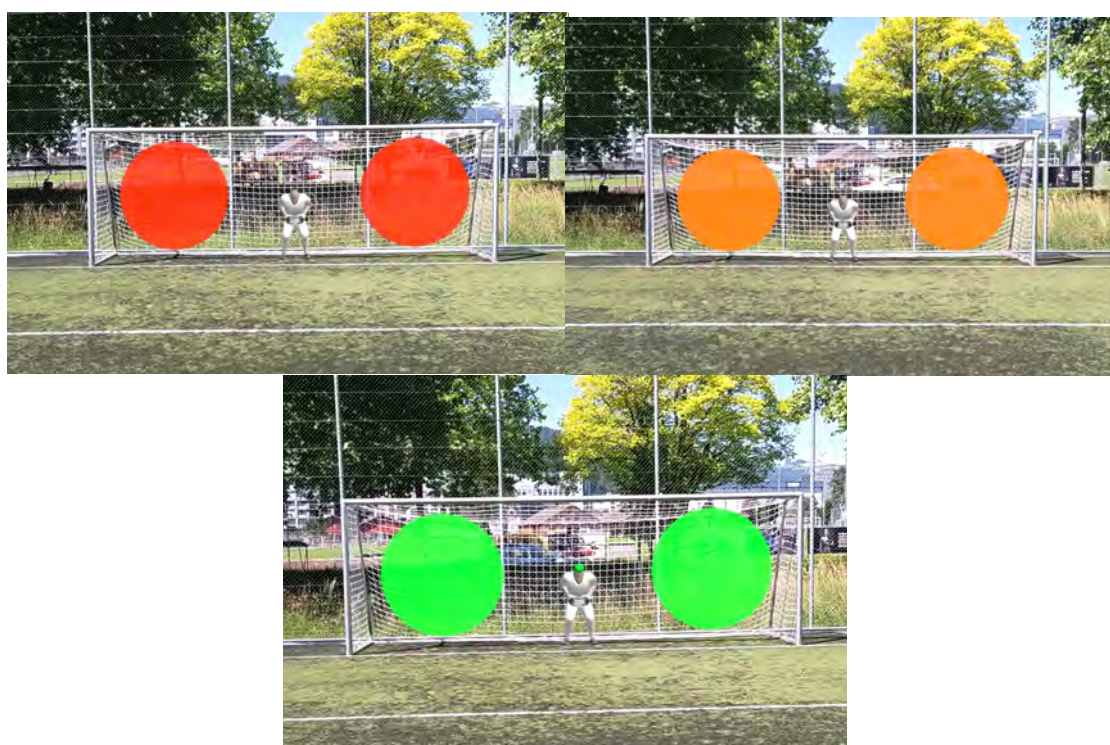
Le ballon placé sur le point de penalty



Note. La figure montre le point de penalty en réalité augmentée lorsque le ballon est mal placé (rouge) et lorsqu'il est bien placé (vert).

Figure 6

Recherche de la distance optimale pour l'élan du joueur : "State ready"



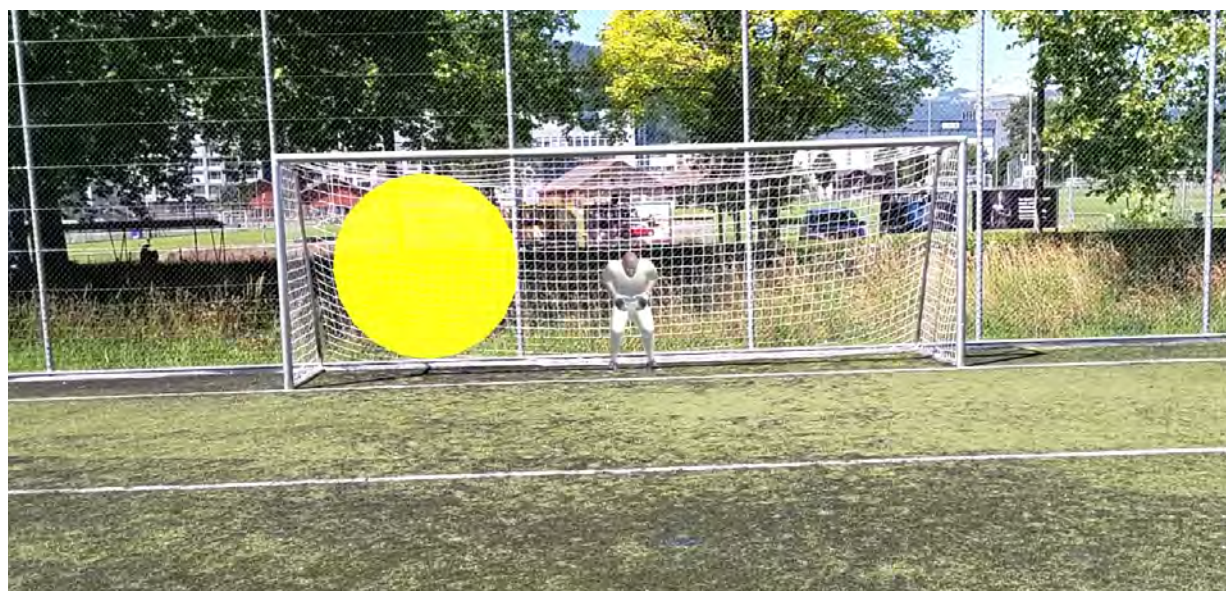
Note. La figure montre ce que le joueur voit lorsqu'il cherche la bonne distance pour son élan avant de tirer le penalty. Lorsque les cercles étaient rouges ou orange, la distance pour l'élan n'était pas bonne, tandis que lorsqu'ils étaient verts, la distance était optimale.

Grâce au petit point de direction du regard, le joueur peut déclencher l'exécution et effectuer le tir au but tout en fixant, donc en dirigeant le point vers la tête du gardien pendant une durée de trois secondes, jusqu'à ce qu'un des deux cercles de la première intention disparaisse. À ce stade, l'avatar est in « State ready » et il ne reste plus qu'un grand cercle à droite ou à gauche du gardien de but (cf. Figure 7).

À ce moment-là, le joueur pouvait effectuer le penalty, en pensant d'abord à tirer en direction du grand cercle et à rediriger le tir si le gardien plongeait du même côté. À la fin de chaque pénalty le système est en « State kicked », c'est à dire que le software a détecté le déplacement de ballon. Après l'exécution le système est en « State feedback » donc il a besoin d'une réponse "feedback" correspondant à la direction dans laquelle le ballon a été dirigé. La réponse a été donnée par le chercheur via l'ordinateur en cliquant sur les boutons : LEFT ; RIGHT ; CENTRE ; OUT ; SKIP (cf. Figure 10) du programme auquel le casque et le lidar étaient connectés (*IntelJIDEA*). La réponse pouvait également être donnée vocalement par le participant, qui devait dire : « Feedback ... » (cf. Figure 8).

Figure 7

Exécution du penalty , avatar gardien en : State Ready”



Note. L'image montre la situation lorsque l'avatar du gardien de but est en "état prêt" et que le joueur peut tirer un penalty. Le cercle jaune indique l'intention initiale du tir. Si le gardien de but plongeait de ce côté (LL), il devait diriger le tir, sinon il ne le faisait pas (LR).

Figure 8

Après l'exécution du coup du penalty: "State Kicked et State Feedback"



Note. Une fois que le joueur a tiré le penalty, le système a détecté le départ du ballon et le logiciel indiquait : "State Kicked". Immédiatement après, le système avait besoin d'une réponse pour savoir où la balle était dirigeait. Le système passait alors à "State feedback" et affichait le texte : "Waiting for feedback". La réponse a été donnée par le chercheur dans le programme approprié.

Il était important pour les joueurs de maintenir un élan régulier pendant la séance des penaltys, car le logiciel de l'ordinateur, grâce à l'algorithme, a calculé les seuils de temps d'élan en prenant comme référence le premier élan du joueur. Dès que l'essai était différent, le logiciel ne validait pas l'essai et le message suivant apparaissait: "Running time Adjustment ». Le nouvel essai, qu'n'était pas valide par l'ordinateur a été quand même pris comme référence. Il fallait alors recommencer l'essai en effectuant un élan similaire au précédent. Le calcul de l'élan est un aspect très important de l'algorithme, car il permet de déterminer le temps d'anticipation du gardien de but pour effectuer le mouvement (swing) avant que le pied du joueur ne touche le ballon.

La tâche du chercheur une fois que le joueur portait le casque était de fournir les bonnes explications aux sujets, de s'assurer que l'équipement fonctionnait et que le calibrage était optimal, de fournir un retour d'informations et à la fin des sessions, il devait accepter la session pour valider le test.

Pour la collecte des données, le casque et l'ordinateur avec le programme respectif permettant la sélection aléatoire des conditions de tir (RL ; LR ; LL ; RR) ont été connectés via une connexion internet à partir d'un téléphone mobile. Enfin, tous les appareils, à l'exception du casque porté par le joueur, étaient alimentés en électricité par une centrale électrique afin de pouvoir fonctionner dans les meilleures conditions.

2.4 Description détaillée des instruments de recherche

2.4.1 HoloLens 2

Ce dispositif technologique est l'un des aspects clés de notre travail de recherche, car il a permis de mettre en œuvre le nouveau plan expérimental le plus proche de la réalité d'un coup de pied de réparation, ce qui permettra à l'avenir au football professionnel moderne de tester et d'entraîner les penaltys dans les conditions les plus réelles et donc écologiques possibles (cf. Figure 9 ; Annexe 1). Le travail précédant celui-ci a déjà eu l'occasion d'utiliser ce dispositif, mais certaines distorsions dans les mesures ont empêché l'utilisation des données recueillies (Richard, 2021). D'autres travaux ont utilisé une conception purement virtuelle, c'est-à-dire que la réalité virtuelle du penalty a été reproduite en laboratoire (Correia, 2020 ; Molisani, 2016 ; Rao, 2019).

Notre expérience scientifique a donc utilisé l'HoloLens 2, un casque qui se fixe sur la tête à l'aide d'une bande souple et qui est doté d'une visière semi-transparente. Grâce à la visière transparente, le dispositif permet au sujet de voir à la fois l'environnement réel et les "hologrammes" virtuels souhaités. On parle donc d'un dispositif de réalité augmentée. Le dispositif technologique est conçu pour être ergonomique et confortable pour le porteur, car il n'est pas contraint par des fils et des câbles, de sorte que le porteur peut se déplacer librement sans être gêné. L'appareil fonctionne donc grâce à la connexion Wifi.

Dans notre situation expérimentale, l'HoloLens 2 a permis aux sujets de test d'être sur le terrain pour tirer un vrai penalty. Dans la visionneuse de l'appareil, seuls le gardien, le point de penalty et la cible représentant la première intention de tir étaient projetés virtuellement. Le reste de l'environnement (terrain, but, ballon) était vraiment perçu. En outre, l'absence de fils et de câbles et la légèreté du dispositif technologique ont permis au footballeur de se déplacer sans limites. En outre, un film sombre pourrait être appliqué sur la visière, permettant au sujet de percevoir les hologrammes même lorsque les conditions de luminosité sont trop importantes. Enfin, l'appareil a été connecté à l'ordinateur portable via Internet, de sorte que le gardien virtuel

dans le but et le cercle vert de deux mètres correspondant à la première intention de tir ont été connectés au programme dans lequel les penaltys ont été enregistrés.

Figure 9

Casque de réalité augmentée : HoloLens



Note. Casque de réalité augmentée HoloLens 2, avec une visière, une batterie et un bouton permettant d'allumer et d'éteindre l'appareil. En façade, à gauche et à droite, se trouvent les commandes de luminosité et de volume (CopeLab, 2021).

2.4.2 Unity3D

Il s'agit du logiciel qui a permis la création de l'avatar virtuel permettant donc au casque de réalité augmentée de représenter la vraie situation d'un joueur se retrouvant face au gardien lors d'un penalty. Plus précisément le logiciel permet d'afficher le gardien, le point de fixation indiqué par un petit cercle qui se déplace en fonction du regard, le point de penalty, le cercle indiqué par un grand cercle où le joueur doit tirer son ballon en première intention, ainsi que le but si le joueur le désire. Concernant le point de penalty, cela où le joueur devra placer le ballon et le disque apparaîtra rouge lorsque la balle est mal placée, tandis qu'il sera vert lorsque la balle est correctement positionnée. Ensuite, le joueur pourra observer la figure avatar du gardien avec la perception d'une distance réelle de 11 mètres. Le programme fait initialement apparaître deux cercles à droite et à gauche du gardien de but, qui seront rouges lorsque le joueur se trouve à

une distance trop proche, orange lorsque la distance est à la limite, et verts lorsqu'il est positionné à une distance optimale. Quand les grands cercles sont verts le logiciel fait apparaître aussi un petit point de fixation qui suit le regard du joueur. Ceci est l'outil qui permettant au joueur de commencer l'exécution du penalty. Plus précisément en maintenant son regard fixe et donc en plaçant le point de fixation sur la tête de l'avatar du gardien pendant environ trois secondes, l'un des deux grands cercles disparaît et le penalty peut être exécutée.

Enfin Unity 3D, dès que le joueur est sur le point de donner un coup de pied, permettra de voir les mouvements du gardien. L'avatar du gardien se déplace avec un timing différent en fonction de la course d'élan du joueur. Cette dernière est déterminée grâce à une zone de 2 mètres contournée par le logiciel autour du point de penalty. En effet, grâce à un système de suivi 3D, le temps écoulé entre l'entrée du joueur dans la zone des 2 mètres et le contact avec le ballon correspondra à la course d'élan des joueurs.

Pendant la séance de penalty, le joueur doit essayer d'avoir une course homogène entre les tirs, car l'algorithme prend la course d'élan du tir précédent comme référence et ne valide le tir que si la course était plus ou moins similaire. Si ce n'est pas le cas, le système répète l'exécution et rééquilibre chaque fois l'élan du joueur.

2.4.3 IntelJIDEA

IntelJIDEA est un logiciel sur l'ordinateur portable qui permet de programmer en Java (cf. Figure 10). Grâce à lui, il a été possible de créer un programme spécial pour l'utilisation de la réalité virtuelle dans les sessions aux penaltys. Plus précisément, le programme développé permet de créer des séances des penaltys et de mesurer et d'enregistrer les seuils de temps pour la réorientation du tir. La possibilité de capturer les valeurs de l'équipement Lidar inhérent au départ de la balle a été incluse dans le programme. Cette information associée au moment où le joueur entre dans la zone d'action déterminée par l'HoloLens permettra au programme de calculer le temps de la course d'élan de chaque joueur, ce qui est fondamental pour mesurer les seuils de temps minimum que nous recherchons.

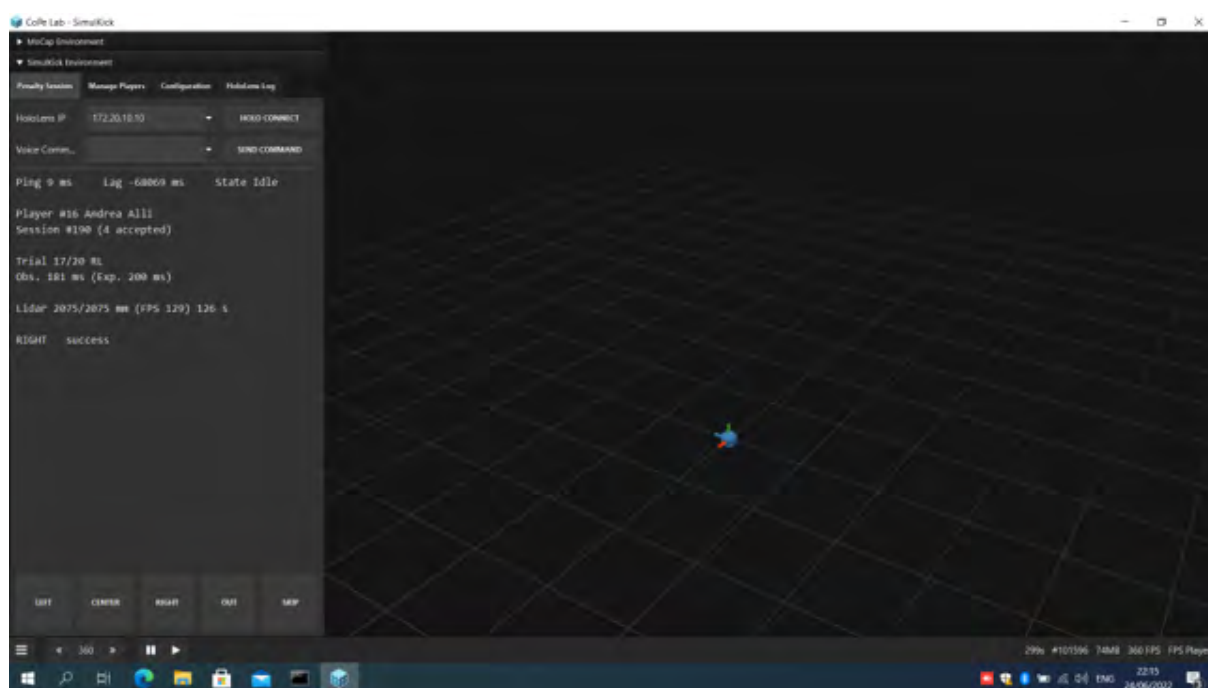
Sur la base de la durée de l'élan du joueur et du taux de réussite lors de la réorientation du tir, le programme détermine également le temps en millisecondes dont le gardien a besoin pour effectuer un swing avant que le pied du joueur ne touche le ballon.

Si la course varie trop, le système effectue un recalibrage en prenant comme référence la dernière course effectuée. Grâce à la connexion Internet, le programme peut se connecter au casque et transmettre les séances de tirs au but avec les conditions respectives (RL ; LR ; LL ; RR) prises causalement par les joueurs et déterminées sur la base d'un algorithme.

Le programme avec ses fonctionnalités, nous permet d'abord de nous connecter à l'HoloLens, nous donne ensuite des informations sur le temps de passage des informations du casque à l'ordinateur, des informations sur l'élan des joueurs, nous permet de calibrer les hologrammes représentés dans le casque, de créer des sessions de pénaltys, de créer des sessions de preuves, de réinitialiser le système de réalité augmentée. Enfin nous permet d'indiquer la direction du tir en appuyant sur les boutons possibles : GAUCHE ; DROITE ; CENTRE ; OUT ; SKIP.

Figure 10

Programme développé avec IntelJIDEA pour collecter des données à partir des pénaltys



Note. La figure montre le programme développé avec IntelJIDEA qui a permis la création des séances de tirs au but. L'algorithme créé à partir des mesures de l'équipement auquel le programme était connecté a permis d'obtenir des données sur les seuils de re-direction des tirs. Dans ce programme, un feedback sur la direction des tirs des joueurs était également donné pendant les sessions per le chercheur (CopeLap, 2022).

2.4.4 Lidar

Ce dispositif permet de déterminer la distance d'un objet dans l'espace à l'aide d'une impulsion laser qui en émane, c'est-à-dire un faisceau lumineux d'une longueur d'onde précise (cf. Figure 11). Dans notre expérience, le Lidar permet de déterminer le moment où le ballon entre en

contact avec le pied du joueur et s'éloigne donc du point de penalty. Le dispositif détermine la distance de la balle en calculant le temps écoulé entre l'émission de l'impulsion laser et la réception du signal rétrodiffusé. Pendant l'exécution du coup de pied de réparation, le ballon est placé à environ 1,5 mètres du lidar afin que les longueurs d'onde de l'équipement puissent capter au mieux le mouvement du ballon dans l'espace. Une distance trop proche ($<0,5\text{m}$) ne permettrait pas aux faisceaux de capter la distance, et une distance trop grande ($>2,5\text{m}$) rendrait la collecte des données plus imprécise.

Figure 11

Lidar



Note. La figure montre l'équipement dans lequel le lidar a été incorporé. Le Lidar était situé dans le tube au milieu de trois pieds d'appui. Cet appareil lors du a penalty permettait de détecter la distance du ballon dès qu'il a été frappé (CopeLab, 2022).

2.4.5 Power station

Il s'agit d'une centrale électrique qui fait office à la fois d'accumulateur et de batterie. Cette "centrale" a permis de fournir suffisamment d'électricité à tous les équipements : ordinateur, HoloLens, téléphone. Il a donc permis à l'ensemble des équipements de fonctionner

indépendamment d'une prise électrique et a assuré la réalisation des mesures dans les meilleures conditions et sur une longue période.

Figure 12

Power station



Note. Centrale électrique (EcoFlow River) qui a permis de fournir une énergie suffisante à tous les appareils pour la récolte des données. Au centre est présent l'écran centrale avec les indications de l'autonomie restante. De plus il est munie de deux prises 230 Volts, quatre ports USB et de deux prises pour charger des éléments (téléphone mobile ; casque) demandant moins d'intensité (CopeLab, 2021).

2.4.6 Téléphone mobile

Le téléphone était utilisé pour filmer les des penaltys des joueurs pour l'analyse vidéo grâce à l'application CMV Free qui permet l'analyse cinématique des mouvements. En outre le téléphone était dispensable pour connecter tous les appareils qui avaient besoin d'une connexion Wi-Fi. Avant chaque session, l'HoloLens et l'ordinateur étaient donc connectés au réseau Internet du téléphone portable afin que les sessions des penaltys puissent être effectuées ainsi que les données puissent être collectées.

2.5 Analyse statistique des données

Il y avait deux facteurs principaux, à savoir la session (Pre et Post) et la redirection du coup de pied (croisé et non croisé). Les deux facteurs ont été manipulés au sein du sujet (c'est-à-dire, mesures répétées). La variable dépendante était le seuil de redirection de 50 %, c'est-à-dire le temps minimum requis pour rediriger le coup de pied avec succès dans 50 % des cas.

L'effet des deux facteurs et de leur interaction sur la variable dépendante a été évalué à l'aide d'une approche de modélisation linéaire à effets mixtes. Les deux facteurs principaux ont été introduits dans le modèle en tant qu'effets fixes, tandis que les intercepts des participants ont été introduits en tant qu'effets aléatoires. Au total, quatre modèles ont été ajustés, à savoir : 1. un modèle incluant uniquement l'intercept, 2. un modèle incluant l'intercept et le facteur Session comme prédicteur, 3. un modèle incluant l'intercept et les facteurs Session et Redirection comme prédicteurs, et 4. un modèle incluant l'intercept, les facteurs Session et Redirection comme prédicteurs. Un modèle incluant l'ordonnée à l'origine, les deux facteurs comme prédicteurs et un terme d'interaction. Les quatre modèles ont été comparés et les valeurs p ont été obtenues à l'aide de tests de rapport de vraisemblance. Les degrés de liberté ont été approximés à l'aide de la méthode de Kenward-Roger (Halekoh et Højsgaard 2014). Pour chaque facteur, le R au carré marginal a été calculé comme indicateur de la taille de l'effet.

Les comparaisons directes entre les moyennes de seuils ont été effectuées à l'aide de tests de Wilcoxon (test non paramétrique pour les mesures répétées) et R a été calculé comme indicateur de la taille de l'effet.

La comparaison direct des angles du regard des joueurs des lors 10 premiers penaltys en Pre Post session ont été effectuées à l'aide de tests de student (test paramétrique pour le mesures répétées).

3 Résultats

3.1 Résultats globaux des seuils de redirection

La figure 13 nous montre la moyenne de seuil de redirection à un taux de réussite supérieur à 50 % de la première session (Pre) et de la dernière (Post).

En moyenne, le seuil de redirection des tirs à 50 % était de 406,34 ms dans la Pre et a diminué à 301,11 ms dans la Post. Le seuil de redirection de 50% des tirs était significativement différent entre les sessions Pre et Post ($\chi^2(1) = 19.22, p < .001$).

La différence entre les sessions Pre et Post explique 50 % de la variance du seuil de redirection ($R^2_{\text{marginal}} = 0,50$).

Concernant la redirection pour le tir croisée (Crossed) et non croisé (Uncrossed), la figure 13 montre également les seuils globaux de redirection pour les deux typologies de tir ; il n'y avait pas d'effet principal de la redirection (365,56 ms pour la redirection croisée contre 341,90 ms pour la redirection non croisée, $\chi^2(1) = 1,92, p > .05$) et pas d'interaction entre les deux facteurs ($\chi^2(1) = 0,01, p > .05$).

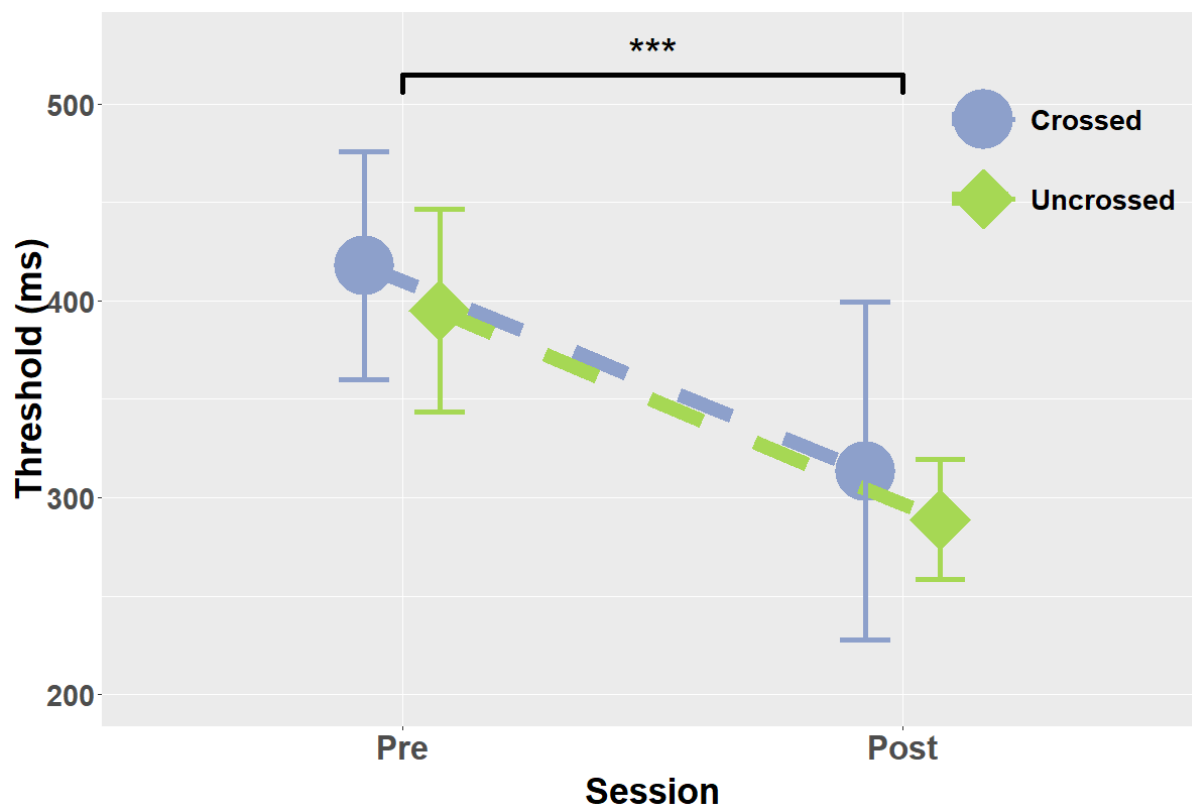
3.2 Résultats des seuils de redirection de tirs croisés et non croisés en Pre et Post session

Nous avons ensuite analysé séparément les données concernant les seuils de redirection des tirs croisés (cf. Figure 14) et non croisés (cf. Figure 15). Pour la raison que nous venons d'évoquer, pour chaque type de réorientation, nous avons directement comparé les seuils mesurés lors des sessions pré et post.

En ce qui concerne les tirs croisés, comme le montre la figure 14, les résultats montrent que le seuil de réorientation était significativement plus bas dans la session post (moyenne=313,46 ms) que dans la session pré (moyenne=417,66 ms, $p < .05$, $R = 0,90$, c'est-à-dire une taille d'effet importante). Comme le montre la figure 15, le même schéma a été observé pour la réorientation des tirs non croisés (288,76 ms dans la session Post vs. 395,03 ms dans la session Pre, ($p < .05$, $R = 0.90$, c'est-à-dire une taille d'effet importante).

Figure 13

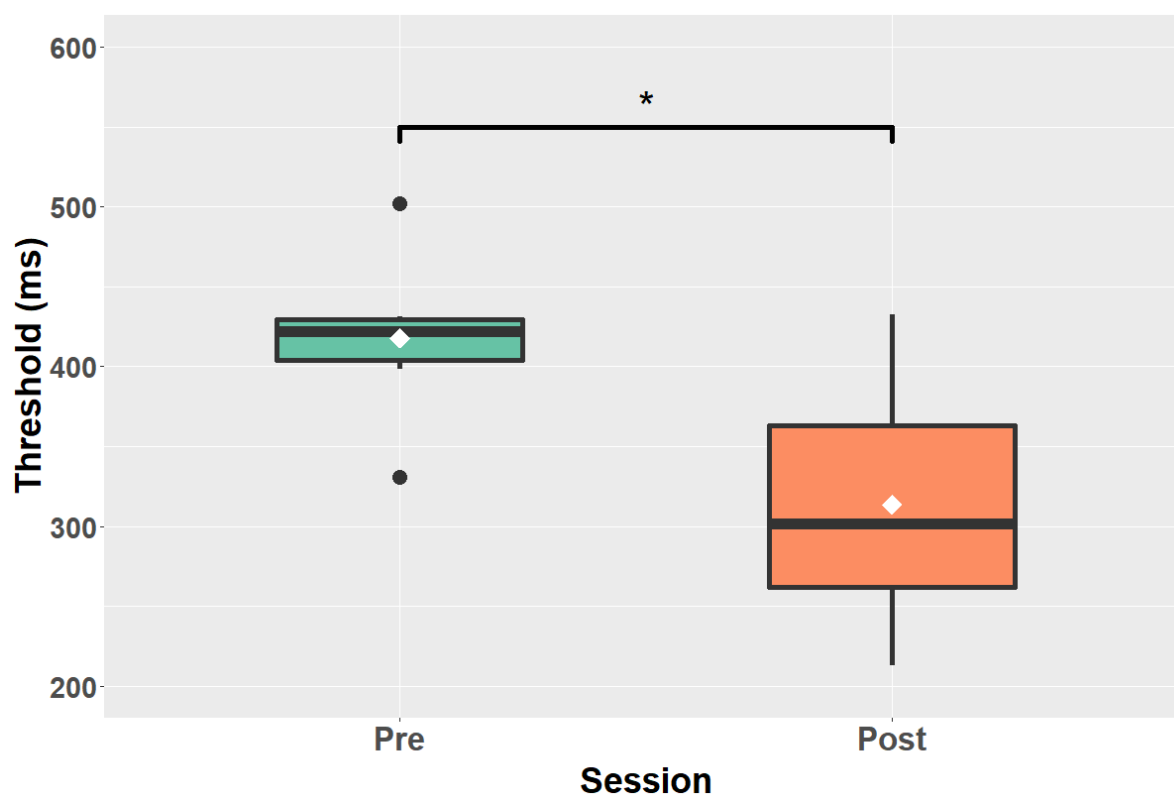
Seuils globaux de redirection de tirs en Pre et Post session avec distinction de tirs croisés et non croisés



Note. La figure montre sur l'axe des ordonnées les seuils de redirection globaux (ms) à un taux de réussite supérieur à 50 %. Sur l'axe des abscisses sont figurées la première session (Pre) et la dernière session (Post). Pour chaque session Pre et Post, deux box plot sont figurés; la box plot verte correspond au seuil de redirection de tirs non croisés et la bleue à celui des tirs croisés.

Figure 14

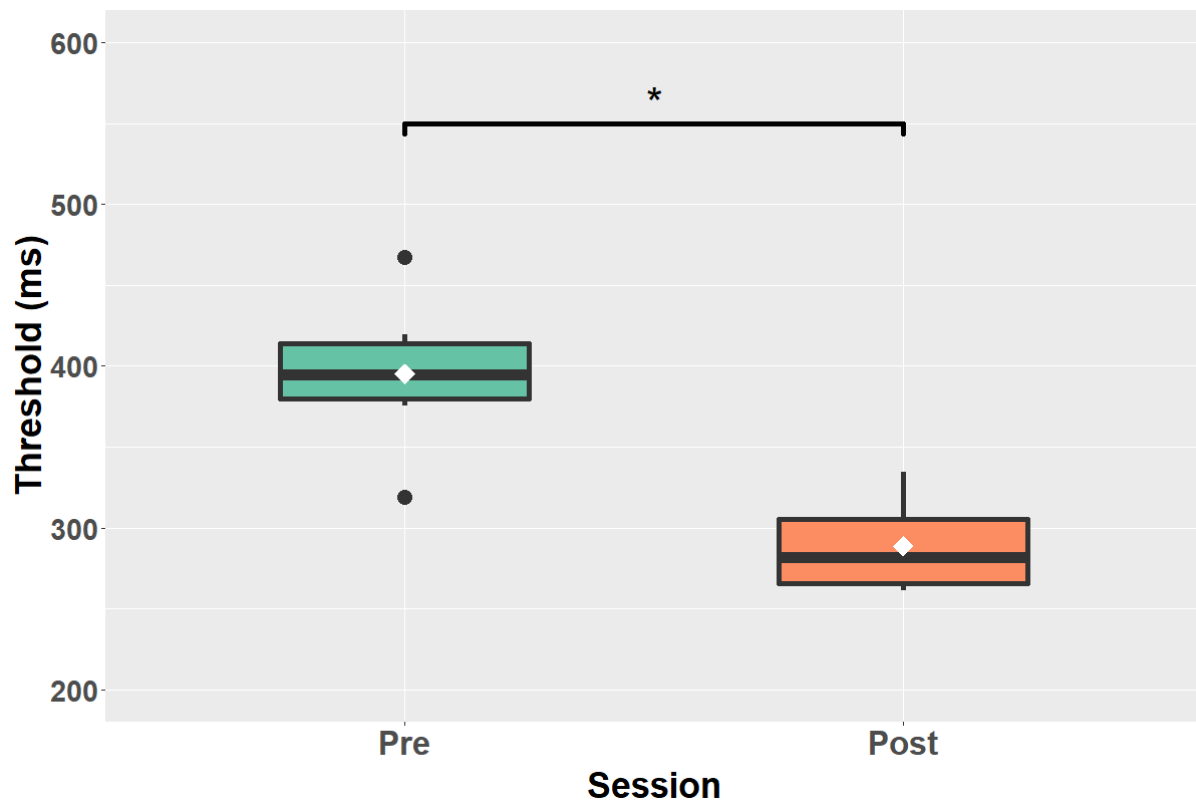
Seuil de redirection de tirs croisés des joueurs en Pre et Post session



Note. Représentation graphique des seuils de redirection des tirs croisés des joueurs, à un taux de réussite supérieur à 50 % dans la première session (Pre) et la dernière session (Post). Le seuil de redirection (ms) de tirs croisés est situé sur l'axe des abscisses et les sessions sur l'axe des ordonnées. Un box Plot vert est représenté pour la Pre session et un box Plot orange pour la Post session.

Figure 15

Seuil de redirection de tirs non-croisés des joueurs en Pre et Post session



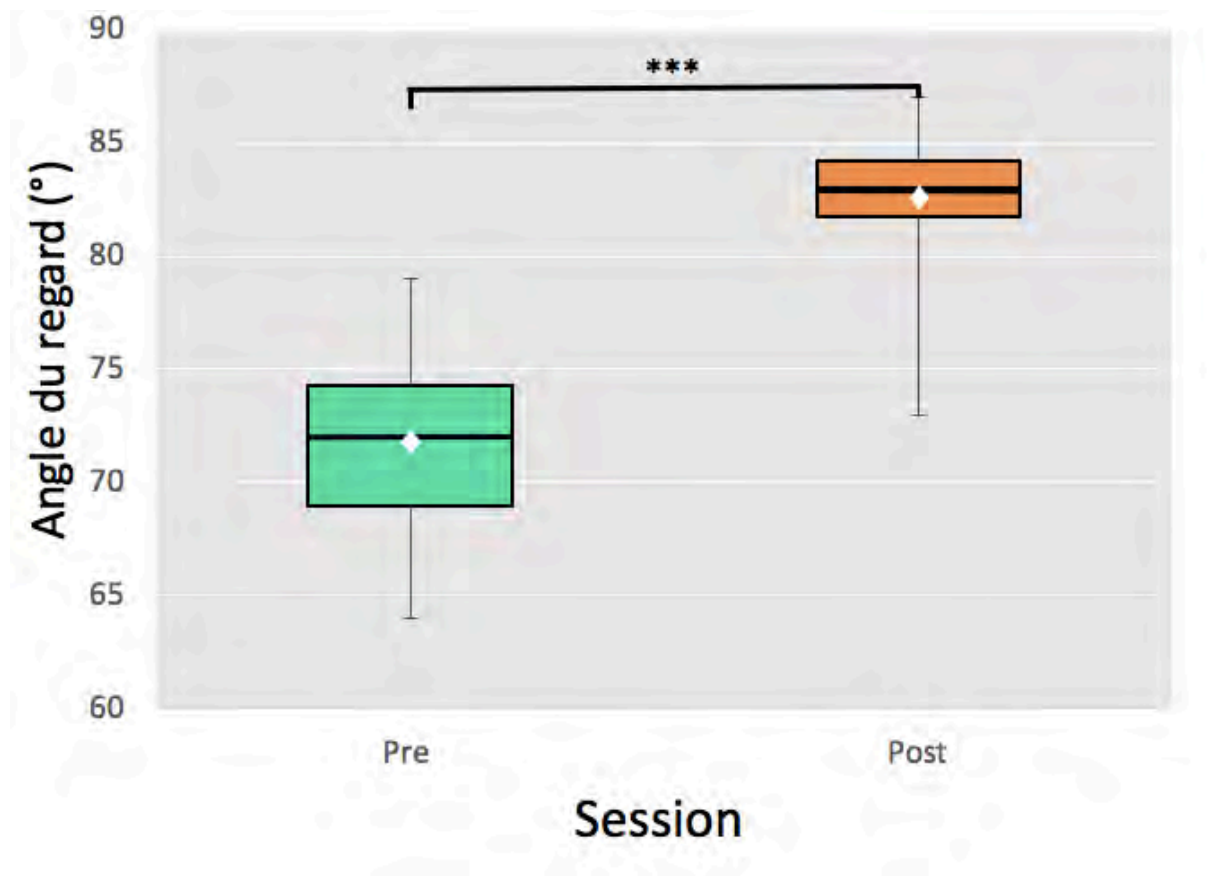
Note. Représentation graphique des seuils de redirection des tirs non-croisés des joueurs à un taux de réussite supérieur à 50 %, dans la première session (Pre) et la dernière session (Post). Le seuil de redirection (ms) de tirs non-croisés est situé sur l'axe des abscisses et les sessions sur l'axe des ordonnées. Un box Plot vert est représenté pour la Pre session et un box Plot orange pour la Post session.

3.3 Résultats cinématiques des captures vidéo des penaltys des joueurs

Les angles du regard (°) des premiers 10 penaltys des joueurs sont représentés dans la figure 16. La moyenne d'angle du regard des premiers 10 penaltys dans la Pre session était de 71,75 ° et dans la Post session était de 83,1 °. La différence de la moyenne d'angle du regard entre la session Pre et Post était significative ($t(59) = -16.7, p < .001$). Les différences cinématiques de l'angle du regard de certaines penaltys des joueurs sont représentés dans la Figure 17 et dans les annexes 3 et 4. Enfin la figure 18 montre une différence d'angle du regard entre l'un des penalty manqués et réussis des joueurs 3 et 4. Les résultats des autres joueurs sont présentés dans les annexes 5 et 6.

Figure 16

Angle du regard des joueurs lors des 10 premiers penaltys en Pre et Post session



Note. La figure montre les angle du regard des joueurs lors des 10 premiers penaltys en Pre (box plot vert) et Post session (box plot orange).

Figure 17

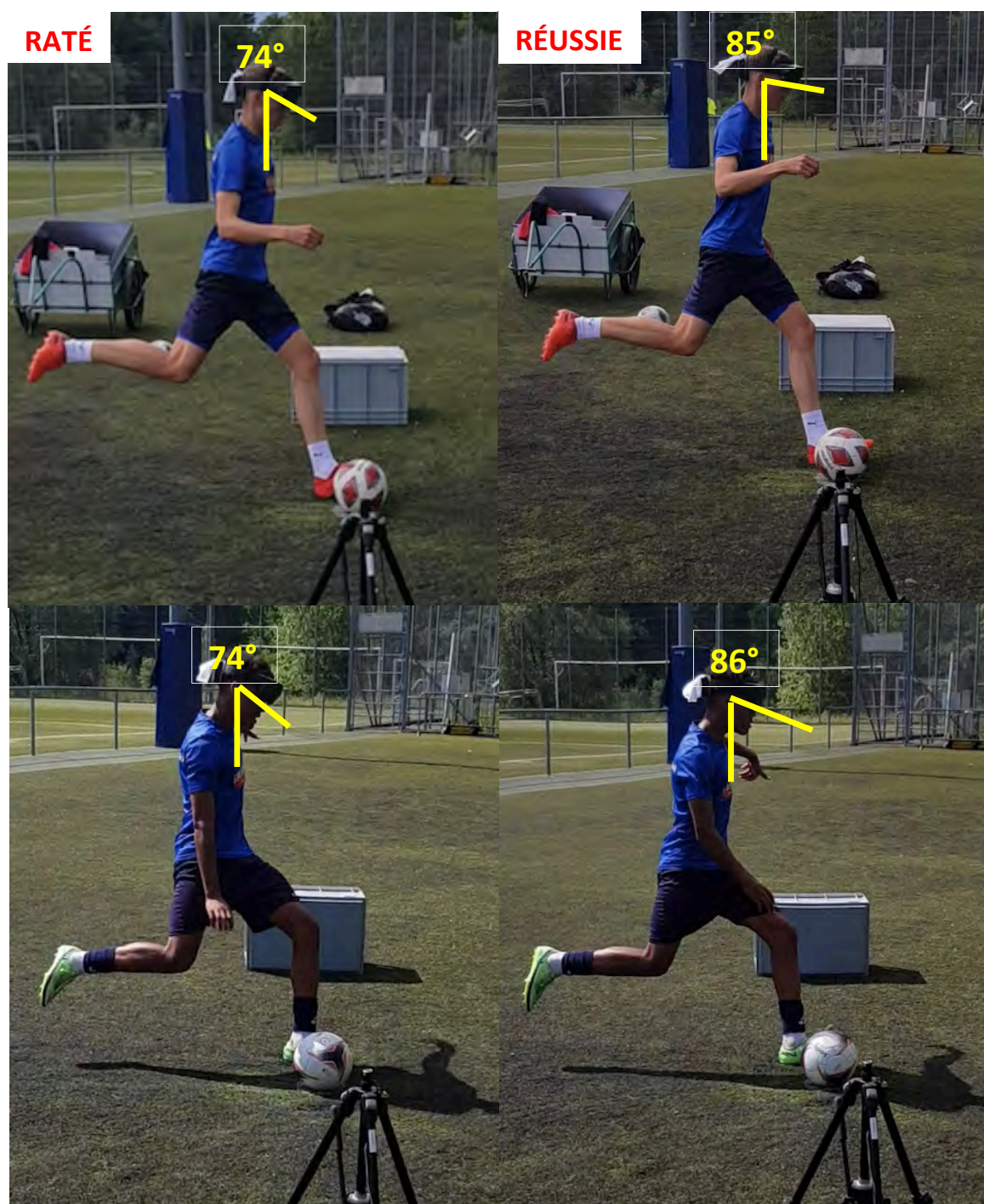
Exécution du penalty en Pre et Post session des joueur 1 et 2



Note. La figure montre sur la gauche l'exécution des penalty en Pre session par deux joueurs et sur la droite en Post session. La flèche jaune correspond à la direction et à l'angle du regard. Ce dernier change entre les exécutions en Pre et Post session. Dans la Post session le regard est plus élevé que dans la Pre session.

Figure 18

Exécution d'un penalty raté et réussi des joueurs 3 et 4



Note. La figure montre l'exécution des deux penalty par deux joueur dans la même session. Les penalty sur la côte droite sont réussies et ceux sur la gauche sont ratés. La flèche montre la direction et l'angle du regard. Ce dernier dans le penaltys réussie est plus élevée qui par rapport aux penaltys ratés.

4 Discussion

A travers ce travail, nous avons voulu étudier et approfondir la stratégie dépendante du gardien pendant l'exécution du coup de pied de réparation. Plus précisément nous avons voulu analyser différents aspects cruciaux pour l'utilisation de cette stratégie tels que le temps minimum pour rediriger la direction du tir, la capacité des joueurs à améliorer le seuil de redirection et enfin comprendre s'il existe des limitations physiologiques et biomécaniques lorsque le tir est redirigé avec une ouverture du pied, c'est-à-dire dans le cas d'un tir non croisé ou avec une fermeture du pied dans le cas d'un tir croisé. Pour une analyse et une interprétation précises, nos résultats ont ensuite été comparés avec d'autres recherches scientifiques ayant étudié le même sujet (Bowtell et al., 2009 ; Morya et al., 2003 ; Van Der Kamp, 2006).

4.1 Analyse et interprétation des résultats en fonction des objectifs

4.1.1 Analyse des résultats des seuils minimaux de redirection

Cette enquête scientifique a permis de découvrir une moyenne globale du seuil minimal de réorientation du tir avec un taux de réussite de 50 % de 301,11 ms. En analysant séparément le type de tirs, on a trouvé des valeurs seuils minimales pour la réorientation croisée de 313,46 ms et de 288,76 ms pour les tirs non croisés.

En comparant nos résultats concernant la moyenne des seuils de temps minimum de réorientation avec ceux obtenus dans d'autres publications scientifiques (Morya et al., 2003 ; Bowtell et al., 2009 ; Van Der Kamp, 2006), nous pouvons constater que dans notre expérience, les valeurs se situaient approximativement dans la même fourchette de temps, c'est-à-dire entre 300 et 400ms. Plus précisément, les valeurs moyennes du seuil minimum pour la réorientation du tir étaient légèrement supérieures à 300 ms, alors qu'elles étaient légèrement inférieures pour les tirs non croisés (288,76 ms).

Comparé aux résultats de (Morya et al., 2003) où les seuils découverts étaient supérieurs à 400 ms lorsque la performance était parfaite et autour de 150 ms lorsque la performance était aléatoire, nos résultats sont surprenants dans la mesure où notre expérience a nécessité une modification de l'action en cours qu'est plus complexe au niveau moteur. Donc, par rapport à l'ajustement de la direction du tir en inclinant un levier vertical vers la gauche ou vers la droite, en raison de la contrainte liée à l'exécution de la tâche on pouvait s'attendre un seuil de réorientation plus élevé. Dans notre travail, il est également important de mettre en évidence les valeurs précises qui ressortent de l'échantillon des seuils de réorientation minimum observé

dans la Post session. Comme le montre la figure 13, lors de la post-session, nous avons constaté que 25 % de l'échantillon dans les tirs croisés et 75 % de l'échantillon dans les tirs non croisés ont atteint les seuils de réorientation avec un taux de réussite de 50 % dans la fourchette de temps entre 200 et 300 ms.

Ces données sont surprenantes car elles montrent qu'une partie importante des joueurs est capable de rediriger le tir dans les 200-300 ms précédant le mouvement du gardien. Si l'on considère que les gardiens expérimentés anticipent le mouvement au moins 560-600 ms à l'avance (Dicks et al., 2010 ; Noël et al., 2021), ces données suggèrent que les joueurs d'élite lors des tirs au but peuvent atteindre des seuils de redirection minimum qui leur permettraient de garantir le succès. Ainsi, si les joueurs s'entraînaient à la stratégie dépendant du gardien, la probabilité de réussite aux tirs au but serait plus élevée.

Nos résultats sont encore plus étonnants lorsqu'ils sont comparés aux valeurs seuils avec un taux de réussite de 50 % découvertes par (Van Der Kamp, 2006). Dans cette dernière étude, le seuil minimum moyen de réorientation avec un taux de réussite de 50 % était de 400 ms, alors que dans notre travail il était de 301,11 ms. Une différence de 105,23 ms est exceptionnelle si l'on considère que notre expérience proposait des conditions réelles, plus proche d'un vrai penalty puisque pendant l'exécution du tir au but, l'utilisation de la réalité augmentée nous a permis de remplacer l'utilisation des ampoules par le mouvement réel du gardien et ce dernier, grâce à un algorithme, qui a été produit de manière aléatoire en fonction du calcul précis de l'élan du joueur.

Il est également vrai que dans certaines études scientifiques, comme dans l'étude de (Van Der Kamp, 2006) la stratégie dépendant du gardien a été évalué inefficace. Mais l'évaluation est souvent faite en raison d'une augmentation des erreurs dans un tâche de précision. En fait, les participants dans l'étude que nous venons de mentionner devaient rediriger le tir vers une cible précise (0,6 x 0,6 m), ce qui est probablement donc la cause d'une élévation plus importante du seuil. Pour ce dernier résultat, la science a soutenue l'importance du regard des joueurs, ce qui signifie que la fixation du regard sur la cible avant le tir au but est obligatoire et que si elle ne se produit pas, la probabilité d'un tir imprécis est acquise (Vickers, 1996).

Cependant, nous pensons que la précision d'un tir au but dans la stratégie dépendant du gardien est relative, car lorsque le ballon est correctement redirigé vers le côté opposé au plongeur du gardien, il lui sera vraiment impossible de parer le tir. A mon avis, la précision n'est pas une contrainte de la stratégie.

Grâce à l'utilisation de la réalité augmentée dans les tirs au but, notre travail, par rapport à des recherches scientifiques antérieures (Bowtell et al., 2009 ; Morya et al., 2003 ; Van Der Kamp,

2006), a permis de mieux relier les limites liées au temps de réaction du joueur aux limites liées aux aspects de visualisation, de concentration, donc aux contraintes de perception-cognition-action. Cette dernière boucle sensorimoteur présente des composantes interconnectées qui varient grandement en fonction de la situation de la tâche spécifique et qui peuvent être influencées par des contraintes motrices, situationnelles et temporelles (William, 2009). Il a été démontré qu'il est très difficile d'ignorer les actions du gardien de but et que la simple présence de ce dernier peut influencer l'attention visuelle et donc le contrôle moteur (Masters et al., 2007 ; Masters & van der Kamp, 2008 ; Wood & Wilson, 2010b). Le regard peut donc être un élément déterminant dans la réalisation du penalty. En effet l'attention visuelle avant et pendant l'élan peut être un facteur qui conditionne le contrôle moteur (Land & Furneaux, 1997). En outre, lorsque les joueurs doivent prendre des décisions momentanées en fonction des actions du gardien, cela augmente la pression perçue chez eux et, par conséquent, leur niveau de stress, ce qui conduit à leur échec au penalty (Navarro et al., 2012). On pourrait donc s'attendre à un seuil nettement plus élevé, mais malgré cela, le résultat du seuil était étonnamment plus bas.

En plus de cela, un autre facteur important doit être pris en compte, à savoir que le gardien avatar n'a pas fait de mouvements d'anticipation, mais a plongé brusquement. Ce fait est intéressant car dans la plupart des cas, les informations prédictives dérivées des mouvements d'anticipation du gardien de but sont cruciales pour le joueur. Des recherches scientifiques ont montré que la disposition des articulations gauche et droite du genou, ainsi que la préparation biomécanique à un saut latéral impliquant l'extension de la jambe controlatérale d'abord et l'extension de la jambe ipsilatérale immédiatement après, sont déterminantes pour l'anticipation (Kibele & Neuhof, 2021). Par conséquent, le fait que les joueurs d'élite de notre étude n'aient pas eu accès à ces informations rend leur capacité à rediriger le tir encore plus impressionnante. Il faut cependant tenir compte du fait que la collecte d'informations prédictives puis la sélection de stimuli clés sont étroitement corrélées aux stratégies visuelles (Piras et al., 2015), et à la capacité de savoir utiliser au mieux la vision fovéale et périphérique (Piras et al., 2021).

Dans les tâches avancées comme les tirs au but, ce qui différencie les groupes aux capacités supérieures des autres est précisément qu'ils ont des processus d'attention sélective plus raffinés et des structures de connaissances spécifiques à la tâche (William, 2009). Nous suggérons donc que le penalty à stratégie dépendante soit entraîné dans sa globalité en stimulant le vrai circuit de perception-cognition-action. Tout sur ce dernier circuit sensomoteur est la clé de redirection, donc il faut s'entraîner à la réorientation du tir dans les mêmes conditions visuelles que celles perçues lors de la réalité et s'entraîner également aux stratégies visuelles qui permettent le plus facilement la réalisation.

4.1.2 Analyse des résultats d'évolution des seuils de redirection après un période d'entraînement

Évolution du seuil de direction des tirs avant et après la séance. Comme le montre la figure 13, le seuil de rejet moyen avec un taux de réussite de 50 % était de 406,34 ms en pré-session et de 301,11 ms en post-session. Entre la première et la dernière session, on a constaté un abaissement du seuil moyen de réorientation de 105,33 ms. Cette amélioration du seuil était très significative. Il est donc démontré que l'entraînement des joueurs à tirer des penaltys avec la stratégie dépendant du gardien trois fois par semaine pendant une période de 4 semaines peut conduire à une amélioration importante du seuil de réorientation.

Bien que certaines études aient montré que le tir croisé est plus efficace pour les joueurs que le tir non croisé (Chiappori et al., 2002), la figure 13 montre qu'il n'y avait pas d'effet principal dans la réorientation des deux types de tir et que les moyennes de réorientation du tir croisé (365,56 ms) et du tir non croisé (341,90 ms) étaient similaires après toute la période d'entraînement. Même pour le tir croisé (cf. Figure 14) et le tir non croisé (cf. Figure 15), une diminution significative du seuil de réorientation a été constatée pour les deux après la période d'entraînement, c'est-à-dire entre les pré et post-sessions.

Il est scientifiquement prouvé que le processus de formation de les gestes moteurs permettent l'affinement de la motricité. Cela signifie que l'entraînement contribue à rendre le mouvement automatique et moins exigeant en termes de contrôle cognitif (Cappuccio, 2013). Par conséquent, ces résultats nous suggèrent que l'entraînement au tir au but est également crucial pour minimiser l'attention et maximiser le contrôle moteur, abaissant ainsi les seuils de réorientation du tir. Les athlètes devraient donc être entraînés à tirer des penaltys avec une stratégie dépendant du gardien sur une période relativement longue d'au moins un mois, en leur apprenant à tirer des deux côtés du but sans avoir à distinguer un côté spécifique, ce qui augmenterait également leurs chances de réorientation et donc les chances de réussite.

Analyse cinématique de la stratégie dépendante du gardien en pré et post session.

L'importance du regard dans les circuits sensorimoteurs de la stratégie de penalty du gardien est bien connue, car notre système moteur, lorsqu'il a l'intention de modifier l'action en cours, traite continuellement toutes les informations afférentes provenant de différents canaux sensoriels et le rôle de la vision dépendante du but est fondamental (Desmurget & Grafton, 2000). Une analyse vidéo de tirs au but a été réalisée pour chaque joueurs pour la Pre et Post session pour voir si un changement moteur aurait lieu avec l'entraînement. Les résultats sont

intéressantes et surprenantes car après la période d'entraînement, les joueurs ont modifié l'angle de leur regard de manière significative (cf. Figure 16). Plus précisément, les joueurs dans la session Pre, après avoir placé le pied d'appui de la jambe qui n'entre pas en contact avec la balle avaient le regard plus vers le bas que dans les sessions Post où le regard était plus vers le haut (cf. Figure 17). Cette modification de l'angle de la tête a été observée chez tous les joueurs (Annexe 3 ; Annexe 4).

Si l'on considère qu'entre la pré-session et la post-session, il y a eu un abaissement significatif du seuil de réorientation du tir, le changement significatif du regard a sûrement contribué à modifier le tir plus rapidement vers la côte opposé au plongeon du gardien. Comme montre dans la figure 18 et dans les annexe 5 et 6, un autre aspect cinématique intéressant observé dans quelques penaltys chez tous les joueurs lors dans au moins un séance d'entraînement, est que lorsque les joueurs ont raté le penalty, ils avaient une position du regard vers le bas, alors que lorsqu'ils ont réussi, ils avaient un regard plus vers le haut. L'angle du regard plus grand, donc plus dirigé vers le gardien a donc probablement aussi un effet sur la réussite du penalty (cf. Figure 18).

Ces résultats confirment l'importance de la vision dans les tirs au but mentionné précédemment. Même un petit changement dans l'angle du regard peut améliorer le seuil de réorientation et ainsi permettre la réussite du penalty. Regarder davantage le gardien est une stratégie qui permet aux joueurs d'acquérir des informations provenant de la vision périphérique, considéré plus efficace pour détecter les mouvements que la vision fovéale. Plus précisément, les joueurs se concentreront sur le centre du but, en utilisant spécifiquement le gardien de but comme pivot visuel (Wood & Wilson, 2010). Cette observation est en accord avec des études dans lesquelles il a été montré que les footballeurs en stratégie dépendante pendant la course et l'exécution passaient plus de temps à regarder le gardien que les tireurs de penalty en stratégie indépendante (Noël & van der Kamp, 2012).

4.1.3 Analyse des résultats des seuils de redirection pour les tirs croisés et non-croisés

Aucun effet principal n'a été trouvé dans la réorientation croisée et non croisée du tir et il n'y a pas eu d'interaction entre les deux facteurs. En moyenne, les seuils trouvés sur l'ensemble de la période entre les deux types de tirs étaient similaires, soit 365,56 ms pour la réorientation croisée et 341,90 ms pour la réorientation non croisée. Si l'on analyse les deux types de tir ensemble dans les sessions individuelles pré et post, on se rend compte que le tir non croisé avait toujours, bien que légèrement, des seuils de redirection plus bas (cf. Figure 13). Ce résultat est contraire à certaines études scientifiques, qui affirment que les footballeurs sont plus

efficaces pour frapper le ballon en travers du terrain, c'est-à-dire que pour les footballeurs droitiers, le tir sera plus efficace vers la gauche que vers la droite et vice versa pour les footballeurs gauchers (Chiappori et al., 2002 ; Palacios Huerta, 2003).

Nous soutenons cependant que le fait qu'aucune différence n'ait été trouvée entre le coup de pied croisé et non croisé pourrait être dû aux exigences de la stratégie dépendante du gardien. C'est-à-dire qu'en utilisant une telle stratégie, une fois que l'on est capable de diriger le tir vers le côté opposé au plongeon du gardien, le but est assuré et il n'y a donc aucune contrainte liée à la précision. En fait, jusqu'à présent, la différence entre le tir croisé et le tir non croisé a été principalement évaluée et par conséquent trouvée dans la précision du tir (Chiappori et al., 2002). Probablement si une tâche de précision avait été ajoutée, nous aurions trouvé des différences, mais nous ne pensons pas que la précision dans la stratégie dépendant du gardien de but soit dispensable.

Par conséquent, même s'il peut y avoir une divergence biomécanique dans le fait de tirer avec un pied ouvert par rapport à un pied fermé, cette contrainte n'annule pas la capacité du joueur individuel à traiter l'information prédictive, à réagir au stimulus et à rediriger le tir dans la direction opposée au mouvement du gardien. Nous soutenons également que de nombreux facteurs entrent en jeu dans la réorientation du tir, tels que des facteurs techniques, individuels et de perception-cognition qui ont aussi une grande influence (Wilson & Wood, 2011).

De plus, en prenant en compte le type de tir individuel, il a été constaté que le tir croisé (cf. Figure 14) et non croisé (cf. Figure 15) améliorait le seuil de redirection en l'abaissant significativement entre la pré et la post session. Une fois de plus, nous pouvons constater que dans notre système moteur, le traitement du signal dans le cycle perception-cognition-action a subi les mêmes changements pour le coup de pied croisé et non croisé, produisant des effets similaires. Nous soutenons donc les conclusions de l'étude de (Bowtell et al., 2009) selon lesquelles il n'y a pas de différence ni de contrainte dans les tirs au coup de pied fermé par rapport au coup de pied ouvert dans la stratégie dépendant du gardien.

4.2 Discussion des résultats sur la base des hypothèses

Dans ce travail, trois hypothèses principales ont été avancées, auxquelles nous avons souhaité répondre plus précisément. Tout d'abord, la valeur minimale du seuil de redirection devait se situer entre 300 et 400 ms comme dans la plupart des publications scientifiques (Bowtell et al., 2009 ; Morya et al., 2003 ; Van Der Kamp, 2006). Notre enquête scientifique a révélé un seuil de rejet minimum moyen de 301,11 ms, ce qui est conforme à ce qui est attendu.

D'une part, on pensait que le seuil augmenterait parce que les penaltys étaient plus proches de la réalité d'un coup de pied de réparation, avec des aspects réels liés aux capacités de coordination, à la biomécanique, à la motricité au sol, à la perception psychologique et cognitive. En fait les seuils en Pre session étaient légèrement supérieurs à 400 ms. D'autre part, les capacités neurophysiologiques supérieures des footballeurs d'élite par rapport aux footballeurs amateurs ont été prises en compte, ce qui pourrait réduire considérablement le seuil minimal de réorientation. Ce dernier point explique en fait l'abaissement significatif du seuil moyen (moyenne=301,11 ms) et la découverte surprenante du seuil minimum de réorientation des tirs non croisés de 288,76 ms dans la post-session.

Par la suite, notre deuxième hypothèse prédisait un abaissement significatif du seuil de réorientation des tirs après les 12 séances d'entraînement réparties sur 4 semaines, malgré le fait que les joueurs plus habiles progressent plus lentement qu'un joueur ayant moins d'expérience et d'habileté (Baker et al., 2003).

En même temps, on s'attendait à ce qu'il n'y ait pas de limitations dues à la fatigue ou à l'ennui et à ce que la marge de progression varie entre les joueurs en raison des principes d'individualité. Nos résultats confirment l'hypothèse, en effet entre le début de la période d'entraînement, donc en pré-session et la fin des 4 semaines, donc en post-session, la moyenne du seuil de redirection du tir a eu une diminution très significative de 105,23 ms, passant ainsi de 406,34 à 301,11 ms. L'abaissement du seuil par l'entraînement a également été obtenu en considérant les différents types de tir : croisé et non croisé. Les deux types de tir ont connu un abaissement significatif du seuil de réorientation. Les participants étaient des footballeurs d'élite à l'âge de 16, 17 ans, donc pas encore au sommet de leur développement moteur, ce qui a permis une progression significative. En outre, en observant la variabilité interindividuelle entre la pré-session et la post-session (cf. Figure 13), il est possible d'observer des variations significatives différentes, ce qui témoigne du fait que les joueurs progressent différemment les uns des autres. Il y a aussi une variation intra individuelle importante dans la Pre session, démontrant que les joueurs sont partis de différents niveaux, précisément parce que les questions génétiques entrent également en jeu dans l'apprentissage moteur. Comme prévu, les limitations induites par la fatigue ou l'ennui n'ont pas eu lieu.

Enfin, notre dernière hypothèse prétendait que, pour différentes raisons anatomiques, lorsque le joueur donne un coup de pied à droite ou à gauche, il existe une différence significative entre la réorientation entre les deux côtés. Cependant, cette hypothèse n'a pas été confirmée car aucun effet principal n'a été trouvé dans la réorientation du coup de pied croisé et non croisé et il n'y

a pas eu d'interaction entre les deux facteurs. On savait que les facteurs anatomiques n'étaient pas les seuls responsables de la réorientation du tir et que tous ceux liés à la technique, à la psychologie, à la perception et à la cognition étaient importantes, mais on a pensé qu'ils pouvaient avoir une plus grande influence sur le temps de réorientation du tir.

4.3 Forces et faiblesses de l'étude

La méthodologie proposée dans cette expérience présente des atouts importants qui la distinguent des autres études scientifiques et la rendent unique dans l'étude de la redirection des tirs dans les tirs au but. Il est important de dire que notre méthodologie a déjà été expérimentée dans une étude antérieure à celle-ci. Cependant, il y avait trop de contraintes d'équipement liées à l'environnement extérieur et les données recueillies étaient inexploitable (Richard, 2021).

Tout d'abord, l'ensemble du travail de perfectionnement des équipements : technologies, logiciels, algorithmes, ainsi que l'application de caméra vidéo ont été un point fort de notre expérience et ont rendu les données collectées plus précises et plus fiables. En fait, tout a été mis au point pour que les mesures puissent être maintenues dans des conditions extérieures sans interférence.

Notre recherche est donc la première à avoir expérimenté les tirs au but afin d'établir un seuil minimum de redirection en conditions réelles, c'est-à-dire avec les bonnes distances de tir, de terrain de jeu, de but et à avoir obtenu des résultats exploitables, ce qui est certainement un aspect important pour le progrès scientifique.

Plus précisément, l'expérience en conditions réelles a été rendue possible par l'utilisation de la réalité augmentée (HoloLens), dans laquelle la vision de l'avatar du gardien a été permise grâce à une programmation spécifique, et de l'équipement Lidar nécessaire pour tenir le ballon. Ces équipements étaient reliés entre eux grâce à un algorithme développé et mis en place dans un logiciel spécifique, qui permettait ensuite la collecte minutieuse de données.

En particulier, dans le nouvel algorithme, la détection de la course du joueur, qui était fondamentale pour les variations du plongeon du gardien, a été améliorée. Le nouvel algorithme permettait au joueur de faire son propre élan et si celui-ci était modifié, le programme se recalibrerait et le système se basait toujours sur l'élan du joueur lors du tir précédent. En outre, la précision de l'élan est évaluée au centimètre près, ce qui signifie que le système calcule le temps exact pour chaque centimètre du mouvement du joueur. De cette façon, les mesures étaient précises et les joueurs devaient recommencer moins de tirs pour des courses trop différentes,

car plus la probabilité de faire le même temps au centimètre près pendant la course d'élan était grande.

Ensuite l'ajout d'une caméra vidéo pour l'analyse cinématique des pénalités des joueurs est certainement un aspect positif du travail car il a permis d'associer une première analyse cinématique à la redirection des tirs, ainsi qu'aux taux de réussite des joueurs. La caméra vidéo nous a permis d'appréhender déjà les principaux aspects cinématiques changeants qui se sont avérées significatives.

Par la suite, un autre aspect important de notre enquête scientifique en ce qui concerne la méthodologie de recherche est le fait que nous avons collaboré avec un club professionnel tel que le FC Lucerne. Cette collaboration nous a tout d'abord permis de mettre en place un plan expérimental dans lequel les séances étaient réalisées régulièrement avec une alternance contrôlée entre les séances et la récupération. Deuxièmement, cela nous a permis de travailler avec des athlètes d'élite possédant d'importantes compétences footballistiques, qui ont effectué les mesures avec engagement et professionnalisme.

Enfin, un dernier point fort de notre travail est le fait que nous avons reproduit le mouvement du gardien au moyen de la réalité augmentée ; cet aspect distingue notre recherche d'autres études scientifiques (Bowtell et al., 2009 ; Morya et al., 2003 ; Van Der Kamp, 2006) car il nous a permis d'impliquer les processus liés au lien perception-cognition-action qui sont présents dans un tir de penalty réel et, comme nous l'avons également vu dans notre expérience, sont cruciaux pour la redirection du tir.

Cependant, notre recherche scientifique présente certaines limites et faiblesses. Bien que l'équipement ait été amélioré afin de pouvoir effectuer des mesures dans l'environnement extérieur, il s'agit toujours de technologie. Cela signifie que les mesures dans des conditions défavorables, c'est-à-dire sous la pluie, n'ont pas pu être effectuées parce que le terrain de football n'était pas à l'intérieur. En effet, une session a été annulée à cause de la pluie et n'a pas pu être rattrapée ; il y a donc eu 11 sessions sur les 12 prévues.

Par la suite, l'équipement HoLolens avait une autonomie limitée à 1 heure et 30 minutes, alors qu'il fallait au moins deux heures pour le recharger. Cela a limité le nombre de joueurs qui pouvaient être testés pendant l'entraînement.

Ensuite, lorsqu'on travaille avec des athlètes d'élite faisant partie d'un club professionnel, une organisation méticuleuse des mesures est nécessaire, car les joueurs ne peuvent pas être soumis à des charges neuromusculaires trop importantes et ne peuvent pas être absents de l'entraînement pendant trop longtemps. Pour des raisons liées à l'automatibilité du matériel et

aux contraintes des athlètes d'élite, il a été difficile de tester un grand nombre de joueurs ($n=6$) et de collecter un grand nombre de tirs au but lors des séances d'entraînement. Afin d'augmenter le nombre de sujets et le nombre de penaltys il était nécessaire de prolonger la période des mesures, mais le temps manquait.

De plus, pour l'analyse cinématique, un GoPro (caméra vidéo) était prévu, mais en raison de difficultés techniques, il a été remplacé par la caméra vidéo du téléphone. Bien que l'ajout de la caméra vidéo soit une innovation intéressante, il est important de mentionner les difficultés rencontrées dans son utilisation. En effet, en raison de la difficulté de manipuler des dispositifs nécessitant la mesure des tirs au but, l'utilisation de la caméra pour découvrir d'autres aspects cinématiques utilisés pour analyser en détail la stratégie dépendant du gardien était difficile et ne permettait pas une analyse très détaillée et précise.

Enfin, malgré le fait que notre recherche ait créé des conditions de tir au but déjà très réalistes, nous pourrions encore améliorer le gardien avatar, qui ne faisait aucun mouvement d'anticipation pouvant faire deviner au joueur la direction du tir. Cet aspect est en réalité très présent chez les gardiens expérimentés et les joueurs se fient beaucoup à ces informations prédictives. Un autre aspect fondamental qui n'a pas été mis en évidence dans l'expérience est la sphère émotionnelle des joueurs. Il est vrai que pour stimuler cette sphère, on a dit aux joueurs qu'un classement était créé à la fin de la période d'entraînement sur la base des résultats de leurs seuils de réorientation, cependant, pendant le vrai penalty, le joueur subit beaucoup de stress et le contexte créé n'était donc pas suffisant. En fait, ce dernier est l'un des facteurs les plus influents dans les tirs au but (Jordet et al., 2007). L'importance d'un penalty, ainsi que le contexte extérieur (gardien de but, spectateurs adversaires, primes économiques) et la perception de ses propres capacités, sont autant de facteurs qui alimentent le comportement psychologique et sont difficiles à reproduire dans une expérience.

4.4 Améliorations futures

L'expérimentation réalisée dans ce travail scientifique a déjà permis de faire un grand pas en avant dans l'étude de la stratégie dépendante du gardien concernant la réorientation du tir.

À ce stade, la première étape devrait consister à se rapprocher d'une réalité unique. Cela signifie que les détails inhérents aux mouvements d'anticipation du gardien dans le casque HoloLens devraient être améliorés afin que les footballeurs puissent entraîner les aspects de la capacité visuelle, de l'attention et de la concentration, apprenant ainsi à utiliser leur vision périphérique et fovéale. De plus, de cette manière, les joueurs peuvent entraîner non seulement leur capacité

de réaction mais aussi leur système moteur à traiter des informations prédictives pour déclencher une réponse motrice.

En plus des aspects perception-cognition, il serait très important d'impliquer les mécanismes liés à la sphère émotionnelle. Ce n'est pas facile du point de vue de la réalisation, mais l'émotion devrait être stimulée davantage car le poids de cette sphère pour le contrôle moteur du tireur de penalty est très important. Aussi parce que dans la réalité d'un tir au but, si l'on n'apprend pas à vivre avec ses émotions, tout ce que l'on s'entraîne peut être vain lorsque le stress et l'anxiété prennent le dessus.

Ayant observé dans ce travail que le manque de temps pour diriger le tir reste le principal facteur limitant de la stratégie dépendant du gardien, il convient de mieux comprendre le comportement exact de notre contrôle moteur. La science montre comment notre système moteur, lorsqu'il adapte ses mouvements à un changement de position du gardien, peut à la fois replanifier l'action, le contrôler puis ajuster le mouvement en cours. Cependant, la planification et le contrôle utilisent différemment les centres visuels et ont donc un traitement différent de l'information au niveau du cerveau, ce qui diversifie le temps effectif d'une réponse motrice. Il faut donc coupler l'action motrice du coup de pied de réparation avec une analyse cinématique très détaillée afin de mieux étudier le délai et d'entraîner correctement notre système moteur en conséquence.

Une analyse vidéo a été appliquée dans cette étude, mais malheureusement l'analyse n'était pas si détaillée et précise, donc cet aspect cinématique devrait être perfectionnée dans la méthodologie des études futures et devra être appliqué de manière que l'analyse pourrait fournir des détails extrêmement précis. L'analyse vidéo sera donc un outil utile à intégrer à nouveau dans des travaux futurs pour mieux étudier les stratégies visuelles adoptées par les joueurs lors de l'exécution de tirs au but et pour voir si la significativité trouvée dans notre étude peut encore être confirmée. De cette façon, non seulement on entraîne le système moteur à diriger le tir, mais il sera possible de comprendre le comportement de notre regard pendant l'exécution du tir au but, ce qui permettra nous de développer un entraînement cognitif spécifique. Plusieurs études scientifiques ont maintenant découvert que l'utilisation effective de la fovéa et/ou de la vision périphérique peut être détectée par de minuscules mouvements oculaires appelés microsaccades et saccades (Piras et al., 2021 ; Piras et al., 2015). Comprendre comment et quand la vision centrale et périphérique est utilisée dans la performance permettrait un entraînement spécifique des mouvements oculaires saccadiques et monosaccadiques, ainsi que le maintien de la focus visuelle quand on varie l'angle du champ visuel, affinant ainsi l'attention visuelle dans la tâche.

5 Conclusion

L'importance de l'entraînement des tirs au but devient quelque chose de fondamental pour les équipes du monde entier. L'évolution des compétences des équipes les amène à considérer la séance de tirs au but comme une action pouvant déterminer le sort d'un match ou d'un tournoi et donc comme un détail à affiner lors de l'entraînement. En considérant et en analysant tous les aspects (technique, cognitif-perceptif, émotionnel, tactique et chance) qui sont impliqués dans un coup de pied de réparation, la stratégie dépendant du gardien peut être une découverte importante pour augmenter le succès dans les penaltys. Notre recherche a ajouté aux résultats précédents en se concentrant sur cette stratégie, en particulier sur le temps minimum pendant lequel un joueur peut encore rediriger le tir, la possibilité d'abaisser ou non le seuil de redirection, et la différence physiologique dans la redirection du tir vers la droite ou la gauche en fonction du pied de frappe. Cependant, notre étude est la première recherche scientifique à avoir étudié les tirs au but dans des conditions réalistes et avec des sujets issus du football d'élite, ce qui a certainement augmenté la validité des résultats.

Il n'y avait pas de différence dans la redirection du tir en mode croisé et non croisé, mais la découverte d'un seuil minimum de 301,15 ms à un taux de réussite de 50 %, ainsi que la capacité d'abaisser significativement les seuils des joueurs d'élite de 105,23 ms après une période d'entraînement de 4 semaines est une découverte surprenante pour l'avenir du football. En outre l'analyse cinématique qui a accompagné l'expérimentation a été particulièrement intéressante et nous a permis de comprendre un facteur essentiel pour la réorientation du tir, ainsi que pour l'entraînement spécifique de la stratégie dépendant du gardien.

Les joueurs hautement qualifiés peuvent donc atteindre des seuils étonnants après seulement un mois d'entraînement, ce qui signifie qu'avec une période d'entraînement plus longue, on pourrait probablement penser à franchir les limites physiologiques du traitement du signal nerveux en fonction des stimuli visuels, que nous pensons jusqu'à présent impossible à franchir. Cette découverte va donc certainement contribuer à la science pour l'étude des tirs au but en termes de validité et de fiabilité des résultats, mais elle sera certainement une découverte importante pour toutes les équipes de football et les joueurs qui décident d'entraîner cette stratégie pour avoir plus de succès dans les tirs au but.

Les entraîneurs doivent cependant préparer et entraîner les joueurs à rediriger le tir sans oublier les sphères cognitive fondamentales pour la redirection, ainsi que la sphère émotionnelle et technique. Seul un entraînement spécifique de tous les facteurs de la stratégie dépendant du gardien peut conduire à un bénéfice absolu et donc à un succès assuré lors des tirs au but.

Bibliographie

- Adams, J. (1971). A Closed-Loop Theory of Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111-150. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898>
- Baker, J., Horton, S., Robertson-Wilson, J., & Wall, M. (2003). Nurturing Sport Expertise: Factors Influencing the Development of Elite Athlete. *Journal of Sports Science*, 2(1), 1-9. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24616603/>
- Bar-Eli, M., & Azar, O. (2009). Penalty kicks in soccer: An empirical analysis of shooting strategies and goalkeepers' preferences. *Soccer & Society*, 10(2), 183-191. <https://doi.org/10.1080/14660970802601654>
- Bar-Eli, M., Azar, O., Ritov, I., Levin, Y., & Schein, G. (2007). Action Bias among Elite Soccer Goalkeepers: The Case of Penalty Kicks. *Journal of Economic Psychology*, 28(5), 606-621. <https://doi.org/10.1016/j.joep.2006.12.001>
- Bowtell, M., King, M., & Pain, M. (2009). Analysis of the Keeper-Dependent Strategy in the Soccer Penalty Kick. *International Journal of Sports Science and Engineering*, 3(2), 93-102. https://www.researchgate.net/publication/48340994_Analysis_of_the_keeper-dependent_strategy_in_the_soccer_penalty_kick
- Bresciani, J.-P., Audiffren, J., Bloechle, J.-L. & Rigamonti, M. (2021). Control and Perception Laboratory (CopeLab). The Control and Perception research group is part of the Department of Neuroscience and Movement Science of the University of Fribourg. *Université de Fribourg, Suisse*.
- Bresciani, J.-P., Audiffren, J., Bloechle, J.-L. & Rigamonti, M. (2022). Control and Perception Laboratory (CopeLab). The Control and Perception research group is part of the Department of Neuroscience and Movement Science of the University of Fribourg. *Université de Fribourg, Suisse*.
- Bresciani, J., Bühlhoff, H., Peer, A., Reichenbach, A., & Thielscher, A. (2009). Seeing the hand while reaching speeds up on-line responses to a sudden change in target position. *The Journal of Physiology*, 587(19), 4605–4616. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.176362>
- Brinkschulte, M., Furley, P., & Memmert, D. (2020). English Football Players are not as Bad at Kicking Penalties as Commonly Assumed. *Scientific Reports*, 10, 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63889-6>
- Cappuccio, M. (2013). Flow, Choke, Skill. The Role of the Nonconscious in Sport Performance. *The Nonconscious in Sport*, 243-283.

- https://www.academia.edu/30695262/Flow_Choke_Skill_The_Role_of_the_Non_Conscious_in_Sport_Performance
- Chiappori, P., Levitt, S., & Groseclose, T. (2002). Testing Mixed-Strategy Equilibria When Players Are Heterogeneous: The Case of Penalty Kicks in Soccer. *American Economic Review*, 92(4), 1138-1151. <https://doi.org/10.1257/00028280260344678>
- Cluff, T., & Scott, S. (2013). Rapid feedback responses correlate with reach adaptation and properties of novel upper limb loads. *The Journal Of Neuroscience*, 33(40), 15903–15914. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0263-13.2013>
- Correia, K. (2020). Seuil minimal requis lors de la réorientation d'un tir au but chez des footballeurs évoluant en 2^{ème} ligue inter et 1^{ère} ligue Suisse. *Travail de matser, Université, Fribourg, Suisse*. https://doc.rero.ch/record/330403/files/TM_Correia_Kevin.pdf
- Dalton, K., Guillon, M., & Naroo, S. (2015). An Analysis of Penalty Kicks in Elite Football Post 1997. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 10(5), 815-827. <https://doi.org/10.1260/1747-9541.10.5.815>
- Davids, K., Lees, A., & Burwitz, L. (2021). Understanding and measuring coordination and control in kicking skills in soccer: Implications for talent identification and skill acquisition. *Journal of Sports Sciences*, 18(9), 1-13. <https://doi.org/10.1080/02640410050120087>
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 423-431. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(00\)01537-0](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01537-0)
- Dicks, M., Davids, K., & Button, C. (2010). Examination of Gaze Behaviors under in situ and Video Simulation Task Constraints Reveals Differences in Information Pickup for Perception and Action. *Attention Perception & Psychophysics*, 72(3), 706-720. <https://link.springer.com/article/10.3758/APP.72.3.706>
- Dohmen, T. G. (2008). Do professionals choke under pressure? *Journal of Economic Behavior & Organization*, 65(3-4), 636-653. <https://docs.iza.org/dp1905.pdf>
- Eubank, M., & Collins, D. (2000). Coping with pre- and in-event fluctuations in competitive state anxiety: A longitudinal approach. *Journal of Sports Sciences*, 18(2), 121-131. <https://doi.org/10.1080/026404100365199>
- Franks, I. M., & Harvey, I. (1997). Cues for Goalkeepers-High-tech methods used to measure penalty shot response. *Soccer Journal*, 30-33. <http://www.husseinmardan.com/Bio-01-245-254.pdf>

Furley, P., Noël, B., & Memmert, D. (2017). Attention towards the goalkeeper and distraction during penalty shootouts in association football: a retrospective analysis of penalty shootouts from 1984 to 2012. *Journal of Sports Sciences*, 35(9), 1-7.
<https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1195912>

Glover, S. (2004). Separate visual representations in the planning and control of action. *The Behavioral and brain sciences*, 27(1), 24-78.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X04000020>

Hearts and Scottish Football Reports For Sat. (1890). *Sat 20 Dec 1890 East Stirlingshire 1 Hearts 3*. Tratto da London Hearts Supporters Club:
<https://londonhearts.com/scores/images/1890/1890122015.htm>

International Football Association Board. (2022, Juin 30). *ABOUT THE LAWS*. Tratto da IFAB:
<https://www.theifab.com/laws/latest/about-the-laws/>

International Football Association Board. (1891). Minutes of the annual general meeting.

International Football Association Board. (1891). *Penalty kick (association football)*. Tratto da Wikipedia:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Penalty_kick_\(association_football\)#cite_note-31](https://en.wikipedia.org/wiki/Penalty_kick_(association_football)#cite_note-31)

International Football Association Board. (1891, June 2). The Laws of the Game. Glasgow, Scotland.

International Football Association Board. (1902, June 15). *Laws of the Game*. Wikisource:
[https://en.wikisource.org/wiki/Laws_of_the_Game_\(1902\)](https://en.wikisource.org/wiki/Laws_of_the_Game_(1902))

International Football Association Board. (1905, June 17). *Laws of the Game (1905)*. Wikisource: [https://en.wikisource.org/wiki/Laws_of_the_Game_\(1905\)](https://en.wikisource.org/wiki/Laws_of_the_Game_(1905))

International Football Association Board. (1923, June 9). *Laws of the Game (1923)*. Wikisource: [https://en.wikisource.org/wiki/Laws_of_the_Game_\(1923\)](https://en.wikisource.org/wiki/Laws_of_the_Game_(1923))

International Football Association Board. (1937, June 12). *Minutes of the Annual General Meeting*. Minutes of the 1937 Annual General Meeting:
<https://ssbra.org/ifab/assets/pdf/1937min.pdf>

International Football Association Board. (2022, Mars 11). *Loi 14 Penalty*. IFAB:
<https://www.theifab.com/fr/laws/latest/the-penalty-kick/>

International Football Association Board. (2022, June 6). *LAW 10 DETERMINING THE OUTCOME OF A MATCH*. International Football Association Board:
<https://www.theifab.com/laws/latest/determining-the-outcome-of-a-match/#goal-scored>

- Jordet, G., Hartman, E., Visscher, C., & Lemmink, K. A. (2007). Kicks from the penalty mark in soccer: The roles of stress, skill, and fatigue for kick outcomes. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 121-129. <https://doi.org/10.1080/02640410802509144>
- Kerwin, D. G., & Bray, K. (2006). Measuring and modelling the goalkeeper's diving envelope in a penalty kick. In E.F Moritz & S. Haake (ed.), *The Engineering of Sport*, (1, p. 321-326). Springer New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-46050-5_57
- Kibele, A. (2022, Juin 30). *Learning a Keeper-Dependent Penalty Kick in Football with a Suddenly Decelerated Run-Up*. Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=wBZlbWFrAJU>
- Kibele, A., & Neuhof, S. (2021). *How to learn a keeper-dependent penalty kicking strategy in football with a decelerated run-up*. https://www.researchgate.net/publication/350064111_How_to_learn_a_keeper-dependent_penalty_kicking_strategy_in_football_with_a_decelerated_run-up
- Kitching, G. (2015). The Origins of Football: History, Ideology and the Making of 'The People's Game' by Gavin Kitching. *History Workshop Journal*, 79(1), 1-27. <https://doi.org/10.1093/HWJ/DBU023>
- Krumer, A. (2020). Pressure versus ability: Evidence from penalty shoot-outs between teams from different divisions. *Journal of Behavioral and Experimental Economics*. 89, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.socrec.2020.101578>
- Kuhn, W. (1988). Penalty-kick strategies for shooters and goal-keepers. *Science and football*, 489-492.
- Land, M. F., & Furneaux, S. (1997). The knowledge base of the oculomotor system. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, biological*
- Leela, J., & Comissioning, D. (2009). Modelling Football Penalty Kicks. *Latin-American Journal of Physics Education*, 3(2), 259-269. http://www.lajpe.org/may09/12_Jeffrey.pdf
- Loffing, F., & Hagemann, N. (2014). Zum Einfluss des Anlaufwinkels und der Füßigkeit des Schützen auf die Antizipation von Elfmeterschüssen. *Zeitschrift für Sportpsychologie*, 21(2), 63-73. <https://doi.org/10.1026/1612-5010/a000117>
- Masters, R., & van der Kamp, J. (2008). The human Müller-Lyer illusion in goalkeeping. *Perception*, 37(6), 951-954. <https://doi.org/10.1068/p6010>
- Masters, R., van der Kamp, J., & Jackson, R. (2007). Imperceptibly Off-Center Goalkeepers Influence Penalty-Kick Direction in Soccer. *Psychological Science*, 18(3), 222-223. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01878.x>

- McLeod, P. (1987). Visual reaction time and high-speed ball games. *Perception*, 16(1), 49-56.
<https://doi.org/10.1068/p160049>
- Missitzi, J., Gentner, R., Misitzi, A., Geladas, N., Politis, P., Klissouras, V., & Classen, J. (2013). Heritability of motor control and motor learning. *Physiological Reports*, 1(7), 1-10. <https://doi.org/10.1002/phy2.188>
- Molisani, L. (2016). Temps minimal requis lors de la réorientation d'un coup de pied de réparation et capacités d'amélioration chez des enfants de 11-12 ans. *Travail de matser, Université, Fribourg, Suisse*
- Morya, E., Bigatão, H., Lees, A., Ranvaud, R., Cabri, J., & Araújo, D. (2005). Evolving penalty kick strategies: World cup and club matches 2000–2002. In: Reilly T, Cabri J & Araújo D, (ed). *Science and Football V. The Proceedings of the World Congress on Science and Football*. London: Routledge; 2005. p. 237-42.
<https://doi.org/10.4324/9780203412992>
- Morya, E., Ranvaud, R., & Machado-Pinheiro, W. (2003). Dynamics of visual feedback in a laboratory simulation of a penalty kick. *Journal of Sports Sciences*, 21(2), 87-95.
<https://doi.org/10.1080/0264041031000070840>
- Navarro, M., Miyamoto, N., Van der Kamp, J., Morya, E., Ranvaud, R., & Savelsbergh, G. (2012). The Effects of High Pressure on the Pointof No Return in Simulated Penalty Kicks. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 34(1), 83-101.
<https://doi.org/10.1123/jsep.34.1.83>
- Navarro, M., van der Kamp, J., Ranvaud, R., & Savelsbergh, G. (2013). The mere presence of a goalkeeper affects the accuracy of penalty kicks. *Journal of Sport Science*, 31(9), 921-929. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.762602>
- Navia, J. A., van der Kamp, J., & Ruiz, L. M. (2013). On the use of situation and body information in goalkeeper actions during a soccer penalty kick. *International Journal Sport Psychology*, 44(3), 234-251.
https://oa.upm.es/28973/1/INVE_MEM_2013_167155.pdf
- Noël, B., & van der Kamp, J. (2012). Gaze behaviour during the soccer penalty kick: an investigation of the effects of strategy and anxiety. *International Journal of Sport Psychology*, 43(4), 26-345.
https://www.researchgate.net/publication/288372081_Gaze_behaviour_during_the_soccer_penalty_kick_An_investigation_of_the_effects_of_strategy_and_anxiety

- Noël, B., Furley, P., van der Kamp, J., Dicks, M., & Memmert, D. (2015). The development of a method for identifying penalty kick strategies in association football. *Journal of Sports Sciences*, 33(1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.926383>
- Noël, B., van der Kamp, J., & Klatt, S. (2021). The Interplay of Goalkeepers and Penalty Takers Affects Their Chances of Success. *Frontiers in Psychology*, 12, 1-6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.645312>
- Palacios Huerta, I. (2003). Professionals Play Minimax. *The Review of Economic Studies Limited*, 70(2), 395-415. <https://doi.org/10.1111/1467-937X.00249>
- Piras, A., & Raffi, M. (2019). Investigating the Crucial Role of Optic Flow in Postural Control: Central vs. Peripheral Visual Field. *Applied Sciences*, 9(5), 1-10. <https://doi.org/10.3390/app9050934>
- Piras, A., Raffi, M., Malagoli Lanzoni, I., Persiani, M., & Squatrito, S. (2015). Microsaccades and Prediction of a Motor Act Outcome in a Dynamic Sport Situation. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 56(8), 4520-4530. <https://doi.org/10.1167/iovs.15-16880>
- Piras, A., Timmis, M., Trofè, A., & Raffi, M. (2021). Visual Strategies Underpinning the Spatiotemporal Demands During Visuomotor Tasks in Predicting Ball Direction. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 43(6), 514-523. <https://doi.org/10.1123/jsep.2020-0345>
- Prablanc, C., & Martin, O. (1992). Automatic Control During Hand Reaching at Undetected Two-Dimensional Target Displacements. *Journal of Neurophysiology*, 67(2), 455-469. <https://doi.org/10.1152/jn.1992.67.2.455>
- Rao, R. (2019). Calcul des seuils de redirection minimale lors de séances de tirs au but chez des adultes évoluant entre la 2e et la 1ère ligue Suisse. *Travail de matser, Université, Fribourg, Suisse*. https://doc.rero.ch/record/327808/files/TM_Rao_Riccardo.pdf
- Reichenbach, A., Thielscher, A., Peer, A., H Bülthoff, H., & Bresciani, J. (2009). Seeing the hand while reaching speeds up on-line responses to a sudden change in target position. *The Journal of physiology*, 587(19), 4605-4616. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.176362>
- Richard, B. (2021). Etude du seuil minimal auquel la décision de rediriger un tir au but est encore possible lors d'un penalty ou coup de pied de réparation. *Travail de matser, Université, Fribourg, Suisse*
- Sanchez-Lopez, J., Fernandez, T., Silva-Pereyra, J., Martinez Mesa, J., & Di Russo, F. (2014). Differences in Visuo-Motor Control in Skilled vs. Novice Martial Arts Athletes during

- Sustained and Transient Attention Tasks: A Motor-Related Cortical Potential Study. *PLoS One*, 9(3), 1-9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091112>
- Sarlegna, F., & Mutha, P. (2015). The influence of visual target information on the online control of movements. *Vision Research*, 110(Pt.b), 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.07.001>
- Savelsbergh, G., Van der Kamp, J., Williams, A., & Ward, P. (2007). Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers. *Ergonomics*, 48(11-14), 1686-1697. <https://doi.org/10.1080/00140130500101346>
- Schmidt, R. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225-260. <https://doi.org/10.1037/H0076770>
- Seidler, R., Noll, D., & Thiers, G. (2004). Feedforward and feedback processes in motor control. *ScienceDirect*, 22(4), 1775-1783. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.05.003>
- Shan, G., & Westerhoff, P. (2005). Full-body kinematic characteristics of the maximal instep Soccer kick by male soccer players and parameters related to kick quality. *Sports Biomechanics*, 4(1), 59-72. <https://doi.org/10.1080/14763140508522852>
- Taube, W. (2021). SP.1014 Sciences du mouvement – contrôle moteur. *Université de Fribourg, Suisse*.
- The Football Association: Alterations of Rules. (1882). *Sheffield and Rotherham Independent*.
 Tratto da Wikimedia Commons:
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Football_Association_\(Sheffield_and_Rotherham_Independent\)_1882-02-04.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Football_Association_(Sheffield_and_Rotherham_Independent)_1882-02-04.png)
- Timmis, M., Turner, K., & van Paridon, K. (2014). Visual Search Strategies of Soccer Players Executing a Power vs. Placement Penalty Kick. *PLOS ONE*. 9(12), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115179>
- Van Der Kamp, J. (2006). A field simulation study of the effectiveness of penalty kick strategies in soccer: Late alterations of kick direction increase errors and reduce accuracy. *Journal of Sports Sciences*, 24(5), 467-477. <https://doi.org/10.1080/02640410500190841>
- Van der Kamp, J., Dicks, M., Navia, J., & Noël, B. (2018). Goalkeeping in the soccer penalty kick. *German Journal of Exercise and Sport Research volume*, 48, 169-175. <https://doi.org/10.1007/s12662-018-0506-3>
- Vickers, J. (1996). Visual control when aiming at a far target. *Journal of Experimental Psychology: Human Performance and Perception*, 22, 342-354. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.22.2.342>

- Wilson, M., Wood, G., & Vine, S. (2009). Anxiety, Attentional Control, and Performance Impairment in Penalty Kicks. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 31(6), 761-775. <https://doi.org/10.1123/jsep.31.6.761>
- William, M. (2009). Perceiving the intentions of others: how do skilled performers make anticipation judgments? *Progress in Brain Research*, 174, 73-83. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(09\)01307-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(09)01307-7)
- Williams, A., & Weigelt, C. (2002). Vision and proprioception in interceptive actions. In K. Davids, G. Savelsbergh, S. Bennett, & J. van der Kamp (ed). *Interceptive actions in sport: Information and movement* (p. 90-108). London: E & FN Spon.
- Wilson, M., & Wood, G. (2011). Quiet-eye training for soccer penalty kicks. *Cognitive processing*, 12(3), 257-266. <https://doi.org/10.1007/s10339-011-0393-0>
- Wood, G., & Wilson, M. (2010). Gaze behaviour and shooting strategies in football penalty kicks: Implications of a ‘keeper-dependent approach. *International Journal Sport Psychology*, 41(3), 293-312. https://www.researchgate.net/publication/251571698_Gaze_behaviour_and_shooting_strategies_in_football_penalty_kicks_Implications_of_a_keeper-dependent_approach
- Wood, G., & Wilson, M. R. (2010b). A moving goalkeeper dis-tracts penalty takers and impairs shooting accuracy. *Journal of Sports Sciences*, 28(9), 937-946. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.495995>
- Wood, G., Jordet, G., & Wilson, M. R. (2015). On winning the “lottery”: psychological preparation for football penalty shoot-outs. *Journal of Sports Sciences*, 33(17), 1758-1765. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1012103>

Annexes

Annexes 1

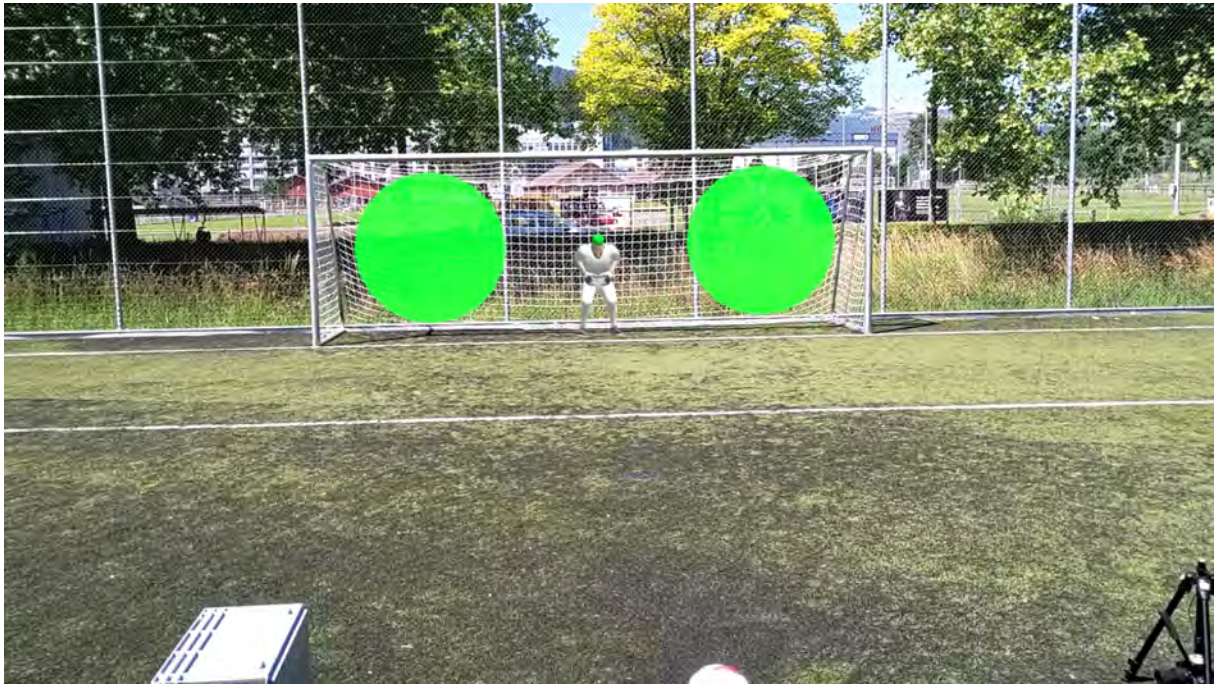
Protocole d'exécution d'un penalty en conditionne réelles



Notes. L'image montre l'exécution d'un pénalty dans des conditions réelles. Distance 11 mètres, taille du but : 7.32 mètres de long et 2.44 mètres de hauteur, ballons officiels, terrain de jeu.

Annexe 2

Perception visuelle du gardien Avatar : « State Idle »



Notes. La figure montre l'avatar gardien perçu par le joueur pendant l'exécution du penalty et transmis par l'équipement HoloLens.

Annexe 3

Exécution du penalty en Pre et Post session des joueur 3 et 4



Note. La figure montre l'angle du regard des joueurs 3 et 4 dans l'exécution d'un penalty en Pre (gauche) et Post session (droite).

Annexe 4

Exécution du penalty en Pre et Post session des joueur 5 et 6



Note. La figure montre l'angle du regard des joueurs 5 et 6 dans l'exécution d'un penalty en Pre (gauche) et Post session (droite).

Annexe 5

Exécution d'un penalty réussie et raté des joueurs 1 et 2



Note. La figure montre l'angle du regard des joueurs 1 et 2 dans l'exécution d'un penalty raté (gauche) et réussie (droite).

Annexe 6

Exécution d'un penalty réussie et raté des joueurs 5 et 6



Note. La figure montre l'angle du regard des joueurs 5 et 6 dans l'exécution d'un penalty raté (gauche) et réussie (droite).