

# Etude du Monopoly via les chaînes de Markov

Rémy Detobel

Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique  
rdetobel@ulb.ac.be

## Abstract

Etude du Monopoly à travers un modèle simple de processus probabiliste que sont les chaînes de Markov. Les concepts principaux de ce modèle seront présentés et expliqués. Une adaptation de cette chaîne sera également effectuée pour correspondre au fonctionnement du Monopoly (un jeu de plateau classique).

Un algorithme a également été créé pour mettre en application les chaînes de Markov et calculer les terrains les plus rentables, les plus fréquentés.

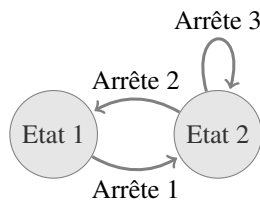
## Introduction

Contrairement aux idées reçues, les cases du Monopoly ne sont pas équiréparties. Pour pouvoir décrire la probabilité de tomber sur chaque case, on va utiliser les chaînes de Markov. Ce document définira donc les chaînes de Markov ainsi que d'autres notions utiles pour résoudre ce problème. Des choix devront également être faits pour permettre de modéliser ce problème et le rendre totalement compatible avec la structure des chaînes de Markov.

## Approche théorique

### Les chaînes de Markov

Une chaîne de Markov est une représentation graphique permettant de modéliser l'état d'un système en se basant uniquement sur l'état précédent. La structure utilisée dans ce rapport sera toujours considérée en temps discret. Une chaîne de Markov est composée de noeud et d'arrête reliant ces noeuds. Chaque noeud représente un état du système tandis qu'une arrête permet d'indiquer les différents liens entre ces états. Chaque arrête a un poids représentant la probabilité que ce changement d'état se produise.



Par définition, la somme des poids des arrêtes partant d'un poids doivent valoir 1. De manière plus formelle, les chaînes de Markov sont représentées via la formule mathématique suivante :

$$\mathcal{M} = (S, \mathbf{P}, \iota_{init})$$

Où  $S$  représente l'ensemble de tous les états possible,  $P$  une matrice  $S \times S$  où chaque élément est compris entre 0 et 1 et où cette valeur représente la probabilité de passer d'un état à un autre (respectivement, l'état correspondant à la ligne et à la colonne).  $\iota_{init}$  est une matrice colonne où chaque ligne représente un état et la valeur associée représente la probabilité de commencer par cet état. On peut retrouver d'autres variables dans la littérature (comme  $AP$  et  $L$  par exemple) mais celles-ci ne seront pas utiles dans cet article.

## Probabilité

Dans une chaîne de Markov, on s'intéresse à la "probabilité" de se trouver dans un certain état ou la probabilité de passer d'un état à un autre. Définir formellement une probabilité est un travail long et complexe, il ne sera donc pas fait dans ce document. Cependant, on peut se représenter une probabilité comme étant la "chance" de passer d'un état à un autre. Par exemple, si une arrête reliant l'état  $s$  à  $s'$  à une probabilité de 0.5, on peut en déduire qu'il y a une "chance" sur deux que le système passe de l'état  $s$  à  $s'$ . Cette exemple sera noté plus formellement de la manière suivante :

$$\mathbf{P}(s, s') = 0.5$$

Où  $s$  et  $s'$  sont des états et 0.5 la probabilité de passer du premier état au second état (respectivement donc  $s$  et  $s'$ ). Il n'est pas toujours simple de mesurer une probabilité. Une technique assez intuitive est de reproduire une expérience (chaque expérience doit être indépendante des précédentes)

## Propriété

Comme vu précédemment, la somme des poids des arrêtes partant d'un noeud valent un. Soit pour tous  $s \in S$  :

$$\sum_{s' \in S} \mathbf{P}(s, s') = 1$$

Il en va de même pour la somme des éléments de la matrice de distribution initiale :

$$\sum_{s \in S} \ell_{init}(s) = 1$$

Pour qu'un état  $s'$  soit le successeur d'un état  $s$ , il faut que

$$P(s, s') > 0$$

L'idée est équivalente concernant les chemins (arrêtes).

### Comportement des chaînes des Markov

Les chaînes de Markov peuvent avoir différentes caractéristiques en fonction de leurs structures et des valeurs qu'elles contiennent. Nous en distinguerons 3 :

- **Fortement connexe** : un ensemble est fortement connexe si pour tout les noeuds présent dans cet ensemble peuvent être atteint depuis n'importe quel autre noeud également présent dans ce même ensemble. En d'autres mots, on peut dire que dans un ensemble  $T$  il existe un chemin entre l'état  $s'$  et  $s$  tel que  $s$  et  $s' \in T$
- **Composant fortement connexe** : un ensemble  $T$  est un composé fortement connexe s'il est le plus grand ensemble fortement connexe d'une chaîne de Markov. Les composants fortement connexes sont notés "SCC" (qui sont les initiales de "Strongly Connected Component").
- **BSCC** : il s'agit des initiales de "Bottom Strongly Connected Component". L'ensemble  $T$  est un BSCC de la chaîne de Markov  $\mathcal{M}$  si  $T$  est un SCC et qu'aucun état en dehors de  $T$  ne peut être atteint. En d'autres mots, il faut que pour tout  $s \in T$ ,  $\mathbb{P}(s, T) = 1$ . Cela signifie que toutes les arrêtes partant de  $s$  sont dirigés dans l'ensemble  $T$ .

Lorsque l'on se trouve dans un état présent dans un BSCC, on ne quitte plus jamais ce BSCC, même après une infinité de changement d'état. On a donc une probabilité 1 de se retrouver dans ce BSCC après une infinité de changement.

### Distribution stationnaire

Lorsque l'on se trouve dans un état étant lui même dans un BSCC, il est impossible de quitter ce BSCC. La probabilité dans une chaîne de Markov de se retrouver dans un état présent dans le BSCC après une infinité de changement d'état est donc de 1. Cependant tous les états présent dans ce BSCC n'ont pas la même probabilité d'être sélectionné.

On estime qu'on se trouve dans une distribution stationnaire lorsqu'un changement d'état supplémentaire ne modifie pas les valeurs de probabilité de chaque état. De manière plus formel, cela signifie qu'il existe un vecteur  $v$  où chaque terme est compris entre 0 et 1, tel que sa multiplication par la matrice de déplacement donne ce même vecteur. C'est à dire :

$$vP = v$$

Où  $v$  est le vecteur décrivant la distribution stationnaire et  $P$  la matrice de déplacement.

**Calcul de la distribution stationnaire** Il existe différentes façon de calculer l'état stationnaire d'une chaîne de Markov. Plusieurs méthodes sont décrite dans le livre "Introduction to Probability" ((Charles M. Grinstead, 2006)) dans le chapitre 11.

On sait que la somme des composants du vecteur  $v$  décrivant la distribution stationnaire fait 1. On peut donc écrire :

$$v_1 + v_2 + \dots + v_n = 1$$

Où  $n$  est le nombre d'élément dans ce vecteur  $v$ . On sait que multiplier ce vecteur  $v$  avec la matrice de déplacement ne change pas les valeurs de ce vecteur. On se retrouve donc avec une multiplication de matrice qui peut-être subdivisé en  $n$  sous calcul (où  $n$  est toujours le nombre d'élément dans ce vecteur  $v$ ) ; plus l'équation décrite ci-dessus. On a donc  $n + 1$  équation pour  $n$  inconnue. Le problème peut donc être résolu.

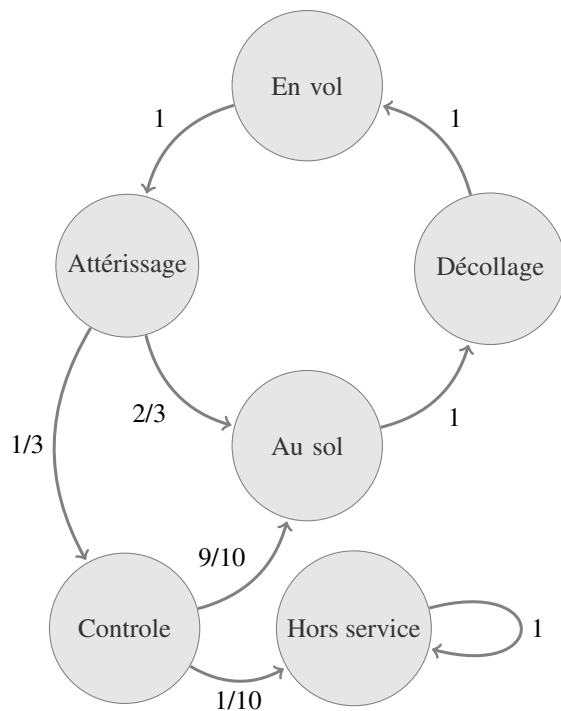
Une autre méthode consiste à fixer une des valeurs du vecteur  $v$  et de ainsi trouver les autres valeurs du vecteur. Une fois ces valeurs trouvées, il suffit de diviser tous les termes par la somme de ceux-ci.

### Cas concret

Afin de rendre tous ces concepts plus concrets, on va s'intéresser à un exemple décrivant l'état d'un avion.

**Contexte** Dans cet exemple, on va considérer que l'avion pourra avoir 6 états différents : en vol, atterrissage, décollage, au sol, controle et hors service. On va considérer qu'en moyenne après 3 vol un avion doit passer au controle. On remarque également qu'il y a une chance sur 10 que l'avion ne passe pas le controle et soit considéré comme hors service.

**Représentation Graphique** Voici donc la chaîne de Markov décrivant cette situation :



**Représentation matricielle** Une chaîne de Markov peut également être vue comme une matrice où chaque ligne et chaque colonne représente un état. Les valeurs au sein de la matrice représentent le passage de la ligne (en lien avec cette valeur) et la colonne associée à cette même valeur. Avant de faire cela, il faut énoncer les différents états possibles :

$$\begin{pmatrix} \text{En vol} \\ \text{Décollage} \\ \text{Atterissage} \\ \text{Au sol} \\ \text{Contrôle} \\ \text{Hors service} \end{pmatrix}$$

C'est donc l'ordre de cette matrice qui sera utilisé afin de constituer la matrice représentant la chaîne de Markov :

	Vol	Dec.	Att.	Sol	Ctr.	H.S.
Vol	0	0	1	0	0	0
Dec.	1	0	0	0	0	0
Att.	0	0	0	2/3	1/3	0
Sol	0	1	0	0	0	0
Ctr.	0	0	0	9/10	0	1/10
H.S.	0	0	0	0	0	1

Si on considère que lorsqu'un avion est mis en service il se trouve dans l'état "au sol", on peut écrire la matrice initiale

de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} \text{Vol} & 0 \\ \text{Dec.} & 0 \\ \text{Att.} & 0 \\ \text{Sol} & 1 \\ \text{Ctr.} & 0 \\ \text{H.S.} & 0 \end{pmatrix}$$

**Caractéristiques** La chaîne de Markov résultant de cet exemple a plusieurs propriétés. Tout d'abord, cette chaîne de Markov contient plusieurs sous-parties fortement connexes comme par exemple l'ensemble : {en vol, atterissage, décollage, au sol}. Cette ensemble reste fortement connexe si l'on ajoute l'état "contrôle". On a donc l'ensemble : {en vol, atterissage, décollage, au sol, contrôle} qui en plus d'être fortement connexe est un SCC. Cette chaîne contient également un BSCC formé uniquement de l'état "Hors Service".

Pour faire en sorte que toute la chaîne de Markov soit un BSCC, il suffirait par exemple de permettre à l'état "Hors service" de rejoindre à nouveau l'état "contrôle". On pourrait par exemple imaginer qu'il y a une chance sur 100 qu'un avion hors service soit repris au contrôle et soit de nouveau utilisable.

## Modélisation

### Plateau de jeux

Les plateaux de jeux peuvent être vus comme des chaînes de Markov. En effet, on peut voir la position d'un point comme l'état d'un système. Dans ce type de jeu (comme par exemple le jeu de l'oie) la position du pion dépendra seulement de la case où il se trouvait précédemment et du nombre de cases qu'il doit parcourir (dû par exemple au lancement d'un dé ou à l'indication présente sur la case où le pion se trouvait). Les jeux de plateau où le déplacement des pions n'influencent pas directement la victoire d'un joueur et où chaque case du plateau de jeu peut être visitée tout au long de la partie, peuvent être vus comme des BSCC.

### Modélisation

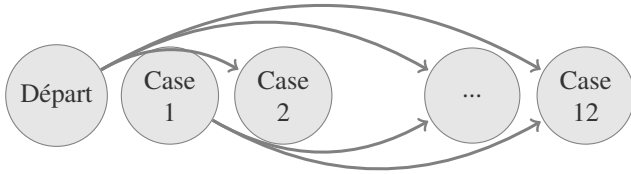
Le Monopoly peut en effet être vu comme une chaîne de Markov. En effet, comme décrit ci-dessus, on peut voir la position d'un point comme l'état d'un système. Plus concrètement, chaque case sera numérotée et représentera un état de la chaîne de Markov.

Chaque déplacement du pion (c'est-à-dire à chaque fois que l'on lance le dé) sera traduit par un changement d'état. Dans un premier temps, on modélise donc le Monopoly par 40 cases où chaque case est reliée aux  $6 * n - (n - 1)$  cases suivantes, où  $n$  est le nombre de dés. Dans le cas précis des règles du Monopoly, chaque case pourra donc accéder à 11 autres cases. En effet, le résultat le plus petit pouvant être produit par  $n$  dés est de  $n$  (tous les dés à 1). On devra donc



FIGURE 1 – Numérotation du Monopoly (Monopolypedia.fr, 2015)

éliminer toutes les  $n - 1$  cases juste après la case actuelle et le résultat le plus grand pouvant être produit par  $n$  dés est de  $6 * n$  (pour un dé à 6 faces).



Cependant, certaines cases ont un comportement particulier comme par exemple la case “aller en prison” sur laquelle on ne peut pas rester ; en effet, celle-ci nous redirige directement dans la prison. La case “chance” et “caisse de communauté” sont également des cas particuliers qui font que le Monopoly n’est pas équilibré.

### Répartition des dés

Lorsque l’on lance  $n$  dés, la somme des valeurs de chaque dés n’a pas la même probabilité d’apparaître. En effet, lorsque l’on lance 2 dés, il y a 3 manières différentes de former un 4 (à savoir :  $3 + 1$ ,  $2 + 2$  et  $1 + 3$ ) alors qu’il n’y a qu’une seule manière de former un 2 (à savoir :  $1 + 1$ ), comme illustré par la figure 2. Cette répartition peut être généralisée de la manière suivante :

$$\sum_{k=0}^{(s-n)/6} (-1)^k \binom{n}{k} \binom{s-6k-1}{n-1}$$

Source : <http://villemin.gerard.free.fr/Wwwgvm/Identite/Identxx2.htm#formule>

Où  $n$  est le nombre de dés et  $s$  le nombre que l’on désire former. Cette équation a été construite suite à la décomposition en polynôme permettant de calculer des répartition.

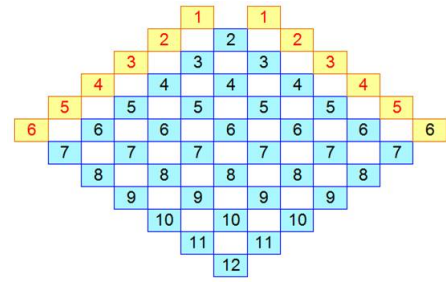


FIGURE 2 – Répartition des nombres formés avec 2 dés (villemin.gerard.free.fr, 2016)

En effet, en prenant par exemple le polynôme  $3x + 5x^2 + x^3$  et en le mettant au carré, on va récupérer toutes les combinaisons possibles :

$$\begin{aligned} & (3x \times 3x) + (3x \times 5x^2) + (3x \times x^3) + \\ & (5x^2 \times 5x^2) + (5x^2 \times x^3) + (x^3 \times x^3) \\ & = (9x^2) + (15x^3) + (3x^4) + (25x^4) + (5x^5) + (x^6) \\ & = x^6 + 5x^5 + 28x^4 + 15x^3 + 9x^2 \end{aligned}$$

Ce calcul montre la répartition de dés truqués ayant 3 faces 1, 5 faces 2 et une face 3. Le résultat final nous montre que lorsque l’on lance 2 de ces dés de 9 faces. En faisant la somme des coefficients, on obtient le nombre d’arrangement possible. Dans le cas présent, on a donc  $1 + 5 + 28 + 15 + 9$  c’est à dire 59. Cela nous permet de dire qu’il y a une chance sur 59 que la somme de ses 2 dés forme un 6 et 28 chance sur 59 de former un 4.

L’équation exprimé au début de ce point représente simplement le développement de ce polynôme.

### Case prison

Les règles du Monopoly stipulent que l’on peut sortir de prison de plusieurs manières différentes : soit via une carte chance, soit en payant, soit en faisant un double. Seule les deux dernières solutions seront utilisées dans cette modélisation. En effet, avoir une carte chance ne dépend pas uniquement de l’état précédent et ne peut donc pas être représenté facilement avec les chaînes de Markov. Les règles indiquent également que l’on ne peut rester que 3 tours maximum avant d’être obligé de payer. Afin de représenter ces différentes cas, la case prison sera “triplée”. On aura donc trois représentations de la case prison : au premier, second et troisième tour. La case “aller en prison” sera donc considérée comme une case prison de niveau 0 et n’aura donc qu’une seule arrête visant la case “prison premier tour”. Afin d’être le plus précis possible, on va calculer la probabilité de faire un double. Comme vu dans le point , il y a 36 cas possible lorsque l’on lance 2 dés à 6 faces. On sait qu’il y a 6 doubles. On a donc 6 chance sur 36 de faire un double et chaque double : 2, 4, 6, 8, 10 et 12 ont chacun

une chance sur 36 d'apparaître. Si on ne fait pas de double (dans 5 cas sur 6), on doit relancer les dés (et donc avant ça, passé à la case prison "suivante"). Chaque case "prison" (les 3 cases cités ci-dessus) auront donc 8 arrêtes différentes :

- Payer et sortir de prison
- Faire un double (et avancer du résultat de ce double), il y a donc 6 choix possibles
- Ne pas réussir à faire un double (et continuer attendre)

### Case "Chance"

Les cases chances peuvent faire gagner de l'argent mais également déplacé les pions présent sur le plateau de jeu. C'est évidemment ce second comportement qui sera étudié ici. Le Monopoly comporte 16 cartes chances ayant la répartition suivante :

- 8 cartes faisant référence à des paiements
- une carte "sortir de prison"
- 7 cartes faisant référence à un déplacement

On peut donc en déduire que lorsqu'un joueur pioche une carte chance, il aura une 7 chance sur 16 de devoir déplacer son pion. Ces déplacements sont les suivants :

- Reculer de 3 cases
- Se rendre à la case départ
- Aller en prison
- Se rendre à la 11ème case (où 0 est le départ)
- Se rendre à la 15ème case
- Se rendre à la 24ème case
- Se rendre à la 36ème case (dernière case avant l'arrivée)

Dans les 9 autres cas on lancera simplement les dés. Les cases chances ont donc beaucoup d'arrêtes.

### Case "Caisse de communauté"

Les cartes "Caisse de communauté" sont plus axé sur l'aspect financier du jeu. Cependant 3 cartes provoques également des déplacements des pions.

- Se rendre à la case départ
- Aller en prison
- Se rendre sur la première case

### Calcul de l'état stationnaire

Comme vu dans le point , il est possible de calculer la distribution stationnaire de chaque case du Monopoly. Pour se faire, on va se basé sur une des méthodes décrite dans ce même point, à savoir simplifier la fonction de base :

$$\begin{aligned}wP &= w \\wP &= wI \\w(P - I) &= 0\end{aligned}$$

Où  $w$  est le vecteur stationnaire que l'on cherche,  $P$  est la matrice de déplacement et  $I$  est la matrice identité. On peut également noté cette equation de la façon suivante :

$$(P - I)^T w^T = 0$$

Qui sera plus simple à implémenté dans un langage informatique.

On peut également rajouter une colonne de 1 permettant d'intégrer directement la contrainte suivante dans l'équation :

$$\sum_{i \in w} i = 1$$

Cette équation part du simple principe que le vecteur résultat sera la distribution de probabilité de chaque état. Il faut donc que leur somme corresponde à 1 vu que l'on exprime la probabilité de se trouver sur tous les états accessibles, il y a donc 100% de "chance" de se trouver sur les états présent dans le vecteur résultat (plus d'informations dans le point ).

**Avec un exemple concret** Prenons la matrice de déplacement suivante :

$$\begin{aligned}wP &= w \\(w_1 \quad w_2 \quad w_3) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 3 \end{pmatrix} &= (w_1 \quad w_2 \quad w_3) \\ \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix}^T \left( \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right) &= 0 \\(w_1 \quad w_2 \quad w_3) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} &= (0 \quad 0 \quad 0) \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

On ajoute donc la colonne de 1 :

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

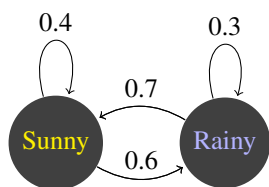
### Choix du langage

Pour modéliser le Monopoly, le langage Python a été choisi. Il permet en effet d'avoir accès facilement à plusieurs librairies permettant de manipuler facilement des données.

**Libraires utilisées** Pour manipuler plus facilement des matrices et résoudre les équations linéaire, la librairie "numpy" a été utilisé. Concernant l'interface graphique, c'est la librairie tkinter qui a été sélectionnée.

## Résultat

## Conclusion



## References

Charles M. Grinstead, J. L. S. (2006). *Introduction to Probability*.  
the American Mathematical Society.

Monopolypedia.fr (2015). Le monopoly en 2015.

villemin.gerard.free.fr (2016). jeu de dés, probabilité de gain.