



Ceci est un extrait électronique d'une publication de
Diamond Editions :

<http://www.ed-diamond.com>

Retrouvez sur le site tous les anciens numéros en vente par
correspondance ainsi que les tarifs d'abonnement.

Pour vous tenir au courant de l'actualité du magazine, visitez :

<http://www.gnulinuxmag.com>

Ainsi que :

<http://www.linux-pratique.com>

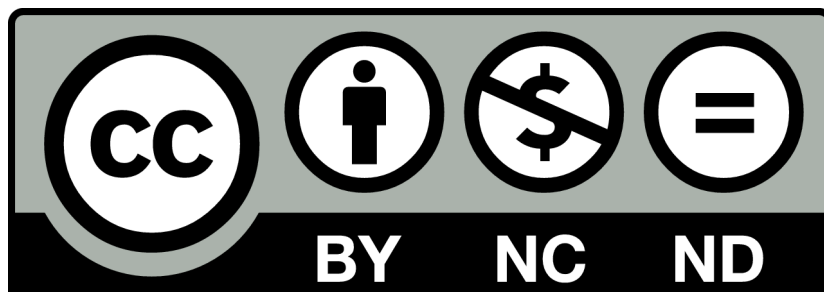
et

<http://www.miscmag.com>



Ceci est un extrait électronique d'une publication de Diamond Editions

<http://www.ed-diamond.com>



Creative Commons

Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 2.0 France

Vous êtes libres :

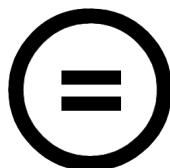
- de reproduire, distribuer et communiquer cette création au public.



Paternité. Vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'oeuvre ou le titulaire des droits qui vous confère cette autorisation (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous soutiennent ou approuvent votre utilisation de l'oeuvre).



Pas d'Utilisation Commerciale. Vous n'avez pas le droit d'utiliser cette création à des fins commerciales.



Pas de Modification. Vous n'avez pas le droit de modifier, de transformer ou d'adapter cette création.

A chaque réutilisation ou distribution de cette création, vous devez faire apparaître clairement au public les conditions contractuelles de sa mise à disposition.

- Chacune de ces conditions peut être levée si vous obtenez l'autorisation du titulaire des droits.
- Rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint le droit moral de l'auteur ou des auteurs.

Ceci est le Résumé Explicatif du Code Juridique. La version intégrale du contrat est attachée en fin de document et disponible sur :

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr/legalcode>

L'ordinateur peut-il lire dans votre esprit ?

Introduction

L' introspection est une des facultés les plus impressionnantes de l'être humain : nous sommes en effet capables de réfléchir sur notre façon de penser et d'agir. Ceci nous permet d'interpréter et parfois prédire les actes de nos pairs, en partant de l'hypothèse logique que le mode de fonctionnement du cerveau est le même pour tous les humains. Certains psychologues spécialement formés peuvent même se plonger dans la personnalité d'un autre (même mentalement instable), telle qu'elle transparait dans ses actes, afin d'établir un profil et anticiper sur ses actions futures. Quand ils travaillent pour la police, on les appelle des *profilers*. Dans le domaine ludique qui nous intéresse, ce seraient plutôt des joueurs de poker.

La modélisation psychologique d'un être humain semble *a priori* une tâche de très haut niveau qu'il serait vain de vouloir faire réaliser par un ordinateur.

Et pourtant, de nombreux jeux vidéo sont basés sur l'anticipation de l'adversaire car l'information est imparfaite : dans les jeux de stratégie en temps réel, par exemple, le brouillard de guerre masque les mouvements des troupes adverses et il faut donc deviner de quel(s) côté(s) viendra l'attaque et quels types d'unités seront utilisés. Dans les jeux de combat, les réflexes ne sont en général pas suffisants pour réagir aux attaques de l'adversaire et un minimum d'anticipation est nécessaire pour ne pas se faire battre. La situation est la même pour les jeux de simulation sportive de football ou de tennis par exemple.

Dans de nombreux jeux, le plaisir ludique vient de la sensation d'avoir piégé son adversaire en devinant ses intentions et en préparant une riposte parfaitement adaptée à celles-ci. Les jeux vidéo modernes, qu'ils soient de stratégie en temps réel, de combat, de sport, etc. rencontrent un énorme succès dans leurs versions online car celles-ci permettent d'affronter un autre humain et donc d'être mis en difficulté. L'intelligence artificielle de ces jeux fait souvent défaut, essentiellement parce qu'elle peine à deviner les intentions du joueur humain. Pourtant, comme nous allons le voir dans cet article, il est parfaitement possible d'exploiter certaines faiblesses de notre cerveau pour prédire notre comportement et de doter ainsi l'ordinateur de capacités d'analyse d'assez haut niveau qu'il pourra exploiter pour nous piéger.

Pour offrir une expérience ludique de qualité, il est donc indispensable que l'intelligence artificielle (IA) soit capable d'anticiper un minimum sur les actions du joueur. Comme la modélisation psychologique est délicate, beaucoup de développeurs résolvent le problème en permettant à l'IA de tricher. Dans *Warcraft II* par exemple, l'IA ne souffrait pas du brouillard de guerre (ce qui ne l'empêchait pas de jouer très très mal).

Dans les différents *Civilization*, l'IA trichait de façon scandaleuse, non seulement en ayant accès à des informations complètes sur les ressources du joueur, mais aussi en ne respectant pas certaines règles. L'expérience prouve que non seulement les IA obtenues par tricherie ne sont pas très bonnes, mais en plus que ces tricheries apparaissent de façon évidente au joueur, ce qui diminue l'attrait du jeu contre l'ordinateur.

Pourtant, nous allons voir dans le présent article qu'il existe des méthodes simples pour anticiper sur les coups d'un joueur humain en exploitant certaines faiblesses de son cerveau, essentiellement sa totale incapacité à jouer au hasard. Nous nous contenterons d'étudier le jeu d'apparence enfantine "pierre, papier et ciseaux". En effet, les mécanismes de ce jeu constituent un archétype pour énormément de jeux vidéo, en particulier les jeux de stratégie en temps réel et les jeux de combat.

De plus, il s'agit en quelque sorte d'une version épurée des problèmes d'anticipation dans les jeux, tant et si bien que les algorithmes proposés pour modéliser le joueur humain dans ce cadre pourront être appliqués à bien d'autres jeux dont certains n'ont aucun rapport avec le modèle de "pierre, papier et ciseaux".



Pierre, papier et ciseaux

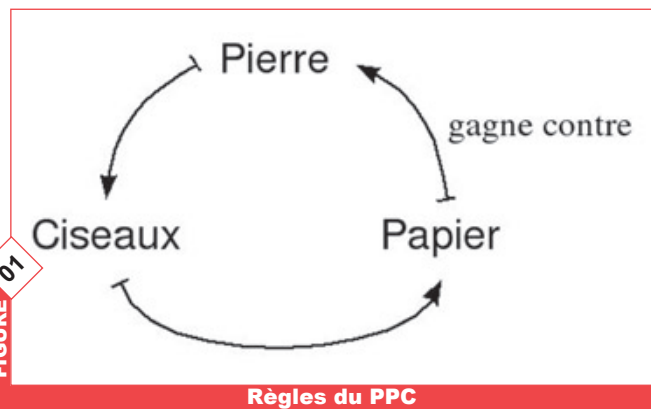
Le jeu

Le jeu pierre/papier/ciseaux (PPC) peut sembler de prime abord l'un des jeux les plus basiques qui soient. Rappelons ses règles élémentaires : à chaque tour, les deux joueurs annoncent simultanément le coup qu'ils ont choisi parmi les trois possibilités, pierre (*rock*), papier (*paper*) ou ciseaux (*scissors*). Si les coups sont identiques, la manche est nulle et ne modifie pas le score. Dans le cas contraire, on détermine le gagnant en appliquant les règles suivantes (illustrées par la figure 1) :

1. la pierre l'emporte sur les ciseaux (car ils ne peuvent la couper) ;
2. les ciseaux l'emportent sur le papier (car ils le coupent) ;
3. le papier l'emporte sur la pierre (car il l'enveloppe).

Le vainqueur de la manche gagne un point. La partie s'arrête après un nombre de manches fixé à l'avance et le gagnant est celui qui a accumulé le plus de points.

On peut utiliser diverses règles pour trancher les cas d'égalité, par exemple la "manche en or" qui déclare vainqueur le premier joueur qui remporte une manche après la phase initiale du jeu. On peut aussi décider à l'avance d'une différence de points, le jeu s'arrêtant dès que celle-ci est atteinte.



Prédire le comportement de son adversaire

Joué entre humains, le PPC se révèle en fait assez intéressant, à tel point qu'il existe une fédération officielle [1] qui organise des championnats mondiaux [2]. On constate, en pratiquant le jeu de façon "sérieuse", qu'on ne joue pas au hasard, mais plutôt de façon assez stratégique.

On cherche en effet à deviner ce que l'adversaire va jouer pour le contrer efficacement. De plus, comme on suppose que l'adversaire en fait autant, on cherche à rendre notre jeu difficile à prédire. Étudions par exemple une partie de l'actuel champion du monde et de son challenger (en octobre 2003). Nous utilisons ici les abréviations des mots anglais car elles ne sont pas ambiguës (on a donc R pour pierre, P pour papier et S pour ciseaux). Le déroulement de la partie est donné dans le tableau 1.

Une partie de PPC entre champions							
Joueur	1	2	3	4	5	6	7
Krueger	S	R	P	S	P	R	P
Rigaux	R	R	R	S	P	R	R

On constate que Rigaux utilise une série de coups assez dangereuse, les trois pierres du départ. Il s'agit en fait d'un pari sur l'adversaire. En effet, Rigaux pense que son adversaire ne le croira pas assez téméraire pour jouer trois fois de suite pierre, et donc qu'il tentera de contrer au troisième tour une des deux autres possibilités, c'est-à-dire qu'il jouera soit pierre pour contrer ciseaux, soit ciseaux pour contrer papier. Rigaux joue donc une troisième fois pierre en espérant gagner contre ciseaux (et au pire faire match nul).

Cependant, Krueger, qui est un habitué de la stratégie de triplement d'un coup (il vient de gagner la partie précédente avec un triple papier), prend le risque de joueur papier car il estime que Rigaux est sûrement en train de tenter un triplement. Le 4ème coup est encore plus intéressant. Krueger prend un risque en jouant ciseaux. Rigaux pourrait en effet quadrupler pierre et donc gagner contre ciseaux. Cependant, Krueger parie ici sur la forte pression psychologique qui s'exerce sur Rigaux : il vient de perdre avec pierre et il a joué trois fois de suite ce coup. Il est donc assez probable qu'il change de coup.

Dans ce cas, ciseaux est un très bon choix : il obtient un match nul contre lui-même et gagne contre papier. Il est peu probable que Rigaux ait joué ici en poussant la réflexion très loin. En effet, une auto-analyse lui aurait permis de prédire le choix de Krueger et un quadruplement de pierre lui aurait fait gagner la partie. Le choix de ciseaux est donc vraisemblablement le résultat du hasard. La suite de la partie est plus délicate à analyser et je laisse au lecteur le plaisir d'étudier diverses conjectures.

Il faut noter que le jeu PPC comporte une partie "matérielle" importante. En effet, un joueur peut tenter de retarder au maximum la divulgation de son coup afin de réagir aux mouvements de son adversaire pour deviner le coup qu'il prépare et ainsi contrer efficacement (c'est pourquoi d'ailleurs un arbitre est indispensable).

De plus, comme au Poker par exemple, l'observation de l'adversaire peut parfois apporter des informations sur ce qu'il se prépare à jouer. Enfin, une partie ne se joue jamais seule, elle s'inscrit toujours dans une série qui constitue une rencontre. L'historique des coups joués entre donc en jeu de façon non négligeable dans la prédiction du prochain coup de l'adversaire. Notons aussi que le jeu se joue rapidement, ce qui interdit des réflexions prolongées et impose donc parfois des décisions réflexes.

En dehors des compétitions, le jeu PPC est un excellent jeu éducatif pour les jeunes enfants. Il les initie en effet à

FIGURE 01

la construction de modèles mentaux et les aide à comprendre que l'autre pense de la même façon qu'eux : les enfants adorent élaborer des stratégies évoluées mettant en œuvre plusieurs niveaux de réflexion de la forme "je sais qu'il sait que je sais, mais il ne sait pas que je sais qu'il sait que je sais..."

Une base de *gameplay*

En terme d'intelligence artificielle, le jeu PPC est très intéressant car il est utilisé comme base pour le *gameplay* (les principes généraux) de très nombreux jeux vidéo. Les deux principales catégories de jeux basés sur PPC sont ceux de stratégie en temps réel (les STR construits sur le modèle de l'ancêtre *Dune II*) et ceux de combats (type *Street Fighter*).

Dans les STR anciens, le principe du PPC est repris pratiquement tel quel grâce à une transposition en termes de types d'unités. Par exemple, on peut considérer trois types d'unités médiévales : des piquiers, des archers et des chevaliers. Les archers annihilent facilement les piquiers car le temps que ceux-ci s'approchent d'eux, ils ont été criblés de flèches. De même, les piquiers sont extrêmement efficaces pour résister contre les chevaliers car ceux-ci ne peuvent s'approcher sans être embrochés sur les piques. Enfin, les chevaliers sont efficaces contre les archers car ils peuvent charger sans craindre de piques et en ne s'exposant que très peu de temps aux flèches.

Dans les STR modernes comme *Warcraft III*, différentes astuces sont utilisées pour adapter le schéma classique et l'enrichir. Tout d'abord, le théâtre des opérations comprend plusieurs environnements distincts, comme le sol et le ciel dans *Warcraft III*, auquel s'ajoutait les océans dans la version II. Les unités aériennes, terrestres et maritimes s'affrontent alors plutôt entre elles car elles sont en général impossibles à atteindre depuis un autre environnement (les jeux sont un peu plus complexes que ça, mais ce principe général s'applique). On peut aussi introduire des types de dommage (explosion, projectiles, etc.) auxquels les différentes unités sont plus ou moins sensibles, jouer sur la rapidité des déplacements, la portée des armes, etc.

En fait, l'idée de base est de construire un ensemble de jeux PPC entremêlés, en évitant surtout de créer une unité "invincible" et en respectant l'idée que certaines unités perdent toujours devant d'autres. La grosse difficulté est l'équilibrage d'un jeu ainsi construit, et force est de constater que les créateurs de la série des *Warcraft* et de *Starcraft*, le studio *Blizzard*, sont les meilleurs dans ce domaine (malheureusement, l'entreprise est 100% propriétaire et ne semble même pas connaître l'existence de Linux malgré de nombreuses pétitions demandant le portage de ses jeux sur notre OS préféré).

Pour les STR, je n'ai abordé ici que l'aspect tactique, c'est-à-dire l'affrontement au niveau des unités. On peut aussi interpréter le *gameplay* de ces jeux comme un PPC au niveau stratégique. En effet, il existe en général trois grandes

orientations classiques en début de partie (je caricature, que les puristes me pardonnent). Le *rush* consiste à produire le plus rapidement possible une petite escouade et à attaquer la base ennemie dès le départ de la partie, sans chercher à construire une "économie" viable. La stratégie complètement opposée consiste à privilégier le long terme en développant les bases d'une économie viable. Cette stratégie est complètement démunie face au rush car elle laisse la base sans défense (ou presque) pendant les premières minutes de jeu. Enfin, une stratégie mixte consiste à sacrifier quelques ressources initiales pour construire des unités de défense dès le début de la partie. Ceci permet de résister au rush et en général de gagner contre lui. Par contre, l'économie démarrant moins vite qu'avec la stratégie la plus posée, sur le long terme la stratégie mixte est moins efficace. On se retrouve donc de nouveau avec un trio organisé comme celui du PPC.

Dans les jeux de combat, l'adaptation est assez semblable. L'idée générale de ces jeux est de simuler un combat entre deux protagonistes, en général sous forme d'un art martial quelconque. Les joueurs contrôlent la position de leur personnage et décident des attaques qu'il effectue.

Or, les attaques disponibles sont organisées selon le principe du PPC. L'idée de base utilisée dans des jeux comme la série des *Virtua Fighter* est d'avoir trois types de mouvement : les attaques classiques, les blocages et les projections. Une attaque classique (par exemple un coup de poing) fonctionne contre une projection, mais échoue contre un blocage (ce qui se traduit parfois par des dommages à l'attaquant). Un blocage échoue contre une projection.

Comme pour les STR, les jeux de combat compliquent le schéma de base en proposant toutes sortes de mouvements complexes, en particulier des combos évolués déclenchés par de savantes combinaisons de mouvements du *paddle*. Cependant, l'idée de base reste la même : privilégier l'équilibre dans le jeu en introduisant toujours une parade pour un coup. On trouvera sur [3] d'intéressantes analyses du *gameplay* des jeux de combats, en particulier en termes de PPC.

On constate ainsi que le PPC, jeu très simple de prime abord, est en fait au cœur d'un nombre considérable de jeux populaires qui mélangent adresse et stratégie en un cocktail ludique très agréable. Le gros succès de ces jeux se fait avant tout en "multi", c'est-à-dire entre adversaires humains. En effet, il est rare que l'ordinateur offre un challenge de haut niveau.

Pourtant, les jeux semblent bien simples comparés aux échecs ou à d'autres jeux de stratégie classiques. Pour ces derniers cependant, la construction d'une IA honorable est un problème en grande partie résolu (cf [4] pour un aperçu des solutions employées). Nous allons voir que s'attaquer au PPC pose des problèmes très différents.

Une base pour l'IA du PPC

Comment ruiner l'expérience ludique

L'aspect le plus intéressant des jeux de stratégie classiques est qu'une analyse mathématique et théorique simple permet de comprendre comment construire une solution (reste bien entendu à l'implémenter de façon efficace, ce qui n'est pas une mince affaire). En effet, la notion d'arbre du jeu permet d'étudier les conséquences d'une série de coups puis de prendre une décision raisonnée (cf [4]). Dans le cas du PPC, la solution mathématique est une catastrophe.

En fait, tout vient d'une propriété simple d'une catégorie de jeux dont le PPC fait partie. Il s'agit de jeux à somme nulle et à information complète et imparfaite. Un jeu à somme nulle est équilibré, c'est-à-dire qu'aucun joueur n'est systématiquement avantagé par rapport à l'autre. C'est le cas de la plupart des jeux (classiques ou modernes), au moins en théorie : rien ne prouve que *Warcraft III* est à somme nulle, mais *Blizzard* travaille constamment à régler les paramètres du jeu afin d'éviter qu'un camp soit meilleur que l'autre, simplement en analysant les parties jouées par des testeurs de haut niveau.

Un jeu à information complète est un jeu dans lequel on peut prédire l'effet d'un coup, éventuellement de façon probabiliste (c'est-à-dire en donnant une probabilité fixée aux différentes conséquences possibles pour un coup). Enfin, l'information est imparfaite quand elle est bruitée ou incomplète. C'est en fait ce qui différencie les jeux de type PPC des jeux de stratégie classiques. Aux échecs, chaque joueur joue **à son tour**, en connaissant parfaitement l'état de l'échiquier. Dans un jeu comme le PPC, les joueurs jouent **simultanément**, ce qui change tout : quand je dois décider de mon prochain coup, je ne connais pas celui que prépare mon adversaire. Or, la résolution du tour se base justement sur ce coup (et en général sur lui seul), ce qui complique considérablement ma tâche.

Le problème des jeux de ce type est que la solution mathématique n'est pas exploitable en pratique : **elle consiste en effet à jouer au hasard !** En fait, l'obtention de cette solution nécessite une hypothèse assez forte : les deux joueurs sont complètement rationnels et peuvent appliquer la stratégie de leur choix, entre autres choisir aléatoirement leurs coups. En pratique, cette hypothèse est totalement fautive, ce qui rend la solution mathématique inutile et même néfaste. Supposons en effet que l'ordinateur soit programmé pour jouer de façon aléatoire. Une première conséquence évidente est qu'aucun joueur ne peut gagner.

En effet, la théorie montre que le jeu reste alors équilibré et en moyenne le score est nul. Seule la chance peut favoriser le joueur humain ou l'ordinateur. Toute la subtilité du PPC, qui consiste à prédire les coups de l'adversaire, est ainsi perdue et le jeu ne présente plus aucun intérêt. En outre, l'ordinateur n'adapte pas ses coups à ceux du

joueur humain : ce dernier peut alors abandonner le jeu aléatoire et jouer n'importe quoi, comme par exemple toujours papier. En moyenne, cette "stratégie" produira les mêmes résultats que la stratégie aléatoire. Non seulement le jeu de l'ordinateur rend le PPC inintéressant, mais en plus, il ne fait aucun effort ! Dans un jeu de STR ou dans un jeu de combat, une programmation aussi indigente de l'IA pourrait être masquée par l'aspect temps réel et les réflexes associés. En effet, il n'est pas rare que dans ces jeux l'information devienne parfaite un bref instant avant la résolution du coup : on peut voir l'adversaire préparer son coup. La dimension stratégique est toujours réduite à zéro, mais le jeu peut conserver un certain intérêt.

Le hasard et les humains

La médiocrité de la solution mathématique optimale vient entre autres des hypothèses qui conduisent à elle. En effet, on suppose que les joueurs sont capables d'adopter n'importe quelle stratégie, en particulier le choix aléatoire. Or, les humains éprouvent d'énormes difficultés à vraiment comprendre la notion de hasard et encore plus à produire du véritable hasard. Pour s'en convaincre, il suffit de jouer au PPC en essayant de choisir aléatoirement ses coups. On stocke les coups choisis et on compare avec la répartition qui aurait dû être obtenue si nous avions vraiment fait nos choix aléatoirement et de façon uniforme. Le tableau 2 présente ce que j'ai obtenu sur une partie de 100 coups.

Pourcentages de choix des différents coups			
Joueur	Pierre	Papier	Ciseaux
Humain	25%	37%	38%
Ordinateur	33%	31%	36%

Les pourcentages théoriques sont de trois fois 33,33%. Naïvement, on peut se dire qu'il est clair que l'humain est moins aléatoire que l'ordinateur. Cependant, il faut se garder de faire des conclusions hâtives. En effet, la notion même de répartition aléatoire fait qu'il existe une probabilité non nulle (mais très très faible) d'obtenir le triplet (0%,0%,100%), c'est-à-dire exclusivement des coups ciseaux, même avec un générateur aléatoire de bonne qualité.

Pour savoir si l'humain fait un choix aléatoire, il faut donc mesurer d'une façon mathématiquement valide la distance entre la répartition théorique et la répartition observée. Une façon de faire est de calculer la distance dite du χ^2 (à prononcer "khi 2") entre les deux répartitions. Notons P_i la probabilité théorique pour le coup numéro i , X_i le nombre de fois que ce coup a été joué et N le nombre total de coups étudiés. La distance du χ^2 est alors donnée par la formule suivante $\chi^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{(X_i - N P_i)^2}{N P_i}$.

Plus la valeur est petite, plus la répartition des coups est proche d'une répartition uniforme, la valeur théorique

Tableau 2

minimale étant 0. Nous obtenons la valeur 3,13 pour l'être humain et 0,37 pour l'ordinateur. Sur notre exemple, le choix de faire 100 tirages impose une valeur minimale de 0,02.

Tirer une conclusion de ces valeurs demande des calculs complexes car il faut estimer la probabilité d'obtenir une valeur non nulle dans le cas où le choix est vraiment aléatoire. Heureusement, les calculs correspondants sont implémentés dans différents logiciels libres, comme par exemple le logiciel de statistiques R [5] ou la bibliothèque de calcul scientifique GSL [6]. On trouve alors que la probabilité d'avoir un χ^2 supérieur ou égal à 3,13 pour 100 tirages est seulement de 21%, alors qu'une valeur supérieure ou égale à 0,37 est obtenue avec une probabilité de 83%. En termes simples, cela signifie que si on utilise un vrai générateur uniforme, on obtient une répartition aussi mauvaise que celle obtenue par le joueur humain dans seulement 21% des cas, alors qu'on en obtient une aussi mauvaise que ce qui a été proposé par l'ordinateur dans 83% des cas. Il est donc légitime de douter du caractère aléatoire du choix de l'être humain.

Cependant, le test du χ^2 est loin d'être suffisant. En effet, je peux le passer haut la main en jouant de façon répétée la séquence (pierre, papier, ciseaux), sans une seule variation aléatoire. J'obtiens ainsi des effectifs de 34, 33 et 33, et un score de 0,02, le minimum possible sur 100 tirages. Ce score est obtenu dans 99% des cas (en fait dans 100%, mais il y a une forme d'approximation dans le calcul que je ne détaillerai pas ici) ce qui semble valider le caractère "aléatoire" du choix.

Pour aller plus loin, il faut impérativement tenir compte des corrélations entre les coups joués, en d'autres termes, de la présence d'éventuelles séquences. En effet, jouer de façon complètement aléatoire, c'est entre autres ne tenir aucun compte du passé : les coups doivent être indépendants les uns des autres. La probabilité de choisir pierre pour mon troisième coup doit être la même quels qu'aient été mes coups précédents. Or, la séquence proposée ici ne respecte absolument pas cette règle. Par exemple, la probabilité d'avoir papier suivi de pierre est nulle, alors qu'elle devrait être de 1/9 (une chance sur trois d'avoir papier, puis une chance sur trois d'avoir pierre, les probabilités devant être multipliées ici).

Tester si les choix de coups sont indépendants est assez délicat. Une technique simple consiste à généraliser le χ^2 sur des séquences de coups. On considère par exemple toutes les séquences de 2 coups. Si le joueur joue PRCCPR (notation anglaise), on devra donc étudier les paires PR, RC, CC, CP, et PR.

Comme pour l'analyse simple proposée au-dessus, on note la fréquence d'apparition de chacune des neuf paires possibles et on compare la table obtenue à une table théorique. Celle-ci affecte la probabilité 1/9 à chaque paire car on suppose que les tirages sont indépendants.

La comparaison entre les tables passe par une distance du χ^2 calculée comme pour les simples fréquences d'apparition des coups. En reprenant l'exemple précédent, on obtient les résultats résumés dans les tableaux 3 et 4. Pour lire ces tableaux, il faut considérer la ligne comme indiquant le premier coup de la séquence et la colonne pour le second. Attention, seulement 99 paires peuvent être obtenues à partir de 100 coups. Rappelons que le tableau théorique contient 100/9 dans chaque case, soit environ 11, ce qui montre clairement que le joueur humain ne choisit pas ses coups au hasard.

Résultats du joueur humain

	Pierre	Papier	Ciseaux
Pierre	5	12	8
Papier	9	9	19
Ciseaux	10	16	11

Tableau 3

Résultats de l'ordinateur

	Pierre	Papier	Ciseaux
Pierre	11	9	12
Papier	9	9	13
Ciseaux	12	13	11

Tableau 4

On remarque en particulier que pierre n'est pas souvent suivi de pierre, et au contraire que papier est très souvent suivi de ciseaux, pour prendre les cas les plus extrêmes. En termes de distance du χ^2 , on obtient la valeur de 13,09 dans le cas du joueur humain et celle de 2 dans le cas de l'ordinateur. R transforme ces valeurs en probabilités respectives de 10,9% et 98,1%. Cela signifie, comme dans le cas de la simple répartition des coups, qu'un générateur aléatoire a une probabilité de seulement 11% d'obtenir une table aussi éloignée de la table théorique que celle produite par le joueur humain.

Ceci confirme le caractère non aléatoire des choix effectués par l'être humain. Le lecteur attentif aura remarqué que le lien entre la distance du χ^2 et les probabilités semble complexe car 0,37 ne correspondait qu'à 83% dans l'exemple précédent contre 98% pour une distance de 2 dans le présent exemple.

En fait, ce comportement est normal car on doit tenir compte du nombre de possibilités étudiées pour faire la traduction. Or, dans le premier exemple, on considère 3 coups alors qu'ici on a 9 séquences possibles, ce qui change pas mal de choses. Pour fixer les idées, terminons avec la proposition de jeu déterministe (répéter la séquence RPS sans fin) qui donnait un résultat parfait avec la simple approche par répartition. Sur 100 coups, cette stratégie donne le tableau 5.

Résultats de la stratégie RPS

	Pierre	Papier	Ciseaux
Pierre	0	33	0
Papier	0	0	33
Ciseaux	33	0	0

Tableau 5

La distance du χ^2 est alors de 198 (!). La probabilité d'obtenir une telle valeur à partir d'un générateur aléatoire est nulle. Plus précisément, elle est tellement faible que les bibliothèques de calcul l'approchent par la valeur zéro.

On pourrait prolonger cette section pour explorer les subtilités permettant de tester si une répartition est véritablement aléatoire. Cependant, cela nous éloignerait beaucoup de notre sujet et demanderait de gros investissements mathématiques. Je renvoie donc le lecteur intéressé à diverses références en ligne [7][8][9], en précisant qu'elles sont d'un abord assez délicat (disons plus clairement qu'elles demandent le niveau licence de mathématiques ou assimilé, au minimum).

Exploiter les faiblesses de l'adversaire

Nous venons de voir que l'être humain est incapable de produire du hasard, ce qui peut être "facilement" retourné contre lui dans des jeux comme le PPC. En effet, la stratégie aléatoire n'est optimale que si l'adversaire joue le mieux possible, c'est-à-dire aléatoirement lui aussi. Dès qu'un joueur s'éloigne de l'aléatoire optimal, on peut exploiter cette faiblesse. Pour prendre un cas extrême, on peut considérer celui du joueur qui choisit toujours pierre. Il suffit de jouer toujours papier pour l'écraser.

L'idée de base pour une IA intéressante pour un jeu de PPC est donc de découvrir dans le jeu de l'humain les éléments non aléatoires, en un certain sens les répétitions, afin de prédire le comportement de l'humain et ainsi le battre. Nous allons voir que c'est en fait relativement facile, ce qui est un peu gênant pour notre fierté...

Lire dans l'esprit du joueur

Les pionniers Hagelberg et Shannon

Dans les années 50, David Hagelberg et Claude Shannon ont construit des *Mind reading machines*, littéralement des machines télépathes, qui donnaient vraiment l'impression de lire dans l'esprit du joueur. Le jeu utilisé était celui dit du *matching penny*. Le joueur humain doit choisir entre deux alternatives (par exemple pile et face) et la machine doit deviner son choix, bien entendu sans tricher. Le jeu se répète pour un nombre de manches fixé à l'avance, comme pour le PPC.

Les machines de Hagelberg et Shannon étaient basées sur le fait que les humains ne jouent pas au hasard (qui est la stratégie optimale comme pour le PPC) et sont influencés par diverses considérations stratégiques et psychologiques. La machine de Shannon travaille en considérant les deux

derniers choix du joueur et les résultats de ces coups (échec ou victoire), ce qui donne en fait huit possibilités (par exemple, j'ai joué deux fois de suite la même chose et j'ai perdu à chaque fois). Dans chacune des huit situations, le joueur peut répéter son dernier coup au tour d'après ou bien changer de coup. La machine de Shannon stocke les deux dernières attitudes du joueur pour chacune des huit situations et prend une décision en fonction des "mémoires" ainsi constituées. Si la mémoire détecte une répétition de stratégie, la machine considère que cette répétition va continuer et joue donc en conséquence. Sinon, elle joue au hasard. Si une mémoire fait prendre une mauvaise décision, elle est simplement effacée (cf [10] pour les détails).

La machine de Shannon est très intéressante pour deux raisons. Tout d'abord, elle gagne très souvent contre des adversaires humains, même prévenus que l'ordinateur est très fort (et ne triche pas). De plus, elle est facile à battre même quand on ne connaît pas l'algorithme exact, à condition d'être très attentif et d'avoir une bonne mémoire. C'est exactement ce qu'on cherche à obtenir pour le premier niveau de difficulté d'un jeu contre l'ordinateur. Bien entendu, les spécialistes demanderont un challenge de plus haut niveau, mais il est important de proposer une difficulté ajustable pour ne pas décourager les débutants.

L'algorithme de Minasi

Adapter la machine de Shannon au jeu du PPC ne pose pas de problème majeur en théorie. Cependant, nous sommes confrontés à un problème combinatoire. En effet, la symétrie dans le jeu du *matching penny* permet de ne considérer que 8 configurations. Dans le cas du PPC, on doit prendre en compte toutes les possibilités sur les deux derniers coups de l'humain et de la machine, soit 3^4 possibilités, c'est-à-dire 81 mémoires. Le problème n'est pas celui du stockage, mais plutôt celui de la pertinence des informations stockées.

En effet, une partie de PPC ne peut pas raisonnablement durer plus d'une centaine de manches. Or, il est assez rare de répéter une configuration de coups sur une telle durée. En fait, si on fait jouer au hasard deux programmes l'un contre l'autre, on obtient en moyenne 50 configurations différentes sur une partie de 100 coups, les configurations étant assez peu répétées. Il est fréquent par exemple que plus de la moitié des configurations explorées ne soit pas répétées. Or, toute la mécanique de l'algorithme de Shannon est basée sur les répétitions et l'algorithme est donc assez peu efficace sur le PPC (comme nous le verrons par la suite, il existe cependant des variantes efficaces).

La solution réside dans un algorithme à la fois plus simple et plus souple que celui de Shannon, l'algorithme de Minasi. Il s'agit tout simplement de chercher dans l'historique des coups les situations similaires à la situation présente et d'en déduire un modèle des réactions du joueur, puis une décision adaptée.

La grosse différence avec l'algorithme de Shannon est que la notion de situation ou de contexte ne correspond plus à une taille fixe, mais s'adapte au contraire à l'historique du jeu. L'algorithme commence en effet par rechercher dans l'historique les coups du joueur identiques à celui qu'il vient de jouer. S'il trouve au moins 2 fois un tel coup (en plus de l'apparition finale), il recherche des situations dans lesquelles non seulement le joueur avait joué le même coup que celui qu'il vient de jouer, mais de plus que l'ordinateur avait aussi joué un coup identique à celui qu'il vient d'opposer au joueur. L'opération se répète jusqu'à obtenir la plus longue séquence de coups identique à la séquence courante. Une fois la plus longue séquence déterminée, Minasi observe le comportement du joueur pour les occurrences de celle-ci et joue en faisant l'hypothèse que le joueur va reproduire son comportement passé. Pour bien comprendre l'algorithme, étudions l'exemple donné par le tableau 6.

Exemple de partie contre Minasi

Manche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Joueur	R	R	S	S	P	P	R	S	P	S
Minasi	S	S	P	P	R	P	S	R	S	S

Tableau 6

Pour faciliter l'interprétation de la recherche du contexte, on peut adopter une représentation utilisée entre autres dans [10]. On note les coups du joueur humain en minuscules et ceux de l'ordinateur en majuscules. Ensuite, on transforme le tableau 6 en une chaîne de caractères en commençant toujours par le coup de l'ordinateur. On obtient la chaîne de caractères suivante :

SrSrPsPsRpPpSrRsSpSs

L'algorithme de Minasi consiste donc à chercher la plus grande chaîne de caractères qu'on retrouve à la fois à la fin de l'historique et quelque part ailleurs dans celui-ci. Pour les deux premiers coups, il n'y a pas d'historique exploitable, et Minasi joue donc au hasard (d'ailleurs, il n'a pas de chance). Étudions les manches suivantes :

■ **Manche 3 (SrSr)** : comme dans toute la suite du déroulement de la partie, l'algorithme recherche une situation comparable à la situation présente. Comme je viens de jouer pierre (Rock), il cherche si j'ai déjà joué ce coup. C'était le cas dans la manche 1. Comme l'historique se termine sur cette manche, la recherche s'arrête. On remarque ici un point important : quand le contexte (ici réduit à r) apparaît une seule fois en dehors de la fin de l'historique, il est inutile de chercher un contexte plus long. En effet, celui-ci ne pourrait qu'apparaître au même endroit. Or, l'algorithme se base sur le coup suivant l'apparition du contexte, qu'on peut déterminer sans avoir à connaître la taille exacte de celui-ci. Ici, l'algorithme constate qu'après avoir joué pierre, j'ai joué de nouveau pierre, il pense donc que je vais poursuivre cette répétition. Il joue donc papier

pour contrer mon pierre. Comme je connais l'algorithme, je m'attends à ce coup et je contre donc par un ciseaux !

■ **Manche 4 (SrSrPs)** : je viens de jouer ciseaux et c'était la première fois dans la partie, Minasi joue donc au hasard, et n'a toujours pas de chance !

■ **Manche 5 (SrSrPsPs)** : comme dans la manche 3, Minasi retrouve une seule occurrence de ciseaux (joué à la manche 3) et pense donc que je vais jouer ciseaux, qu'il tente donc de contrer par pierre. Et je gagne car je connais l'algorithme...

■ **Manche 6 (SrSrPsPsRp)** : je viens de jouer papier pour la première fois et Minasi joue donc au hasard.

■ **Manche 7 (SrSrPsPsRpPp)** : comme dans les manches 3 et 5, Minasi retrouve une seule occurrence de papier (joué à la manche 5) et tente donc de me battre par un ciseaux destiné à contrer un triplement de papier.

■ **Manche 8 (SrSrPsPsRpPpSr)** : ça se complique ! Minasi trouve deux occurrences de pierre dans l'historique, en manches 1 et 2 (en rouge dans la chaîne suivante : SrSrPsPsRpPpSr). Il étend donc la longueur du contexte à 2 et cherche si j'ai déjà joué pierre alors que lui jouait ciseaux (première occurrence en rouge et deuxième en bleu : SrSrPsPsRpPpSr). Il trouve deux fois ce contexte, toujours dans les manches 1 et 2. Minasi tente alors une recherche sur un contexte de longueur 3, sans succès. En effet, je n'ai jamais joué papier suivi de ciseaux précédemment (la chaîne pSr n'apparaît donc qu'une fois dans l'historique). Il reste donc deux apparitions d'un contexte de longueur 2. Dans le premier cas (manche 1), j'ai joué ensuite pierre alors que dans le second (manche 2) j'ai joué ciseaux. Minasi choisit aléatoirement sa réponse parmi les deux contres envisageables, à savoir papier et pierre. Je commets ici ma première erreur en jouant ciseaux, alors que j'aurais du jouer papier, seul coup sans risque.

■ **Manche 9 (SrSrPsPsRpPpSrRs)** : Minasi trouve deux occurrences de ciseaux (mon dernier coup), en manches 3 et 4 (en rouge dans la chaîne suivante : SrSrPsPsRpPpSrRs). L'extension du contexte à la longueur 2 ne donne rien car je n'ai jamais joué ciseaux contre pierre (une seule apparition de Rs en dehors de la fin). J'ai fait suivre ciseaux une fois de ciseaux et une autre fois de papier. Minasi choisit donc aléatoirement entre pierre et ciseaux. De nouveau, je commets une erreur fatale en jouant papier alors que seul pierre était sans risque.

■ **Manche 10 (SrSrPsPsRpPpSrRsSp)** : comme dans la manche précédente, Minasi trouve deux occurrences d'un contexte de longueur 1, à savoir papier, suivies respectivement de papier et de pierre (toujours en rouge : SrSrPsPsRpPpSrRsSp). Il choisit donc au hasard un coup entre ciseaux et papier. Dépit par mes deux derniers échecs, je joue au hasard ciseaux, qui s'avérait le seul coup sans risque.

Globalement, je gagne donc cette partie, mais avec beaucoup de chance et surtout parce qu'elle n'a duré que



10 manches. Sur des parties plus longues, il est très difficile de gagner et cela demande une grande concentration. En fait, les expériences menées par Christophe Meyer [11] montrent que sur une partie d'une centaine de manches, Minasi gagne presque systématiquement contre un humain.

L'algorithme de Minasi est donc capable d'exploiter les régularités dans le jeu d'un humain afin de le battre. Il rend ainsi l'expérience ludique beaucoup plus intéressante car il s'adapte à l'humain pour le battre, contrairement au joueur aléatoire. Si je joue toujours la même chose, même une séquence de coups de longueur élevée, Minasi découvre la séquence et me bat. Comme annoncé plus haut, un algorithme simple peut battre presque systématiquement un adversaire humain au PPC.

Les limites

La solution proposée par Minasi n'est cependant pas parfaite et ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord, en termes ludiques, Minasi est beaucoup trop fort. Pour le battre, la seule solution consiste à reproduire son raisonnement. Or, celui-ci est typiquement informatique et s'appuie sur la force brute : la mémoire de tous les coups de la partie et la faculté de chercher des motifs (le contexte) dans cette mémoire. Sans une aide informatique, par exemple sous forme d'une représentation de l'historique des coups, nous ne pouvons pas faire la même chose, surtout si on limite le temps de réflexion à chaque manche. Ce qui rend le jeu particulièrement difficile est l'aspect adaptatif du contexte.

En effet, le joueur ne connaissant pas l'algorithme de Minasi constate rapidement que répéter un coup est une mauvaise idée. Il tente donc de gagner en amenant l'ordinateur à croire à une possible répétition (par exemple trois fois pierre) et en jouant au contraire un autre coup.

Le problème est que cette nouvelle stratégie est facilement repérée par Minasi en augmentant la taille du contexte. Au fur et à mesure de l'avancement de la partie, les stratégies imaginées par le joueur humain sont peu à peu découvertes et battues par Minasi, ce qui est assez frustrant.

Un autre problème, plus conceptuel, concerne le modèle sous-jacent à l'algorithme de Minasi. En effet, il suppose que nous répétons notre comportement sans tenir compte ni de nos oublis, ni de notre apprentissage.

En pratique, la simplicité du jeu et le potentiel de répétition fait que ce modèle est relativement efficace sur le long terme. Toujours dans le même ordre d'idée, l'algorithme ne tient pas compte des parties précédentes avec le même joueur, ce qui le rend assez inefficace en début de partie. Enfin, il ne tient pas compte d'un comportement de contre-modélisation.

En effet, l'idée de base de l'algorithme est de deviner comment pense l'adversaire pour essayer de le contrer. L'adversaire pourrait bien sûr faire la même chose, éventualité dont Minasi ne tient pas compte.

D'autres solutions

Variantes simples

Diverses variantes de l'algorithme de Minasi sont envisageables soit pour améliorer l'expérience ludique, soit pour rendre le modèle de l'adversaire plus pertinent. Voici quelques exemples :

■ On peut limiter la zone de recherche, en d'autres termes la longueur de l'historique. L'idée est que la mémoire à court terme des êtres humains est assez limitée et donc qu'il ne sert à rien de chercher un comportement répété il y a 50 manches. La difficulté réside bien entendu dans le choix de la longueur de l'historique, qui doit être réglée par des essais contre des adversaires humains. Le paramètre peut d'ailleurs jouer le rôle d'un niveau de difficulté pour le jeu. Il est clair en effet que si on réduit l'historique à deux coups par exemple, Minasi devient plus facile à battre car le joueur humain peut facilement retenir les deux derniers coups et leur appliquer l'algorithme pour prédire le coup de l'ordinateur ;

■ On peut limiter la longueur du contexte. Cette modification est subtilement différente de la précédente. Au lieu de limiter le nombre de coups conservés en mémoire, on limite la longueur des séquences recherchées dans l'historique. Cette modélisation du joueur n'est pas très réaliste mais permet un réglage de la difficulté. Si le contexte est par exemple limité à 2 manches, le joueur humain peut mettre en œuvre des stratégies basées sur des motifs plus longs et battre ainsi l'algorithme ;

■ On peut pondérer une occurrence d'un contexte dans le passé en fonction de la longueur du contexte et de la position de l'occurrence. L'idée est de mettre en balance la longueur du contexte qui est plutôt un indicateur de fiabilité de l'occurrence (plus le contexte est long moins sa réapparition dans le passé peut être un simple hasard) et la distance temporelle entre l'instant présent et l'occurrence du contexte dans le passé (le joueur a de fortes chances d'abandonner les stratégies utilisées au début de la partie quand celle-ci avance). Chaque contexte retrouvé dans l'historique est associé à un coup suivant joué par l'humain. La technique de pondération est utilisée pour calculer une probabilité pour chaque coup possible en fonction du coup suivant associé à chaque contexte. Si le contexte associé au coup suivant pierre a une forte pondération, l'algorithme de Minasi modifié suppose qu'il est très probable que le joueur humain rejoue pierre. Minasi va donc choisir avec une forte probabilité papier. Cette technique de pondération modélise de façon beaucoup plus satisfaisante le joueur humain (cf [12] pour des détails) ;

■ On peut tenir compte du succès ou de l'échec d'une stratégie. L'idée est de supposer que l'humain n'est pas (trop) idiot et ne répète pas ses erreurs (vu le succès de Minasi contre les adversaires humains, il est permis de douter de cette hypothèse, mais c'est un peu déprimant...). En fait, on réalise une fusion entre l'algorithme de Shannon et celui de Minasi. Quand on découvre une ou plusieurs

occurrences du contexte de longueur maximale dans le passé, on considère à la fois le prochain coup joué et l'issue de ce coup. Si on obtient par exemple une seule occurrence du contexte, suivie par une défaite, on peut supposer que le joueur ne va pas commettre de nouveau cette erreur et tenter de contrer un des autres coups possibles. Au contraire, une victoire renforcera la volonté du joueur de répéter son coup. Des occurrences mixtes doivent être pondérées.

Il est bien entendu possible (et même souhaitable) de combiner les modifications de l'algorithme, en gardant à l'esprit que le but est de battre les meilleurs joueurs tout en étant capable de dégrader l'IA pour l'adapter aux plus mauvais. Un ordinateur impossible à battre devient vite très énervant...

Une modélisation statistique

Une approche assez différente de celle de Minasi consiste à réaliser une modélisation statistique du comportement du joueur humain [13]. En fait, il s'agit d'une sorte de Minasi à contexte de taille bornée, mais répété sur plusieurs parties. Le principe de base est de considérer toutes les possibilités pour les k derniers coups de la partie (comme dans Minasi, on ordonne les coups en commençant par celui de l'ordinateur, le dernier coup étant donc toujours celui du joueur humain).

Comme dans Minasi, on recherche toutes les occurrences du contexte ainsi produit. Par contre, au lieu de rechercher seulement dans la partie en cours, on étudie l'historique d'un ensemble de parties conservées dans une base de données de parties. On obtient de cette manière un certain nombre d'occurrences, chacune étant associée à un coup suivant pour le joueur humain.

On peut alors calculer la probabilité pour l'humain de choisir un des coups possibles dans le contexte considéré (il suffit de diviser le nombre d'apparition du coup considéré par le nombre total d'occurrences du contexte). Si on considère l'exemple de partie contre Minasi étudié précédemment avec un contexte de longueur 2 (mon dernier coup et le dernier coup de l'ordinateur), on compte 7 contextes distincts (pour une longueur 2, il existe au total 9 contextes distincts). Le tableau 7 donne les occurrences de chaque contexte, avec les coups suivants associés pour le joueur humain. Le dernier contexte n'apporte aucune information car il n'est pas suivi par d'autres coups.

Occurrences d'un contexte de longueur 2

Tableau 7

Contexte	Sr	Ps	Rp	Pp	Rs	Sp	Ss
Occurrences	r,s,s	s,p	p	r	p	s	

Considérons par exemple le contexte Sr (je joue pierre alors que l'ordinateur joue ciseaux). D'après l'historique, il a été suivi dans deux cas par le coup s (ciseaux) et dans un cas par r (pierre). La modélisation statistique consiste

à dire que le joueur a ainsi une probabilité de $2/3$ de jouer ciseaux quand il vient de jouer pierre et que l'ordinateur a joué ciseaux, contre une probabilité de $1/3$ de jouer pierre dans les mêmes circonstances. La stratégie de l'ordinateur basée sur cette modélisation sera donc de jouer pierre avec une probabilité $2/3$ et papier avec une probabilité de $1/3$.

Notons que dans la partie considérée, le contexte actuel n'ayant jamais été vu, l'ordinateur choisira son prochain coup au hasard : on voit donc qu'il est important de disposer de plusieurs parties pour estimer au préalable les probabilités de façon satisfaisante (il est peu vraisemblable, par exemple, que le contexte Rp soit toujours suivi du coup pierre pour le joueur). Il est aussi souhaitable de créer des contextes spéciaux pour gérer le début de partie : on peut ainsi estimer la probabilité que le joueur "ouvre" la partie sur chacun des coups possibles.

Comme dans les variantes de Minasi, en jouant sur la longueur du contexte, on règle l'intelligence artificielle. Par contre, l'augmentation de cette longueur dégrade la qualité de l'estimation des probabilités (comme nous l'avons indiqué dans notre discussion sur l'application de l'algorithme de Shannon au PPC).

En fait, comme le PPC n'utilise que trois choix, un contexte de longueur k correspond à 3^k possibilités pour les k coups étudiés. Chaque possibilité doit apparaître plusieurs fois pour qu'on puisse avoir confiance en l'estimation des probabilités concernant celle-ci. Une modélisation mathématique permet de déterminer la confiance qu'on peut associer à ce genre d'estimation en fonction du volume de données disponibles, mais une telle sophistication n'est pas vraiment utile ici. Il suffit en général d'avoir une dizaine d'observations pour chaque contexte possible pour que les évaluations soient de qualité suffisante pour notre application.

Cette valeur est liée au nombre de coups possibles : si nous avons 10 coups possibles à chaque manche, il faudrait beaucoup plus d'observations, au moins une trentaine. En pratique, on doit donc sauvegarder suffisamment de parties pour obtenir le nombre requis d'observations. Or, une partie de m manches engendre $m-1-\frac{1}{2}$ contextes de longueur k (dans cette formule, $\frac{1}{2}$ doit être arrondi à l'entier supérieur), avec bien entendu des répétitions. Si on considère que les contextes sont régulièrement répartis, il faut donc stocker N parties de m manches pour obtenir une bonne estimation, avec N donné par la formule suivante : $N = \frac{m-1-\frac{1}{2}}{k}$.

Par exemple, pour des contextes de longueur 4 (comme dans l'algorithme de Shannon) et des parties de 100 manches, on observe 97 contextes par partie, et il nous faut donc stocker 9 parties pour avoir une estimation correcte des probabilités.

Avec 50 manches (ce qui est déjà assez long), il faut stocker 18 parties. Si on se contente d'un contexte de longueur 2,

on peut se limiter à 2 parties de 50 manches, alors que pour un contexte de longueur 6, il faut 159 parties de 50 manches. La croissance exponentielle du nombre de contextes possibles limite donc en pratique la longueur envisageable, car une grande longueur entraîne soit une mauvaise évaluation des probabilités, soit l'analyse d'un très grand nombre de parties.

Une erreur à ne pas commettre

En conclusion des améliorations proposées, j'aimerais insister sur un point très important : le but est avant tout d'enrichir l'expérience ludique en proposant un adversaire puissant, mais pas trop.

Cela passe bien entendu par un algorithme évolué, mais aussi réglable et surtout qu'un adversaire humain de bon niveau soit capable de battre. C'est pourquoi il faut être très prudent si on cherche à s'inspirer des techniques déployées dans la compétition de PPC organisée par Darse Billing [14].

Cette compétition est passionnante et elle a opposé des programmes déployant une IA d'excellent niveau, mais elle est biaisée vers une intelligence informatique. En effet, les programmes ne sont pas opposés à des adversaires humains mais à d'autres programmes et n'ont qu'un seul but : gagner. De ce fait, les solutions retenues sont prévues pour contrer les approches par force brute (mémoire infinie et recherche parfaite des sous-séquences) qui ne sont absolument pas réalistes pour les êtres humains.

De plus, le but n'est pas de produire une IA qui pourrait être battue par un humain. De ce fait, les meilleurs programmes sélectionnés par la compétition de PPC ne correspondent pas toujours à des adversaires agréables pour un joueur classique et même pour un expert.

Aller plus loin

En termes de *gameplay*

Bien entendu, le jeu de PPC n'est pas le jeu le plus intéressant qui soit, loin s'en faut. Comme je l'ai déjà indiqué, il est cependant utilisé comme base pour le *gameplay* de nombreux jeux. Pour le rendre plus intéressant, il est en général associé à une modification très simple de ses règles qui a des conséquences très importantes. L'idée est simplement de proposer un gain différent pour chacun des coups.

Au lieu de marquer 1 point pour une victoire quel que soit le coup utilisé pour celle-ci, on gagne plus ou moins suivant le coup joué. Ce principe est utilisé par exemple pour les jeux de combat (cf [3]) : un coup direct (coup de poing ou de pied) cause le plus de dommages à l'adversaire, une projection produit un peu moins de dégât, alors qu'un blocage ne produit en général aucun dégât. A priori, il est donc intéressant d'utiliser le coup direct, mais le blocage le contre facilement.

Cependant, je ne peux pas bloquer à chaque manche car une projection me fera perdre. L'introduction de gains asymétriques complique donc la stratégie de base en rendant certains coups plus risqués que les autres. Dans les jeux STR, l'introduction de coups de production pour les unités, de points de vie et de puissance des armes et des protections, complique de la même façon le *gameplay* et donc les stratégies de base.

Un algorithme comme Minasi ne fonctionne pas tel quel avec la modification proposée. En effet, il peut être intéressant de perdre peu plusieurs fois pour embrouiller l'algorithme, puis de gagner au final. Une stratégie totalement basique consiste par exemple à toujours attaquer de façon directe, ce que Minasi bloque sans marquer de point.

Au dernier tour, on joue une projection qui gagne contre le blocage; avec un peu de chance dans les deux premières manches, on remporte la partie. Pour améliorer l'algorithme, il faut alors tenir compte du gain associé à un coup, en particulier dans l'estimation des probabilités quand on hésite entre plusieurs possibilités pour le joueur.

En termes de domaines d'applications

Si on prend un peu de recul par rapport aux diverses méthodes proposées (Shanon, Minasi et ses variantes, la modélisation statistique), on constate qu'elles procèdent toujours de la même façon : elles cherchent à repérer des répétitions dans le comportement du joueur afin de prédire ses actions à venir.

Or, rien n'est spécifique au PPC dans cette façon de procéder. Comme l'exposent très bien [12] et [13], détecter des comportements répétitifs ou estimer la probabilité d'apparition d'un comportement donné dans un contexte fixé est utile de façon générale pour l'IA des jeux vidéo. Voici quelques exemples issus de [12] :

■ Dans les jeux de simulation sportive type tennis ou football, le terrain peut être découpé en zones contenant ou non un joueur, ce qui correspond plus ou moins à un schéma tactique. L'évolution du schéma tactique au cours de la partie est en fait la stratégie du joueur. En repérant des évolutions classiques (par exemple un joueur de tennis qui revient toujours au centre du terrain après avoir frappé la balle), on peut prévoir le comportement du joueur et l'anticiper (et donc prendre notre tennisman à contre-pied, par exemple) ;

■ Dans les jeux de type *First Person Shooter*, certains joueurs se placent toujours aux mêmes endroits pour diverses raisons (point d'apparition des munitions, position favorable au *snipe*, etc.). Pour éviter d'être repérés, ils changent régulièrement de position. L'analyse des positions de station permet de découvrir automatiquement les positions stratégiques. De plus, le cheminement dans les positions est souvent assez répétitif, ce qui peut être repéré facilement et donc utilisé pour tendre une embuscade, par exemple.

Conclusion

Les algorithmes présentés dans cet article donnent à l'ordinateur la faculté d'anticiper les actions d'un joueur. Dans des jeux élémentaires, cette forme d'intelligence artificielle améliore l'expérience ludique en proposant un adversaire digne de ce nom, dont le niveau est facilement réglable. Grâce à ces méthodes, le joueur peut retrouver une partie du plaisir de jeu éprouvé face à un adversaire humain. Malgré la simplicité des algorithmes proposés, l'ordinateur se révèle ainsi étonnamment fort, parfois même un peu trop, ce qui motive en fait l'introduction d'algorithmes un peu plus complexes.

Reste donc à adapter les méthodes proposées à des jeux plus réalistes que "pierre, papier et ciseaux". Cela pose deux problèmes principaux. Tout d'abord, les jeux modernes comportent un très grand nombre de coups possibles. Il est donc peu probable que des séquences se répètent très fréquemment, ce qui rend l'estimation de probabilités assez délicate. Il est alors utile d'avoir une analyse de plus haut niveau, qui recherche des comportements fréquents de type stratégique plutôt que tactique (par exemple l'emplacement de la base et les routes utilisées pour les attaques dans un jeu STR). Il faut donc intégrer dans les algorithmes élémentaires des connaissances produites par des experts du jeu étudié.

L'autre difficulté réside dans la partie décisionnelle des algorithmes. En effet, pour le jeu "pierre, papier et ciseaux", la modélisation de l'adversaire est suffisante : si on sait que l'adversaire s'apprête à jouer pierre, la réponse optimale est papier. Dans les jeux plus évolués, la situation est beaucoup moins claire. Même si on sait que l'adversaire va attaquer avec une troupe constituée de deux chevaliers, quatre piquiers et quatre archers, la réponse optimale n'est pas très claire, d'autant que des contraintes de production d'unités entrent en jeu à la fois en termes de temps et de ressources.

Encore une fois, l'intervention d'experts humains est une solution possible. La construction automatique de règles pour une réponse optimale est un thème de recherche très actif. On trouvera dans la thèse de Christophe Meyer [11] une technique très intéressante basée sur l'optimisation d'un système expert par algorithmes génétiques, à partir d'une base de données de parties. Comme pour les jeux de stratégie classiques (cf [4]), l'introduction de techniques d'apprentissage automatique est certainement une des pistes les plus intéressantes pour la construction d'une IA digne des meilleurs joueurs humains.

Fabrice Rossi
 Projet AxIS (INRIA)
 Fabrice.Rossi@apiacoa.org
<http://apiacoa.org/>

Références

- [1] Site de la fédération mondiale de PPC : <http://www.worldrps.com/>
- [2] Site du championnat du monde de PPC : <http://www.rpschamps.com/>
- [3] Site de David Sirlin : <http://www.sirlin.net/>
- [4] Eric Lacombe et Fabrice Rossi - *L'intelligence artificielle des jeux de stratégie classiques*, GNU/Linux Magazine France, No 55, Novembre 2003.
- [5] Le projet R : <http://www.r-project.org/>
- [6] La bibliothèque GSL : <http://sources.redhat.com/gsl/>
- [7] Un cours sur la simulation de Pierre Douillet qui aborde les tests de générateurs aléatoires : <http://193.48.37.48/~douillet/preprint/simul/simul.html>
- [8] Une version plus pointue de [7] et en anglais (oui, ça commence à devenir dur...) par Pierre L'Ecuyer, un chercheur reconnu dans le domaine des générateurs aléatoires : http://www.iro.umontreal.ca/~lecuyer/myftp/papers/hand_sim.ps
- [9] Un site de référence sur les générateurs aléatoires qui contient une section sur les tests : <http://random.mat.sbg.ac.at/>
- [10] Christophe Meyer et Jean-Daniel Zucker Ⓓ "Mind-Reading Machines" *Modélisation des adversaires et anticipation dans les jeux à information complète et imparfaite*, Journées Française de l'apprentissage, JFA'99, Palaiseau, France. Disponible en ligne : <http://www-poleia.lip6.fr/~zucker/Papers/%20CAP'99.pdf>
- [11] Christophe Meyer - *S.A.G.A.C.E Solution Algorithmique Génétique par l'Anticipation de Comportements Evolutifs. Application aux jeux à information complète et imparfaite*. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 1999, Paris. Disponible en ligne : <http://www.lip6.fr/reports/lip6.1999.015.html>
- [12] Fri Mommersteeg Ⓓ *Pattern recognition with sequential prediction*, article du recueil *AI Game Programming Wisdom*, édité par Steve Rabin chez Charles River Media, 2002.
- [13] François Dominic Laramée - *Using N-Gram Statistical Models to Predict Player Behavior*, article du recueil *AI Game Programming Wisdom*, édité par Steve Rabin chez Charles River Media, 2002.
- [14] Darse Billing - *The Second International RoShamBo Programming Competition*. URL : <http://www.cs.ualberta.ca/~darse/rsbpc.html>

Creative Commons

Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 2.0

Creative Commons n'est pas un cabinet d'avocats et ne fournit pas de services de conseil juridique. La distribution de la présente version de ce contrat ne crée aucune relation juridique entre les parties au contrat présenté ci-après et Creative Commons. Creative Commons fournit cette offre de contrat-type en l'état, à seule fin d'information. Creative Commons ne saurait être tenu responsable des éventuels préjudices résultant du contenu ou de l'utilisation de ce contrat.

Contrat

L'Oeuvre (telle que définie ci-dessous) est mise à disposition selon les termes du présent contrat appelé Contrat Public Creative Commons (dénommé ici « CPCC » ou « Contrat »). L'Oeuvre est protégée par le droit de la propriété littéraire et artistique (droit d'auteur, droits voisins, droits des producteurs de bases de données) ou toute autre loi applicable. Toute utilisation de l'Oeuvre autrement qu'explicitement autorisée selon ce Contrat ou le droit applicable est interdite.

L'exercice sur l'Oeuvre de tout droit proposé par le présent contrat vaut acceptation de celui-ci. Selon les termes et les obligations du présent contrat, la partie Offrante propose à la partie Acceptante l'exercice de certains droits présentés ci-après, et l'Acceptant en approuve les termes et conditions d'utilisation.

1. Définitions

- a. « **Oeuvre** » : oeuvre de l'esprit protégeable par le droit de la propriété littéraire et artistique ou toute loi applicable et qui est mise à disposition selon les termes du présent Contrat.
- b. « **Oeuvre dite Collective** » : une oeuvre dans laquelle l'oeuvre, dans sa forme intégrale et non modifiée, est assemblée en un ensemble collectif avec d'autres contributions qui constituent en elles-mêmes des oeuvres séparées et indépendantes. Constituent notamment des Oeuvres dites Collectives les publications périodiques, les anthologies ou les encyclopédies. Aux termes de la présente autorisation, une oeuvre qui constitue une Oeuvre dite Collective ne sera pas considérée comme une Oeuvre dite Dérivée (telle que définie ci-après).
- c. « **Oeuvre dite Dérivée** » : une oeuvre créée soit à partir de l'Oeuvre seule, soit à partir de l'Oeuvre et d'autres oeuvres préexistantes. Constituent notamment des Oeuvres dites Dérivées les traductions, les arrangements musicaux, les adaptations théâtrales, littéraires ou cinématographiques, les enregistrements sonores, les reproductions par un art ou un procédé quelconque, les résumés, ou toute autre forme sous laquelle l'Oeuvre puisse être remaniée, modifiée, transformée ou adaptée, à l'exception d'une oeuvre qui constitue une Oeuvre dite Collective. Une Oeuvre dite Collective ne sera pas considérée comme une Oeuvre dite Dérivée aux termes du présent Contrat. Dans le cas où l'Oeuvre serait une composition musicale ou un enregistrement sonore, la synchronisation de l'oeuvre avec une image animée sera considérée comme une Oeuvre dite Dérivée pour les propos de ce Contrat.
- d. « **Auteur original** » : la ou les personnes physiques qui ont créé l'Oeuvre.
- e. « **Offrant** » : la ou les personne(s) physique(s) ou morale(s) qui proposent la mise à disposition de l'Oeuvre selon les termes du présent Contrat.
- f. « **Acceptant** » : la personne physique ou morale qui accepte le présent contrat et exerce des droits sans en avoir violé les termes au préalable ou qui a reçu l'autorisation expresse de l'Offrant d'exercer des droits dans le cadre du présent contrat malgré une précédente violation de ce contrat.

2. Exceptions aux droits exclusifs. Aucune disposition de ce contrat n'a pour intention de réduire, limiter ou restreindre les prérogatives issues des exceptions aux droits, de l'épuisement des droits ou d'autres limitations aux droits exclusifs des ayants droit selon le droit de la propriété littéraire et artistique ou les autres lois applicables.

3. Autorisation. Soumis aux termes et conditions définis dans cette autorisation, et ceci pendant toute la durée de protection de l'Oeuvre par le droit de la propriété littéraire et artistique ou le droit applicable, l'Offrant accorde à l'Acceptant l'autorisation mondiale d'exercer à titre gratuit et non exclusif les droits suivants :

- a. reproduire l'Oeuvre, incorporer l'Oeuvre dans une ou plusieurs Oeuvres dites Collectives et reproduire l'Oeuvre telle qu'incorporée dans lesdites Oeuvres dites Collectives;
- b. distribuer des exemplaires ou enregistrements, présenter, représenter ou communiquer l'Oeuvre au public par tout procédé technique, y compris incorporée dans des Oeuvres Collectives;
- c. lorsque l'Oeuvre est une base de données, extraire et réutiliser des parties substantielles de l'Oeuvre.

Les droits mentionnés ci-dessus peuvent être exercés sur tous les supports, médias, procédés techniques et formats. Les droits ci-dessus incluent le droit d'effectuer les modifications nécessaires techniquement à l'exercice des droits dans d'autres formats et procédés techniques. L'exercice de tous les droits qui ne sont pas expressément autorisés par l'Offrant ou dont il n'aurait pas la gestion demeure réservé, notamment les mécanismes de gestion collective obligatoire applicables décrits à l'article 4(d).

4. Restrictions. L'autorisation accordée par l'article 3 est expressément assujettie et limitée par le respect des restrictions suivantes :

- a. L'Acceptant peut reproduire, distribuer, représenter ou communiquer au public l'Oeuvre y compris par voie numérique uniquement selon les termes de ce Contrat. L'Acceptant doit inclure une copie ou l'adresse Internet (Identifiant Uniforme de Ressource) du présent Contrat à toute reproduction ou enregistrement de l'Oeuvre que l'Acceptant distribue, représente ou communique au public y compris par voie numérique. L'Acceptant ne peut pas offrir ou imposer de conditions d'utilisation de l'Oeuvre qui altèrent ou restreignent les termes du présent Contrat ou l'exercice des droits qui y sont accordés au bénéficiaire. L'Acceptant ne peut pas céder de droits sur l'Oeuvre. L'Acceptant doit conserver intactes toutes les informations qui renvoient à ce Contrat et à l'exonération de responsabilité. L'Acceptant ne peut pas reproduire, distribuer, représenter ou communiquer au public l'Oeuvre, y compris par voie numérique, en utilisant une mesure technique de contrôle d'accès ou de contrôle d'utilisation qui serait contradictoire avec les termes de cet Accord contractuel. Les mentions ci-dessus s'appliquent à l'Oeuvre telle qu'incorporée dans une Oeuvre dite Collective, mais, en dehors de l'Oeuvre en elle-même, ne soumettent pas l'Oeuvre dite Collective, aux termes du présent Contrat. Si l'Acceptant crée une Oeuvre dite Collective, à la demande de tout Offrant, il devra, dans la mesure du possible, retirer de l'Oeuvre dite Collective toute référence au dit Offrant, comme demandé. Si l'Acceptant crée une Oeuvre dite Collective, à la demande de tout Auteur, il devra, dans la mesure du possible, retirer de l'Oeuvre dite Collective toute référence au dit Auteur, comme demandé.

- b. L'Acceptant ne peut exercer aucun des droits conférés par l'article 3 avec l'intention ou l'objectif d'obtenir un profit commercial ou une compensation financière personnelle. L'échange de l'Oeuvre avec d'autres Oeuvres protégées par le droit de la propriété littéraire et artistique par le partage électronique de fichiers, ou par tout autre moyen, n'est pas considéré comme un échange avec l'intention ou l'objectif d'un profit commercial ou d'une compensation financière personnelle, dans la mesure où aucun paiement ou compensation financière n'intervient en relation avec l'échange d'Oeuvres protégées.
- c. Si l'Acceptant reproduit, distribue, représente ou communique l'Oeuvre au public, y compris par voie numérique, il doit conserver intactes toutes les informations sur le régime des droits et en attribuer la paternité à l'Auteur Original, de manière raisonnable au regard du médium ou au moyen utilisé. Il doit communiquer le nom de l'Auteur Original ou son éventuel pseudonyme s'il est indiqué ; le titre de l'Oeuvre Originale s'il est indiqué ; dans la mesure du possible, l'adresse Internet ou l'Identifiant Uniforme de Ressource (URI), s'il existe, spécifié par l'Offrant comme associé à l'Oeuvre, à moins que cette adresse ne renvoie pas aux informations légales (paternité et conditions d'utilisation de l'Oeuvre). Ces obligations d'attribution de paternité doivent être exécutées de manière raisonnable. Cependant, dans le cas d'une Oeuvre dite Collective, ces informations doivent, au minimum, apparaître à la place et de manière aussi visible que celles à laquelle apparaissent les informations de même nature.
- d. Dans le cas où une utilisation de l'Oeuvre serait soumise à un régime légal de gestion collective obligatoire, l'Offrant se réserve le droit exclusif de collecter ces redevances par l'intermédiaire de la société de perception et de répartition des droits compétente. Sont notamment concernés la radiodiffusion et la communication dans un lieu public de phonogrammes publiés à des fins de commerce, certains cas de retransmission par câble et satellite, la copie privée d'Oeuvres fixées sur phonogrammes ou vidéogrammes, la reproduction par reprographie.

5. Garantie et exonération de responsabilité

- a. En mettant l'Oeuvre à la disposition du public selon les termes de ce Contrat, l'Offrant déclare de bonne foi qu'à sa connaissance et dans les limites d'une enquête raisonnable :
 - i. L'Offrant a obtenu tous les droits sur l'Oeuvre nécessaires pour pouvoir autoriser l'exercice des droits accordés par le présent Contrat, et permettre la jouissance paisible et l'exercice licite de ces droits, ceci sans que l'Acceptant n'ait aucune obligation de verser de rémunération ou tout autre paiement ou droits, dans la limite des mécanismes de gestion collective obligatoire applicables décrits à l'article 4(e);
- b. L'Oeuvre n'est constitutive ni d'une violation des droits de tiers, notamment du droit de la propriété littéraire et artistique, du droit des marques, du droit de l'information, du droit civil ou de tout autre droit, ni de diffamation, de violation de la vie privée ou de tout autre préjudice délictuel à l'égard de toute tierce partie.
- c. A l'exception des situations expressément mentionnées dans le présent Contrat ou dans un autre accord écrit, ou exigées par la loi applicable, l'Oeuvre est mise à disposition en l'état sans garantie d'aucune sorte, qu'elle soit expresse ou tacite, y compris à l'égard du contenu ou de l'exactitude de l'Oeuvre.

6. Limitation de responsabilité. A l'exception des garanties d'ordre public imposées par la loi applicable et des réparations imposées par le régime de la responsabilité vis-à-vis d'un tiers en raison de la violation des garanties prévues par l'article 5 du présent contrat, l'Offrant ne sera en aucun cas tenu responsable vis-à-vis de l'Acceptant, sur la base d'aucune théorie légale ni en raison d'aucun préjudice direct, indirect, matériel ou moral, résultant de l'exécution du présent Contrat ou de l'utilisation de l'Oeuvre, y compris dans l'hypothèse où l'Offrant avait connaissance de la possible existence d'un tel préjudice.

7. Résiliation

- a. Tout manquement aux termes du contrat par l'Acceptant entraîne la résiliation automatique du Contrat et la fin des droits qui en découlent. Cependant, le contrat conserve ses effets envers les personnes physiques ou morales qui ont reçu de la part de l'Acceptant, en exécution du présent contrat, la mise à disposition d'Oeuvres dites Dérivées, ou d'Oeuvres dites Collectives, ceci tant qu'elles respectent pleinement leurs obligations. Les sections 1, 2, 5, 6 et 7 du contrat continuent à s'appliquer après la résiliation de celui-ci.
- b. Dans les limites indiquées ci-dessus, le présent Contrat s'applique pendant toute la durée de protection de l'Oeuvre selon le droit applicable. Néanmoins, l'Offrant se réserve à tout moment le droit d'exploiter l'Oeuvre sous des conditions contractuelles différentes, ou d'en cesser la diffusion; cependant, le recours à cette option ne doit pas conduire à retirer les effets du présent Contrat (ou de tout contrat qui a été ou doit être accordé selon les termes de ce Contrat), et ce Contrat continuera à s'appliquer dans tous ses effets jusqu'à ce que sa résiliation intervienne dans les conditions décrites ci-dessus.

8. Divers

- a. A chaque reproduction ou communication au public par voie numérique de l'Oeuvre ou d'une Oeuvre dite Collective par l'Acceptant, l'Offrant propose au bénéficiaire une offre de mise à disposition de l'Oeuvre dans des termes et conditions identiques à ceux accordés à la partie Acceptante dans le présent Contrat.
- b. La nullité ou l'inapplicabilité d'une quelconque disposition de ce Contrat au regard de la loi applicable n'affecte pas celle des autres dispositions qui resteront pleinement valides et applicables. Sans action additionnelle par les parties à cet accord, lesdites dispositions devront être interprétées dans la mesure minimum nécessaire à leur validité et leur applicabilité.
- c. Aucune limite, renonciation ou modification des termes ou dispositions du présent Contrat ne pourra être acceptée sans le consentement écrit et signé de la partie compétente.
- d. Ce Contrat constitue le seul accord entre les parties à propos de l'Oeuvre mise ici à disposition. Il n'existe aucun élément annexe, accord supplémentaire ou mandat portant sur cette Oeuvre en dehors des éléments mentionnés ici. L'Offrant ne sera tenu par aucune disposition supplémentaire qui pourrait apparaître dans une quelconque communication en provenance de l'Acceptant. Ce Contrat ne peut être modifié sans l'accord mutuel écrit de l'Offrant et de l'Acceptant.
- e. Le droit applicable est le droit français.

Creative Commons n'est pas partie à ce Contrat et n'offre aucune forme de garantie relative à l'Oeuvre. Creative Commons décline toute responsabilité à l'égard de l'Acceptant ou de toute autre partie, quel que soit le fondement légal de cette responsabilité et quel que soit le préjudice subi, direct, indirect, matériel ou moral, qui surviendrait en rapport avec le présent Contrat. Cependant, si Creative Commons s'est expressément identifié comme Offrant pour mettre une Oeuvre à disposition selon les termes de ce Contrat, Creative Commons jouira de tous les droits et obligations d'un Offrant.

A l'exception des fins limitées à informer le public que l'Oeuvre est mise à disposition sous CPCC, aucune des parties n'utilisera la marque « Creative Commons » ou toute autre indication ou logo afférent sans le consentement préalable écrit de Creative Commons. Toute utilisation autorisée devra être effectuée en conformité avec les lignes directrices de Creative Commons à jour au moment de l'utilisation, telles qu'elles sont disponibles sur son site Internet ou sur simple demande.

Creative Commons peut être contacté à <http://creativecommons.org/>.