



Titre: Analyse et modélisation de la performance en Boccia
Title:

Auteur: Vincent Beiglig
Author:

Date: 2023

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Beiglig, V. (2023). Analyse et modélisation de la performance en Boccia [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/54382/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/54382/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Quentin Cappart
Advisors:

Programme: Génie informatique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Analyse et modélisation de la performance en Boccia

VINCENT BEIGLIG

Département de génie informatique et génie logiciel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie informatique

Août 2023

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Analyse et modélisation de la performance en Boccia

présenté par **Vincent BEIGLIG**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Omar ABDUL WAHAB, président

Quentin CAPPART, membre et directeur de recherche

Sylvain GAUDET, membre externe

REMERCIEMENTS

Tout d’abord, je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de recherche Quentin Cappart pour sa patience, sa disponibilité et sa pédagogie pendant l’ensemble de ce projet.

De plus, j’aimerais remercier mes deux correspondants de l’Institut National du Sport du Québec au sein de l’équipe Boccia Canada : César Nicolai et Sylvain Gaudet pour leur soutien, leur expertise et leur positivité tout au long du projet.

Finalement, je tiens à remercier ma famille et mes proches sans qui je ne serais pas là aujourd’hui.

RÉSUMÉ

La boccia est un sport paralympique qui s'apparente à la pétanque que n'importe quelle personne peut pratiquer, qu'elle ait un handicap ou non. Malheureusement, en raison du caractère spécifique de ce sport et de sa popularité relativement limitée par rapport à d'autres disciplines, il y a peu de recherches scientifiques qui lui sont consacrées. Cela signifie que les informations disponibles sont souvent limitées et fragmentaires, surtout dans le domaine de la performance sportive.

L'équipe de Boccia Canada a pris l'initiative de collecter des données de matchs dans le but de les exploiter afin d'améliorer les performances de ses équipes. En recueillant certaines données, les entraîneurs peuvent commencer à identifier des tendances et des schémas récurrents. Ces données pourraient potentiellement révéler des stratégies gagnantes, des faiblesses spécifiques à corriger ou des domaines d'amélioration pour les joueurs. En intégrant l'analyse des données dans le processus d'entraînement, les entraîneurs de Boccia Canada espèrent pouvoir prendre de meilleures décisions et fournir des conseils plus précis à ses athlètes.

C'est donc dans le domaine de l'analyse et de l'exploitation de données que s'inscrit ce mémoire. En effet, l'objectif est de poursuivre le travail commencé par les entraîneurs dans le but d'améliorer les performances des équipes de Boccia. La première partie du projet consiste à nettoyer les données de manière à les rendre exploitables, puis à les analyser en profondeur de manière à en apprendre plus sur ce sport qui a été jusqu'à maintenant peu étudié, ce qui va permettre de fournir des résultats intéressants aux équipes de Boccia Canada qui vont pouvoir les exploiter pour améliorer les performances de leurs athlètes. La suite de projet consiste à exploiter ces données dans le but de créer un outil d'aide à la décision permettant de prédire le meilleur lancer à effectuer dans une situation donnée.

Pour réaliser cet outil, nous avons conçu un algorithme de type expectiminimax, une variante de l'algorithme minimax issu de la théorie des jeux. L'avantage de cet algorithme est qu'il permet d'introduire une notion de probabilité à un algorithme qui est habituellement déterministe, ce qui permet de modéliser facilement le fait que les joueurs professionnels ne sont pas infaillibles et qu'ils leur arrivent de manquer des tirs. Cependant, la faible quantité de données nous a forcé à faire des concessions au niveau de la précision de la recommandation. Après une évaluation de l'outil sur six matchs réels par l'entraîneur en chef de Boccia Canada, les résultats obtenus ont été jugés comme pertinents, mais le manque de précision fait qu'ils sont parfois difficiles à exploiter.

Plusieurs pistes sont envisageables pour améliorer l'outil développé, d'une part, il serait intéressant de refaire cette étude avec un volume de données plus massif pour améliorer la précision des recommandations. D'autre part, il serait intéressant d'améliorer les données collectées en prenant en compte notamment la position des balles sur le terrain, ce qui pourrait permettre d'intégrer de l'apprentissage automatique dans l'outil d'aide à la décision, ce qui pourrait donner des résultats plus pertinents.

ABSTRACT

Boccia is a Paralympic sport similar to bocce that is inclusive and can be played by anyone, regardless of their disability. However, due to its specific nature and relatively limited popularity compared to other sports, there has been a scarcity of scientific research dedicated to it. Consequently, the available information, particularly concerning sports performance, remains limited.

To address this, the Boccia Canada team has taken the initiative of collecting match data to enhance the performance of its athletes. Through the analysis of this data, coaches aim to identify recurring trends and patterns, which could potentially reveal winning strategies, specific weaknesses to address, and areas for player improvement. By integrating data analysis into the training process, Boccia Canada coaches hope to make better decisions and provide more accurate advice to their athletes.

As a result, this thesis focuses on data analysis and exploitation. Its objective is to build upon the work initiated by coaches to improve boccia teams' performance. The project's initial phase involves data cleaning to ensure usability, followed by in-depth analysis to gain valuable insights into the sport, which has been relatively under-researched until now. The obtained results will provide meaningful outcomes for Boccia Canada teams, allowing them to enhance their athletes' performance. The subsequent phase of the project includes leveraging this data to develop a decision support tool capable of predicting the best shot to make in a given situation.

To create this tool, we designed an expectiminimax algorithm, a variation of the minimax algorithm used in game theory. The advantage of this algorithm lies in its consideration of probability, which allows for modeling the fact that professional players are not infallible and may sometimes miss shots. However, the limited amount of data compelled us to make some compromises concerning the precision of the recommendations. Following the evaluation of the tool in six real matches, the head coach of Boccia Canada deemed the results relevant. Nevertheless, the lack of precision sometimes presents challenges in their effective utilization.

To improve the developed tool, several approaches can be explored. Firstly, conducting this study with a larger volume of data would enhance the precision of the recommendations significantly. Secondly, improving the collected data by considering factors such as the position of the balls on the field would prove beneficial. This could facilitate the integration of machine learning into the decision support tool, potentially leading to more relevant and accurate results.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectifs de recherche	2
1.3 Plan du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 L'intelligence artificielle dans le sport de haut niveau	4
2.2 Le curling comme inspiration	5
2.3 Une approche par la théorie des jeux	6
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DE LA BOCCIA ET DONNÉES DISPONIBLES	8
3.1 Présentation du sport	8
3.2 Présentation des données	12
3.2.1 Données considérées	12
3.2.2 Description des caractéristiques	15
3.2.3 Prétraitement des données	19
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE	21
4.1 Aperçu global	21
4.2 Analyse des données	22
4.3 Développement d'un outil d'aide à la décision	29
4.3.1 Algorithme Minimax	29

4.3.2	Algorithme Expectiminimax	35
CHAPITRE 5	RÉSULTATS	42
5.1	Protocole expérimental	42
5.2	Résultats	44
5.3	Analyse des résultats	52
CHAPITRE 6	CONCLUSION	56
6.1	Synthèse des travaux	56
6.2	Limitations de la solution proposée	57
6.3	Améliorations futures	58
RÉFÉRENCES		60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Détail des matchs dans la base	13
Tableau 3.2	Détail des manches dans la base	13
Tableau 3.3	Détail des athlètes dans la base	14
Tableau 3.4	Description des caractéristiques des manches	15
Tableau 3.5	Exemple d’une manche complète	17
Tableau 3.6	Description des caractéristiques des athlètes	17
Tableau 3.7	Description des caractéristiques des manches après le prétraitement des données	19
Tableau 3.8	Description des caractéristiques des athlètes après le prétraitement des données	20
Tableau 4.1	Détail de la répartition des lancers dans la base	24
Tableau 4.2	Détail de la répartition des lancers dans la base après compression . .	24
Tableau 4.3	Pourcentage de victoire en fonction de la note de la première balle . .	26
Tableau 5.1	Résultat des tests pour le premier match dans la catégorie BC3 . . .	45
Tableau 5.2	Résultat des tests pour le second match dans la catégorie BC4	46
Tableau 5.3	Résultat des tests pour le troisième match dans la catégorie BC3 . . .	47
Tableau 5.4	Résultat des tests pour le quatrième match dans la catégorie BC4 . .	48
Tableau 5.5	Résultat des tests pour le cinquième match dans la catégorie BC3 . .	49
Tableau 5.6	Résultat des tests pour le sixième match dans la catégorie BC1	50
Tableau 5.7	Détail de la répartition des notes	51
Tableau 5.8	Détail de la répartition des lancers	51

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1	Terrain de boccia	8
Figure 4.1	Répartition des coups en Boccia	22
Figure 4.2	Comparaison de la répartition des coups selon les catégories	23
Figure 4.3	Comparaison de la répartition des données avant et après compression	25
Figure 4.4	Taux de victoire selon la première balle	26
Figure 4.5	Évolution du taux de victoire en fonction de la note	27
Figure 4.6	Ouvertures les plus courantes	27
Figure 4.7	Représentation en arbre d'un jeu à deux joueurs de profondeur deux sur lequel pourrait être appliqué l'algorithme minimax	29
Figure 4.8	Exemple de l'utilisation de l'algorithme minimax sur un arbre d'un jeu à deux joueurs de profondeur deux avec deux coups possibles à chaque tour	30
Figure 4.9	Représentation de deux tours d'une partie de boccia sous forme d'arbre en considérant qu'une équipe n'a que deux coups à sa disposition à chaque tour	33
Figure 4.10	Illustration de la position des noeuds chances dans un arbre adapté à l'utilisation de l'algorithme expectiminimax	35
Figure 4.11	Une étape de calcul de l'algorithme Expectiminimax	36
Figure 4.12	Une étape de calcul de l'algorithme Expectiminimax	36
Figure 4.13	Diagramme récapitulatif de la méthodologie	41
Figure 5.1	Synthèse des résultats	51
Figure 5.2	Arbre représentant l'ensemble des séquences de coups apparaissant au moins 50 fois dans la base de données	53
Figure 5.3	Arbre représentant l'ensemble des séquences de coups apparaissant au moins 20 fois dans la base de données	54
Figure 5.4	Arbre représentant l'ensemble des séquences de coups apparaissant au moins 20 fois dans la base de données pour la catégorie BC3	54
Figure 5.5	Illustration de la division des données pour une étape de fonctionnement de l'algorithme expectiminimax	55

LISTE DES ALGORITHMES

1	Pseudocode de l'algorithme minimax classique	30
2	Pseudocode de la fonction qui détermine la terminalité d'un noeud	32
3	Pseudocode de l'algorithme minimax classique adapté à la boccia	34
4	Pseudocode de l'algorithme expectiminimax	37
5	Pseudocode de l'algorithme expectiminimax adapté à la boccia	40

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

IA	Intelligence Artificielle
MCTS	Monte Carlo tree search

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

En misant sur la science, l'innovation et la technologie, l'Institut national du sport du Québec incarne le «Génie derrière les performances» en proposant des solutions de pointe propulsées par des experts et des partenaires ayant pour objectif commun de permettre aux athlètes s'entraînant au Québec de s'améliorer constamment afin d'exceller sur la scène internationale. Le présent projet vise à soutenir l'équipe canadienne de boccia dans sa démarche d'innovation visant à réaliser de façon constante des performances dignes d'un podium.

La boccia est un sport de précision et de stratégie pratiqué par des athlètes avec des handicaps physiques. Le jeu se joue avec des balles lancées sur un terrain de jeu, et l'objectif est de placer ses balles le plus près possible d'une balle cible appelée cochonnet ou jack. Les athlètes de boccia doivent maîtriser différents types de lancers et les mettre en œuvre avec succès au bon moment pendant un match afin de prendre le dessus sur leur adversaire et de marquer des points. L'analyse notationnelle pour quantifier les actions réussies et non réussies ainsi que les schémas tactiques est donc bien adaptée à ce sport. Pour rappel, l'analyse notationnelle est une technique d'analyse de la performance sportive basée sur le codage systématique, au cours du temps, de caractéristiques de la situation sportive observée. Pourtant, la littérature scientifique dans ce domaine est quasi-inexistante en boccia. Cela signifie que les modèles et les actions critiques associés à une performance réussie en boccia restent inconnus.

Lors d'un précédent projet mené à terme il y a quelques années, l'équipe d'entraîneurs de Boccia Canada a établi sa propre liste d'indicateurs clés de la performance (sa grille d'analyse notationnelle) et a développé une application propriétaire pour numériser cette grille. Cela permet aux entraîneurs de codifier les actions lors de matchs de boccia, de sauvegarder ces informations dans une base de données structurées, et de générer des rapports de matchs.

Après avoir accumulé une quantité de données importante telle que les différents lancers effectués pendant les matchs, la qualité de ces lancers, le score des matchs ou encore les performances de certains athlètes sur les différents lancers, l'Institut national du sport du Québec et Boccia Canada ont décidé de s'associer avec Polytechnique Montréal pour créer un projet ayant pour objectif d'exploiter l'ensemble des données collectées pour en apprendre plus sur ce sport et pour essayer d'améliorer les performances des athlètes de l'équipe Boccia Canada.

Problématique

Il existe actuellement une lacune significative en termes de littérature scientifique dans le domaine de la performance en boccia. Malgré l'intégration de la boccia comme sport paralympique il y a presque quarante ans lors des jeux paralympiques de New York en 1984, les recherches spécifiquement axées sur la performance des athlètes de boccia sont très limitées voir inexistantes. La grande majorité des études scientifiques existantes portent sur des aspects tels que la biomécanique [1], la physiologie [2] ou encore la psychologie [3] sans traiter de la performance pure. Cette absence de recherches scientifiques approfondies dans le domaine limite notre compréhension des facteurs clés de la performance en boccia et empêche le développement d'approches et de stratégies optimales pour améliorer les performances des athlètes dans ce sport. L'apparition de nouvelles ressources scientifiques sur la performance sportive en boccia permettrait de combler cette lacune et stimuler le développement de la boccia en tant que discipline sportive compétitive. L'ambition de ce projet est d'apporter des premières réponses sur la compréhension des facteurs clés de la performance en boccia en explorant et en appliquant des méthodes de prises de décision dans un contexte adversarial aux données récoltées l'équipe de Boccia Canada pour potentiellement découvrir de nouveaux indicateurs clés ou tactiques de jeu gagnantes qui pourraient améliorer les performances des athlètes.

1.2 Objectifs de recherche

Afin de répondre à la problématique, nous allons analyser en détail l'ensemble des données mises à disposition par l'équipe de Boccia Canada dans le but d'apporter un certain formalisme au monde de la boccia. En effet, la faiblesse de la littérature scientifique dans le domaine de la performance en boccia engendre un manque de ressource et de référence sur le sujet. Les coachs et les athlètes professionnels ont une riche expérience dans le sport, mais manquent d'un support formel qui leur permettrait de confronter leurs connaissances et leurs intuitions à des faits concrets. Notre premier objectif sera donc de travailler à l'établissement de ce support.

En plus de ces analyses, nous avons pour objectif de développer un outil d'aide à la décision basé sur les données à disposition qui permet de déterminer le meilleur lancer à effectuer dans une situation donnée lors d'un match de boccia.

Ce travail a également pour sous-objectif d'offrir une première contribution scientifique dans le domaine de la performance sportive en boccia qui est un sport riche et complexe qui pourrait être amené à évoluer dans le futur au fil des publications scientifiques.

1.3 Plan du mémoire

Tout d'abord, la première partie portera sur une revue de littérature consacrée à l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le sport, où seront présentés les travaux les plus impactant sur le sujet ainsi que ceux pouvant être adaptés à la boccia. Cette section permettra d'établir le contexte de l'étude et d'identifier les lacunes et les questions en suspens dans ce domaine spécifique. Dans un second temps, nous présenterons en détail la boccia en temps que sport ainsi que les données qui ont été utilisées tout au long de ce projet. Ensuite, nous parlerons de la méthodologie suivie lors de ce projet, en allant des analyses préliminaires jusqu'au développement d'un outil de prédiction du meilleur coup dans une situation donnée basé sur l'algorithme expectiminimax qui a été la contribution majeure de cette recherche. Finalement, la dernière partie sera consacrée au protocole expérimental mis en place pour tester notre outil ainsi qu'à l'analyse des résultats obtenus.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 L'intelligence artificielle dans le sport de haut niveau

Au cours des dernières décennies, l'essor de l'intelligence artificielle (IA) a offert de nouvelles opportunités à de nombreux domaines, dont celui du sport où l'IA a commencé à jouer un rôle de plus en plus important. On peut citer comme exemple le basketball [4], sport dans lequel l'apparition de l'analyse de données à bouleverser la façon de jouer, en encourageant un jeu plus rapide et plus loin du panier [5]. De la même manière, au baseball, l'intelligence artificielle a sublimé la discipline, aussi bien dans la façon d'appréhender le sport et les entraînements [6] que dans la façon de vendre le produit aux fans [7].

L'intégration de l'IA dans le sport repose sur de la collecte de données massives et variées, allant des statistiques de jeu basiques aux données biométriques des athlètes. Grâce à des techniques telles que l'apprentissage automatique, les réseaux de neurones et l'analyse prédictive, il est possible d'extraire des informations à partir de ces données, permettant ainsi aux entraîneurs et aux athlètes de prendre des décisions plus éclairées et de mieux comprendre les performances individuelles et collectives [8], ce qui peut mener à l'amélioration des performances des athlètes ainsi que de l'expérience des spectateurs.

Par exemple, l'intelligence artificielle joue un rôle essentiel dans la prévention des blessures sportives grâce à l'analyse des données biométriques des athlètes. En surveillant en permanence des paramètres tels que la fréquence cardiaque, la température corporelle et la fatigue, l'IA peut détecter les signaux précurseurs de blessures potentielles [9]. En analysant les données historiques et en étudiant les facteurs de risque communs, elle peut également créer des modèles prédictifs pour estimer la probabilité de blessure et recommander des programmes d'entraînement adaptés [10].

L'IA peut être utilisée pour simuler des situations de jeu [11], fournissant ainsi aux entraîneurs et aux joueurs des outils d'entraînement virtuel précis. Ces simulations permettent aux athlètes de perfectionner leurs compétences, d'expérimenter de nouvelles stratégies et de se préparer à des situations de jeu réelles. De plus, l'IA peut aider à l'analyse des mouvements, en détectant les schémas [12], les faiblesses et les opportunités d'amélioration dans la technique des athlètes, ce qui peut aider à la conception de programmes d'entraînement personnalisés.

On peut aussi utiliser l'IA pour prédire les résultats des matchs et des compétitions sportives en analysant les données historiques telles que les performances passées des équipes ou des athlètes, les conditions météorologiques, les statistiques individuelles, les tactiques de jeu et en utilisant des algorithmes prédictifs même si les résultats sont souvent mitigés [13].

La boccia est malheureusement un sport sur lequel très peu de recherches ont été faites dans le domaine de la performance. La grande majorité des recherches existantes portent sur des aspects tels que les techniques de lancer, la physiologie de l'exercice, l'impact de la pratique de la boccia sur la qualité de vie, et les effets sur la santé mentale, c'est-à-dire sur des aspects qui sont plus du ressort du biomédical [14]. Seul un article traite un sujet qui s'approche de la performance en boccia, mais le sujet est abordé de façon très superficielle [15] en cherchant à trouver des schémas récurrents dans les matchs de haut niveau sans chercher à les lier aux résultats des matchs ou aux performances des joueurs. Il a donc fallu chercher à trouver des références dans des sports similaires avec des contributions scientifiques plus riches.

2.2 Le curling comme inspiration

Le curling s'impose comme un candidat de choix, car c'est un sport qui est similaire à la boccia tant mécaniquement que stratégiquement et qui est beaucoup plus prisé par les chercheurs. Les études sur la performance y sont plus nombreuses et diverses. On peut y retrouver plusieurs types d'approches différentes : premièrement des études statistiques [16], différentes données peuvent être étudiées pour essayer de mettre en lumière des tendances et des patterns qui peuvent permettre aux joueurs et aux coachs de mieux appréhender le jeu et d'améliorer leurs performances. Les études peuvent être faites sur des données très simples (résultats des matchs, métriques de performances, ordre des lancers...) ou plus complexes (disposition du terrain, vitesse des lancers...) [17]. Des données de bonne qualité peuvent amener à des résultats qui peuvent être utilisés individuellement ou combinés pour fournir une analyse plus complète du jeu et ce genre d'analyse est complètement applicable à la boccia.

On peut également relever plusieurs approches différentes utilisant l'intelligence artificielle pour essayer de trouver des stratégies gagnantes. Certains passent par de l'apprentissage par renforcement [18] en entraînant des agents jouant l'un contre l'autre à l'aide de simulateur très fidèle de curling. Cela amène à des agents avec un très bon niveau qui surpassent ceux qui existaient précédemment. D'autres essaient de déterminer l'action optimale à un moment donné en utilisant la recherche arborescente Monte Carlo (MCTS) [19] avec un environnement

adapté. La combinaison des deux méthodes est aussi possible [20] avec de l'apprentissage profond pour apprendre une stratégie gagnante (avec des images représentant l'état du terrain en entrée) et avec un MCTS pour explorer l'espace d'action. Ces méthodes sont testées à l'aide de simulateur numérique de curling très fidèle et donnent de très bons résultats [21].

Ces méthodes qui apportent des résultats satisfaisants pour le curling pourraient théoriquement être facilement adaptées à la boccia. Cependant, le manque de données concernant le sport ne permet pas d'entraîner des modèles similaires et l'absence ou la non-accessibilité à des simulateurs réalistes [22] est également handicapant pour produire et tester les modèles. Il peut donc être plus intéressant de voir ce qu'il est possible de faire du côté de la théorie des jeux.

2.3 Une approche par la théorie des jeux

La théorie des jeux est un outil analytique qui nous permet de comprendre les choix stratégiques et les résultats possibles lorsque des individus interagissent les uns avec les autres, en prenant en compte les motivations, les préférences et les contraintes de chaque joueur. La théorie des jeux a de multiples applications possibles [23] mais celle qui va nous intéresser va être son utilisation pour modéliser les jeux à somme nulle [24]. En effet, il est possible d'utiliser une approche par la théorie des jeux pour modéliser et parfois résoudre certains jeux [25]. Et avec le bon paradigme, il est également possible d'appliquer certains de ces concepts au sport.

Il est vrai que la théorie des jeux peut être appliquée à de nombreux domaines, y compris le sport. Dans le contexte sportif, la théorie des jeux permet de modéliser les interactions stratégiques entre les différents acteurs impliqués, tels que les équipes, les joueurs et les entraîneurs. Elle aide à comprendre comment les décisions prises par chaque acteur peuvent influencer les résultats globaux [26].

Par exemple, dans les sports d'équipe tels que le football, la théorie des jeux peut être utilisée pour analyser les choix tactiques des entraîneurs [27]. Ils doivent évaluer les forces et les faiblesses de leur équipe ainsi que celles de leurs adversaires, et prendre des décisions tactiques qui maximisent les chances de succès. Cela peut inclure des choix tels que la formation de l'équipe [28], les substitutions pendant le match, ou encore les décisions relatives à la défense ou à l'attaque.

La théorie des jeux peut également être utilisée pour étudier les comportements stratégiques

des athlètes individuels. Par exemple, dans les sports individuels tels que les sports de raquettes, les joueurs doivent prendre des décisions en fonction des mouvements de leur adversaire [29]. Ils peuvent utiliser des stratégies différentes pour essayer de prévoir les mouvements de leur adversaire et maximiser leurs chances de marquer des points.

CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DE LA BOCCIA ET DONNÉES DISPONIBLES

3.1 Présentation du sport

La boccia est un sport paralympique que n'importe quelle personne peut pratiquer, qu'elle ait un handicap ou non. Conçu à l'origine pour les personnes ayant une grave paralysie cérébrale, il est désormais pratiqué par des joueurs ayant un large éventail de handicaps. C'est un sport de boule apparenté à la pétanque, d'origine gréco-romaine. C'est un sport facilement accessible aux débutants, mais qui gagne en intensité et en complexité au fur et à mesure que les joueurs progressent. La boccia a été ajoutée au programme paralympique en 1984. Aujourd'hui, la boccia est pratiquée dans plus de cinquante pays. La boccia se joue sur un terrain intérieur, généralement une surface plane et lisse, divisée en six zones appelées *boxes*. La figure 3.1 ci-dessous représente un terrain de boccia officiel.

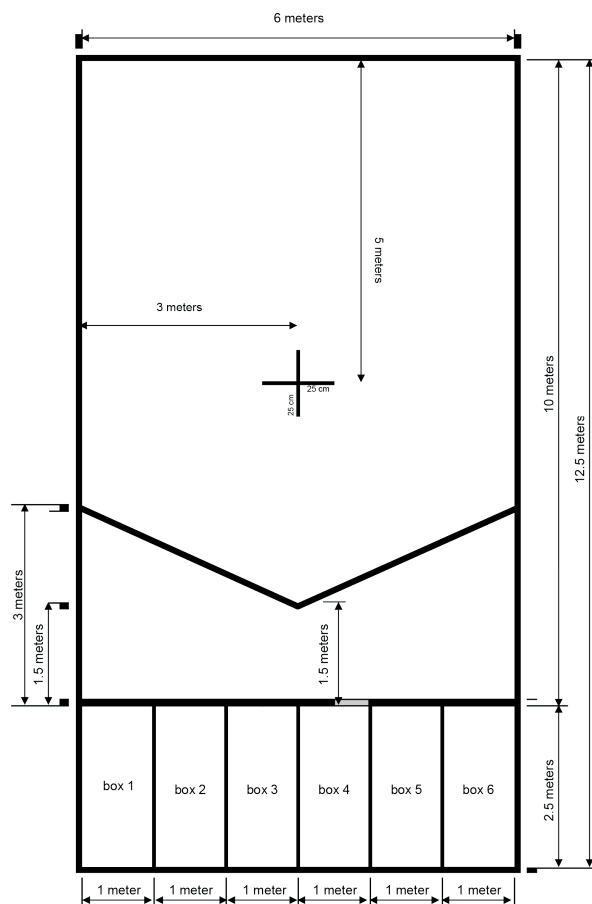


FIGURE 3.1 Terrain de boccia

Les dimensions standard d'un terrain de boccia sont de 12,5 mètres de long sur 6 mètres de large. Chaque *box* mesure un mètre par deux mètres cinquante, les athlètes doivent rester dans leur *box* lorsque c'est leur tour de jouer. La petite zone devant les *boxes* est une zone illégale pour le cochonnet, car trop proche des joueurs. La grande zone correspond à la partie jouable du terrain. Le centre du terrain de jeu est marqué d'une croix.

Le sport peut se pratiquer seul ou en équipe, chaque joueur ou équipe dispose de six balles de couleur, généralement rouges ou bleues, ainsi que d'une balle blanche plus petite appelée "jack" ou "cochonnet". Les balles sont en cuir et ont une circonférence d'environ 270 millimètres (soit légèrement plus large qu'une balle de tennis) pour un poids d'environ 275 grammes. Il y a trois façons possibles de pratiquer la discipline : individuellement (un contre un, chaque joueur a six balles), en paires (deux contre deux, chaque joueur a trois balles) ou en équipe (trois contre trois, chaque joueur a deux balles).

Le joueur doit rester à l'intérieur de sa *box* pendant le jeu et ne peut pas franchir la ligne pendant le lancer. En cas de jeu individuel, les joueurs occupent les cases centrales trois et quatre. En cas de jeu par paires, les joueurs occupent les *boxes* de deux à cinq, de même, pour le jeu en équipes, les six *boxes* sont occupées.

Le but du jeu est de placer ses balles le plus près possible du cochonnet, en essayant de les positionner de manière stratégique pour bloquer l'accès aux boules adverses. Si le cochonnet sort du terrain pendant la partie, il est replacé au centre du terrain sur la croix. Les joueurs peuvent effectuer différents types de lancers dans le but de prendre l'avantage. Un match se déroule de la manière suivante : le premier joueur lance le cochonnet puis la première balle. Ensuite, c'est au tour de l'équipe adverse de jouer ses balles jusqu'à ce qu'elle marque un point ou qu'elle ait utilisé la totalité de ses balles. La règle de la balle la plus proche détermine l'ordre des lancers. Le joueur dont la balle se rapproche le plus du cochonnet doit se retirer et laisser l'autre joueur effectuer son lancer. Le joueur ou l'équipe qui réussit à placer le plus de boules près du cochonnet marque des points. Un match de boccia est divisé en plusieurs manches, quatre pour les matchs individuels et en paire, contre six pour les matchs en équipe. À la fin d'une manche, le joueur ou l'équipe ayant la balle le plus près du cochonnet marque un point. Un point est accordé pour chaque balle qui est le plus près du cochonnet avant qu'une balle de l'adversaire ne se présente. Le jeu se déroule en plusieurs manches, et le joueur ou l'équipe ayant le plus de points à la fin du match remporte la partie. Nous allons maintenant voir l'ensemble des lancers possibles lors d'une partie de boccia.

Description des lancers

- **Première balle** : Première balle lancée après le cochonnet. On va généralement chercher à mettre la balle dans une position avantageuse qui va gêner l'adversaire.
- **Placement** : Un lancer qui a pour objectif de placer la balle à un endroit précis du terrain sans toucher d'autres balles. C'est le lancer le plus courant en boccia.
- **Déplacement** : Un lancer qui a pour objectif de déplacer une balle adverse ou le cochonnet, le plus souvent pour s'ouvrir un espace pour y placer une balle par la suite.
- **Poussée** : Un lancer qui a pour objectif de déplacer une de ses propres balles dans le but d'obtenir une position plus avantageuse.
- **Ricochet** : Un lancer qui consiste à faire rebondir sa balle sur une autre balle pour la placer dans une zone inaccessible autrement.
- **Défense** : Un lancer qui consiste à placer une balle pour gêner l'adversaire et défendre sa position.
- **Lob** : Un lancer aérien qui a pour but de passer au dessus d'une balle pour placer sa balle dans une zone inaccessible autrement.
- **Flop** : Un lancer aérien qui a pour objectif d'atterrir devant une balle pour rebondir par dessus pour placer sa balle dans une zone inaccessible autrement.
- **Coupe** : Un lancer qui consiste à déplacer une balle en la touchant par le côté lorsqu'il n'est pas possible de la déplacer normalement.
- **Grimpe** : Un lancer qui a pour but de faire rouler la balle pour qu'elle grimpe et reste en équilibre sur d'autres balles. Peut être utilisé pour marquer des points ou défendre une position.
- **Poussée-culbute** : Un lancer qui a pour but de faire rouler la balle pour qu'elle grimpe et passe derrière cette balle pour placer sa balle dans une zone inaccessible autrement.

Cette grande diversité de coups est notamment possible, car les athlètes sont libres de personnaliser leurs balles en termes de dureté, ce qui permet d'avoir des balles qui vont être très efficaces pour déplacer d'autres balles ou pour rebondir, ou des balles qui vont au contraire très peu rebondir et qui vont permettre de grimper sur d'autres balles.

La boccia est un sport qui requiert à la fois de la précision dans le lancer des boules et de la stratégie dans le placement des boules pour obtenir un avantage tactique. Les joueurs peuvent lancer les boules en les roulant, en les lançant à la main ou en utilisant des dispositifs d'assistance si nécessaire en raison de leur handicap. Ces dispositifs sont des rampes qui permettent aux athlètes qui ne sont pas en mesure de relâcher la balle avec la main d'envoyer

la balle. L'importante diversité de joueur pratiquant se sport impose une réglementation pour les matchs officiels pour s'assurer que les joueurs qui s'affrontent aient des capacités similaires. Nous allons maintenant voir comment cette partie du sport est gérée.

Catégories en boccia

En boccia, il existe différentes catégories de jeu en fonction du niveau de handicap des joueurs, et des règles spécifiques régissent chaque catégorie. Des adaptations peuvent être apportées aux règles, telles que l'assistance d'un assistant sportif pour les joueurs ayant des difficultés motrices plus importantes. Voici les catégories officielles en boccia et leurs spécificités :

- **Catégorie BC1** : Joueur atteint de paralysie cérébrale et assimilés : handicap "sévère" au niveau des quatre membres. Le joueur est capable de lancer la balle et dispose d'un assistant sportif qui ajuste le fauteuil roulant ou fait passer une boule au joueur.
- **Catégorie BC2** : Infirmité motrice cérébrale, de niveau moindre. Pas d'assistant sportif.
- **Catégorie BC3** : Joueur atteint de tout type de pathologie : handicap plus "sévère" au niveau des quatre membres. Le joueur n'a pas la capacité motrice de lancer la balle, et peut le placer sur une rampe. Il peut être aidé physiquement par une personne qui a le dos tourné au jeu.
- **Catégorie BC4** : Joueur atteint de tout type de pathologie, hors paralysie cérébrale : handicap "sévère" au niveau des quatre membres. Pas d'assistant sportif, sauf pour les pratiquants jouant au pied.

La boccia est un sport compétitif, mais il est également pratiqué à des fins récréatives et thérapeutiques. Il favorise la concentration, la coordination, la précision et la prise de décision stratégique. En tant que sport inclusif, il offre aux personnes atteintes de handicaps physiques une opportunité de participer activement à une activité physique compétitive et socialement engageante.

Ce projet est effectué en partenariat avec l'Institut National du Sport du Québec et en particulier avec l'équipe de Boccia Canada le « maître d'œuvre » de l'Association canadienne de sports pour paralytiques cérébraux pour tout ce qui touche à la boccia.

3.2 Présentation des données

Dans cette section, nous allons présenter de manière exhaustive l'ensemble des données mises à disposition pour ce projet ainsi que la manière dont elles ont été récoltées.

3.2.1 Données considérées

Provenance des données

Croyant dans le pouvoir de l'analyse statistique pour améliorer les performances sportives, l'équipe de Boccia Canada a lancé il y a quelques années un projet de développement d'une application permettant aux coachs de recueillir les données de match de boccia professionnel. Ces données étaient précédemment recueillies sur papier et jamais exploitées. Grâce à cette application, l'équipe de Boccia Canada a pu compiler une quantité importante de données relatives à la Boccia de haut niveau, allant de données générales sur le sport jusqu'à des données spécifiques sur les performances de certains athlètes.

Données considérées

Nous considérons l'ensemble des données recueillies par les coachs de Boccia Canada depuis le développement de l'application évoquée précédemment. Ces données sont divisées en trois grandes catégories, les données relatives aux matchs en général, les données relatives aux athlètes et des données relatives à des indicateurs de performance avancée. Nous nous intéresserons uniquement aux deux premières catégories dans le cadre de ce projet.

Données relatives aux matchs

Les données à disposition comprennent le détail de presque 2000 matchs de boccia professionnels dans des catégories différentes. Le tableau 3.1 à la page suivante indique le nombre de matchs dans la base de données en fonction de la catégorie.

Catégorie	Quantité de matchs
BC1	251
BC2	346
BC3	416
BC4	410
Équipe (BC1 - BC2 - BC3)	383
Total	1806

TABLEAU 3.1 Détail des matchs dans la base

Cependant, comme c'est indiqué dans la section précédente, un match de boccia est divisé en plusieurs manches indépendantes les unes des autres, il est donc possible de considérer une manche comme une entité indépendante. Nous verrons par la suite pourquoi il est plus intéressant de considérer les données de cette manière. Ce paradigme nous laisse avec environ 7100 manches distinctes jouées dans différentes catégories, en individuel ou en équipe, dont le détail peut être consulté dans le tableau 3.2 ci-dessous. Le détail de cette transformation sera expliqué dans une section suivante qui traitera du prétraitement des données.

Catégorie	Quantité de manches
BC1	969
BC2	1327
BC3	1614
BC4	1598
Équipe (BC1 - BC2 - BC3)	1621
Total	7129

TABLEAU 3.2 Détail des manches dans la base

Données relatives aux athlètes

L'ensemble des données contient un jeu de données consacré aux performances individuelles des certains athlètes professionnels de boccia. Ce jeu de donnée regroupe les performances d'environ 500 athlètes dans différents domaines du jeu. Le détail peut être consulté dans le tableau 3.3 suivant.

Catégorie	Quantité d'athlètes
BC1	88
BC2	112
BC3	151
BC4	128
Total	479

TABLEAU 3.3 Détail des athlètes dans la base

Après cette présentation sommaire des données à disposition et de leur provenance, nous allons étudier dans les prochaines sections les spécificités de ces données ainsi que les modifications que nous avons dû y apporter pour pouvoir les exploiter dans ce projet.

3.2.2 Description des caractéristiques

A travers cette section, nous allons présenter de manière plus détaillée les données introduites précédemment ainsi que leurs caractéristiques.

Données relatives aux matchs

Chaque match est représenté comme un ensemble de caractéristiques dont une liste exhaustive peut être consultée dans le tableau 3.4 ci-dessous.

Caractéristique	Domaine	Description
Nom de la compétition	Chaîne de caractères	Nom de la compétition
Date	Date	Date de la compétition
Type de match	Chaîne de caractères	Catégorie de la manche
Nom du match	Chaîne de caractères	Nom du match
Équipe	Booléen	Équipe qui va jouer
Numéro de lancer	Entier	Numéro du lancer dans la manche
Type de lancer	Chaîne de caractères	Type de lancer
Nom de l'athlète	Chaîne de caractères	Nom de l'athlète jouant
Note	Flottant	Note du lancer
Lancer clé	Booléen	Indique si le lancer est exceptionnel
Manche	Entier	Manche en cours
Position du cochonnet	Flottant	Distance du cochonnet
Score équipe rouge	Entier	Score de l'équipe rouge
Score équipe bleue	Entier	Score de l'équipe bleue
Pays	Chaîne de caractères	Pays du joueur

TABLEAU 3.4 Description des caractéristiques des manches

Il faut noter que toutes les caractéristiques des données relatives aux matchs ne sont pas utiles pour le travail présenté dans ce mémoire. Nous allons offrir une description détaillée des caractéristiques qui vont avoir beaucoup d'importance dans notre étude.

- **Type de match** : La catégorie dans laquelle la manche est jouée, les différentes catégories ont été présentées dans la partie précédente. Nous verrons par la suite que la catégorie peut avoir une influence importante sur la façon dont le sport est pratiqué.
- **Équipe** : Équipe qui va jouer le prochain coup, rouge ou bleue.
- **Numéro du lancer** : Ordre du lancer effectué durant une manche, de 1 à 12.

- **Type de lancer** : Type de lancer effectué parmi les lancers présentés dans la section précédente.
- **Manche** : Indique la manche en cours dans le match. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, les matchs peuvent être segmentés en manches indépendantes. Nous verrons par la suite qu'il est plus intéressant de voir le jeu de données comme un ensemble de manches indépendantes plutôt que comme ensemble de matchs.
- **Score d'équipe** : Score de l'équipe à la fin de la manche
- **Note** : Qualité du lancer effectué selon l'analyste ayant codifié le match. Les différents lancers sont notés sur une échelle allant de 0 à 4, sauf pour la première balle qui est notée sur une échelle allant de 0 à 5.

La note est une caractéristique très importante de nos données, car une partie importante de notre étude va être basée dessus, nous allons donc maintenant expliquer en détail l'échelle de notation.

Échelle de notation

- **Score de 0** : Le lancer est raté et n'était pas une bonne décision. Le lancer est hors du terrain ou l'athlète n'a pas pu lancer par manque de temps. Le lancer n'a pas d'impact ou un impact négatif sur la manche.
- **Score de 1** : Le lancer est raté mais était une bonne décision. Le lancer n'a pas d'impact ou un impact négatif sur la manche
- **Score de 2** : Le lancer est partiellement réussi et part d'une bonne décision. Le lancer a un impact moyen sur la manche.
- **Score de 3** : Le lancer est bien réussi et a un impact positif sur la manche.
- **Score de 4** : Le lancer est parfaitement réussi et a un impact majeur sur la manche.
- **Score de 5** : Uniquement pour la première balle. Première balle parfaite avec un impact majeur sur la manche.

Un exemple d'une manche complète simplifié pour ne laisser que les caractéristiques les plus importantes peut être trouvé dans le tableau 3.5 suivant.

Catégorie	Equipe	N° lancer	Type du lancer	Note	Score rouge	Score bleue
BC3	Rouge	1	Première balle	3	1	0
BC3	Bleue	2	Déplacement	4	1	0
BC3	Bleue	3	Placement	2.5	1	0
BC3	Rouge	4	Déplacement	3	1	0
BC3	Rouge	5	Placement	2.5	1	0
BC3	Bleue	6	Placement	2	1	0
BC3	Rouge	7	Placement	3.5	1	0
BC3	Bleue	8	Lobe	1	1	0
BC3	Bleue	9	Placement	4	1	0
BC3	Rouge	10	Placement	4	1	0
BC3	Bleue	11	Placement	2	1	0
BC3	Rouge	12	Placement	4	1	0

TABLEAU 3.5 Exemple d'une manche complète

Données relatives aux athlètes

De même, chaque athlète est représenté comme un ensemble de caractéristiques dont le détail peut être consulté dans le tableau 3.8 suivant.

Caractéristique	Domaine	Description
Nom	Chaîne de caractères	Nom de l'athlète
Pays	Chaîne de caractères	Pays de l'athlète
Catégorie	Chaîne de caractères	Catégorie de l'athlète
Main	Chaîne de caractères	Main dominante de l'athlète
Rang global	Entier	Classement mondial de l'athlète
Type de lancer	Chaîne de caractères	Type de lancer
Moyenne	Flottant	Moyenne de performance sur ce lancer
Nombre de lancer	Entier	Nombre total de tir dans la base.
Genre	Booléen	Genre de l'athlète

TABLEAU 3.6 Description des caractéristiques des athlètes

Ces données nous permettent d'avoir des informations précises sur les performances de certains athlètes, nous verrons par la suite que cela nous permettra d'avoir des résultats personnalisés dans le cas où on travaille avec un athlète dont les performances sont présentes dans la base de données.

Maintenant que nous en savons plus sur les données mises à notre disposition, nous pouvons commencer à travailler dessus pour les rendre exploitables. Nous allons voir dans la prochaine section comment nous avons effectué ce travail de prétraitement des données.

3.2.3 Prétraitement des données

Dans cette section, nous verrons comment nous avons retravaillé les données qui nous ont été fournies pour les rendre exploitables facilement pour la suite du projet.

Données relatives aux matchs

Dans un premier temps, il a fallu nettoyer les données disponibles pour les rendre exploitables. En effet, les données ayant été collectées de façon manuelle par des coachs lors des différents matchs, on peut y retrouver certaines erreurs et incohérences comme des scores impossibles (un score plus grand que le meilleur score possible par exemple), des données manquantes ou encore des suites de coups illégaux (l'équipe qui commence rejoue immédiatement après). Il a donc fallu corriger ces erreurs lorsque c'était possible et supprimer les données inexploitables ce qui a mené à la suppression d'environ 500 manches pour nous amener aux 7129 manches que nous avons présentés dans la section précédente.

Après cette première étape de nettoyage, il a fallu réorganiser les données de manière à les rendre plus cohérentes. En effet, les données étaient initialement divisées en matchs, comme nous l'avons vu dans la section précédente, or, nous avons aussi vu que les matchs étant divisés en différentes manches (4 ou 6 selon la situation) complètement indépendantes les unes des autres, il est plus pertinent de diviser les données en manches plutôt qu'en matchs. Nous avons donc divisé le jeu de données en manches.

Nous avons également supprimé les caractéristiques qui ne seront pas utiles au projet présenté dans ce mémoire. Le tableau 3.7 ci-dessous montre les caractéristiques retenues après le prétraitement des données des matchs.

Caractéristiques	Domaine	Description
IdManche	Chaîne de caractères	Identifiant unique d'une manche
Catégorie	Chaîne de caractères	Catégorie de la manche
Équipe	Booléen	Équipe qui va jouer
Numéro du lancer	Entier	Numéro du lancer dans la manche
Type de lancer	Chaîne de caractères	Type du lancer
Note	Flottant	Note du lancer
Score équipe rouge	Entier	Score de l'équipe rouge
Score équipe bleue	Entier	Score de l'équipe bleue

TABLEAU 3.7 Description des caractéristiques des manches après le prétraitement des données

Voilà l'intégralité des changements qui ont été effectués sur les données relatives aux matchs pour les rendre plus exploitables pour la suite.

Données relatives aux athlètes

De la même manière que pour les données précédentes, nous avons d'abord nettoyé les données des athlètes en supprimant les profils avec des données manquantes ou avec trop peu de données pour avoir un indicateur de performance pertinent.

De plus, nous nous sommes débarrassés des caractéristiques qui n'avaient pas d'importance pour ce projet et nous avons concaténé les données de sorte qu'il soit possible d'avoir accès directement à toutes les performances d'un athlète. Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques qui ont été retenues pour les athlètes après le prétraitement des données.

Caractéristique	Domaine	Description
Nom de l'athlète	Chaîne de caractères	Nom de l'athlète
Catégorie	Chaîne de caractères	Catégorie de l'athlète
Placement	Flottant	Moyenne de performance sur le placement
Déplacement	Flottant	Moyenne de performance sur le déplacement
Poussée	Flottant	Moyenne de performance sur la poussée
Défense	Flottant	Moyenne de performance sur la défense
Ricochet	Flottant	Moyenne de performance sur le ricochet
Lobe	Flottant	Moyenne de performance sur le lobe
Grimpe	Flottant	Moyenne de performance sur la grimpe
Coupe	Flottant	Moyenne de performance sur la coupe
Flop	Flottant	Moyenne de performance sur le flop
Poussée-culbute	Flottant	Moyenne de performance sur le poussée-culbue

TABLEAU 3.8 Description des caractéristiques des athlètes après le prétraitement des données

Après avoir vu comment nous avons rendu ces données exploitables, nous allons voir dans la prochaine partie comment nous avons exploité ces données pour en apprendre un peu plus sur la boccia et pour créer un outil d'aide à la décision.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

4.1 Aperçu global

Dans cette partie, nous allons expliquer comment nous avons choisi d'exploiter toutes les données collectées par l'équipe de Boccia Canada, que nous avons décrites en détail dans la partie précédente, de manière à en apprendre plus sur ce sport qui a été très peu étudié du point de vue de la performance. De plus, nous verrons précisément comment nous avons utilisé ces données de manière à créer un outil d'aide à la décision en utilisant un algorithme issu de la théorie des jeux, l'algorithme expectiminimax.

Dans un premier temps, nous allons voir comment une étape préliminaire d'analyse de données nous a aidés à mieux comprendre nos jeux de données de manière à mieux pouvoir les exploiter par la suite. Cette analyse nous a également permis de mieux comprendre le sport en lui même, en mettant en évidence les tirs les plus couramment effectués par les athlètes, les scénarios de match les plus fréquents à haut niveau, ou encore en montrant l'impact que la qualité d'un tir peut avoir sur le résultat d'une manche.

Dans un second temps, nous verrons comment ces résultats préliminaires nous ont encouragés à nous tourner vers la théorie des jeux pour créer un outil d'aide à la décision qui permettrait de donner le meilleur coup dans une situation donnée en utilisant l'algorithme expectiminimax. Nous verrons également en détail comment fonctionne cet algorithme dérivé de l'algorithme minimax. Finalement, nous verrons comment nous avons adapté cet algorithme pour le faire fonctionner avec nos jeux de données de manière à donner les meilleurs résultats possibles.

Pour finir, nous expliquerons comment nous avons utilisé l'analyse statistique comme heuristique pour faire fonctionner notre algorithme et comment nous avons effectué la gestion des noeuds terminaux à travers un jeu de données parfois lacunaire.

4.2 Analyse des données

Après la première étape de prétraitement décrite dans la partie précédente est venue une phase d'exploration des données. Le but étant de mieux visualiser et appréhender les données pour mieux les comprendre, pour s'apercevoir de leurs forces et de leurs faiblesses ainsi que pour trouver la meilleure manière de les exploiter.

De plus, la boccia est un sport sur lequel très peu de recherches ont été faites dans le domaine de la performance. La grande majorité des recherches existantes portent sur des aspects tels que les techniques de lancer, la physiologie de l'exercice, l'impact de la pratique de la boccia sur la qualité de vie, et les effets sur la santé mentale, c'est-à-dire sur des aspects qui sont plus du ressort du biomédical. En raison de la pauvreté du contenu de recherche sur la boccia, tous les résultats sont importants et peuvent fournir des informations précieuses pour mieux comprendre le sport et permettre aux coaches de mieux structurer leurs entraînements et d'améliorer les performances des équipes.

Une partie de ses analyses préliminaires s'est portée sur la comparaison de la répartition des données en fonction des différentes catégories présentes en boccia au niveau professionnel (BC1, BC2, BC3, BC4), comme la proportion de certains coups dans les matchs qu'on peut voir dans la figure 4.1 ci-dessous.

Répartition des coups en boccia

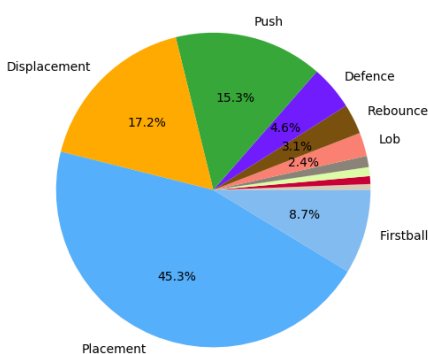


FIGURE 4.1 Répartition des coups en Boccia

Les athlètes évoluant dans des catégories différentes ayant des capacités physiques différentes et donc une façon de jouer différente. Cette étude a permis de constater à quel point il était pertinent de considérer les données comme un tout ou s'il fallait plutôt les voir comme différents jeux de données regroupés ensemble. Cela constitue un point important, car nous allons voir que le manque de données va s'avérer être une difficulté importante de ce projet de recherche. On peut constater dans la figure 4.2 ci-dessous qu'il y a tout de même des différences relativement importantes entre les catégories.

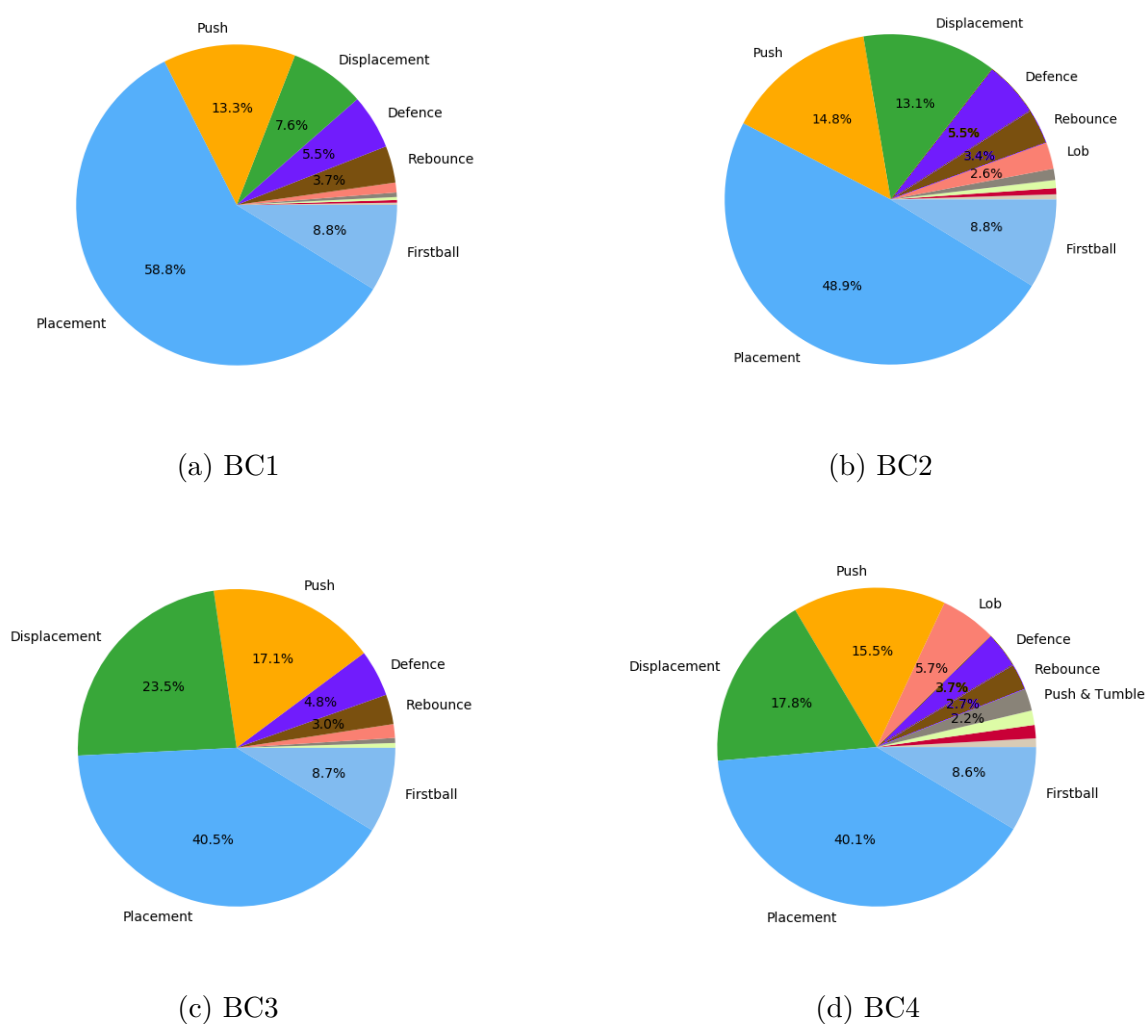


FIGURE 4.2 Comparaison de la répartition des coups selon les catégories

Cette étude a également mis en lumière une autre particularité du jeu de données : la proportion de données est très déséquilibrée avec des coups comme le placement qui vont constituer presque la moitié du jeu de données et des coups très sous représentés comme le flop. Le tableau 4.1 suivant et la figure 5.1 permettent d'illustrer de façon plus parlante ce déséquilibre.

Déséquilibre du jeu de données

Type de lancers	Nombre de lancers dans la base
Placement	37206
Déplacement	14172
Poussée	12568
Première balle	7129
Défense	3751
Ricochet	2543
Lobe	1990
Poussée-culbute	944
Coupe	758
Grimpe	718
Flop	500

TABLEAU 4.1 Détail de la répartition des lancers dans la base

Une façon de rééquilibrer le jeu de données est de regrouper certaines données ensemble quitte à perdre un peu d'information. Par exemple, il est pertinent de regrouper les déplacements et les poussées, car les deux coups sont mécaniquement identiques (déplacer une balle du terrain à l'aide de sa propre balle) et seule la fin est différente (pousser sa balle ou celle de l'adversaire). On peut également regrouper l'ensemble des coups les plus rares sous un même label 'autre' pour ne pas qu'il soit noyé par l'ensemble des coups les plus fréquents. Les premières balles étant des lancers très spécifiques communs à tous les matchs, elles vont être traitées à part par la suite. Le tableau 4.2 suivant montre à quoi peut ressembler le jeu de données rééquilibré.

Type de lancers	Nombre de lancers dans la base
Placement	37206
Déplacement	26740
Autre	11204

TABLEAU 4.2 Détail de la répartition des lancers dans la base après compression

Rééquilibrer les données de cette manière entraîne une perte importante d'information mais permet de donner un poids non négligeable aux données sous représentées. La figure 5.1 ci-dessous permet de mettre en évidence ce propos.

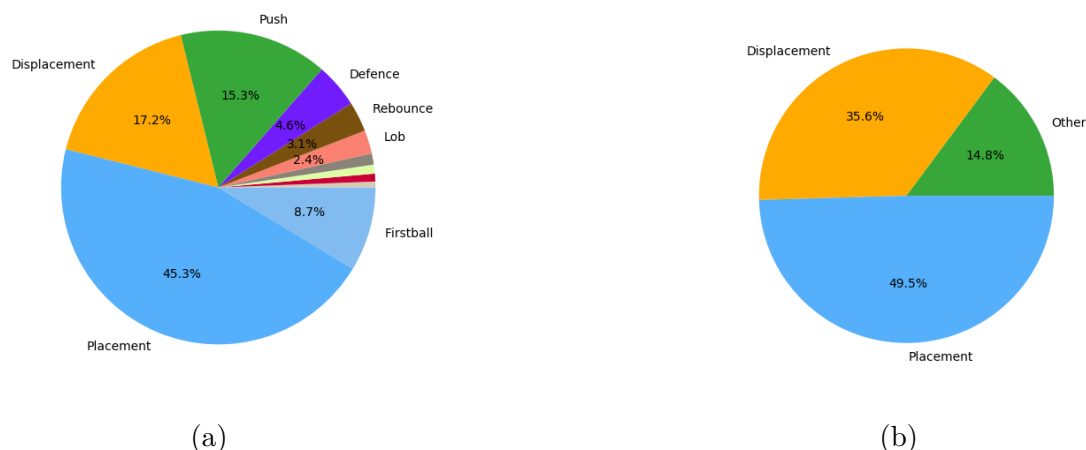


FIGURE 4.3 Comparaison de la répartition des données avant et après compression

Après cette première étude, nous nous sommes intéressés aux ouvertures de match. En effet, à l'instar d'une partie d'échecs, un match de boccia peut devenir unique après quelques coups, mais on peut souvent observer des similitudes dans les entames de matches.

Impact de la première balle

Dans un premier temps, nous avons cherché à déterminer si commencer une manche à un impact sur celle-ci, comme c'est le cas dans des sports tel que les échecs ou le curling. La figure 4.4 suivante montre que c'est effectivement le cas.

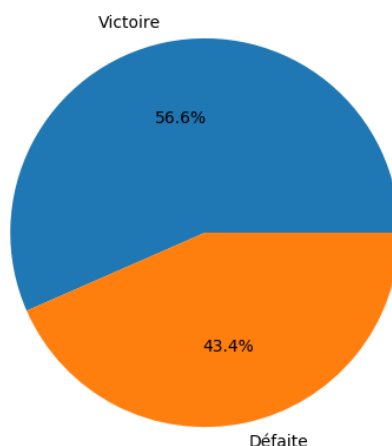


FIGURE 4.4 Taux de victoire selon la première balle

De même, il peut être intéressant de voir à quel point la qualité d'une première balle peut influencer le résultat du match. Le tableau 4.3 ci-dessous nous montre comment évolue le taux de victoire en fonction de la note qui a été attribuée par les coachs à la première balle. On rappelle que le détail de l'échelle de notation est disponible dans la partie précédente. On peut voir que commencer parfaitement une manche donne un avantage très significatif.

Note	% de victoire
5	74.6
≥ 4	67.9
4	62.1
3	53.8
2	43.2
1	42.6

TABLEAU 4.3 Pourcentage de victoire en fonction de la note de la première balle

Ces premiers résultats nous ont inspirés à pousser le concept d'ouverture un peu plus loin. Il est effectivement intéressant de voir comment la réponse à la première balle peut influencer le cours de la partie. Les deux figures 4.5 suivantes montrent comment évolue le taux de victoire de l'équipe qui commence la manche en fonction des notes des deux premiers coups.

Ouvertures

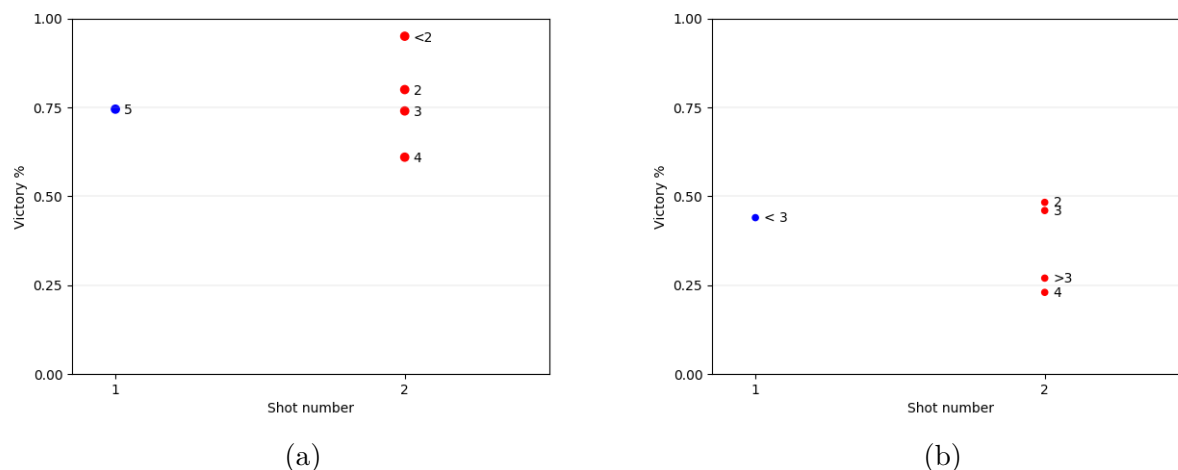


FIGURE 4.5 Évolution du taux de victoire en fonction de la note

Une autre approche du concept d'ouverture peut être d'étudier les coups les plus courants dans les débuts de partie. Cela permet de voir si on observe souvent des entames de matchs similaires et quel type de coup est le plus intéressant à ce moment là. La figure 4.6 ci-dessous met en évidence les façons les plus classiques dont les matchs commencent, ainsi que l'évolution de la probabilité de victoire de l'équipe qui débute la manche. Cette figure montre également la quantité de données dans la base pour les scénarios les plus courants.

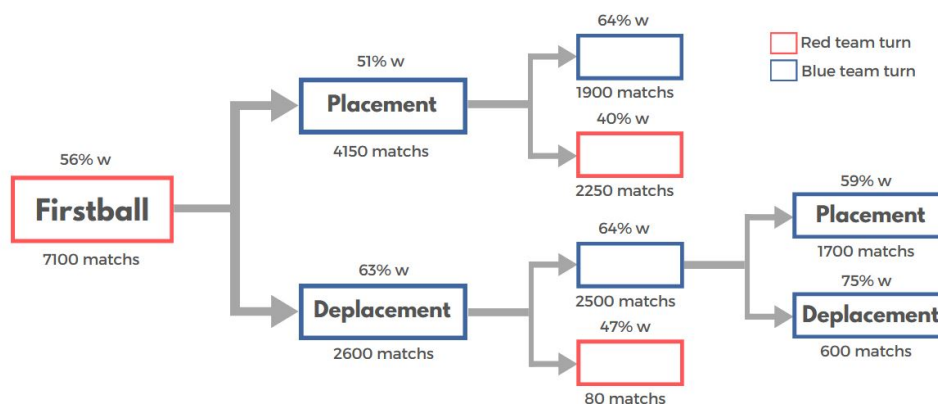


FIGURE 4.6 Ouvertures les plus courantes

On peut voir que malgré le nombre important de scénarios possibles lors d'un début de match (environ une centaine de combinaisons de coups possibles sur les trois premiers coups), l'énorme majorité des matchs commencent de manière similaire. L'ensemble de ces résultats nous montrent qu'en connaissant la qualité des coups, le type de coups ainsi que l'ordre de jeu des équipes, il est possible d'estimer l'équipe qui est la plus susceptible de gagner. De plus, la figure 4.6 nous montre qu'en dépit du nombre important de scénarios possibles pour un match de boccia, les scénarios observés en pratique sont souvent très similaires, ce qui laisse penser qu'avec les données à disposition, il est possible de trouver le coup optimal dans la majorité des situations rencontrées en pratique. La dernière figure met également en évidence une façon intéressante de représenter les données de match disponibles, sous forme d'un arbre donc chaque feuille contient l'équipe qui doit jouer le coup ainsi que le type de coups.

L'ensemble des résultats précédents ainsi que cette nouvelle manière de représenter le sport nous ont encouragés à penser qu'il était possible de créer un outil d'aide à la décision pertinent à l'aide des données disponibles.

Après réflexion et au vu des ressources disponibles, nous avons jugé que la solution susceptible d'apporter les meilleurs résultats serait de créer un outil basé sur l'algorithme expectimin-max, une variante de l'algorithme minimax capable d'intégrer une notion de probabilité. La section suivante explique en détail le fonctionnement de cet outil ainsi que les étapes de sa construction.

4.3 Développement d'un outil d'aide à la décision

4.3.1 Algorithme Minimax

Pour rappel, l'algorithme Minimax est une technique d'exploration de l'arbre de recherche utilisée dans les jeux à deux joueurs à somme nulle. L'objectif de l'algorithme Minimax est de trouver le meilleur mouvement pour le joueur maximisant son score tout en minimisant le score de l'adversaire.

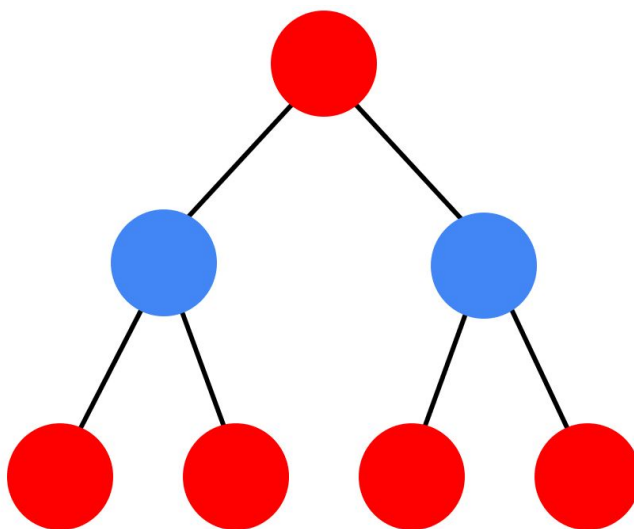


FIGURE 4.7 Représentation en arbre d'un jeu à deux joueurs de profondeur deux sur lequel pourrait être appliqué l'algorithme minimax

L'algorithme fonctionne en explorant l'arbre de jeu à partir de l'état actuel du jeu jusqu'à une profondeur prédéfinie. Il évalue ensuite chaque nœud de l'arbre en utilisant une fonction d'évaluation qui attribue une valeur à l'état du jeu. L'algorithme Minimax utilise ensuite cette évaluation pour calculer la valeur minimale ou maximale des nœuds à partir des feuilles de l'arbre en remontant vers la racine. Si c'est au tour du joueur maximisant, l'algorithme choisira le nœud avec la valeur maximale. Si c'est au tour du joueur minimisant, il choisira le nœud avec la valeur minimale. Cette sélection se poursuit jusqu'à ce que l'algorithme atteigne la profondeur de recherche maximale ou qu'il atteigne un état final. L'algorithme 1 ainsi que la figure 4.8 sur la page suivante décrivent respectivement le fonctionnement de l'algorithme minimax dans le cas général ainsi qu'un exemple l'utilisation de cet algorithme pour un jeu avec deux coups possibles par tour avec une profondeur de deux.

Algorithm 1 Pseudocode de l'algorithme minimax classique

```

function MINIMAX(node, depth, maximizingPlayer)
  if depth = 0 or node is a terminal node then
    return heuristic value of node
  end if
  if maximizingPlayer then
    value  $\leftarrow -\infty$ 
    for each child of node do
      value  $\leftarrow \mathbf{max}(\text{value}, \text{MINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1, \text{FALSE}))$ 
    end for
    return value
  else
    value  $\leftarrow +\infty$ 
    for each child of node do
      value  $\leftarrow \mathbf{min}(\text{value}, \text{MINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1, \text{TRUE}))$ 
    end for
    return value
  end if
end function

```

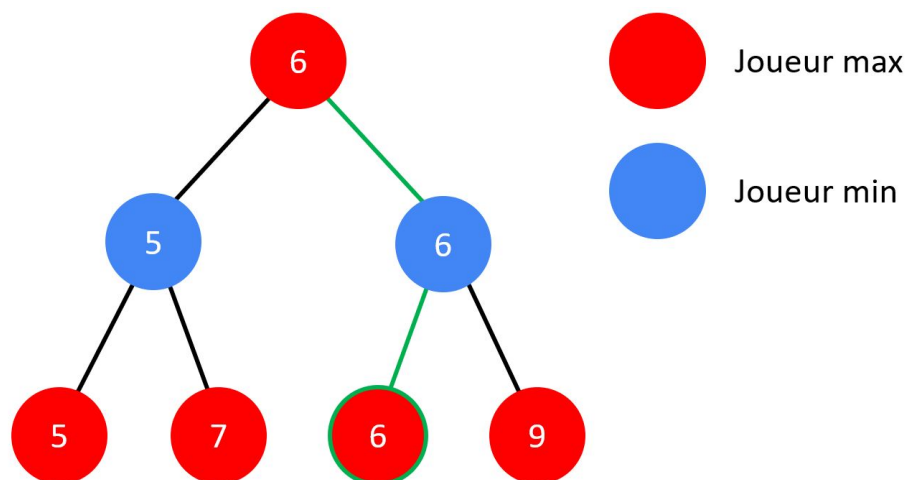


FIGURE 4.8 Exemple de l'utilisation de l'algorithme minimax sur un arbre d'un jeu à deux joueurs de profondeur deux avec deux coups possibles à chaque tour

Pour expliquer plus en détail l'exemple de la figure 4.8, le joueur bleu commence par choisir le coup qui va minimiser le score du rouge dans les deux cas possibles, c'est-à-dire les coups qui mènent à un score de 5 et 6. Ensuite, le joueur rouge va choisir le coup qui va maximiser son score en fonction des coups choisis par le joueur bleu, c'est-à-dire le coup qui mène à un score de 6.

Le but étant d’adapter l’algorithme Minimax pour pouvoir l’utiliser comme un outil d’aide à la décision lors d’un match de boccia, il a donc d’abord fallu développer une fonction d’évaluation adaptée qui attribue une valeur à chaque état de la partie. Pour cela, nous avons utilisé une fonction qui détermine le taux de victoire de l’équipe qui a commencé la manche en fonction de la suite de coups actuelle. En effet, une manche de boccia peut être décrite comme une suite de couleur (ordre de jeu des équipes) couplée à une suite de différents coups. Voici une définition plus formelle de la fonction d’évaluation utilisée :

Fonction d’évaluation

Soit $x_i = (s_{1i}, s_{2i})$ un match de boccia défini tel que s_{1i} représente la séquence de coups associée au match x_i et s_{2i} représente la séquence de couleurs associée au match x_i . Soit S_1 une séquence de coups et S_2 une séquence de couleurs. Soit $A = [x_1, \dots, x_n]$ l’ensemble des matchs du jeu de données qui incluent les séquences S_1 et S_2 .

$$\text{Soit } g : x_i \mapsto \begin{cases} 1 & \text{si le joueur commençant la manche la remporte} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On peut alors définir la fonction d’évaluation comme :

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i)$$

Après avoir développé cette fonction d’évaluation, il a fallu adapter les données pour s’assurer qu’on allait avoir des résultats pertinents en appliquant l’algorithme minimax. En effet, comme évoqué dans la partie sur l’analyse de données, il y a une sur-représentation de certains coups ainsi qu’une sous-représentation de certains autres (les placements représentent environ la moitié du jeu de données tandis que les slices représentent à peine 1%). Nous avons donc effectué la transformation de données évoquée dans la partie précédente et illustrée par la figure 5.1. Les déplacements et les poussées sont regroupés ensemble et nous avons regroupé tous les coups minoritaires ensemble sous la dénomination “autre” en estimant que si l’outil propose ce genre de coups, le joueur ou le coach serait capable de trouver le bon coup selon le contexte.

Finalement, une fois les données mises dans une forme exploitable et la fonction d'évaluation définie, il ne reste plus qu'à trouver une manière adéquate de gérer les noeuds terminaux. Les noeuds terminaux sont définis comme étant : soit comme un noeud représentant le dernier coup possible d'un match, soit comme un noeud ayant la profondeur donnée en entrée à l'algorithme ou soit comme un noeud pour lequel on ne possède pas assez de données pour l'étendre plus en restant pertinent. Le processus qui permet de déterminer si un noeud est terminal ou non est décrit dans l'algorithme 2. Pour chaque enfant d'un noeud, on vérifie s'il reste assez de matchs dans la base pour exploiter cet enfant de manière pertinente, cela est déterminé en vérifiant si le nombre de match associés à cet enfant est supérieur à un seuil limite qui a été défini à l'avance. Si au moins un des noeuds enfants est considéré viable, alors le noeud n'est pas considéré comme terminal. Si au contraire aucun des noeuds enfants est au-dessus du seuil limite, alors le noeud sera considéré comme terminal.

Algorithm 2 Pseudocode de la fonction qui détermine la terminalité d'un noeud

```

function IS TERMINAL(currentPosition, threshold)
  moves  $\leftarrow$  GET ALL MOVES(currentPosition)
  i  $\leftarrow$  0
  for each move of moves do
    if numberOfMatchInBase(move) > threshold then
      i  $\leftarrow$  i + 1
    end if
  end for
  return i == 0
end function

```

Une fois ces étapes préliminaires menées à bien, nous disposons de tous les outils pour mettre en place une première version de l'algorithme minimax adapté à la boccia. Cependant il ne faut pas oublier de prendre en compte le fait que la boccia est un sport où le même joueur peut jouer plusieurs fois de suite s'il ne récupère pas la main, donc plutôt que d'alterner maximisation et minimisation, nous allons plutôt chercher à vérifier quelle est la prochaine équipe à jouer et choisir en conséquence. La figure 4.9 sur la page suivante illustre ce principe en montrant une manière de représenter deux tours d'une partie de boccia en considérant qu'une équipe n'a que deux coups à sa disposition à chaque tour. Les deux branches du milieu ont été raccourcies par souci de clarté.

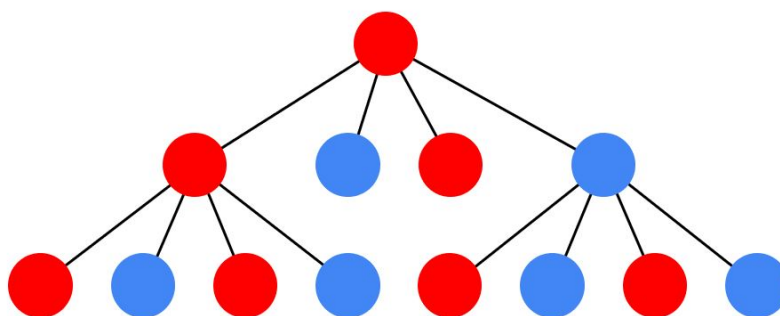


FIGURE 4.9 Représentation de deux tours d'une partie de bocce sous forme d'arbre en considérant qu'une équipe n'a que deux coups à sa disposition à chaque tour

Cela entraîne une légère adaptation de l'algorithme minimax présenté précédemment, plutôt que d'alterner entre joueurs maximisant et joueur minimisant, on va regarder la couleur de l'équipe qui a la main à chaque noeud exploré et exécuter prendre la décision en conséquence. L'algorithme 3 ci-dessous illustre ce changement en considérant que l'équipe rouge correspond au joueur maximisant. L'argument *currentPosition* contient une séquence de lancers et l'ordre des équipes correspondantes plus une couleur qui correspond à la couleur du lancer que l'on veut prédire.

Algorithm 3 Pseudocode de l'algorithme minimax classique adapté à la boccia

```

function MINIMAX(currentPosition, depth)
  if depth = 0 or node is a terminal node then
    return heuristic value of node
  end if
  childPositions  $\leftarrow$  GET ALL CHILD POSITIONS(currentPosition)
  if redTeamPlaying then
    value  $\leftarrow -\infty$ 
    for each child of childPositions do
      value  $\leftarrow \mathbf{max}(\text{value}, \text{MINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1))$ 
    end for
    return value
  else
    value  $\leftarrow +\infty$ 
    for each child of childPositions do
      value  $\leftarrow \mathbf{min}(\text{value}, \text{MINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1))$ 
    end for
    return value
  end if
end function

```

Nous sommes donc maintenant en mesure de développer un algorithme minimax fonctionnel adapté à la boccia avec une fonction d'évaluation adaptée à notre problématique, des données adaptées et formatées pour être plus facilement exploitables ainsi qu'une façon efficace de détecter les noeuds terminaux.

Nous avons néanmoins omis d'évoquer un problème majeur avec cette implémentions de l'algorithme minimax, il ne considère pas la notion de succès ou d'échec, il va seulement considérer le coup effectué sans prendre en compte le fait que les coups ne sont pas standardisés ce qui n'est absolument pas réaliste pour modéliser un sport. En effet, il arrive par exemple que les athlètes échouent leurs coups et cette version de l'algorithme est incapable d'exploiter cette information et donne donc des résultats qui ne sont pas pertinents.

Or, il est possible de quantifier approximativement cette notion de succès et d'échec à l'aide des notes attribuées aux coups par les coachs. Dans le but d'avoir un outil d'aide à la décision plus précis, nous avons décidé de prendre en compte cette notion de probabilité en utilisant une variante de l'algorithme minimax, l'algorithme expectiminimax qui va être présenté en détail dans la section suivante.

4.3.2 Algorithme Expectiminimax

L'algorithme Expectiminimax est une extension de l'algorithme Minimax qui est utilisé pour résoudre des jeux où les actions des joueurs adverses sont incertaines ou probabilistes. Cela signifie qu'au lieu d'avoir une décision déterministe pour chaque joueur, il y a des probabilités associées à chaque action possible. L'algorithme Expectiminimax étend donc le concept de l'algorithme Minimax en prenant en compte les probabilités des actions des adversaires. Voici comment il fonctionne :

1. **Construction de l'arbre de recherche** : L'arbre de recherche est construit en explorant toutes les possibilités de coups à partir de l'état actuel du jeu, tout comme dans l'algorithme minimax.
2. **Évaluation des nœuds feuilles** : Chaque nœud feuille est évalué de la même manière que dans l'algorithme minimax, en utilisant une fonction d'évaluation appropriée dont nous allons parler plus en détail par la suite
3. **Propagation des valeurs vers le haut** : La propagation des valeurs dans l'algorithme expectiminimax est similaire à celle de l'algorithme minimax. Les nœuds max choisissent le coup qui maximise la valeur, tandis que les nœuds min choisissent le coup qui minimise la valeur de l'adversaire.
4. **Prise en compte des événements aléatoires (nœuds chance)** : L'algorithme expectiminimax introduit une nouvelle étape pour prendre en compte les événements aléatoires. Lorsqu'un nœud chance est atteint, représentant un événement aléatoire, les valeurs des coups possibles sont pondérées en fonction de leurs probabilités respectives. La figure 4.10 ci-dessous illustre la manière dont les noeuds chance apparaissent dans l'arbre de recherche.

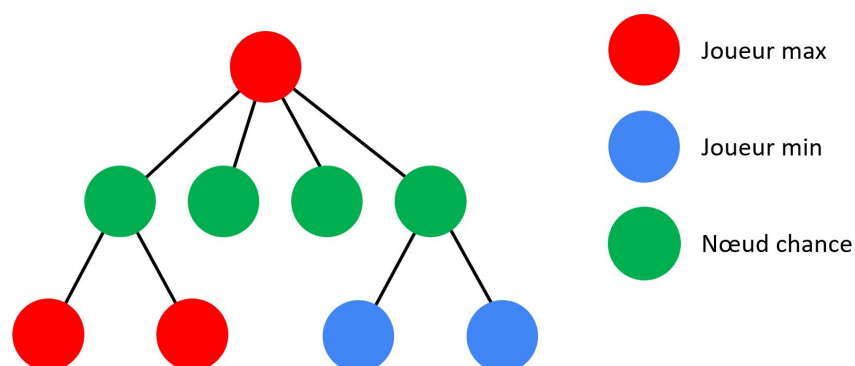


FIGURE 4.10 Illustration de la position des noeuds chances dans un arbre adapté à l'utilisation de l'algorithme expectiminimax

5. **Calcul des valeurs des nœuds chance :** Pour calculer les valeurs des nœuds chance, on effectue une moyenne pondérée des valeurs des coups possibles en utilisant les probabilités associées à chaque coup. Cela représente l'espérance des valeurs des nœuds chance. La figure 4.11 suivante illustre cette étape.

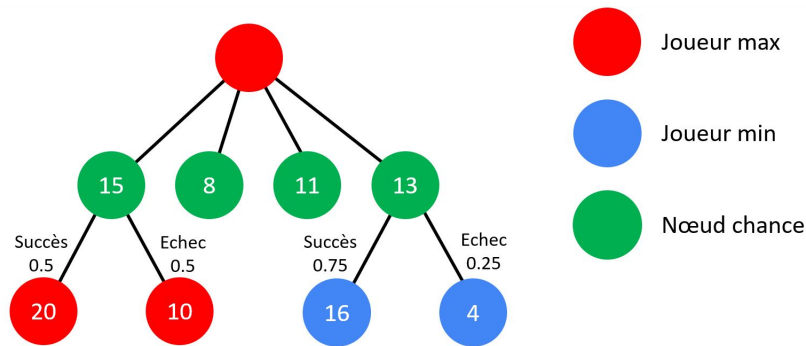


FIGURE 4.11 Une étape de calcul de l'algorithme Expectiminimax

6. **Prise en compte des valeurs des nœuds chance dans la propagation :** Lors de la propagation des valeurs vers le haut de l'arbre, les nœuds chance sont traités différemment. Les nœuds max sélectionnent le coup qui maximise la valeur des nœuds chance, tandis que les nœuds min sélectionnent le coup qui minimise la valeur des nœuds chance.
7. **Sélection du meilleur coup :** Une fois que l'arbre de recherche a été entièrement exploré et que les valeurs ont été propagées jusqu'à la racine, le joueur max choisit le coup qui maximise la valeur du nœud racine, tout comme dans l'algorithme minimax. Une étape complète de calcul est illustré par la figure 4.12 ci-dessous

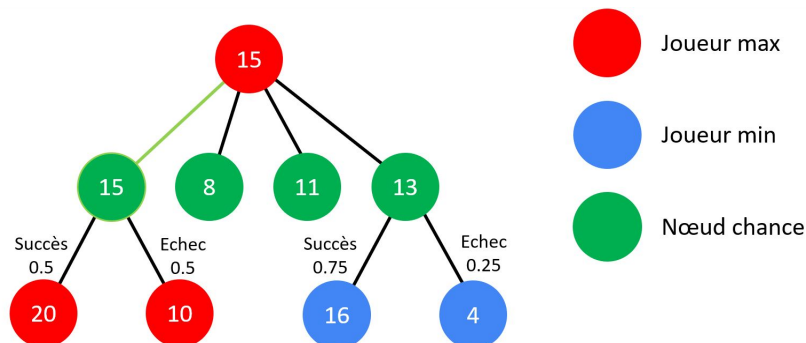


FIGURE 4.12 Une étape de calcul de l'algorithme Expectiminimax

En résumé, l'algorithme expectiminimax étend l'algorithme minimax en introduisant une étape supplémentaire pour prendre en compte les événements aléatoires. Il calcule l'espérance des valeurs des nœuds chance et les intègre dans la propagation des valeurs vers le haut de l'arbre. Cela permet de trouver la meilleure décision dans les jeux à information imparfaite ou stochastiques en prenant en compte à la fois les actions des adversaires et les événements aléatoires. L'algorithme 4 ci-dessous détaille le fonctionnement de expectiminimax dans un cas général.

Algorithm 4 Pseudocode de l'algorithme expectiminimax

```

function EXPECTIMINIMAX(node, depth, maximizingPlayer)
  if depth = 0 or node is a terminal node then
    return heuristic value of node
  end if
  if maximizingPlayer then
    value  $\leftarrow -\infty$ 
    for each child of node do
      value  $\leftarrow \mathbf{max}(\text{value}, \text{EXPECTIMINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1))$ 
    end for
    return value
  else if minimizingPlayer then
    value  $\leftarrow +\infty$ 
    for each child of node do
      value  $\leftarrow \mathbf{min}(\text{value}, \text{EXPECTIMINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1))$ 
    end for
    return value
  else if node is a chance node then
    value  $\leftarrow 0$ 
    for each child of node do
      value  $\leftarrow \text{values} + (\text{Probability}[\text{child}] \times \text{EXPECTIMINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1))$ 
    end for
    return value
  end if
end function

```

L'algorithme Expectiminimax permet donc de prendre en compte l'incertitude ou les actions probabilistes des joueurs adverses dans le processus de prise de décision. Cela le rend adapté aux jeux où les actions ne sont pas parfaitement prévisibles, et donc à la boccia. Nous allons maintenant voir comment nous avons adapté cet algorithme pour mettre en place un outil d'aide à la décision pour la boccia plus efficace que l'outil développé à l'aide de l'algorithme minimax présenté précédemment.

Au même titre que ce qu'on a vu dans la section précédente, il faut d'abord remplir quelques conditions avant de pouvoir mettre en place l'algorithme. Dans un premier temps, nous allons expliquer comment nous avons défini la notion de succès et d'échec d'un coup. Nous nous sommes basés sur la note qui est attribuée à chaque coup et qui va de 0 à 4. Si cette note est supérieure ou égale à un seuil défini (le plus souvent 3) à l'avance alors le coup est considéré comme réussi, sinon il est considéré comme un échec. En voici une définition formelle :

Succès d'un coup

Soit t un tir de boccia. Soit $T \in [0, 4]$ le seuil au delà duquel on considère un coup comme réussi.

$$\text{Soit } h : t \mapsto \begin{cases} 1 & \text{si } \text{Note}(t) \geq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

De même, il a fallu redéfinir notre fonction heuristique pour qu'elle prenne en compte cette notion de réussite d'un coup.

Fonction d'évaluation

Soit $x_i = (s_{1i}, s_{2i}, s_{3i})$ un match de boccia défini tel que s_{1i} représente la séquence de coups associée au match x_i , s_{2i} représente la séquence de couleurs associée au match x_i et s_{3i} représente la séquence de succès/échecs associée au match x_i . Soit S_1 une séquence de coups, S_2 une séquence de couleurs et S_3 une séquence de succès/échecs. Soit $A = [x_1, \dots, x_n]$ l'ensemble des matchs du jeu de données qui incluent les séquences S_1 , S_2 et S_3 .

$$\text{Soit } u : x_i \mapsto \begin{cases} 1 & \text{si le joueur commençant la manche la remporte} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On peut alors définir la fonction d'évaluation comme :

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u(x_i)$$

En plus de la fonction d'évaluation, il faut définir la notion de probabilité de succès d'un coup. En effet, lorsqu'un noeud chance est atteint par l'algorithme, les valeurs des coups possibles sont pondérées en fonction de leurs probabilités respectives. Voici comment nous avons défini cette probabilité de succès :

Probabilité de succès d'un coup

Cas général

Soit $x_i = (s_{1i}, s_{2i}, s_{3i})$ un match de boccia défini tel que s_{1i} représente la séquence de coups associée au match x_i , s_{2i} représente la séquence de couleurs associée au match x_i et s_{3i} représente la séquence de succès/échecs associée au match x_i . Soit S_1 une séquence de coups, S_2 une séquence de couleurs et S_3 une séquence de succès/échecs. Soit $A = [x_1, \dots, x_n]$ l'ensemble des matchs du jeu de données qui incluent les séquences S_1 , S_2 et S_3 . Soit c_k le dernier élément de S_1 et $T \in [0, 4]$ le seuil au delà duquel un coup est considéré comme un succès.

$$\text{Soit } v : x_i \mapsto \begin{cases} 1 & \text{si } \text{Note}(c_k) \geq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On peut alors définir la probabilité du succès d'un coup comme :

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v(x_i)$$

Il y a cependant une autre façon de définir cette notion de probabilité de succès d'un coup dans certains cas. Pour rappel, dans la partie précédente dans laquelle nous avons exposé les données à disposition, nous avons présenté des données relatives aux athlètes qui contiennent leurs statistiques sur les différents tirs possibles en boccia. Il est alors possible d'utiliser ces données pour définir une probabilité de succès inhérente à un athlète précis. Voici comment on peut alors définir cette probabilité :

Cas d'un athlète présent dans la base

Soit A l'ensemble des athlètes présent dans la base de données et T l'ensemble des coups possibles en boccia. Soit $(a, t) \in A \times T$. Soit $P_a : t \mapsto [0, 1]$ la fonction qui à un coup t effectué par un athlète a associe son taux de succès présent dans la base de données. On peut alors simplement définir la probabilité du succès d'un coup comme :

$$p = P_a(t)$$

Il est cependant impossible d'utiliser cette définition dans certains cas. On rappelle que certains coups ont été rassemblés ensemble pour rééquilibrer le jeu de données. Il est donc incohérent d'accorder une probabilité de réussite pour un athlète en particulier à cause de ça.

Nous sommes donc maintenant capables de mettre en place un algorithme expectiminimax fonctionnel adapté à la boccia avec une fonction d'évaluation qui a été adapté pour prendre en compte les incertitudes humaines ainsi qu'une notion de probabilité cohérente basée sur les performances moyennes des athlètes dans une situation donnée ou sur les performances personnelles d'un athlètes si les données sont disponibles. L'algorithme 5 ci-dessous montre la version adaptée à la boccia de l'algorithme expectiminimax que nous avons développé. L'argument *currentPosition* contient une séquence de lancers, une séquence de succès/échecs et l'ordre des équipes correspondantes plus une couleur qui correspond à la couleur du lancer que l'on veut prédire.

Algorithm 5 Pseudocode de l'algorithme expectiminimax adapté à la boccia

```

function EXPECTIMINIMAX(currentPosition, depth)
  if depth = 0 or node is a terminal node then
    return heuristic value of node
  end if
  childPositions  $\leftarrow$  GET ALL CHILD POSITIONS(currentPosition)
  if maximizingPlayer then
    value  $\leftarrow -\infty$ 
    for each child of childPositions do
      value  $\leftarrow \mathbf{max}(\text{value}, \text{EXPECTIMINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1))$ 
    end for
    return value
  else if minimizingPlayer then
    value  $\leftarrow +\infty$ 
    for each child of childPositions do
      value  $\leftarrow \mathbf{min}(\text{value}, \text{EXPECTIMINIMAX}(\text{child}, \text{depth} - 1))$ 
    end for
    return value
  else if node is a chance node then
    value  $\leftarrow (\text{Probability}[\text{childSuccess}] \times \text{EXPECTIMINIMAX}(\text{childSuccess}, \text{depth} - 1))$ 
    + ( $\text{Probability}[\text{childFailure}] \times \text{EXPECTIMINIMAX}(\text{childFailure}, \text{depth} - 1)$ )
    return value
  end if
end function

```

La façon de gérer les noeuds terminaux décrite dans l'algorithme 2 est toujours viable pour l'algorithme expectiminimax.

Pour résumer ce que nous avons fait dans cette partie, nous avons développé un outil de prédiction du meilleur lancer dans une situation donnée pour la Boccia basé sur l'algorithme expectiminimax. On rappelle que pour des raisons de manque et déséquilibre des données, nous

avons regroupé l'ensemble des lancers dans trois grandes catégories : Placement, Déplacement et Autre. L'outil prend en entrée une séquence de lancers, une séquence de succès/échec et une séquence d'équipes plus la couleur de la prochaine équipe à jouer pour laquelle on va prédire le coup. En sortie, l'outil va retourner le coup prédit, le nombre de manches dans la base qui incluent cette séquence de coups, le taux de victoire de l'équipe qui commence la manche si ce lancer est effectué, un intervalle de confiance à 95% de ce taux de victoire et le taux de succès de ce lancer dans cette situation. Nous allons maintenant présenter un exemple pour clarifier la forme des résultats.

Exemple de résultats

Nous allons prendre pour entrée : la séquence de couleur [Rouge,Bleu] la séquence de coups [Première balle] et la séquence de réussite [Succès]. Cela signifie qu'on va chercher le meilleur lancer pour l'équipe bleue dans la situation où l'équipe rouge a réussi sa première balle. Le seuil de réussite d'un coup est fixé à 3.

Les résultats sont les suivants : le lancer suggéré est un déplacement, le taux de victoire pour l'équipe rouge si ce coup est effectué est de 63% avec un intervalle de confiance $[0.61, 0.65]$ et la probabilité de succès de ce coup est de 61%

Cet exemple conclut cette partie dédiée à la méthodologie, la figure 4.13 récapitule l'ensemble des points importants abordés dans cette section.

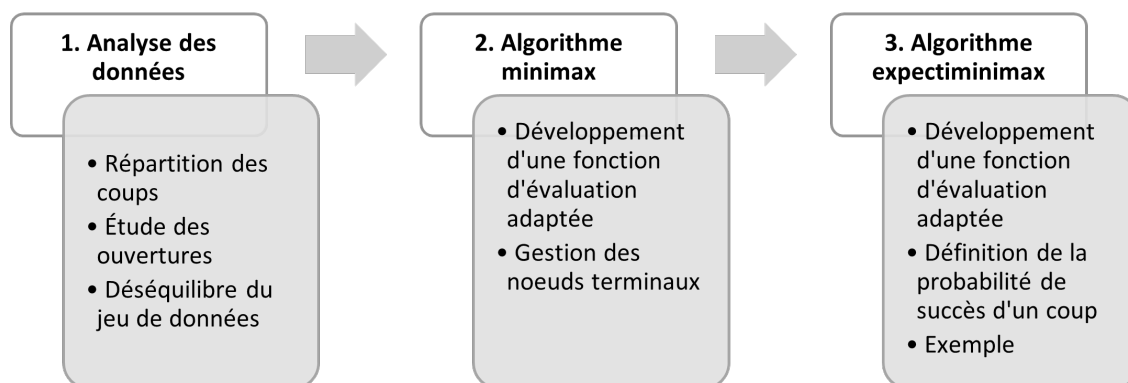


FIGURE 4.13 Diagramme récapitulatif de la méthodologie

Maintenant que nous avons expliqué le fonctionnement de cet outil, nous allons pouvoir le tester pour juger de son efficacité, la partie suivante va présenter les résultats obtenus à l'aide de cet outil.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

Après avoir décrit toutes les étapes du développement de notre outil d'aide à la décision, nous allons maintenant expliquer comment nous l'avons testé, afin de mettre en évidence les résultats obtenus puis analyser ces résultats et faire un bilan de la performance de l'outil.

5.1 Protocole expérimental

Dans cette section, nous allons expliquer en détail comment nous avons choisi de tester notre outil de prédiction. Dans un premier temps, nous allons présenter les objectifs de ces tests.

Objectifs

Le but est ici de tester l'outil que nous avons développé dans des conditions réelles. Nous avons cherché à étudier la pertinence des prédictions effectuées par notre outil en les comparant avec les décisions qu'auraient pris un coach ou un joueur professionnel dans une même situation. Nous avons également cherché à savoir si les prédictions offraient des possibilités qui n'étaient pas envisagées dans certaines situations ou si les prédictions concordaient avec les décisions prises lors de matchs réels.

Maintenant que nous avons exposé nos objectifs principaux, nous allons brièvement décrire l'outil que nous avons testé ainsi que son fonctionnement.

Description de l'outil

Nous avons développé un outil qui permet de suggérer un coup dans une situation donnée lors d'un match de boccia. L'outil prend en entrée une séquence de couleurs (ordre selon lequel les équipes ont joué), une séquence de lancers, une séquence de succès/échecs, une profondeur et le nom des athlètes en train de jouer pour une certaine version. Il parcourt les données disponibles selon le principe de l'algorithme expectiminimax jusqu'à la profondeur souhaitée ou jusqu'à ce qu'il n'y est plus assez de données puis il suggère le meilleur coup possible dans cette situation en se basant sur la probabilité de victoire des équipes dans ces situations et en prenant en compte la difficulté des différents lancers. Les différentes étapes de développement ainsi que le fonctionnement détaillé de l'outil peuvent être retrouvés à la section 4.3.

Après avoir défini les objectifs et présenté l'outil que nous allons tester, nous pouvons maintenant présenter la façon dont nous allons tester cet outil.

Procédure de test

Pour pouvoir tester l'outil que nous avons développé, nous avons eu la chance d'être accompagnés par l'entraîneur en chef de l'équipe de Boccia Canada, ce qui nous a permis d'avoir l'avis d'un expert quant aux suggestions que notre outil proposait. Pour tester notre outil, nous avons eu accès à des enregistrements vidéos de match de boccia professionnels grâce à Boccia Canada. Nous avons utilisé six vidéos différentes de matchs de tournoi au plus haut niveau de la boccia professionnel, soit 24 manches en tout pour un total de 94 prédictions. Nous avons essayé de représenter toutes les catégories avec un match de BC1, un match de BC2, deux matchs de BC3 et deux matchs de BC4. Nous avons alors visionné ces matchs et avant chaque lancer, nous avons utilisé notre outil pour obtenir une suggestion de lancer et nous avons ensuite demandé à l'entraîneur en chef quel lancer serait le plus pertinent dans cette situation et nous avons comparé les deux. Pour déterminer la pertinence de nos suggestions, nous avons développé une échelle de notation allant de 1 à 4 que nous allons détailler ci-dessous :

- **Score de 4 :** La suggestion est identique à ce qu'a proposé l'entraîneur.
- **Score de 3 :** La suggestion est différente de celle qu'a proposé l'entraîneur, mais la suggestion reste cohérente et est jugée pertinente par l'entraîneur.
- **Score de 2 :** La suggestion est différente de celle qu'a proposé l'entraîneur, mais la suggestion reste cohérente mais est jugée moyenne par l'entraîneur.
- **Score de 1 :** La suggestion est différente de celle qu'a proposé l'entraîneur, la suggestion est incohérente et est jugée mauvaise par l'entraîneur.

Nous avons eu la chance d'analyser trois matchs complets avec l'entraîneur de Boccia Canada, soit douze manches, puis nous avons analysé trois matchs complets en autonomie après une formation de l'entraîneur pour mieux comprendre la qualité d'un lancer. Pour ces trois derniers matchs, nous déterminerons nous même la note grâce à une formation donnée par un entraîneur, et le lancer prédit sera comparé au lancer effectué dans le match. Pour l'ensemble des tests, nous avons fixé la profondeur à trois. Pour pouvoir tester l'outil en profondeur, nous avons utilisé des matchs classiques, mais aussi des matchs dans lesquels des situations peu usuelles apparaissent. Nous n'avons cependant pas pu tester la version de l'outil prenant en compte l'athlète en train de performer car comme nous l'avons évoqué précédemment, les données touchant aux athlètes ont été anonymisées pour des raisons d'éthiques.

Maintenant que nous avons expliqué la manière dont nous avons testé notre outil, nous allons dans la prochaine section présenter les résultats obtenus à l'aide de ces tests.

5.2 Résultats

Dans cette section, nous allons présenter les résultats des tests que nous avons effectués pour déterminer l'efficacité de l'outil développé. Les tests portent sur six matchs différents de niveau professionnel, les trois premiers matchs ont été analysés avec l'entraîneur en chef de Boccia Canada et les trois derniers en autonomie.

Match 1-1				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Rouge			
2	Bleue	Placement	4	Placement
3	Rouge	Placement	1	Déplacement
4	Rouge	Placement	4	Placement
5	Bleue	Placement	2	Déplacement
Match 1-2				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Bleue			
2	Rouge	Placement	3	Déplacement
3	Bleue	Déplacement	3	Placement
4	Rouge	Placement	3	Déplacement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 1-3				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Rouge			
2	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
3	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
4	Bleue	Placement	4	Placement
5	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
Match 1-4				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Bleue			
2	Rouge	Placement	4	Placement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Rouge	Placement	4	Placement
5	Rouge	Placement	4	Placement

TABLEAU 5.1 Résultat des tests pour le premier match dans la catégorie BC3

Match 2-1				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Rouge			
2	Bleue	Placement	4	Placement
3	Rouge	Placement	1	Déplacement
4	Rouge	Placement	4	Placement
5	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
Match 2-2				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Bleue			
2	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Bleue	Placement	1	Déplacement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 2-3				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Rouge			
2	Bleue	Placement	3	Déplacement
3	Bleue	Placement	4	Placement
4	Rouge	Placement	4	Placement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 2-4				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Bleue			
2	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
5	Bleue	Placement	4	Placement

TABLEAU 5.2 Résultat des tests pour le second match dans la catégorie BC4

Match 3-1				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Rouge			
2	Bleue	Placement	1	Déplacement
3	Rouge	Placement	4	Placement
Match 3-2				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Bleue			
2	Rouge	Placement	4	Placement
3	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
4	Bleue	Placement	4	Placement
5	Bleue	Placement	4	Placement
Match 3-3				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Rouge			
2	Bleue	Placement	4	Placement
3	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
4	Rouge	Autre	3	Déplacement
5	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
Match 3-4				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note entraîneur	Coup entraîneur
1	Bleue			
2	Rouge	Placement	4	Placement
3	Bleue	Déplacement	2	Placement
4	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
5	Bleue	Déplacement	4	Déplacement

TABLEAU 5.3 Résultat des tests pour le troisième match dans la catégorie BC3

Match 4-1				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Rouge			
2	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
3	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
4	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
5	Rouge	Placement	1	Déplacement
Match 4-2				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Bleue			
2	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
5	Bleue	Placement	4	Placement
Match 4-3				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Rouge			
2	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
3	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
4	Bleue	Placement	4	Placement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 4-4				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Bleue			
2	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Bleue	Placement	4	Placement
5	Rouge	Placement	2	Déplacement

TABLEAU 5.4 Résultat des tests pour le quatrième match dans la catégorie BC4

Match 5-1				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Rouge			
2	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
3	Bleue	Placement	4	Placement
4	Bleue	Placement	3	Déplacement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 5-2				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Bleue			
2	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Bleue	Placement	4	Placement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 5-3				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Rouge			
2	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
3	Bleue	Placement	4	Placement
4	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 5-4				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Bleu			
2	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
5	Bleue	Placement	4	Placement

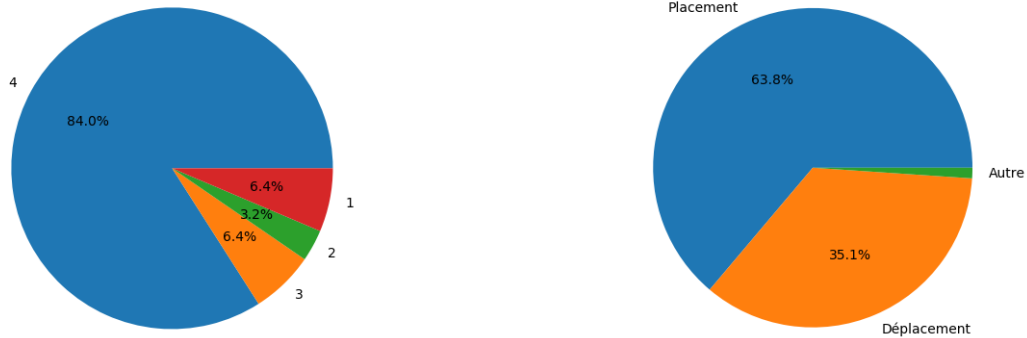
TABLEAU 5.5 Résultat des tests pour le cinquième match dans la catégorie BC3

Match 6-1				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Rouge			
2	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
3	Bleue	Placement	4	Placement
4	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 6-2				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Bleue			
2	Rouge	Déplacement	4	Déplacement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Bleue	Placement	4	Placement
5	Rouge	Placement	4	Placement
Match 6-3				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Rouge			
2	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
3	Bleue	Déplacement	4	Déplacement
4	Bleue	Placement	4	Placement
5	Rouge	Placement	1	Déplacement
Match 6-4				
Numéro du coup	Équipe	Coup prédit	Note estimée	Coup effectué
1	Bleu			
2	Rouge	Placement	4	Placement
3	Rouge	Placement	4	Placement
4	Rouge	Placement	4	Placement
5	Rouge	Placement	4	Placement

TABLEAU 5.6 Résultat des tests pour le sixième match dans la catégorie BC1

Maintenant que nous avons présenté l'ensemble des résultats obtenus, nous allons effectuer une synthèse de ceux-ci, en particulier nous allons détailler la répartition des notes des prédictions ainsi que des lancers suggérés sur l'ensemble des tests.

Synthèse des résultats



(a) Répartition des notes des prédictions sur l'ensemble des tests

(b) Répartition des lancers suggérés sur l'ensemble des tests

FIGURE 5.1 Synthèse des résultats

Note	Quantité
4	79
3	6
2	3
1	6
Total	94

TABLEAU 5.7 Détail de la répartition des notes

Lancers	Quantité
Placement	60
Déplacement	33
Autre	1
Total	94

TABLEAU 5.8 Détail de la répartition des lancers

Après avoir rassemblé l'ensemble des résultats sous une forme plus concise et exploitable, nous allons pouvoir essayer de leur donner du sens, c'est le thème de la prochaine section.

5.3 Analyse des résultats

Maintenant que nous avons présenté les résultats, nous allons les analyser et essayer de les interpréter.

Analyse et interprétation des résultats

Dans un premier temps, nous pouvons constater que la grande majorité du temps l'outil propose un lancer conforme à la recommandation de l'entraîneur et il propose un coup pertinent environ 90% du temps. Cela nous laisse avec environ 10% des cas pour lesquels l'outil propose un coup moyen ou incohérent. Ces 10% peuvent s'expliquer par le fait que nous n'avons aucune information sur la position des balles sur le terrain pendant le match, ce qui fait que l'outil propose des coups incohérents lorsqu'on peut voir le terrain, mais qui paraissent cohérents lorsqu'on regarde uniquement les informations à disposition.

Nous pouvons également observer que pendant l'ensemble des tests, notre outil a suggéré qu'un seul lancer de type 'Autre' et un coup de ce type n'a jamais été suggéré par l'entraîneur ou effectué pendant les matchs observés. Cela peut s'expliquer de plusieurs manières, premièrement c'est la catégorie de lancers la moins représentée dans la base, elle est donc la première à s'amenuiser à mesure que l'on s'enfonce dans la base. De plus, les lancers de la catégorie 'Autre' correspondent souvent à des lancers plus spécifiques qui sont plus fréquemment utilisés en fin de manche lorsqu'il est beaucoup plus difficile voire impossible de renverser la situation avec des placements ou des déplacements, par exemple quand il y a un amas de balle important autour du cochonnet. Comme la quantité de données ne nous permet pas d'atteindre ces situations ou l'utilisation de ce genre de coup est propice avec notre outil, il est normal qu'il apparaisse peu voire pas dans les suggestions.

Pour terminer, nous allons donner l'avis de l'entraîneur en chef de Boccia Canada sur les résultats de l'outil qui est : les résultats sont intéressants et pertinents même si leurs manques de précision les rends parfois difficiles à exploiter, et au-delà des résultats ce projet a également aidé à mettre en lumière la complexité et la richesse d'un sport qui pourrait paraître simple aux premiers abords.

Maintenant que nous avons analysé et interprété nos résultats, nous allons pouvoir parler des limites de notre approche, en particulier du manque de données et de la manière dont cela a affecté nos résultats.

Limitation de l'approche

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le manque de données a été un obstacle majeur lors de ce projet. C'est à cause de ce problème que nous ne pouvons pas effectuer de prédiction à une profondeur supérieure à cinq. Nous allons maintenant tenter d'illustrer et d'expliquer ce propos grâce aux trois arbres suivants qui représentent les différentes séquences de coups présent dans la base de données sans prendre en compte l'ordre de jeu des équipes et le succès ou l'échec d'un coup (on rappelle que l'ensemble des lancers a été divisé en trois catégories : Placement, Déplacement et Autre). Un coup qui apparaît dans l'arbre signifie que la présence de ce coup dans cette séquence de coup précise apparaît au moins autant de fois qu'un seuil que nous avons défini à l'avance. Ces arbres sont donc construits sur le même principe que la condition d'arrêt des noeuds terminaux que nous avons implémenté pour le développement de notre outil. Nous pouvons voir si dessous les figures 5.2 et 5.3 pour un seuil de respectivement 50 et 20.

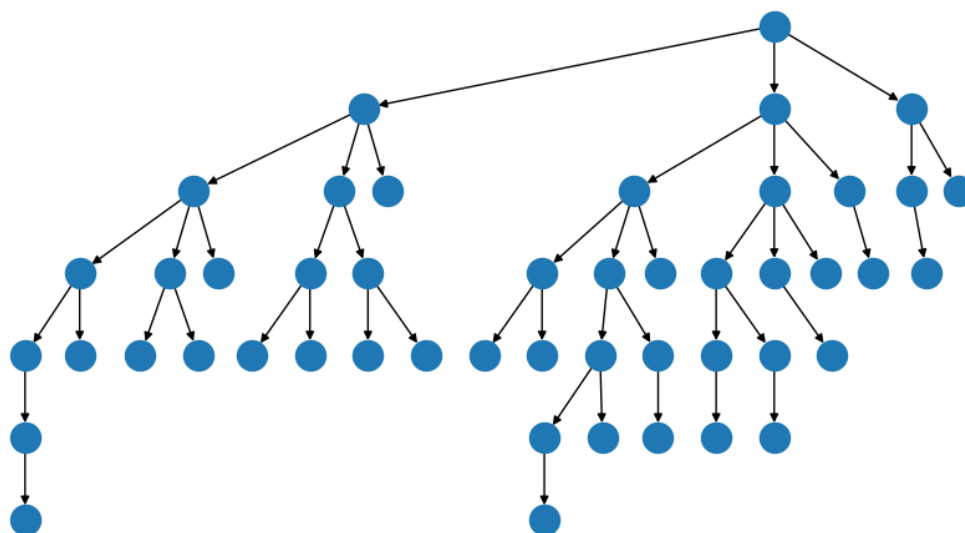


FIGURE 5.2 Arbre représentant l'ensemble des séquences de coups apparaissant au moins 50 fois dans la base de données

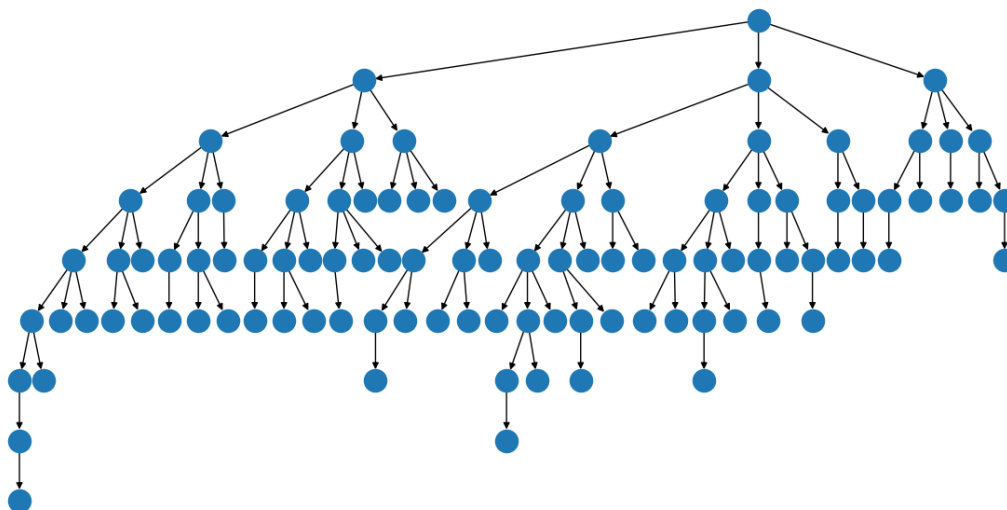


FIGURE 5.3 Arbre représentant l'ensemble des séquences de coups apparaissant au moins 20 fois dans la base de données

On peut constater que pour même pour un seuil de 20, le manque de données se fait ressentir très rapidement et on a très peu d'information au delà d'une profondeur de six. Le manque de données nous empêche également d'adapter notre outil en fonction de la catégorie. En effet, si le jeu de données est déjà peu fourni lorsqu'il est complet, l'utilisation de l'outil devient impossible si on se limite à une seule catégorie, la figure 5.4 suivante met en évidence ce propos en montrant l'arbre obtenu pour les données de la catégorie BC3 pour un seuil de 20.

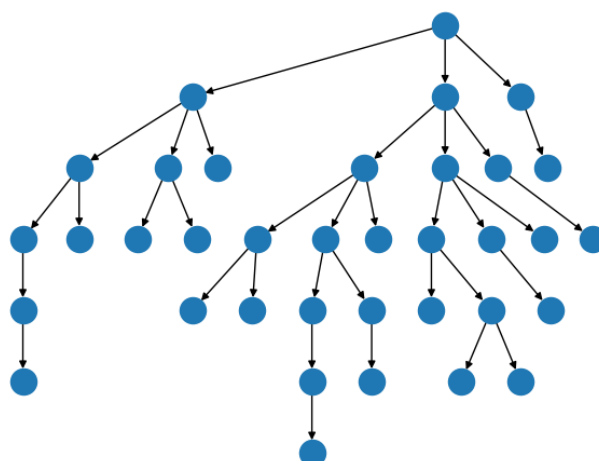


FIGURE 5.4 Arbre représentant l'ensemble des séquences de coups apparaissant au moins 20 fois dans la base de données pour la catégorie BC3

Ce manque de données est encore plus présent lors de l'utilisation de l'algorithme expectiminimax car on ajoute un filtre succès/échec en plus qui va encore diviser nos données. La figure 5.5 ci-dessous illustre la perte de données pour une étape de calcul de l'algorithme expectiminimax, en supposant pour simplifier que les données sont équiréparties dans la base.

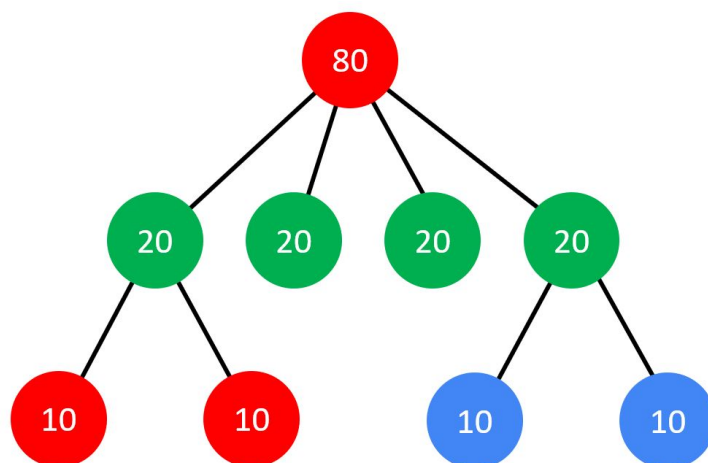


FIGURE 5.5 Illustration de la division des données pour une étape de fonctionnement de l'algorithme expectiminimax

On peut voir que l'ensemble des données est divisé par un facteur 8 à chaque étape de calcul, il faudrait donc une quantité beaucoup plus élevée de données pour faire fonctionner l'algorithme jusqu'à la fin d'une manche.

De plus, la répartition des données dans la base fait que lorsqu'on rencontre une situation peu courante, on est rapidement à court de données même lorsqu'on se trouve au début d'une manche. Un exemple se trouve dans le tableau 5.3 pour la première manche du match trois. L'équipe bleue effectue un déplacement lors du second coup et arrive à reprendre la main ce qui est très rare (souvent on fait un déplacement pour ouvrir le jeu puis un placement pour récupérer le point). Cela rejoint ce qu'on avait mis en évidence lorsque nous avons évoqué les ouvertures dans la section 4.2, qui est illustré par la figure 4.6.

Maintenant que nous avons présenté l'ensemble de notre approche et nos résultats, nous allons pouvoir conclure ce mémoire.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Nous avons présenté l'intégralité de notre étude sur la performance en boccia avec pour espoir que cette première publication soit suivie par de nombreuses autres. Nous allons maintenant faire une synthèse succincte des travaux présentés dans ce mémoire puis nous allons discuter les limitations de ce que nous avons développé ainsi que les pistes d'amélioration pour la suite.

6.1 Synthèse des travaux

Dans le but d'en apprendre plus sur le sport qu'est la boccia, l'Institut National du sport du Québec et Boccia Canada ont récolté une quantité importante de données provenant de matchs de boccia professionnels, puis ils ont instigué ce projet en partenariat avec l'école Polytechnique de Montréal, projet ayant pour objectif d'exploiter ces données afin d'améliorer l'état actuel de la recherche sur la performance en boccia qui est présentement très lacunaire.

Après avoir pris soin de bien comprendre le sport complexe qu'est la boccia en détail, nous avons commencé par nettoyer les données en supprimant ou modifiant les données incohérentes et erronées. Ensuite, nous avons réorganisé notre jeu de données en choisissant de le voir comme un ensemble de manches plutôt que comme un ensemble de matchs. Après cette phase de prétraitement des données, nous étions prêts à entamer une phase d'analyse des données.

Une fois en possession de données exploitables, nous avons dans un premier temps effectué quelques analyses dans le but d'en apprendre un peu plus sur notre jeu de données mais aussi sur la boccia. Nous avons d'abord mis en évidence la proportion d'occurrences des différents lancers lors des matchs, puis nous avons cherché à montrer comment évoluait cette proportion en fonction des différentes catégories de boccia. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux ouvertures de matchs, notamment à l'impact de la première balle sur une manche, puis nous avons mis en évidence les suites de coups les plus courantes lors des entames de matchs. Les techniques utilisées lors de ces analyses, en particulier le fait de représenter un match de boccia comme un arbre, nous ont inspirés à nous tourner vers la théorie des jeux, et à développer un algorithme de type expectiminimax pour prédire le meilleur lancer possible dans un scénario donné.

L'algorithme expectiminimax est une variante de l'algorithme minimax, qui sont des algorithmes qui cherchent à passer en revue toutes les possibilités pour un nombre limité de coups

et à leur assigner une valeur qui prend en compte les bénéfices pour le joueur et pour son adversaire. Le meilleur choix est alors celui qui minimise les pertes du joueur tout en supposant que l'adversaire cherche au contraire à les maximiser. Après avoir expliqué en détail le principe de fonctionnement de ces deux algorithmes, nous les avons mis en place pour créer un outil d'aide à la décision pour un match de boccia. Il a fallu adapter ces algorithmes pour pouvoir les faire fonctionner dans notre cas. Tout d'abord, nous avons créé une fonction heuristique permettant d'évaluer une position en boccia. Nous avons basé le fonctionnement de cette fonction sur le taux de victoire de l'équipe qui débute la manche dans la position actuelle. En raison du manque de données, il a également fallu créer une condition d'arrêt pour que l'algorithme n'explore pas les branches où le nombre de matchs est trop faible. Finalement, nous avons introduit la notion de probabilité de réussite d'un coup, dernier élément nécessaire à la mise en place de l'algorithme expectiminimax en nous basant soit sur la moyenne de réussite d'un coup dans une situation donnée, soit sur les performances d'un athlète en particulier si l'athlète est présent dans la base de données. Après ces différentes étapes, nous avons développé une version fonctionnelle de l'algorithme adapté à la boccia.

Après une évaluation de l'outil sur six matchs réels avec l'entraîneur en chef de Boccia Canada, les résultats obtenus ont été jugés comme pertinents, mais le manque de précision fait qu'ils sont parfois difficiles à exploiter. Nous allons voir dans la section suivante la raison du manque de précision de ces résultats.

6.2 Limitations de la solution proposée

Une des limites que nous avons rencontré est liée à la manière dont nous avons implémenté l'algorithme expectiminimax. En effet, la raison pour laquelle nous avons choisi cet algorithme est qu'il permet d'intégrer une notion de probabilité, ce qui nous a permis d'introduire le concept de succès et d'échec d'un lancer. Cependant, il est un peu réducteur de classer la qualité d'un coup dans seulement deux catégories, par exemple, un lancer avec une note de 2.5 n'est ni un excellent coup ni un raté. Nous pourrions théoriquement ajouter une nouvelle issue dans notre outil mais cela réduirait encore une quantité de données déjà très faible.

On peut également évoquer le fait qu'il n'a pas été possible de tester la version de l'outil qui prend en compte les performances personnelles des athlètes. Pour des raisons éthiques, les données liées aux athlètes ont été anonymisées, il n'a donc pas été possible d'y avoir accès lors des tests. C'est cette version de l'outil qui aurait pu donner les résultats les plus pertinents, car basés sur les forces et les faiblesses des athlètes en train de performer.

Comme nous l'avons évoqué dans la section précédente, les résultats obtenus manquent parfois

de précision, cela est dû à deux raisons principales : La quantité de données est clairement insuffisante, notre outil d'aide à la décision parcourt l'ensemble des données arrangé comme un arbre dont la base est la première balle commune à tous les matchs de boccia, à mesure que l'on s'enfonce plus profondément dans l'arbre pour explorer des situations spécifiques, la quantité de données diminue jusqu'à être insuffisante pour donner des résultats pertinents. Comme nous l'avons vu dans la partie dédiée aux résultats, l'outil devient impossible à utiliser au-delà de cinq ou six coups de profondeur, et ce, même avec la transformation que nous avons effectuée sur les données, que nous avons détaillé dans la partie sur l'analyse de données, qui permet d'augmenter le volume des données les plus minoritaires en perdant une partie de l'information. Il serait très intéressant de tester à nouveau l'outil lorsqu'une quantité plus importante de données sera disponible. Cependant, nous avons également vu dans la partie précédente que lorsqu'un cas de situation rare apparaît, l'outil est très vite dépassé et on peut penser que même en accumulant plus de données, il va rester des situations qui restent très rares en pratique pour lesquels l'outil va rarement être capable de donner des solutions pertinentes.

Les données ne sont pas assez complètes, l'absence d'information sur la position des balles sur le terrain dans les caractéristiques des matchs fait qu'on ne peut pas prendre en compte la disposition du terrain pour prendre une décision. Cela amène parfois l'outil développé à faire des erreurs grossières comme proposer un coup qui serait intéressant en théorie dans la situation mais qui est clairement impossible en pratique au vu de la disposition des balles sur le terrain. De plus, l'ajout de la position des balles sur le terrain comme caractéristique des matchs pourrait ouvrir la porte à l'utilisation d'autres techniques pour prédire le meilleur coup comme nous allons le voir dans la prochaine et dernière section.

6.3 Améliorations futures

Finalement, nous allons explorer les perspectives d'avenir pour ce projet et un peu plus généralement pour le domaine de la performance en boccia. Comme nous l'avons évoqué dans la section précédente, le manque de données a été limitant dans ce projet, une première piste d'améliorer est donc de simplement attendre d'accumuler une quantité plus importante de données, ce qui permettrait à l'outil d'effectuer des prédictions plus précises et à une profondeur plus élevée. Une autre idée pourrait être de générer artificiellement des données basées sur les données actuelles pour élargir le jeu de données et ainsi obtenir des prédictions plus pertinentes.

Une autre piste d'amélioration serait de pallier la faiblesse des données que nous avons mentionnés précédemment, l'absence de la position des balles sur le terrain comme caractéristique

des matchs. Cet ajout permettrait notamment de pouvoir utiliser des techniques d'apprentissage automatiques pour reconnaître des schémas de jeux et ainsi obtenir des résultats en fonction de l'état actuel du jeu plutôt que les différents coups qui ont été joués. De plus, cela pourrait grandement accélérer le processus de collecte et également d'éviter les erreurs humaines que les coachs commettent parfois en entrant les données dans la base. Cependant, certaines caractéristiques des matchs, notamment la qualité d'un coup, peuvent être difficiles à juger par une machine.

Une manière de résoudre les deux problèmes susmentionnés pourrait être d'automatiser le processus de collecte de données. En effet, à l'aide d'un outil basé sur la vision par ordinateur, il devrait être possible de récolter des données de matchs à partir de vidéo ou d'image de match, et ces données pourraient facilement inclure la position des balles sur le terrain.

Une dernière idée d'amélioration pourrait être de s'inspirer de certaines publications scientifiques sur le curling que nous avons mentionné dans la revue de littérature et de développer un simulateur très réaliste de boccia, puis de développer des agents basés sur de l'apprentissage par renforcement qui pourraient jouer l'un contre l'autre et qui pourraient ainsi découvrir de nouvelles stratégies qui pourraient être applicable en réalité par des athlètes.

RÉFÉRENCES

- [1] D. T.-P. Fong *et al.*, “Upper limb muscle fatigue during prolonged boccia games with underarm throwing technique,” *Heliyon*, vol. 11, n°. 4, nov. 2012. [En ligne]. Disponible : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23259234/>
- [2] d. B. M *et al.*, “Geometrical adaptation in ulna and radius of cerebral palsy patients : Measures and consequences,” *Clinical Biomechanics*, vol. 29, n°. 4, avr. 2014. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2014.01.003>
- [3] T. Ichiba *et al.*, “Relationship between pulmonary function, throw distance, and psychological competitive ability of elite highly trained japanese boccia players via correlation analysis,” *Heliyon*, vol. 6, n°. 3, mars 2020. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03581>
- [4] N. M. Abbas. (2019) Nba data analytics : Changing the game. [En ligne]. Disponible : <https://towardsdatascience.com/nba-data-analytics-changing-the-game-a9ad59d1f116>
- [5] Petra. (2020) How data analytics is revolutionizing the nba. [En ligne]. Disponible : <https://d3.harvard.edu/platform-digit/submission/how-data-analytics-is-revolutionizing-the-nba/>
- [6] J. Mizels, B. Erickson et P. Chalmers, “Current state of data and analytics research in baseball.” *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, vol. 15, n°. 4, p. 1–8, août 2022. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/360268757_Current_State_of_Data_and_Analytics_Research_in_Baseball
- [7] A. Wyner. (2019) Changing the game : How data analytics is upending baseball. [En ligne]. Disponible : <https://knowledge.wharton.upenn.edu/podcast/knowledge-at-wharton-podcast/analytics-in-baseball/>
- [8] F. Hammes *et al.*, “Artificial intelligence in elite sports—a narrative review of success stories and challenges,” *Frontiers in Sports and Active Living*, vol. 4, juill. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspor.2022.861466/full>
- [9] F. Bieuzen *et al.*, “Monitoring variables influence on random forest models to forecast injuries in short-track speed skating,” *Frontiers in Sports and Active Living*, vol. 4, juill. 2022. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/361982912_Monitoring_Variables_Influence_on_Random_Forest_Models_to_Forecast_Injuries_in_Short-Track_Speed_Skating
- [10] J. G. Claudino *et al.*, “Current approaches to the use of artificial intelligence for injury risk assessment and performance prediction in team sports : a systematic

- review,” *Sports Medicine - Open*, vol. 5, n°. 28, juill. 2019. [En ligne]. Disponible : <https://sportsmedicine-open.springeropen.com/articles/10.1186/s40798-019-0202-3>
- [11] P. Bumgeun *et al.*, “Kick-motion training with dqn in ai soccer environment,” déc. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2212.00389>
- [12] K. Rangasamy *et al.*, “Deep learning in sport video analysis : a review,” *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, n°. 4, août 2020. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/343368131_Deep_learning_in_sport_video_analysis_a_review
- [13] S. Lotfi et M. Rebbouj, “Machine learning for sport results prediction using algorithms,” *Machine Learning for sport results prediction using algorithms*, vol. 3, n°. 3, juill. 2021. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/353665925_Machine_Learning_for_sport_results_prediction_using_algorithms
- [14] C. C. Ferreira *et al.*, “Current status of sport performance in boccia : systematic review of the literature,” *Retos*, vol. 48, mars 2023. [En ligne]. Disponible : <https://recyt.fecyt.es/index.php/retos/article/view/95110>
- [15] D. Lapresa1 *et al.*, “Observation system for analyzing individual boccia bc3,” *Journal of Developmental and Physical Disabilities*, vol. 29, n°. 5, oct. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://psycnet.apa.org/record/2017-24600-001>
- [16] K. Palmer, G. Geurts et J. Gunnlaugson, “The evolution of curling analytic,” dans *MIT Sloan Sport Analytics Conference*, Boston, USA, 1-2 Mars 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.sloansportsconference.com/research-papers/the-evolution-of-curling-analytics>
- [17] P. Brenzel, W. Shock et H. Yang, “An analysis of curling using a three-dimensional markov model,” *Journal of Sports Analytics*, vol. 5, n°. 2, avr. 2019. [En ligne]. Disponible : <https://content.iospress.com/articles/journal-of-sports-analytics/jsa279>
- [18] Y. Han, Q. Zhou et F. Duan, “A game strategy model in the digital curling system based on nfsp,” *Complex Intelligent Systems*, vol. 8, n°. 7, mars 2021. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-021-00345-6>
- [19] T. Yee, V. Lisy et M. Bowling, “Monte carlo tree search in continuous action spaces with execution uncertainty,” dans *Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, New York, USA, 09 July 2016, p. 690–696. [En ligne]. Disponible : <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3060621.3060718>
- [20] K. Lee *et al.*, “Deep reinforcement learning in continuous action spaces : a case study in the game of simulated curling,” dans *Proceedings of the 35th International Conference*

- on Machine Learning*, Stockholm , Sweden, 10-15 July 2018. [En ligne]. Disponible : <https://proceedings.mlr.press/v80/lee18b.html>
- [21] D.-O. Won, K.-R. Müller et S.-W. Lee, “An adaptive deep reinforcement learning framework enables curling robots with human-like performance in real-world conditions,” *Science Robotics*, vol. 5, sept. 2020. [En ligne]. Disponible : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32967991/>
- [22] B. M. Faria¹ et al., “Boccia game simulator : Serious game adapted for people with disabilities,” *Expert Systems*, vol. 36, juin 2018. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/exsy.12299>
- [23] D. Kempe, J. Kleinberg et Tardos, “Maximizing the spread of influence through a social network,” dans *Proceedings of the ninth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, Washington, USA, 24 aout 2003, p. 137–146. [En ligne]. Disponible : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/956750.956769>
- [24] C. H. Papadimitriou, “Algorithms, games, and the internet,” dans *Proceedings of the thirty-third annual ACM symposium on Theory of computing*, Hersonissos, Greece, 6 juillet 2001, p. 749–753. [En ligne]. Disponible : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/380752.380883>
- [25] A. Swanson. (2015) The mathematically proven winning strategy for 14 of the most popular games. [En ligne]. Disponible : <https://www.washingtonpost.com/news/wonk/wp/2015/05/08/how-to-win-any-popular-game-according-to-data-scientists/>
- [26] J. Sindik¹ et N. Vidak, “Application of game theory in describing efficacy of decision making in sportsman’s tactical performance in team sports,” *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, vol. 6, n°. 1, juin 2008. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/23984945_Application_of_Game_Theory_in_Describing_Efficacy_of_Decision_Making_in_Sportsman%27s_Tactical_Performance_in_Team_Sports
- [27] P. Robberechts, J. V. Haaren et J. Davis, “A bayesian approach to in-game win probability in soccer,” dans *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning*, Singapore, 14 - 18 August 2021. [En ligne]. Disponible : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3447548.3467194>
- [28] M. S. K. Engin Esme, “Prediction of football match outcomes based on bookmaker odds by using k-nearest neighbor algorithm,” *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 8, n°. 1, févr. 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.semanticscholar.>

org/paper/Prediction-of-Football-Match-Outcomes-Based-On-Odds-Esme-Kiran/
a7794c01a80f2bd62af86343dcb20b579187109b

- [29] A. Ravi, A. Gokhale et A. Nagwekar, “Using game theory to maximize the chance of victory in two-player sports,” mai 2021. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2105.11650>