La théorie des jeux démystifiée

Vincent Rollet

Édité par l'Institut Pandore

Composition : Fiammetta Condomines

Photographie de couverture : Zichuan Han

ISBN : 978-2-37-788069-0

Sommaire

Préface

Pourquoi décide-t-on de voter pour tel ou tel homme politique ? Quels produits décide-t-on de consommer ? Quel type d'éducation décide-t-on de donner à nos enfants ? Comment les entreprises décident-elles d'investir dans tel ou tel projet ? Pourquoi des pays décident-ils de déclarer la guerre à leurs voisins ? Ceux qui étudient les sciences sociales tentent d'apporter une réponse à toutes ces questions. Plus généralement, ils tentent de comprendre comment des agents (des électeurs, des consommateurs, des parents, des entreprises ou des pays) font leurs choix.

Cette analyse est en général difficile, car de tels agents ne prennent pas leurs décisions indépendamment des autres, mais en fonction de celles prises par ceux qui les entourent. Ainsi, les décisions d'un chef militaire dépendront de ce qu'il croit être la stratégie de l'ennemi. En l'entreprise, il faut choisir les secteurs d'activité dans lesquels il est le plus rentable d'investir, au vu des positionnements des concurrents et des consommateurs. Pour gagner une élection, un homme politique doit adapter ses discours et son programme en fonction des propositions des autres candidats. Lorsqu'un automobiliste prend la route pour aller au travail, il choisit la route qui lui permettra d'arriver le plus rapidement possible, en évitant les routes les plus encombrées. Les embouteillages auxquels il sera confronté sont le résultat des choix qu'ont faits les autres automobilistes.

Par ailleurs, lorsque notre automobiliste choisit la route qu'il décide finalement d'emprunter, il contribue à congestionner ce chemin choisi, influençant le choix des autres automobilistes qui se reporteront peut-être sur d'autres routes. Ainsi, sur la route, les voyageurs sont constamment en interaction, réagissant au comportement des autres usagers et impactant les choix de ceux-ci.

La théorie des jeux est une branche de l'économie qui s'intéresse à de telles interactions : lorsqu'un groupe de personnes doit réaliser des choix qui auront un impact sur les décisions des autres, que se passe-t-il ? Peut-on prédire les choix de chaque personne dans le groupe ? Comment peut-on influencer les choix des uns et des autres ? Les notions de théorie des jeux sont devenues incontournables dans l'étude des sciences économiques. Nash, Selten, Schelling, Aumann, Hurwicz, Myerson, Tirole... Tous ces économistes ont reçu le prix Nobel d'économie pour leurs travaux dans cette discipline.

Grâce aux modèles de théorie des jeux, il est possible d'étudier la compétition entre entreprises, les choix d'hommes politiques, l'évolution des espèces en biologie, les relations diplomatiques entre pays, les stratégies d'hommes de guerre, l'évolution de modes vestimentaires, etc.

Ce que ce livre est, ce qu'il n'est pas

Ce livre est une introduction à ce cadre de pensée développé dans la seconde partie du XXe siècle. Il se veut le plus accessible possible, et sa lecture ne nécessite aucune connaissance préalable. Les équations qui abondent normalement en théorie des jeux ont ici été remplacées par des graphiques et des tableaux.

Comme la théorie des jeux est une discipline à la croisée de l'économie et des mathématiques, certains seront peut-être curieux de voir comment les théoriciens des jeux étudient formellement des problèmes. Pour ces lecteurs curieux, quelques parties « pour aller plus loin » sont disséminées dans le texte. La lecture de ces pages n'est en aucun cas essentielle à la compréhension du livre. Néanmoins, elle permettra à ceux qui veulent en savoir plus de voir comment la théorie des jeux est formalisée, ou quels outils les théoriciens de jeux peuvent utiliser pour étudier des situations bien plus complexes que celles qui sont développées ici.

Pour que les concepts de théorie des jeux exposés dans ce livre ne soient pas pour vous des notions mathématiques abstraites, elles seront présentées de la manière suivante : chaque chapitre commence par une anecdote historique, politique, une curiosité de la nature ou un paradoxe intéressant. Le but de chaque chapitre est d'éclairer chacun de ces exemples grâce à la théorie des jeux. Le livre dans son ensemble constitue ainsi une introduction à cette branche des sciences économiques qui se veut accessible au plus grand nombre et où les concepts mathématiques sont le plus possible liés à la réalité.

Quelque chose risque de vous étonner dans la présentation de ces modèles : ils sont volontairement simples, simplistes parfois, et ignorent souvent des paramètres psychologiques ou sociaux. Les économistes qui travaillent aujourd'hui à la frontière de la recherche en théorie des jeux étudient des modèles bien plus complexes, et la présentation de ces travaux modernes dépasse largement l'objectif de ce livre. Néanmoins, les outils et les modèles évoqués ici font partie des bases de la discipline et donnent une bonne idée des raisonnements que l'on y mène. Après avoir étudié un bon nombre de modèles dans ce livre, nous reviendrons en conclusion sur leur bonne utilisation. D'ici là, nous vous souhaitons une bonne lecture !

Chapitre 1

Kansas City vs Kansas City

Le dilemme du prisonnier et les incitations fiscales

Certaines villes sont traversées par des frontières : c'est le cas de la ville de Kansas City aux États-Unis, en réalité constituée de deux entités administratives bien distinctes. En effet, la frontière qui sépare les deux États du Kansas et du Missouri passe en plein milieu de la ville. À l'est, on trouve donc Kansas City, Missouri, et à l'ouest, Kansas City, Kansas. Étant donné que les États américains sont tout à fait en paix, on pourrait se dire que les deux entités de Kansas City coexistent de manière pacifique. Or, au début des années 2000, une guerre économique commença entre les deux États du fait de cette frontière.

Aux États-Unis, les États gèrent une partie des taxes qui sont prélevées aux entreprises opérant sur leur territoire. En particulier, les États peuvent mettre en place des incitations fiscales pour attirer de nouvelles entreprises ou pour favoriser la création d'emplois. Ainsi, en 2009, le Kansas passa la loi *Promoting Employment Across Kansas* (PEAK) qui exemptait de certaines taxes les entreprises qui se relocalisaient sur son territoire. En 2013, le Missouri lança le programme *Missouri Works* qui offrait des incitations fiscales similaires. Ces deux politiques eurent effectivement pour effet de relocaliser des entreprises dans les deux États. Néanmoins, les relocalisations ne constituaient pas un changement radical pour la zone de Kansas City : pour profiter des avantages fiscaux qui leur étaient proposés, les entreprises établies à Kansas City, Missouri, n'avaient qu'à se déplacer de quelques kilomètres pour s'installer à Kansas City, Kansas, et vice versa.

Ainsi, l'entreprise financière *Cbiz, Inc.* déplaça en 2014 son quartier général de quelques kilomètres, passant de l'État du Kansas à l'État du Missouri et recevant par la même occasion une incitation fiscale de 25 millions de dollars. En 2011, AMC (une chaîne de cinémas) fit le mouvement inverse en passant du Missouri au Kansas pour recevoir 40 millions de dollars[1]. Les deux programmes PEAK et *Missouri Works* eurent donc l'effet de s'annuler entre eux : en 2015, le programme PEAK avait permis de relocaliser 5528 emplois de Kansas City, Missouri à Kansas City, Kansas pour une somme de 156 millions de dollars, tandis ce que le programme *Missouri Works* avait relocalisé 3863 emplois de Kansas City, Kansas à Kansas City, Missouri pour 100 millions de dollars. En cumulé, ce sont donc seulement 1665 emplois qui auront été relocalisés du Missouri vers le Kansas pour un coût de 256 millions de dollars[2]. Les États du Missouri et du Kansas mènent une guerre économique très coûteuse, profitant aux entreprises qui peuvent facilement obtenir des avantages fiscaux en menaçant de traverser la frontière pour s'installer dans l'État voisin (tout en restant dans la même ville !) En 2011, un collectif de businessmen locaux écrivit aux gouverneurs des deux États pour dénoncer leur irresponsabilité fiscale[3] :

> La communauté de Kansas City est en train de vivre une guerre économique frontalière. Les incitations des États sont en train d'être utilisées pour appâter des entreprises [d'un côté ou de l'autre] de la frontière. [Ce] va-et-vient sans gain économique net pour l'ensemble de la communauté provoque une érosion de la base fiscale de la zone.

Malgré cet appel à la coopération, la guerre économique entre les deux villes de Kansas City se poursuit à l'heure actuelle. Si les deux États retiraient en même temps leurs programmes d'incitation fiscale, les entreprises ne se relocaliseraient plus pour bénéficier d'avantages, et les États gagneraient des millions de dollars chaque année. Cependant, si un seul État arrêtait son programme d'incitations sans que l'autre fasse de même, de nombreuses entreprises se délocaliseraient dans l'État qui propose des incitations fiscales. De peur de perdre leurs entreprises, chacun des deux États refuse pour le moment de retirer son programme d'aide aux entreprises.

Une telle situation est appelée un dilemme du prisonnier. Grâce à la théorie des jeux, nous allons voir ce qu'il en est…

Le concept du dilemme du prisonnier est né en 1950 à Princeton, lorsque le mathématicien Albert Tucker imagina une histoire similaire à celle-ci :

« Bonnie et Clyde n'ont pas de chance : ces deux malfrats se sont fait arrêter par le shérif de Black Lake qui les a écroués. Ce dernier les accuse tous deux d'avoir vandalisé un des magasins de la ville, mais n'a aucune preuve tangible pour les condamner. Il aimerait bien pouvoir leur faire avouer leur délit, mais comment y parvenir ? Après une longue réflexion, il décide de procéder de la manière suivante : il place Bonnie et Clyde dans deux cellules différentes et empêche toute communication entre eux. Puis il va les voir séparément et leur fait la proposition suivante : chaque bandit peut choisir de garder le silence ou d'avouer le délit. Si l'un des deux avoue et l'autre nie, celui qui aura avoué sera libéré immédiatement, tandis que l'autre, ayant fait un faux témoignage, sera emprisonné pendant un an. Si les deux nient, le shérif n'aura pas d'autre choix que de les laisser partir au bout d'un mois faute de preuves. Par contre, si les deux avouent leur crime, le shérif pourra faire condamner les deux compères à six mois de prison ferme. Quel choix font Bonnie et Clyde ? »

Commençons par le raisonnement de Clyde. Il sait que sa décision n'aura pas les mêmes conséquences selon que Bonnie ait parlé ou non. Il envisage donc les différents cas :

- Si Bonnie parle, il y a alors deux cas de figure pour Clyde. S'il parle, il restera enfermé six mois. Ce n'est pas une perspective réjouissante, mais c'est tout de même mieux que l'année derrière les barreaux qui l'attend s'il nie. Dans ce cas de figure, Clyde a donc intérêt à avouer sa faute et à passer six mois en prison.
- Si Bonnie nie, il y a également deux cas à envisager. Si Clyde décide de nier également, alors il passera un mois en compagnie des rats. C'est moins que dans le cas précédent, mais Clyde peut faire encore mieux : s'il avoue tout de suite, il sera libre le soir même ! Clyde décide donc de retrouver sa liberté et d'avouer.

On peut regrouper tous les cas de figure dans le tableau suivant : en colonne on a les choix de Bonnie et en ligne les choix de Clyde. Selon les deux options choisies, on trouve à l'intersection de la bonne ligne et de la bonne colonne la peine de Clyde en mois de prison.

Clyde \ Bonnie	Nier	Avouer
Nier	1	12
Avouer	0	6

Tableau 1.1 : Peine de Clyde en mois de prison.

Dans ce tableau, on remarque que les peines dans la ligne du bas sont toujours plus faibles que dans la ligne du haut. Dans les deux cas, il est plus profitable à Clyde d'avouer sa faute plutôt que de la nier : c'est donc vraisemblablement ce qu'il fera.

Mais ce n'est pas fini ! Bonnie a elle aussi un choix à faire, dans les mêmes conditions que Clyde. Elle envisage les mêmes cas de figure, et représente les différentes peines qu'elle encourt dans un tableau :

		Bonnie	
		Nier	**Avouer**
Clyde	**Nier**	**1**	**0**
	Avouer	**12**	**6**

Tableau 1.2 : Peines *de Bonnie en mois de prison.*

Cette fois-ci, on remarque que les peines encourues sont toujours plus faibles dans la colonne de droite que dans la colonne de gauche. En d'autres termes, il est toujours plus profitable pour Bonnie d'avouer la faute que de la nier. Elle aussi va faire le choix de l'aveu, et les deux bandits, ayant reconnu leur culpabilité, sont condamnés à six mois de prison, alors que s'ils s'étaient entendus pour nier tous les deux, ils auraient passé seulement un mois derrière les barreaux.

		Bonnie	
		Nier	**Avouer**
Clyde	**Nier**	**1** / **1**	**0** / **12**
	Avouer	**12** / **0**	**6** / **6**

Tableau 1.3 : Dilemme du prisonnier à deux joueurs.

Le résultat final n'est vraiment pas satisfaisant pour Bonnie et Clyde. L'optimum pour eux aurait été de nier tous les deux, mais il est peu probable d'arriver à ce résultat. En effet, même si les deux malfrats envisagent de coopérer au moment d'annoncer qu'ils nient ou qu'ils avouent la faute, chacun a intérêt à avouer plutôt qu'à nier. La tentative de coopération échoue parce que chacun cherche à minimiser sa peine.

On regroupe sous le terme général de « dilemme du prisonnier » des situations dans lesquelles des agents (personnes, institutions, entreprises…) qui maximisent leur bénéfice personnel arrivent à une situation sous-optimale, comme pour les deux villes de Kansas City.

Chapitre 2

Le passager clandestin

La tragédie des biens communs et la surexploitation des ressources

Dans les montagnes népalaises, les forêts sont une ressource importante pour les populations locales : elles leur apportent du bois pour toute l'année et protègent le sol de l'érosion. À la suite d'une hausse de la population dès les années 1850, les forêts népalaises ont commencé à être davantage utilisées qu'auparavant[4]. Afin d'éviter une surexploitation des ressources forestières, le gouvernement décida en 1957 de retirer les droits forestiers aux communautés locales et de nationaliser les forêts. L'intention était bonne : il s'agissait de protéger les ressources naturelles en imposant des quotas d'exploitation et de les gérer plus efficacement.

Néanmoins, l'impact fut inverse : lorsque des règles furent imposées par l'État, la déforestation s'accentua ! Après quelques années, le Népal décida en 1978 de revenir en arrière et de confier à nouveau la gestion des forêts aux communautés locales, pour enrayer le processus de surexploitation des forêts.

Pourquoi la nationalisation des forêts a-t-elle eu un impact si négatif ? Avant la réforme, les forêts et les pâturages étaient la propriété des communautés qui vivaient au plus près de ceux-ci. Les membres d'autres villages qui voulaient exploiter la forêt devaient payer à la communauté des droits d'accès pour le faire. Les communautés exploitaient leurs forêts de manière responsable, et veillaient à ce que celles-ci puissent se renouveler d'une année sur l'autre. Lorsque les forêts furent nationalisées, celles-ci cessèrent d'être une ressource des communautés individuelles, mais étaient partagées par l'ensemble des Népalais. Le gouvernement avait prévu des gardes forestiers et des institutions pour assurer le respect des quotas imposés par l'État, mais ceux-ci se sont révélés incapables d'assurer leur mission dans un territoire vaste et difficile d'accès. Les Népalais pouvaient donc s'approprier autant de bois qu'ils le voulaient sans s'exposer à des poursuites, et commencèrent donc à intensifier leur exploitation. Les communautés, n'étant plus responsables de la gestion des forêts, ne virent plus celles-ci comme leur bien propre, mais comme un bien partagé, et n'avaient plus autant intérêt à les protéger qu'avant.

Le Népal n'est pas un cas isolé : dans plusieurs autres pays, la nationalisation de forêts autrefois gérées par des communautés locales a eu des effets dévastateurs. En Thaïlande, au Niger et en Inde, l'appropriation des forêts par l'État a été ressentie par les habitants comme une expropriation, et a lancé une course à l'extraction, chacun voulant exploiter la forêt au maximum avant que quelqu'un d'autre ne le fasse[5]. Le même problème a été observé dans l'exploitation de ressources halieutiques : certains pays ont décidé de s'approprier la régulation de la pêche dans des zones côtières auparavant gérées par des communautés locales. Lorsque l'État était incapable de faire respecter ses quotas de pêche, les pêcheurs se sont empressés d'exploiter les poissons qui pouvaient désormais être pêchés par tous et plus seulement par de petites communautés[6].

De manière générale, il est assez courant d'observer la surexploitation de ressources qui sont mises en commun : en voulant satisfaire leurs propres intérêts, ceux qui exploitent la ressource négligent sa conservation à long terme, et en découlent surpêche, déforestation et surexploitation des nappes phréatiques.

Pour modéliser ce qui se passe lorsqu'une ressource est partagée entre plusieurs personnes, imaginons la rivalité entre deux pêcheurs : un français et un anglais. Ils exploitent tous les deux la réserve de poissons de la Manche qui les sépare. Ils décident du nombre de bateaux de pêche qu'ils louent à une entreprise. Chaque bateau leur coûte 6 millions d'euros, tous frais compris. Par ailleurs, ils connaissent la quantité totale de poissons que l'on pourra pêcher chaque année en fonction du nombre de bateaux qui l'exploitent, et le prix auquel ils pourront les vendre :

Nombre de bateaux dans la Manche	Prix des poissons pêchés (en euros)
2	24
3	30
4	34

On remarque que lorsqu'on double le nombre de bateaux, la quantité de poissons extraite ne double pas : en effet, la surexploitation de la ressource fait qu'il devient plus difficile de trouver des poissons lorsque le nombre de bateaux qui les pêchent augmente. Chaque bateau rapporte alors moins de poissons au port. Par ailleurs, plus il y a de poissons sur le marché, plus leur prix baisse.

Chaque pêcheur décide de financer la location d'un ou de deux bateaux pour sa flotte. Il estime pour chaque possibilité les bénéfices qu'il pourra réaliser chaque année (le prix des poissons qu'il aura pêchés moins le coût de l'investissement dans le bateau).

Prenons l'exemple du pêcheur français. S'il investit dans un bateau et le pêcheur anglais aussi, 2 bateaux exploiteront la réserve pour une pêche totale de 24 millions d'euros en poissons, répartis en 12 millions d'euros pour chacun des deux pêcheurs. Le bénéfice pour les deux pêcheurs est donc de 6 millions d'euros, une fois déduit le coût de 6 millions d'euros pour louer et entretenir le bateau. C'est déjà beaucoup, mais le français peut mieux faire : s'il investit dans un second bateau alors que l'anglais n'en a qu'un, il pourra vendre 20 millions d'euros de poissons (et l'anglais 10). Son bénéfice sera alors de 8 millions d'euros, une fois décomptés les 12 millions d'euros affectés à l'entretien des bateaux. L'Anglais, lui, voit son bénéfice passer de 6 à 4 millions d'euros : en effet, comme les poissons sont davantage exploités, il a plus de mal à en trouver et en vend donc moins. De même, l'anglais aura intérêt à investir dans un second bateau, ce qui mène à une quantité totale de 34 millions d'euros pêchée, et un bénéfice de 5 millions d'euros pour chaque marin.

Récapitulons les bénéfices de chaque pêcheur en fonction des choix du Français et de l'Anglais dans un tableau :

Français \ Anglais	Pêche modérée	Pêche intensive
Pêche modérée	6 / 6	8 / 4
Pêche intensive	4 / 8	5 / 5

Tableau 2.1 : Bénéfices *annuels pour les deux pêcheurs en millions d'euros.*

On remarque que chacun des deux pêcheurs gagne toujours plus en faisant une pêche intensive (avec deux bateaux) plutôt qu'une pêche modérée (avec un seul bateau). Chacun décide donc de pêcher de manière intensive, ce qui mène à une situation où les bénéfices sont les plus faibles pour les deux marins, qui auraient été mieux lotis s'ils avaient mené tous deux une politique moins expansionniste. Cette situation ressemble beaucoup à celle du dilemme du prisonnier : lorsque chacun tente de maximiser son profit, on arrive à une situation avec des profits affaiblis pour tous. La situation finale est doublement sous-optimale : les bénéfices sont moindres pour les deux pêcheurs, et la ressource naturelle est pillée. Une des solutions pour garantir une meilleure situation pour tous serait de forcer le français et l'anglais à limiter leur pêche, via des quotas par exemple. Néanmoins, comme nous l'avons vu dans le cas des forêts népalaises, il est parfois difficile d'exercer un contrôle sur l'exploitation des ressources.

Harding et les biens communs

En 1968, l'économiste Garett Harding a appelé « **tragédie des biens communs** » cette situation où chacun cherche à exploiter au maximum une ressource partagée, ce qui mène à une situation sous-optimale et à une surexploitation des ressources[7].

Il existe de nombreux exemples de cette tragédie, que l'on retrouve chaque fois qu'un bien est partagé entre de nombreux acteurs. C'est le cas d'un wifi public qui devient vite surchargé si tout le monde commence à l'utiliser pour télécharger des dizaines de films, ou d'un restaurant qui propose à ses clients un buffet « à volonté ». Dans un tel restaurant, un tarif fixe est payé par chaque client, et correspond au prix de ce que les clients consomment en moyenne. Un client ne paie pas plus s'il prend 2, 3, 4 ou 5 assiettes : il est donc incité à consommer plus, et souvent trop. Si tout le monde prend des portions particulièrement importantes, le restaurant est obligé d'augmenter ses tarifs pour couvrir ses coûts. Les clients d'un restaurant à volonté payent ainsi de plus en plus cher pour avoir des indigestions.

Dans le même registre, lorsqu'un groupe mange au restaurant et décide avant le choix des plats de partager la note, on peut s'attendre à ce que les convives choisissent des plats plus chers que s'ils étaient seuls. Si vous faites partie d'un tel groupe de six personnes et que vous décidez de prendre un plat plus cher de 6 € que celui que vous auriez pris seul, cela ne vous coûtera qu'un euro de plus à la fin du repas (et un euro de plus à tous les autres convives). Néanmoins, si tous autour de la table choisissent eux aussi un plat de 6 € plus cher, tous payeront bien à la fin du repas 6 € de plus que s'ils étaient seuls.

L'idée de la tragédie des biens communs est récurrente dans les réflexions sur la préservation de l'environnement. Lors d'un pic de pollution, on conseille à tous les automobilistes de ne pas utiliser leur voiture en attendant que les niveaux de pollution se stabilisent. Néanmoins, beaucoup de personnes, pensant qu'ils n'ont qu'un petit impact sur la pollution globale, décident d'utiliser quand même leur véhicule. Puis ceux qui avaient initialement songé à limiter leur circulation, voyant leurs voisins ne pas respecter les règles, renoncent à cette austérité : pourquoi devraient-ils être les seuls à faire un effort ? Mis à part certaines personnes particulièrement altruistes, tout le monde utilise quand même sa voiture, et la pollution ne diminue pas malgré les conseils donnés.

De même, il est moins coûteux pour une industrie polluante de disperser ses déchets dans la nature plutôt que de les traiter. En effet, même si la dégradation de l'environnement a un impact négatif sur l'entreprise, ce coût de la pollution est réparti sur toute la population, alors que si l'entreprise traite toute seule ses déchets, elle doit en assumer seule les coûts. D'un point de vue purement économique, une entreprise aura donc intérêt à polluer l'environnement. Néanmoins, si toutes les industries se comportent ainsi, l'environnement sera entièrement dégradé, et la réparation de ces dégradations coûtera plus cher à la société qu'une politique préventive qui pousse les entreprises à limiter leurs émissions en amont. Pour pousser les entreprises à limiter leurs émissions de polluants, on peut imposer une amende à celles qui ne traitent pas leurs déchets. Si l'amende est largement supérieure au coût du traitement des déchets, l'entreprise aura alors intérêt à respecter l'environnement.

Enfin, les difficultés actuelles de la communauté internationale à se mettre d'accord sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre sont peut-être l'un des exemples les plus actuels de cette tragédie des biens communs.

Le dilemme des prisonniers à plusieurs joueurs

Nous sommes donc fréquemment exposés à la tragédie des biens communs, que ce soit à l'échelle de la planète avec des problèmes de pollution. Le jeu du dilemme du prisonnier, représenté par un tableau à deux lignes et deux colonnes, permet de bien modéliser cette situation lorsque deux joueurs interagissent. Néanmoins, dans la plupart des cas, il y a beaucoup plus que deux personnes qui exploitent un bien commun, et il est dans ce cas impossible de représenter la situation dans un tableau, où seuls les choix de deux joueurs peuvent être analysés. Comment modéliser alors la tragédie des biens communs ?

Imaginons le jeu suivant : dix joueurs sont autour d'une table et disposent chacun de 10 €. Au milieu de la table se trouve un pot commun. À chaque partie, chacun des joueurs peut décider de mettre son argent au pot (attitude de coopération) ou de le conserver (attitude égoïste). Tous les joueurs font leur choix simultanément. Lorsque tout le monde a joué, on double la quantité d'argent au pot et on la partage entre tous les joueurs, qu'ils y aient mis de l'argent ou non.

Si tous les joueurs ont mis 10 € au pot, chacun se retrouvera avec 20 € en poche à la fin de la partie. Si un seul joueur met ses 10 € au pot, il n'aura que 2 € en fin de partie, les autres joueurs récupérant 12 €. Bien entendu, si personne ne met de l'argent au pot, chacun se retrouvera à la fin de la partie avec 10 €.

La coopération semble donc être le meilleur choix pour l'ensemble des joueurs ; il serait a priori rationnel que tout le monde mise dans le pot commun. Néanmoins, l'expérience montre que des joueurs qui jouent à ce jeu sont loin de tous choisir l'option altruiste. Doit-on conclure à leur irrationalité ?

Pas nécessairement : sur le graphique suivant, on représente les avoirs en fin de partie d'un joueur pour chacun des deux choix possibles, l'égoïsme et la coopération. Ces avoirs en fin de partie varient évidemment en fonction des choix des autres joueurs : on place donc en abscisse le nombre d'adversaires qui auront choisi de coopérer.

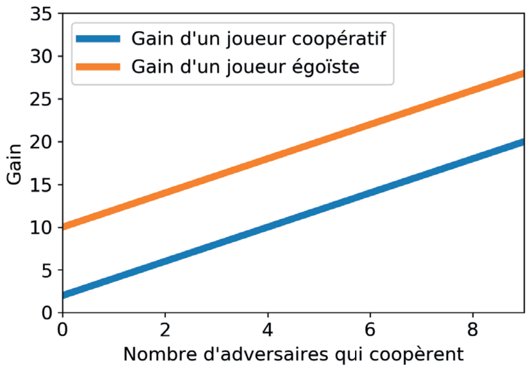


Figure 2.1 : Dilemne du prisonnier à plus de deux joueurs.

On remarque que n'importe quel joueur (coopératif ou égoïste) gagne plus lorsqu'il fait face à des adversaires coopératifs que face à des égoïstes. Néanmoins, les joueurs sont tous tentés d'être égoïstes : cette stratégie leur permet de gagner plus d'argent quels que soient les choix des autres joueurs. Même quand tout le monde coopère et gagne 20 €, chaque joueur est tenté de ne plus coopérer pour gagner près de 10 € supplémentaires : prenant ainsi le rôle de « passager clandestin ». Le problème est que si tout le monde fait ce raisonnement, on arrive à une situation particulièrement sous-optimale.

Dans la gestion d'un lieu commun, le problème du passager clandestin est courant. Imaginons une dizaine d'étudiants qui partagent une cuisine : chacun est censé participer au nettoyage, mais peut décider d'y passer soit un peu de temps, soit de faire le ménage sérieusement. On se retrouve alors dans une situation très similaire au jeu que nous venons d'analyser : chaque étudiant est tenté de passer peu de temps à ranger en espérant qu'un autre fera le travail. Si les dix étudiants n'arrivent pas à s'organiser, la cuisine deviendra rapidement insalubre !

Dans *La Guerre du Péloponnèse*, l'historien athénien Thucydide explique les causes de la guerre qui déchira les cités grecques à la fin du V^e^ siècle avant J.-C. D'après lui, une des raisons qui ont poussé la Grèce à s'engouffrer dans cette guerre fratricide est sa division en petits États incapables de coopérer correctement. Il explique :

> Comme [les républiques du Péloponnèse] ne forment pas un seul peuple, chacun pense à ses intérêts. Et pour l'ordinaire rien ne se termine. Les uns ont surtout en vue quelque vengeance ; les autres veulent que leurs propriétés n'aient rien à

> souffrir. Ils se rassemblent tard, jettent vite un coup d'œil sur les intérêts communs, et s'occupent bien plus constamment de leurs affaires personnelles. Aucun ne croit que sa négligence particulière fasse du tort au bien général : il pense qu'un autre y pourvoira pour lui ; et tous ayant séparément la même pensée, l'intérêt commun se détruit sans qu'on s'en aperçoive[8].

Lorsque chacun défend ses propres intérêts avant de penser à la collectivité, on parle de tyrannie des petites décisions. Ce phénomène ne nuit pas uniquement aux relations entre États comme ce fut le cas pendant la guerre du Péloponnèse, mais également aux décisions prises à l'intérieur d'un pays. Ainsi, lorsqu'un parlement national doit décider de l'allocation d'un budget, beaucoup de parlementaires essaient de réserver de l'argent pour leur circonscription électorale avant de s'occuper des dépenses qui concernent le pays tout entier. Dans les pays qui souffrent de divisions profondes ou lorsque le clientélisme est courant, les routes sont en mauvais état, le réseau électrique défaillant et le service public en général est inefficace.

Chapitre 3

Cartels

Équilibre de Nash

En 1960 à Bagdad, l'Iran, l'Irak, le Koweït, l'Arabie saoudite et le Venezuela ont créé l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP). Aujourd'hui, l'OPEP compte 15 membres qui possèdent à eux seuls plus de 80 % des réserves prouvées de pétrole dans le monde. Le but de cette organisation est de coordonner l'exploitation du pétrole entre ses principaux producteurs. De fait, l'OPEP a régulièrement fixé dans son histoire des quotas de production pour chacun de ses membres, afin de limiter la production mondiale de pétrole. Le but de la manœuvre ? Permettre aux pays membres de gagner plus d'argent : en limitant la production de pétrole, les membres de l'OPEP font augmenter le prix du baril, ce qui leur permet d'engranger d'importants profits[a]. Dans une telle situation, on parle d'un cartel.

La maîtrise des prix du pétrole par l'OPEP lui donne un pouvoir politique important qu'elle n'a pas hésité à utiliser dans le passé. Ainsi, en 1973, une coalition arabe menée par l'Égypte et la Syrie attaque Israël : c'est la guerre du Kippour. En réponse à cette attaque, les États-Unis offrent leur soutien à l'État hébreu. Pour contrer cette aide américaine, les pays arabes membres de l'OPEP limitent leur production de pétrole et lancent un embargo contre les États-Unis et ses alliés. La conséquence est le premier choc pétrolier : en cinq mois, le prix du pétrole a quadruplé.

Un tel cartel ne peut fonctionner que si la grande majorité des producteurs de pétrole en font partie. Dans le cas contraire, un pays en dehors du cartel pourrait produire massivement en profitant des prix hauts imposés par le cartel, et faire baisser les marges des membres de l'OPEP. C'est exactement ce qui s'est passé au début des années 2010 avec l'investissement massif des USA dans la production

a En effet, lorsqu'il y a peu de pétrole disponible sur le marché, ceux qui l'achètent sont ceux qui sont prêts à le payer au prix fort. Réduire la quantité extraite et donc disponible sur le marché mène à une augmentation des prix. Ici, l'adage selon lequel ce qui est rare est cher est respecté. De manière inverse, une augmentation de la production conduit à une chute des prix.

d'hydrocarbures sous la forme de gaz de schiste. Les États-Unis, en dehors de l'OPEP, profitaient des prix hauts du pétrole pour produire de manière lucrative cet hydrocarbure difficile à extraire. Pour contrer l'émergence de ce concurrent, les pays de l'OPEP se sont entendus pour augmenter largement leur production. Ils espéraient qu'en faisant ainsi chuter le cours des prix du pétrole, l'exploitation de gaz de schiste ne serait plus rentable, son prix de vente devenant inférieur au prix de production. Les USA se retireraient alors de ce marché, et l'OPEP pourrait continuer à imposer ses prix. À l'heure actuelle, l'issue de cette guerre économique reste incertaine.

L'OPEP est loin d'être le seul cartel dans le monde : presque tous les secteurs d'activité ont, ou ont eu, un cartel pour imposer leurs prix : c'est le cas du marché de la bière, des diamants, de l'acier, du sucre[9]… Néanmoins, un cartel reste difficile à maintenir : en effet, les membres d'un cartel font face à un dilemme du prisonnier. Lorsque les membres d'un cartel s'engagent à limiter leur production, où à maintenir des prix élevés, leurs profits sont tous élevés. Néanmoins, chacun des membres aurait intérêt à dévier un peu de cette entente : s'il produit un peu plus que ce qui a été entendu, un membre tricheur peut profiter des prix hauts causés par les restrictions des autres membres et engranger encore plus de profits. Si l'entente est réalisée sur les prix et que tous les membres du cartel s'engagent à afficher des prix très hauts, un membre tricheur peut afficher un prix un peu moins haut pour attirer plus de clients qui lui fourniront une marge conséquente. Seulement, si tous les membres du cartel décident de tricher, tout se passe comme s'il n'y avait pas d'entente : c'est le retour à la concurrence.

C'est pour cette raison que la coopération entre membres de l'OPEP présente des failles : plusieurs pays ont une tendance à dépasser leurs quotas : l'ancien ministre saoudien du pétrole a d'ailleurs annoncé à propos de l'OPEP : « Malheureusement, nous avons tendance à tricher[10] ! ».

La concurrence permet de garder des prix bas et de limiter les marges des producteurs au profit des consommateurs. Les ententes anticoncurrentielles sont en général illégales au sein d'un pays dans la mesure où elles défavorisent les consommateurs qui n'ont d'autre choix que de payer le prix fort. Les ententes entre entreprises sont ainsi sévèrement sanctionnées par les autorités du contrôle de la concurrence, et des amendes sont régulièrement infligées aux entreprises qui ne respectent pas ces lois. Pour détecter et démanteler plus facilement des cartels, les autorités de la concurrence utilisent la stratégie suivante : elles sont particulièrement clémentes avec les entreprises qui dénoncent les membres des cartels dont elles font partie. Une telle pratique place une nouvelle fois les membres du cartel face à un dilemme du prisonnier.

Comme les membres d'un cartel font face à un dilemme du prisonnier, il est rare que de telles ententes durent très longtemps. Néanmoins, il serait faux de dire qu'il est impossible d'échapper au dilemme du prisonnier ou à la tragédie des biens communs, et la coopération est possible : pour le pire avec les cartels, et pour le meilleur pour une gestion responsable des ressources naturelles.

Les prisonniers du dilemme n'arrivent pas à s'en extraire justement, car ils sont prisonniers : ils sont incapables de changer les règles du jeu auquel ils jouent. Nous allons maintenant voir plusieurs façons de résoudre le dilemme du prisonnier ou d'éviter la tragédie des biens communs.

La régulation par l'État

Pour limiter la surexploitation des ressources, la solution qui paraît la plus naturelle est d'imposer des quotas et des normes. Voyons pourquoi des réglementations bien appliquées permettent de sortir de la tragédie des biens communs, en reprenant la situation des deux pêcheurs du chapitre précédent.

		Anglais	
		Pêche modérée	**Pêche intensive**
Français	**Pêche modérée**	6, 6	4, 8
	Pêche intensive	8, 4	5, 5

Tableau 3.1 : Tragédie des biens communs.

En théorie des jeux, une situation où plusieurs personnes doivent faire des choix qui mènent à différentes issues *qui dépendent du choix des autres personnes* est appelée un **jeu.** Ses participants sont les

joueurs. Par ailleurs, les différents choix qui s'offrent à chaque joueur sont des **stratégies**. Selon les stratégies choisies par les différents joueurs, on obtient des issues différentes, et chaque joueur empoche des **gains**. Le tableau qui récapitule ces gains est souvent appelé une **matrice de gains**. Ici, le jeu de la pêche dans la Manche est joué par deux joueurs, le français et l'anglais. Ils doivent choisir parmi deux stratégies : une pêche intensive et une pêche modérée. Les gains obtenus par les deux joueurs sont récapitulés dans la matrice de gains (le tableau) ci-dessus. Nous ferons également l'hypothèse ici que tous les joueurs connaissent le jeu auquel ils jouent (ils connaissent les autres joueurs, leurs stratégies et les gains qu'ils peuvent obtenir). Plus précisément, en plus de connaître le jeu, les joueurs savent que tous les joueurs connaissent le jeu, que tous les joueurs savent que tous les joueurs connaissent le jeu, etc. On dit que le jeu est une connaissance commune. Cette hypothèse peut paraître irréaliste, et il existe bien entendu des modèles qui prennent en compte des différences d'information entre joueurs. Par souci de simplicité, nous ne les aborderons pas pour l'instant.

Revenons à nos poissons. Nous avions remarqué que, quelle que soit la stratégie choisie par l'anglais, la stratégie « pêche intensive » était toujours plus profitable pour le français. On dit que la stratégie « pêche intensive » **domine strictement** la stratégie « pêche modérée », et que la stratégie « pêche modérée » est strictement dominée par la stratégie « pêche intensive ».

Lorsque chaque joueur utilise la stratégie strictement dominante, on se retrouve dans la situation de surpêche. Comme annoncé précédemment, il est a priori très difficile de s'extraire de cette situation, car chaque joueur perdrait à dévier de sa stratégie strictement dominante en pêchant modérément. Même si les deux joueurs s'entendaient pour passer en même temps à une pêche modérée, chacun d'eux aurait intérêt à trahir cet engagement pour gagner plus. On retomberait alors dans la situation où tous pêchent intensivement.

Cette situation dont on a du mal à s'extraire est un équilibre, que l'on appelle **équilibre de Nash**, en l'honneur d'un des fondateurs de la théorie des jeux, John Nash. À un équilibre de Nash, aucun joueur n'a intérêt à dévier de sa stratégie.

Pour sortir de notre problème de pêche intensive, nous avions proposé d'imposer des amendes à ceux qui pêchaient intensivement. Admettons par exemple que les joueurs qui décident de pêcher intensivement écopent d'une amende de quatre millions d'euros chaque année où ils décident de surpêcher. Les nouveaux gains espérés par les joueurs sont les suivants :

Français \ Anglais	Pêche modérée	Pêche intensive
Pêche modérée	6 ; 6	4 ; 4
Pêche intensive	4 ; 4	1 ; 1

Tableau 3.2 : Gains annuels des pêcheurs en millions d'euros en cas de réglementation.

Dans cette nouvelle configuration, on remarque que pour les deux joueurs, la stratégie « pêche modérée » est strictement dominante. C'est donc celle-ci que les deux joueurs vont choisir. Cette nouvelle issue est à nouveau un équilibre de Nash : personne n'a intérêt à changer de stratégie. Si le français décidait de se lancer dans une pêche intensive, il perdrait deux millions d'euros, et de même pour l'anglais.

Ainsi, on a réussi à obtenir une coopération des différents joueurs et à les amener à une situation optimale en changeant leurs gains dans chaque situation. On remarquera ici qu'un processus d'amende a été mis en place, mais aucune amende n'est effectivement imposée à l'équilibre de Nash : elle n'était que dissuasive.

Néanmoins, imposer de telles amendes peut être parfois difficile, et lorsque le contrôle des joueurs par un agent externe (comme l'État) est faible, le pillage des ressources peut continuer.

La privatisation

Certains, sceptiques quant à la capacité d'intervention de l'État, affirment que pour sortir de la tragédie des biens communs, il faut simplement retirer le caractère commun des biens en question ! Par exemple, pour éviter qu'une forêt partagée soit surexploitée, il suffit de la diviser en parcelles privées : chaque propriétaire aura alors une incitation à protéger cette ressource qui lui appartient.

Imaginons la situation suivante : deux frères partagent la même chambre à coucher qui est jour après jour de plus en plus encombrée par des jouets divers et variés. Les deux frères peuvent tous deux décider de participer au rangement ou non. Leurs parents espèrent une coopération de la fratrie pour débarrasser la chambre du désordre qui l'a envahie. Néanmoins, il serait plus agréable pour l'aîné que ce soit son frère cadet qui fasse tout le travail tandis qu'il continuerait à lire des bandes dessinées. L'aîné attend donc que le cadet s'attelle à la tâche : en vain, car lui aussi fait ce raisonnement et attend que ce soit l'aîné qui commence à ranger. Finalement, ce sont les parents – exaspérés après avoir marché pour une énième fois sur une petite voiture – qui remettent tous les jouets à leur place. Comment faire pour que la semaine suivante les deux enfants rangent eux-mêmes leur chambre ?

Le manque de coopération pour une bonne utilisation de la chambre est un autre exemple de la tragédie des biens communs. Ici, il y a un problème, car la chambre partagée s'apparente pour les deux frères à un tel bien. Une solution pour y échapper – qui est d'ailleurs utilisée par bon nombre de familles – est de séparer l'espace de la chambre en deux parties : une pour chaque frère. En d'autres termes, on introduit une idée de propriété privée dans la famille. Chaque frère sait que l'autre ne va ranger que la partie de la chambre qui lui est dévolue. Si un des deux frères veut voir son morceau de chambre rangé, il sait qu'il ne pourra pas compter sur l'assistance de l'autre et fera lui-même le travail. Par ailleurs, sachant qu'il sera responsable du rangement d'une partie de sa chambre, il aura moins tendance à y mettre du désordre.

Le manque de propriété privée a largement dégradé l'efficacité économique de l'URSS au début du XXe siècle. En 1929, Staline procéda à une collectivisation des biens dans les campagnes : bétail, terre et outils furent mis en commun dans ce qu'on appela les kolkhozes et les sovkhozes. Néanmoins, les paysans, réticents à donner leurs bêtes à l'ensemble de leur communauté, tuèrent celles-ci pour les consommer. Staline décida alors de réinstaurer une part de propriété privée dans les kolkhozes.

Cette solution ne permet malheureusement pas de résoudre complètement la tragédie des biens communs. En effet, on ne peut pas privatiser l'air ou les océans, eux aussi victimes de cette tragédie.

Les incitations

Dans le cadre professionnel, un mécanisme régulièrement utilisé pour pousser des employés à collaborer est l'utilisation d'incitations financières.

Imaginons la situation suivante : deux ingénieurs travaillent ensemble sur un projet pour lequel ils seront rémunérés collectivement : quel que soit leur apport au projet, ils recevront le même salaire. Ils ont alors le choix de fournir un bon travail ou un travail bâclé. L'idéal pour les deux collègues serait de travailler ensemble pour mener à bien le projet et d'être convenablement payés à l'achèvement de celui-ci. Le premier ingénieur, un peu fainéant, voudrait le beurre et l'argent du beurre : il espère que le second ingénieur fera tout le travail pour clore le projet et se faire payer malgré un investissement limité. Il aura ainsi joué le rôle de « passager clandestin ». Il attend donc que son collègue se mette au travail. Là aussi, cette attente se poursuit longtemps, car le second ingénieur est tout aussi fainéant que le premier. Lorsqu'ils décident enfin de se mettre au travail, il est trop tard : les deux ingénieurs n'arrivent pas à finir le travail à temps et se font licencier. Comment aurait-on pu éviter cette catastrophe ?

Les firmes ont depuis longtemps imaginé une solution pour éviter de tels soucis : pour pousser leurs employés à donner le meilleur d'eux-mêmes, elles leur promettent des récompenses ou des sanctions corrélées avec leur investissement. Ainsi, ce sont (normalement) les employés les plus productifs qui ont les meilleures primes et les promotions les plus rapides. Avec un salaire séparé pour les deux ingénieurs, qui augmente avec leur implication individuelle dans le projet, nos deux ingénieurs auraient eu une bonne incitation pour travailler et ne se seraient sans doute pas fait licencier !

Pour que cette politique soit efficace, il faut que le manager ait un moyen précis de mesurer objectivement le travail de ses collaborateurs : il ne faudrait pas que ces derniers aient une incitation à *faire semblant* de travailler plutôt qu'à travailler réellement. Une stratégie couramment employée par de grandes entreprises est de récompenser certains de ses cadres en leur donnant des actions de l'entreprise, par le biais des *stock options* par exemple. La valeur des actions étant censée refléter la réussite économique de l'entreprise, les cadres rémunérés en actions ont une incitation à travailler plus pour faire monter le cours de l'action de la firme et donc leur salaire.

Une gestion locale des ressources

Cela fait une dizaine de pages que nous expliquons les ravages de la tragédie des biens communs et que nous cherchons des solutions pour sortir de ce problème. Néanmoins, nous avions pendant tout ce temps-là un exemple de gestion réussie d'une ressource partagée, sans l'intervention de l'État ni privatisation : le cas des forêts népalaises.

La destruction des forêts népalaises était justement causée par la nationalisation de ces espaces. Si la mise en commun des forêts a mené à une déforestation, les communautés qui les possédaient initialement arrivaient très bien à gérer leurs forêts, même si ces dernières n'étaient pas une propriété privée, mais un espace partagé. Pourquoi les membres d'une même communauté népalaise n'ont-ils pas commencé à exploiter leurs forêts possédées en commun dans une course à l'appropriation ? La tragédie des biens communs ne s'appliquait-elle pas pour eux ?

On trouve de nombreux exemples où de petites communautés ont réussi à exploiter de manière responsable une ressource partagée. L'économiste Elinor Ostrom a mis en avant les mécanismes qui avaient permis à ces communautés de partager de telles ressources : dans la plupart des cas, les communautés avaient elles-mêmes décidé des règles de partage des ressources, et vérifiaient elles-mêmes que ces règles étaient respectées. Lorsqu'un membre de la communauté détectait une effraction, des sanctions graduelles étaient imposées.

Ainsi, des ressources partagées ne sont pas nécessairement destinées à être pillées : une gestion commune par ceux qui exploitent la ressource est possible à l'échelle locale, et peut se révéler plus efficace que la privatisation ou la gestion par l'État.

Une résolution pas à pas

Avant de passer à la suite, nous allons nous intéresser à un problème militaire et à un autre moyen de résoudre le problème du dilemme du prisonnier.

Deux pays voisins et légèrement hostiles ont la possibilité de s'armer ou non l'un contre l'autre. La meilleure situation (sauf peut-être pour les fabricants d'armes) est celle où les deux pays décident de se désarmer et d'investir dans l'éducation plutôt que dans la défense. Néanmoins, chacun décide d'investir dans des armées, craignant de se faire attaquer par son voisin s'il n'investit pas dans une défense forte tandis que des milliers de soldats se forment de l'autre côté de la frontière.

Comment faire pour limiter cette expansion militaire qui mène à de considérables dépenses de défense tout en augmentant le risque d'un conflit majeur ? La solution est une désescalade graduelle. Ce dont chaque pays a peur, c'est que l'autre accumule une quantité d'armement nettement supérieure à la sienne, et utilise cet armement supplémentaire comme moyen de pression. Chacun a la crainte d'un désarmement unilatéral, où il détruit ses stocks tandis que l'autre les garde intacts en secret. Pour que les deux pays acceptent de diminuer leurs stocks, il faut qu'ils aient la certitude d'un désarmement simultané. Celui-ci doit se faire par petites étapes pour qu'à chaque instant du processus, aucun pays n'ait une nette supériorité sur l'autre. Par ailleurs, il faut que chaque partie donne à l'autre des preuves de la réalité de son désarmement.

Cette situation de désescalade d'une course à l'armement s'est produite durant la guerre froide, alors que les USA et l'URSS avaient atteint des niveaux de dépense vertigineux pour financer leur armement nucléaire. À la fin des années 1960, les deux pays avaient besoin d'une réduction dans leur budget de défense pour financer d'autres projets : le projet Apollo pour les États-Unis et des aides alimentaires à la population en URSS. Les deux blocs commencèrent alors un processus de désarmement nucléaire qui continue toujours aujourd'hui, grâce à la signature de multiples accords bilatéraux[11]. Chacun de ces accords limitait le nombre d'armes nucléaires que les deux parties pouvaient posséder pour enrayer la course à l'armement, et prévoyait des réductions de stocks de part et d'autre. À chaque instant du processus, aucun des deux pays n'avait un avantage significatif sur l'autre grâce à la gradualité des réductions. Par ailleurs, pour assurer la réussite de ces accords, chaque partie donnait à l'autre la preuve de son désarmement. Ainsi, lorsque les USA procédaient à la destruction de bombardiers, ils laissaient sur place les débris des avions pour trois mois de sorte que les Russes puissent obtenir par images satellites la preuve de la bonne foi des Américains. De plus, des Américains étaient parfois conviés dans des sites militaires russes pour assister aux démantèlements.

Ici, la progressivité de la démilitarisation permet de se rapprocher d'une situation avec des dépenses faibles pour la défense. Plus le processus est engagé depuis longtemps, plus les parties se font confiance et arrivent à coopérer sans tomber dans le piège du dilemme du prisonnier.

Chapitre 4

Nash à la plage

La loi d’Hotelling

Dans toutes les sciences, la notion d’équilibre est primordiale : en physique, par exemple, un système a tendance à se rapprocher d’un état « équilibré » dont il ne sort pas tant qu’on ne le force pas à bouger. Ainsi, un pendule qui oscille finit toujours par s’arrêter à la verticale, et plus il est ralenti par l’air, plus il se rapproche rapidement de cette situation d’équilibre. De même, si on laisse l’air circuler entre deux salles de températures différentes, la température va petit à petit s’équilibrer entre les deux pièces, la pièce la plus chaude donnant de l’énergie à la pièce la plus froide. Lorsque la température est égalisée entre les deux pièces, il n’y a plus de mouvement d’air : l’ensemble est à l’équilibre. Si vous voulez faire l’expérience de cet équilibrage des températures, prenez une tasse d’eau chaude et laissez-la tranquillement refroidir quelques heures : vous pourrez alors mesurer avec un thermomètre l’égalité de la température du liquide et de la température ambiante. Une fois refroidie, versez quelques gouttes d’encre dans la tasse : au début, l’encre restera concentrée là où vous l’avez versée. Néanmoins, si vous attendez suffisamment longtemps, l’encre va se diffuser jusqu’à ce que le mélange soit parfait. Là encore, cette situation est bien un équilibre : une fois que l’encre s’est diffusée dans toute la tasse, il est bien difficile de revenir en arrière pour séparer l’eau et l’encre comme elles étaient dans la situation initiale.

En économie, on parle également très souvent d’équilibres, en particulier d’équilibre entre l’offre et la demande (nous en reparlerons plus tard). Dans le chapitre précédent, nous avons commencé à parler de l’équilibre de Nash, une notion centrale de la théorie des jeux.

Pour illustrer la notion d’équilibre de Nash, intéressons-nous à la situation suivante : sur une plage en été, deux marchands s’installent avec des petits chariots pour vendre des glaces aux vacanciers. Comme les deux marchands vendent les mêmes glaces au même prix, les touristes achètent leur goûter auprès du vendeur le plus proche. L’emplacement des marchands de glace divise donc la longue plage en deux territoires exploités par chacun des vendeurs. Ci-dessous, on représente la situation dans laquelle un vendeur se place au premier quart de la plage, et l'autre vendeur au troisième quart.

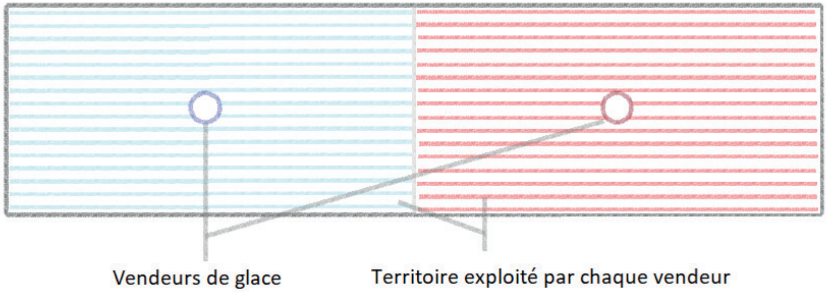


Figure 4.1 : Situation initiale.

Dans cette situation, les deux vendeurs disposent de territoires équivalents, et auront autant de clients si les vacanciers sont répartis sur la plage de manière homogène. Par ailleurs, comme les deux marchands de glace sont au centre de la zone qu'ils approvisionnent, les plaisanciers n'ont pas à marcher trop longtemps pour profiter d'un rafraîchissement.

Bien que cette situation semble être à la fois juste et optimale pour servir un maximum de glaces, il est relativement improbable que les vendeurs de glace restent ainsi. Imaginons par exemple que le vendeur de gauche décide de déplacer son stand vers le centre, et étende ainsi son territoire : tous les baigneurs qui sont à sa gauche continueront de venir vers lui, et des vacanciers qui étaient auparavant dans le territoire du vendeur de droite commenceront à acheter des glaces au vendeur de gauche, désormais plus proche.

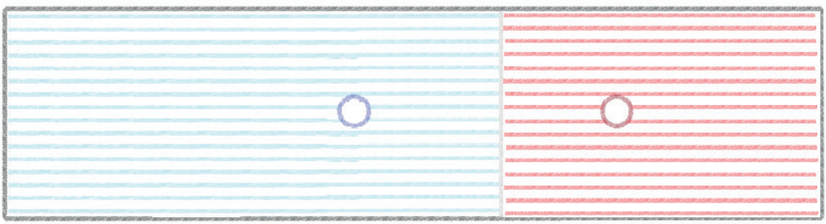


Figure 4.2 : Se rapprocher du centre est une stratégie dominante pour le vendeur de gauche.

Le vendeur de droite peut rétablir l'équilibre en se rapprochant lui aussi du centre de la plage jusqu'à ce que celle-ci soit à nouveau équitablement divisée entre les deux marchands. Dans cette nouvelle situation, les deux vendeurs ont autant de clients que dans la situation initiale, mais les servent moins efficacement : les clients situés aux extrémités de la plage sont maintenant très éloignés des marchands de glace.

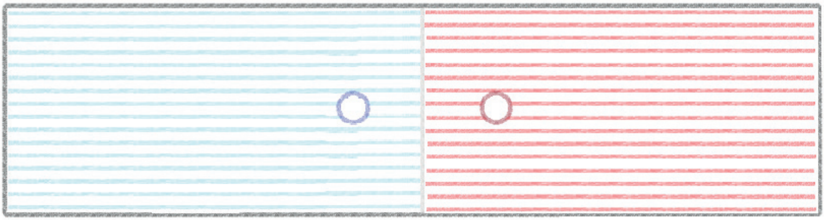


Figure 4.3 : Se rapprocher du centre est aussi une stratégie dominante pour le vendeur de droite.

Cette nouvelle situation n'est toujours pas un équilibre, chacun des deux vendeurs peut encore se rapprocher du centre pour empiéter sur le territoire de l'autre. Lorsque les deux marchands de glace sont dos à dos au centre de la plage, ils ne peuvent pas changer d'emplacement sans perdre des clients : n'ayant pas intérêt à bouger, ils restent en place et se partagent la plage équitablement, mais en se plaçant très loin des clients situés aux extrémités de la plage, ils rendent la situation sous optimale par rapport à leurs emplacements initiaux.

Évidemment, les deux vendeurs pourraient s'accorder pour rester au milieu de leurs territoires respectifs, atteignant une situation optimale pour tout le monde. Néanmoins, chacun des deux vendeurs aurait intérêt à se rapprocher peu à peu du centre de la plage pour empiéter sur le territoire de son concurrent, revenant à la situation d'équilibre.

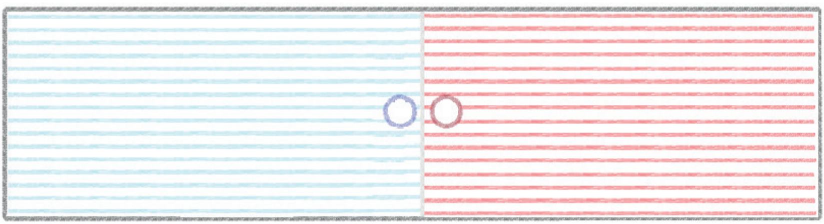


Figure 4.4 : À l'équilibre de Nash, les deux vendeurs sont côte à côte.

Ce jeu des marchands de glaces sur une plage peut paraître enfantin et sans intérêt, mais il permet de montrer un effet souvent observé lors de la concurrence entre entreprises, qui tendent à offrir des produits similaires aux mêmes endroits. Ainsi, dans une ville, il n'est pas rare de trouver tous les restaurants regroupés dans une même rue, ou des banques, des pharmacies proches les unes des autres alors qu'il pourrait être plus agréable pour les citadins d'avoir des commerces bien répartis dans la ville. Ce phénomène est connu comme la loi de Hotelling, du nom de l'économiste et statisticien américain qui l'a popularisé[12].

La loi de Hotelling est également parfois utilisée dans l'analyse politique : lors d'élections, on peut parfois observer les candidats adopter une posture différente de celle qu'ils montrent habituellement à leur base électorale, souvent pour attirer des candidats au bord de cette base. Ainsi, des candidats de centre-droit pourront adopter une posture plus à gauche ou plus à droite, dans le but d'arracher des voix aux candidats du centre ou de l'extrême droite, respectivement. Au fur et à mesure d'une élection, on peut ainsi voir les positions de deux candidats se rapprocher petit à petit, comme pour nos marchands de glace.

Plus généralement, le modèle d'Hotelling illustre l'idée courante en économie que les comportements individuels tendent à converger vers un équilibre. La théorie des jeux prête une importance particulière à l'étude de tels équilibres, qui porteront le nom d'équilibre de Nash.

Point théorique

Un peu de formalisation

Même si ce livre ne contient presque aucune équation, la théorie des jeux est bien une branche des mathématiques. Il existe un formalisme rigoureux pour analyser tous les jeux que nous allons évoquer ici, mais comme celui-ci n'est pas nécessaire à la compréhension intuitive des concepts de la théorie des jeux, nous ne le décrivons pas complètement. Pour ceux qui souhaiteraient avoir un aperçu de ce formalisme, nous en donnons un premier exemple ici avec un jeu très simple. Un exemple un peu plus complexe sera donné plus tard dans le livre.

Il y a en tout quatre « points théoriques » dans ce livre qui sont tout à fait indépendants du reste : si vous ne vous souhaitez pas vous attarder sur ces détails techniques, nous vous invitons passer directement au chapitre suivant.

Pour bien comprendre le concept des équilibres de Nash, nous nous sommes intéressés au comportement de deux marchands de glace, et avons trouvé que des concurrents avaient tendance à se rapprocher à l'équilibre. Comment un théoricien des jeux modéliserait-il cette situation ?

Formellement, un jeu est un triplet de trois éléments :

- un ensemble de joueurs ;
- un ensemble de stratégies pour chaque joueur ;
- une fonction de gain qui à chaque choix de stratégie associe un gain pour chaque joueur.

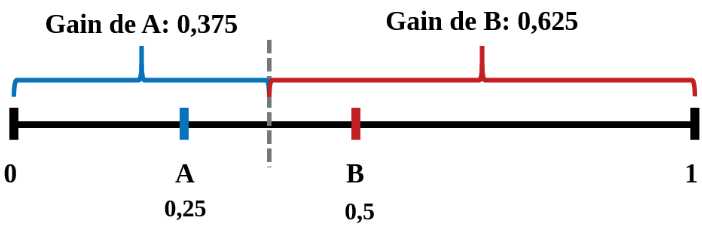
Dans le cas des marchands de glace, nous pouvons nommer les joueurs A et B, et modéliser la plage par le segment [0,1]. Chaque joueur doit choisir un point sur ce segment, l'ensemble des stratégies possibles est donc pour les deux joueurs [0,1]. Notons x_A le choix du joueur *A* et x_B le choix du joueur *B*. Quitte à renommer les joueurs, nous considérons que $x_A < x_B$ (*A* est le joueur de gauche). Le gain de chaque joueur est la fraction du segment qui est la plus proche de lui, fonction de x_A et x_B. Si les deux joueurs choisissent le même point, alors ils se partagent la plage équitablement. Ainsi on a pour le joueur 1 :

$$G_A(x_A, x_B) = x_A + \frac{x_B - x_A}{2} = \frac{x_A + x_B}{2}$$

$$G_B(x_A, x_B) = (1 - x_B) + \frac{x_B - x_A}{2} = \frac{2 - x_A - x_B}{2}$$

Ainsi, lorsque $x_A = 0{,}25$ et $x_B = 0{,}5$, nous avons $G_A = \frac{0{,}25+0{,}5}{2} = 0,375$ et $G_B = \frac{2-0{,}25-0{,}5}{2} = 0,625$.

Cette situation est représentée sur la figure ci-dessous.



Le jeu des marchands de glaces.

Comment trouver alors les équilibres de Nash ? Procédons par disjonction de cas :

1. Si $x_A = x_B = ½$ (les deux joueurs sont exactement au milieu de la plage), alors $G_A = G_B = ½$ et aucun joueur n'a de déviation qui lui permette d'obtenir un meilleur gain.

   En effet, si *A* choisit $x_A < ½$ tandis que *B* reste en $x_B = ½$, alors il obtiendra $G_A = \frac{x_A+x_B}{2} = \frac{x_A}{2} + \frac{1}{4} < \frac{1}{2}$. De même, si *B* choisit $x_B > ½$, alors il obtiendra $G_B = \frac{2-x_A-x_B}{2} = 1 - \frac{1}{4} - \frac{x_B}{2} < \frac{1}{2}$.

   Comme ni *A* ni *B* n'ont de déviation profitable, le couple $(x_A = 0{,}5 ; x_B = 0{,}5)$ est un équilibre de Nash.

2. Si $x_A = x_B \neq ½$ (les deux joueurs sont au même endroit, mais pas au centre de la plage), alors les deux joueurs obtiennent un gain de ½ et chacun des deux joueurs a une déviation profitable :

- Si $x_A < ½$, alors B a intérêt à se placer légèrement à droite, en jouant $x_B = x_A + \varepsilon$, où ε est très petit. Il obtient alors $1 - x_A - \frac{\varepsilon}{2} \sim 1 - x_A > ½$;
- Si $x_A > ½$, alors c'est A qui a intérêt à dévier en se plaçant juste à la gauche de B en $x_A = x_B - \varepsilon$ (le raisonnement est symétrique).

  Cette situation n'est donc pas un équilibre de Nash.

3. Si $x_A \neq x_B$, alors chaque joueur a une déviation profitable qui consiste à se rapprocher de l'autre joueur. Par exemple, si A se place juste à la gauche de B en passant de x_A à $x'_A = x_B - \varepsilon$, alors il obtiendra $G_A = x_B - \varepsilon \sim x_B$, plus que le gain obtenu dans la situation initiale $\frac{x_A + x_B}{2}$.
   Cette dernière situation n'est donc pas non plus un équilibre de Nash.

Avec cette démonstration formelle, on retrouve le résultat que nous avions trouvé intuitivement : il n'existe qu'un seul équilibre de Nash pour ce jeu, où les deux joueurs sont ensemble au centre de la plage. Pour des exemples aussi simples, le formalisme de la théorie des jeux complexifie le problème plutôt qu'il ne le simplifie. Néanmoins, pour des modèles complexes où de nombreux mécanismes sont en jeu et où les équilibres ne sont pas évidents, il devient essentiel.

Chapitre 5

Un coup d'avance

Résolution d'un jeu

Figure 6.1 : Un char gonflable utilisé pendant l'opération Fortitude.

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, le maréchal allemand Rommel fut chargé de protéger les côtes européennes contre un débarquement allié et édifia le mur de l'Atlantique. Cette ligne de défense s'étendait de la Norvège à l'Espagne. Cependant, il était évidemment impossible de la rendre impénétrable en tout point. Rommel dut alors choisir les points particulièrement exposés, là où il pensait un débarquement le plus prévisible. Ces points devaient être renforcés en priorité. Le Pas-de-Calais n'étant qu'à une trentaine de kilomètres de Douvres, un débarquement dans cette région était la solution la plus séduisante pour les Alliés. Par ailleurs, le centre du Reich était rapidement accessible depuis Calais. Les Allemands ont donc particulièrement renforcé les défenses de cette zone et y avaient placé leurs meilleures troupes. Les Alliés savaient que les Allemands feraient ce raisonnement, et pour éviter de se confronter à l'arsenal lourd déployé par l'Axe dans le nord de la France, ils décidèrent de débarquer en Normandie. Néanmoins, pour brouiller les pistes, ils décidèrent de faire croire aux Allemands à un débarquement dans le Nord : c'est l'opération Fortitude. Dès 1943, les Américains placèrent Patton, un de leurs meilleurs généraux, à la tête d'un groupe d'armées fantômes, le First United States Army Group. Ce groupe d'armées, constitué de chars gonflables et d'avions en bois était stationné à Douvres, émettait de faux signaux radio pour faire croire aux Allemands qu'une importante force militaire se concentrait dans cette zone. Patton simula des mouvements de troupes dans le sud-est de l'Angleterre : les Allemands furent ainsi confortés dans leur attente d'un débarquement à Calais, et continuèrent à bâtir des fortifications qui se révélèrent inutiles.

En stratégie militaire, il est primordial de se mettre à la place de son adversaire pour anticiper ses actions et de rester imprévisible. Voyons ce qu'en dit la théorie des jeux.

Nous avons vu que dans le jeu du dilemme du prisonnier, la coopération n'était pas atteinte, car la trahison était une stratégie strictement dominante, et que pour changer la donne, on pouvait changer les gains des différents joueurs. Néanmoins, les deux joueurs n'avaient pas trop à réfléchir dans ce jeu : en particulier, pour choisir leur stratégie, ils n'avaient pas à se soucier du choix de leur adversaire. Quel que soit le choix de leur adversaire, il était plus profitable de ne pas coopérer (ou de coopérer s'ils redoutaient une amende). Or, dans la plupart des situations, le meilleur choix dépend des choix que vont faire vos adversaires.

Imaginons par exemple que Charles et Lucie décident séparément de ce qu'ils vont faire de leur après-midi. Ils peuvent tous deux partir écouter de la musique en ville ou faire une partie de baseball à la campagne. Qu'ils fassent l'un ou l'autre leur est à peu près égal, mais ils préfèrent se retrouver au même endroit. On peut modéliser la situation comme suit[13] :

Charles \ Lucie	Musique	Baseball
Musique	1, 1	0, 0
Baseball	0, 0	1, 1

Tableau 6.1 : Jeu de coordination.

Ici, le choix optimal de chacun des deux joueurs dépend entièrement du choix de l'autre. Pour réussir leur après-midi, Charles et Lucie doivent se coordonner et prendre une décision ensemble.

Dans ce cas, la coordination n'est pas trop difficile, dans la mesure où Charles et Lucie ont intérêt à coopérer. Néanmoins, c'est loin d'être toujours le cas, en particulier lorsque les deux joueurs s'opposent dans une guerre économique ou militaire. Prenons pour exemples une guerre économique et une guerre militaire pour comprendre comment anticiper les décisions de ses adversaires.

Airbus contre Boeing : se mettre à la place de son adversaire

Le marché de l'aviation est en pleine expansion à la suite de la chute des prix du pétrole. Airbus et Boeing décident tous deux d'implanter de nouvelles usines pour gagner des parts de marché. Le marché asiatique est particulièrement prometteur, et en particulier l'Inde et la Chine ont indiqué aux deux firmes qu'ils seraient ravis d'accueillir sur leur sol de nouvelles installations industrielles. Où les deux firmes vont-elles s'implanter ?

Vous êtes consultant pour Airbus, et devez aider le géant européen à prendre la meilleure décision. Ayant fait votre petite enquête, vous estimez à 20 milliards de dollars le chiffre d'affaires annuel supplémentaire généré par le marché aéronautique en Asie. Ce chiffre d'affaires sera réparti différemment entre Airbus et Boeing selon qu'ils décident d'implanter leur nouvelle usine en Inde ou en Chine. Comment faites-vous pour aider Airbus à prendre la meilleure décision ? Votre enquête vous donne le chiffre d'affaires supplémentaire qu'Airbus pourra absorber selon le choix d'implantation des deux entreprises. Vous récapitulez vos résultats dans un tableau :

		Boeing	
		Chine	Inde
Airbus	Chine	9	10
	Inde	8	12

Tableau 6.2 : Chiffre d'affaires supplémentaire dégagé par Airbus en fonction des choix des deux constructeurs (en milliards de dollars).

Par exemple, si Airbus investit en Inde et Boeing en Chine, Airbus gagnera 8 milliards de dollars de chiffre d'affaires. Boeing gagnera le reste de l'augmentation de la valeur du marché, soit 20 − 8 = 12 milliards de dollars.

Comme vous avez appris à vous comporter en stratège, vous cherchez une stratégie strictement dominante, pour maximiser le gain d'Airbus, quel que soit le choix de son concurrent. Le problème, c'est que vous n'en trouvez pas : dans tous les cas, vous avez intérêt à faire la même chose que votre concurrent. Si Boeing décide d'investir en Chine, alors vous avez intérêt à investir en Chine vous aussi. S'il décide de s'installer en Inde, votre « meilleure réponse » est de vous y installer vous aussi. Comment faire ? Bien sûr, vous pourriez attendre que Boeing annonce son implantation et annoncer dans la foulée votre choix, qui sera celui de votre concurrent. Néanmoins, cette stratégie vous empêche de préparer vos investissements bien à l'avance et donne un avantage à Boeing.

Pour éviter de perdre ce temps précieux, vous pourriez considérer qu'il y a une chance sur deux que Boeing s'installe en Inde, et une chance sur deux qu'il s'installe en Chine. Quels seraient alors vos gains ? Si vous décidez de vous implanter en Chine, votre chiffre d'affaires grandira de 9 milliards de dollars si Boeing s'installe en Chine et de 10 milliards s'il investit en Inde. En moyenne, vous gagnez alors 9,5 milliards en chiffre d'affaires. Par contre, si vous investissez en Inde, votre chiffre d'affaires grandira de 10 milliards de dollars « en moyenne ». Ce raisonnement vous conduit donc à conseiller à Airbus d'investir en Inde.

Néanmoins, vous venez de considérer que votre concurrent fait ses choix stratégiques à pile ou face. C'est là une hypothèse bien peu vraisemblable.

Pour savoir quel choix va faire le PDG de Boeing, vous décidez de vous mettre à la place de celui-ci : quel choix auriez-vous fait à sa place ? Vous auriez conduit une enquête similaire à la vôtre, et auriez eu devant vous un tableau similaire au précédent.

Comme le marché asiatique dégagera un chiffre d'affaires de 20 milliards de dollars chaque année, et que les parts de marché qu'Airbus ne conquiert pas reviennent à Boeing, vous pouvez trouver très facilement les gains espérés de votre concurrent :

Airbus \ Boeing	Chine	Inde
Chine	11	10
Inde	12	8

Tableau 6.3 : chiffre d'affaires supplémentaire dégagé par Boeing en fonction des choix des deux constructeurs (en milliards de dollars).

Vous remarquez alors que contrairement à vous, votre concurrent a une stratégie strictement dominante : quel que soit le choix d'Airbus, Boeing a intérêt à s'installer en Chine. C'est donc là que va investir la firme américaine. Airbus, qui a intérêt à s'installer au même endroit que son concurrent, doit choisir lui aussi l'empire du Milieu.

Ainsi, lorsque votre **meilleure réponse** (la meilleure décision que vous pouvez prendre étant donné les décisions de votre adversaire) dépend du choix de l'autre joueur, vous avez intérêt à vous mettre à sa place pour anticiper ses choix.

Alexandre contre Darius : imprévisibilité, espionnage et diversion

Comme nous l'avons vu avec l'exemple du débarquement en Normandie, dans le domaine militaire, il faut attaquer là où l'ennemi ne vous attend pas. Alexandre le Grand l'avait bien compris lorsqu'il affronta Darius à la bataille de Gaugamèles en 331 av. J.-C. faisant face à une armée bien plus nombreuse que la sienne, ses proches lui conseillèrent d'attaquer les Perses la nuit, afin de les prendre par surprise. Alexandre refusa, et attaqua le lendemain après une bonne nuit. Cette stratégie lui assura la victoire : en effet, Darius, qui avait anticipé une attaque de nuit, garda ses hommes éveillés jusqu'au petit matin où, épuisés, ils furent décimés par Alexandre. Darius, en bon stratège, s'était mis à la place de son adversaire et pensant qu'une attaque de nuit serait bénéfique à Alexandre, avait prédit un tel choix de la part de son adversaire. Alexandre, en meilleur stratège, a anticipé ce que Darius ferait sachant que ce dernier a lui aussi anticipé le choix de son adversaire.

Si Darius avait anticipé cette double anticipation d'Alexandre, il se serait alors préparé contre une attaque diurne. Si Alexandre pensait que Darius ferait une telle prévision, il aurait alors attaqué de nuit et se serait heurté à une défense bien préparée.

Dans ce cas de figure, se mettre à la place de son adversaire mène à une impasse, car vous ne savez pas à quel point votre adversaire a anticipé votre raisonnement. Contrairement à la situation précédente où une anticipation des choix des deux joueurs menait à un équilibre de Nash, un tel équilibre n'existe pas à première vue dans ce nouvel exemple, qui peut être synthétisé dans le tableau suivant :

Alexandre \ Darius	Défense de jour	Défense de nuit
Attaque de jour	0 / 1	1 / 0
Attaque de nuit	1 / 0	0 / 1

Tableau 6.4 : Bataille de Gaugamèles, un 0 représente une défaite, un 1 une victoire.

L'équilibre de Nash se caractérise par une situation où personne ne regrette son choix au vu du choix de son adversaire. Ici, quels que soient les choix faits par les deux généraux, l'un des deux regrettera le sien[a] !

Dans une telle situation, le joueur le plus faible est celui qui est le plus prévisible : Darius a été battu, car son choix de préparer une défense nocturne avait été prévu par Alexandre.

Une guerre est toujours remplie d'éléments imprévisibles, tant dans son évolution que dans ses conséquences. Une partie de cette imprévisibilité n'est pas voulue par les belligérants : impossible de prédire tout à fait le moral de ses soldats, l'impact de la météo ou la réaction des populations. Néanmoins, une partie de l'imprévisibilité des conflits est tout à fait voulue : comme nous l'avons vu, la prévisibilité est une faiblesse, et les stratèges cachent minutieusement leurs plans pour surprendre leurs adversaires. Dans la guerre de guérilla, les guérilleros contrebalancent leur manque de moyens en se rendant tout à fait imprévisibles : mêlés à la population, attaquant par petits groupes dans des embuscades, changeant de cache régulièrement, ils harcèlent leurs ennemis qui doivent être constamment en alerte et qui ont du mal à discerner les combattants des civils.

Pour mieux prévoir les mouvements de leurs adversaires, les stratèges militaires font appel à l'espionnage, et tentent d'obtenir le plus de précisions possible sur les mouvements adverses, rendant le camp opposé prévisible. Néanmoins, l'espionnage peut se révéler trompeur : dans ce chapitre, nous avons vu qu'il est important de se mettre à la place de son adversaire. Si vous espionnez votre adversaire, vous avez de bonnes raisons de croire qu'il vous espionne aussi : si Alexandre s'était douté que Darius avait envoyé des espions dans son entourage, il aurait pu annoncer à ses proches qu'il prévoyait une attaque de nuit, tout en maintenant une attaque de jour *in fine*. Ainsi, Darius aurait été conforté dans son idée, le rendant encore plus prévisible, et donnant un avantage à Alexandre.

a Nous préciserons dans un prochain chapitre la notion d'équilibre de Nash, et nous verrons qu'en réalité, il existe un choix qui correspond à une situation d'équilibre : ne sachant pas ce que l'autre fera, les deux généraux peuvent choisir leur stratégie au hasard, en tirant à pile ou face.

Équilibre dans la concurrence

Avant de passer à la suite, étudions un dernier cas de concurrence. Jusqu'ici, nous nous sommes intéressés à des situations dans lesquelles il fallait faire un choix parmi deux options. Néanmoins, dans des situations réelles, il y a souvent plus de possibilités, de nuances entre les divers choix que nous pouvons faire. La théorie des jeux ne se révèle pas impuissante dans ces situations plus complexes, et peut même prédire les choix des joueurs lorsqu'ils font face à une infinité de choix.

Pour illustrer cela, intéressons-nous au marché des sodas. Deux entreprises dominent cette industrie : *PepsiCo* et *The Coca-Cola Company*. Les deux firmes décident de la quantité de soda qu'elles produisent, les prix suivant la loi de l'offre et de la demande : si les deux firmes produisent peu, le soda rare se vendra cher. Réciproquement, si Pepsi et Coca-Cola inondent le marché de la boisson sucrée, les prix chuteront.

Le PDG de Pepsi cherche à savoir combien de soda il doit produire cette année pour maximiser ses profits. Après quelques calculs, il arrive aux conclusions suivantes : si Coca-Cola arrêtait sa production cette année, Pepsi serait alors en position de monopole. Seul à alimenter le marché, il pourrait produire beaucoup de soda d'une façon rentable, mais il ne doit pas non plus en produire trop : le prix du soda baisserait alors et la marge de l'entreprise en pâtirait.

Ses calculs montrent que dans cette hypothèse, une production de 1000 tonnes de soda est optimale.

À l'opposé, si Coca-Cola produisait tellement de soda que le prix d'une bouteille en devenait dérisoire, Pepsi aurait alors intérêt à arrêter sa production : produire une bouteille de boisson coûterait plus cher que son prix de vente. Le PDG de Pepsi estime que ce serait le cas si la production de Coca-Cola dépassait 2 000 tonnes.

Le plus probable est que Coca-Cola produise une quantité de soda entre ces deux extrêmes. Sur un graphique, le PDG de Pepsi trace sa production optimale en fonction de ce que produit Coca-Cola :

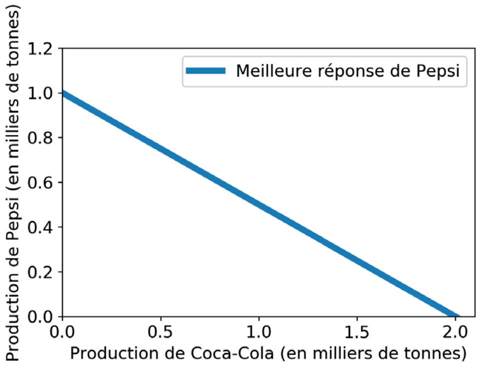


Figure 6.2 : la *meilleure réponse d'un joueur peut dépendre du choix de son adversaire.*

Cela n'aide pas beaucoup le PDG. Il doit annoncer rapidement à ses usines une quantité à produire, et il ne peut pas attendre de connaître la production de Coca-Cola pour lancer la sienne !

Pour résoudre ce problème, il se met à la place de son adversaire. Il sait que dans ses bureaux d'Atlanta, le PDG de Coca-Cola se pose la même question, et a lui aussi tracé un graphique qui donne la meilleure réponse de ses usines en fonction de la production de son concurrent.

Si on superpose les graphes, on obtient la figure suivante :

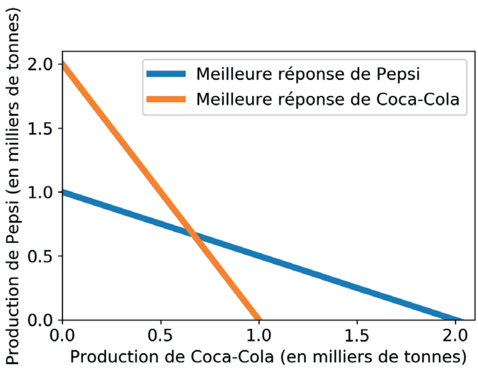


Figure 6.3 : Lorsque la meilleure réponse de chaque joueur dépend du choix de leur adversaire, quel choix font-ils ?

Le PDG de Pepsi se demande ce qui se passerait si Coca-Cola décidait de produire 1500 tonnes de soda. Un coup d'œil sur son schéma lui indique qu'il devrait alors produire 250 tonnes de boisson.

Mais si les choses s'étaient effectivement passées ainsi, Coca-Cola aurait trop produit : sa réponse optimale à la production de 250 tonnes de soda par Pepsi était de produire un peu plus de 800 tonnes (cf. les schémas ci-dessous).

Si Coca-Cola réduisait ainsi sa production, c'est cette fois Pepsi qui aurait produit trop peu : en augmentant sa production un peu au-delà de 500 tonnes, elle donne sa meilleure réponse à la production de Coca-Cola. Ce dernier devrait alors réduire sa production pour mieux contrer son concurrent.

En poursuivant ce raisonnement plus longtemps, les deux PDG ajusteraient leur production là où les deux courbes se croisent, un peu en dessous de 750 tonnes. Lorsque les deux firmes produisent cette quantité de boisson, elles ne regrettent pas leur choix de production : elles ont toutes deux produit exactement ce qu'il fallait pour répondre au mieux à la production de leur concurrent. On a trouvé l'équilibre de Nash. Si on laisse les deux firmes ajuster leur production, elles se placeront petit à petit à cet équilibre, et n'en bougeront pas.

Ce modèle de concurrence s'appelle le duopole [14] de Cournot, et porte le nom de celui qui l'a théorisé, le mathématicien et économiste français Antoine Augustin Cournot. En publiant cette analyse de la compétition économique en 1838, il devint un des pères de la théorie des jeux.

Dans cet exemple, nous avons vu qu'il était possible de prédire les quantités produites par deux entreprises qui cherchent à maximiser leurs profits. Le modèle que nous avons utilisé est un peu simpliste : il ne prend pas en compte les coûts fixes des deux entreprises, leurs différences de productivité et les diverses autres stratégies qu'elles peuvent utiliser, comme la publicité. Néanmoins, vous avez ici l'idée générale qui permet de trouver un équilibre de Nash lorsqu'il faut choisir non pas entre deux stratégies différentes, mais parmi une infinité.

Chapitre 6

Embouteillage

Paradoxe de Braess et problèmes de congestion

Figure 7.1 : Le pont de Queensboro dans Manhattan, film de Woody Allen

Le pont de Queensboro, qui relie les deux arrondissements de Manhattan et du Queens, est une icône de la ville de New York. Néanmoins, avec le rapide développement de l'automobile au début du XXe siècle, ce pont devint rapidement surchargé dès les années 1930. En 1936, on ouvrit donc à la circulation le pont Triborough, pour décharger le pont de Queensboro. Cependant, le nouveau pont fut également rapidement embouteillé. En 1939, le pont de Bronx-Whitestone fut achevé pour limiter l'encombrement sur ces deux premiers ponts. Rien à faire : une fois ouvert, ce troisième pont n'a pas permis de réduire les embouteillages sur les deux premiers[15]. New York disposait maintenant de trois ponts surchargés au lieu d'un.

Quelle était la cause de ces embouteillages supplémentaires ? La ville de New York construisait-elle des ponts trop lentement pour permettre à ses habitants de se déplacer à une époque où le nombre de voitures explosait ? Dès les années 1940, les urbanistes ont compris ce qui s'était passé : le fait d'ajouter deux ponts n'a pas simplement réparti les usagers du premier pont sur trois ouvrages. Les nouveaux ponts rendant l'utilisation de la voiture plus simple pour ceux qui habitaient à proximité, des utilisateurs qui ne faisaient pas usage de la voiture ont commencé à s'en servir.

De manière générale, construire plus de routes est souvent un mauvais moyen de réduire les embouteillages : les nouvelles voies ne font qu'attirer des voitures supplémentaires qui n'aident pas à améliorer la situation. En d'autres termes, augmenter l'offre routière auprès des automobilistes en augmente la demande à long terme : on parle de demande induite.

Au contraire, restreindre les routes a pour effet de diminuer le nombre d'automobilistes qui les empruntent, et peut aider à réduire les embouteillages. En effet, ceux qui prenaient auparavant la voiture se reportent sur d'autres modes de transport. Je ne souhaite pas ici dire que détruire les routes est la solution contre les embouteillages, mais j'insiste simplement sur le fait que la gestion d'un réseau routier est remplie de paradoxes, et les solutions les plus simples ne sont pas forcément les meilleures.

Les urbanistes s'accordent également sur un autre paradoxe intéressant : le fait de construire des routes supplémentaires peut augmenter les embouteillages *sans nécessairement qu'il y ait plus d'usagers sur l'ensemble du réseau.*

Imaginons que deux routes permettent d'aller de la ville A à la ville B. Chacune de des deux routes comporte une autoroute de bonne qualité et une route plus difficile – les temps de trajet pour chaque section sont indiqués sur la figure. Pour ces deux routes, les temps de trajet sont équivalents, les voyageurs qui veulent aller de A à B se répartissent équitablement entre les deux routes, et il n'y a pas de congestion.

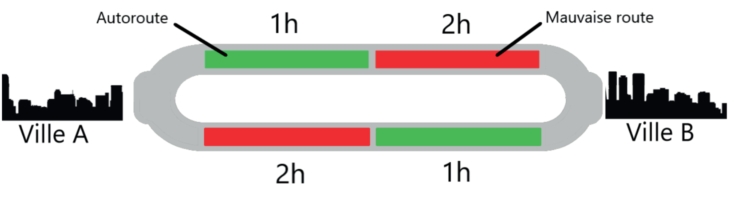


Figure 7.2 : Situation initiale : chaque trajet dure 3.

Pour permettre aux voyageurs d'aller plus vite, nous serions tentés de prolonger les deux autoroutes pour n'en former qu'une. Ce pourrait être là une grave erreur.

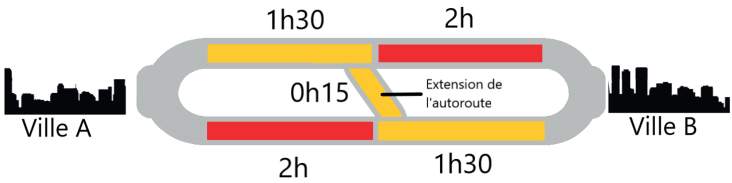


Figure 7.3 : Tous les utilisateurs prennent désormais le même chemin, qui dure 3 h 15.

En effet, dans cette nouvelle configuration, tous les automobilistes utilisent le même trajet, passant uniquement par les autoroutes, ce qui peut provoquer des embouteillages importants qui augmenteront la durée du trajet par rapport à la situation initiale : au lieu de durer 3 h, le trajet entre les deux villes dure maintenant 3 h 15. Alors qu'il n'y avait pas de congestion dans la situation initiale, les automobilistes ne peuvent maintenant pas y échapper. L'ajout de cette nouvelle route aura eu des conséquences négatives sur l'ensemble des utilisateurs. Cette situation s'appelle le paradoxe de Braess, selon lequel on peut augmenter le temps de trajet des utilisateurs d'un réseau en augmentant le nombre de routes sur celui-ci sans augmenter le nombre d'utilisateurs totaux du réseau.

La théorie des jeux donne des outils intéressants pour étudier ce genre de problème de congestion dans un réseau. C'est ce que nous allons voir à présent, avec une nouvelle interprétation des équilibres de Nash.

Avec l'exemple du duopole, nous avons vu la raison pour laquelle on porte une attention particulière aux équilibres de Nash. Lorsqu'on laisse des agents économiques ajuster leurs choix pour mieux répondre à ceux de leurs adversaires, ils vont se rapprocher petit à petit de cet équilibre. Ces équilibres ne se manifestent pas seulement dans la compétition entre entreprises. Nous allons voir qu'ils apparaissent également dans beaucoup de situations de la vie quotidienne : en particulier, chaque fois que vous attendez dans une file. Intéressons-nous au problème suivant :

À la fête foraine de votre ville, les enfants ont le choix entre deux attractions majeures : la grande roue et les montagnes russes. Dans la journée, 600 enfants se pressent en permanence à l'événement et font la queue pour l'une ou l'autre attraction. Chaque minute, la grande roue peut accueillir 10 enfants supplémentaires et dans le même temps, 20 places se libèrent pour les montagnes russes. Combien de temps les enfants devront-ils attendre à chaque attraction, sachant qu'ils veulent passer le moins de temps possible dans la queue ?

Pour résoudre ce problème, représentons le temps d'attente des enfants en fonction du nombre d'enfants attendant devant la grande roue :

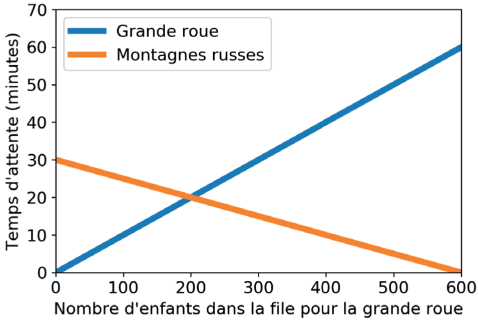


Figure 7.4 : temps d'attente pour chacune des deux files

Voyons maintenant ce qui se passe lorsque les deux files se forment : s'il y a 300 enfants dans chaque file, ceux qui attendent de rentrer dans la grande roue attendront une demi-heure, soit deux fois plus que les enfants qui attendent pour monter dans les montagnes russes. Les enfants au bout de la file pour la grande roue vont alors changer de file pour aller vers celle des montagnes russes pour laquelle il y a moins d'attente. Réciproquement, s'il y a plus d'attente aux montagnes russes qu'à la grande roue, des enfants vont se déporter vers l'autre file. Il y a un équilibre lorsque les temps d'attente dans les deux files sont égaux, au croisement des deux courbes. Il y a alors 200 enfants dans la file pour la grande roue, tandis ce que les 400 autres attendent devant les montagnes russes. Pour les deux attractions, le temps d'attente ne dépasse pas 20 minutes.

On peut généraliser ce résultat chaque fois qu'il y a une file d'attente : au supermarché, les clients se répartissent entre les différentes caisses de sorte que le temps d'attente soit à peu près égal à toutes les caisses. La situation où tout le monde attendrait à une seule caisse est irréaliste.

De même, lorsqu'il y a deux routes pour aller d'un point A à un point B, il est impensable que l'une soit totalement bouchée par des embouteillages tandis ce que l'autre n'est empruntée par personne : les automobilistes se répartissent sur les différentes routes, et s'ils cherchent à minimiser leur temps de trajet, on aura un équilibre de Nash lorsque le temps de trajet sera égal sur les différentes routes empruntées par les voyageurs[a].

Lorsque les urbanistes réfléchissent à la construction de nouvelles voies, ils peuvent trouver grâce à des simulations numériques la distribution du trafic qui en résultera (un équilibre de Nash), et ainsi estimer l'impact de leurs projets sur les embouteillages !

a Les urbanistes appellent cet équilibre de Nash l'équilibre de Wardrop.

Chapitre 7

Le jeu d'échecs a une solution

Définition de la théorie des jeux

Vous connaissez sans doute le jeu du morpion, et si vous y avez joué récemment, vous avez probablement atteint un match nul à la plupart de vos parties. En effet, il est très simple de trouver une stratégie qui permette systématiquement soit de gagner, soit d'atteindre un nul à ce jeu d'enfants.

On peut de la même manière trouver une « solution » à de nombreux autres jeux. En 1988, il fut démontré que celui qui jouait en premier au jeu « puissance 4 » pouvait toujours gagner, et en 2007 un ordinateur prouva qu'au jeu de dames, deux joueurs jouant parfaitement arrivent toujours à un nul.

En 1913, le mathématicien Zermelo se demanda s'il existait au jeu d'échecs une stratégie (c'est à dire une série de coups, sachant les coups déjà joués des deux joueurs) qui permettait de ne jamais essuyer de défaite. Et il démontra que c'était le cas ! Le problème, c'est que le jeu d'échecs est tellement complexe qu'aucun ordinateur n'est capable de trouver cette solution : pour l'instant, personne n'a résolu le jeu d'échecs, mais on sait au moins qu'une solution existe[16] !

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié les choix de prisonniers, de pêcheurs, de PDG, d'enfants et de généraux dans différentes situations. Ces premiers exemples peuvent vous donner un aperçu des situations que l'on analyse en théorie des jeux.

Cette branche de l'économie et des mathématiques trouve ses racines dans les œuvres d'économistes comme Cournot, ainsi que dans les travaux de mathématiciens qui s'intéressaient aux applications des mathématiques dans des jeux comme Zermelo.

Aux échecs, les joueurs sont systématiquement confrontés à des choix, et doivent choisir ceux qui leur apporteront la victoire. Pour ce faire, il est essentiel de se mettre à la place de son adversaire, et d'anticiper les choix que celui-ci va faire, comme nous l'avons fait jusqu'ici.

La théorie des jeux résout des problèmes variés à la manière d'un joueur d'échecs : il s'agit de chercher les choix que vont faire des agents rationnels pour gagner une partie d'un jeu, de l'argent, du temps… La théorie des jeux est la science du raisonnement stratégique.

Bien entendu, on utilise la théorie des jeux pour analyser des jeux comme le jeu d'échecs, mais les domaines où la théorie des jeux a été appliquée sont extrêmement divers : nous avons vu et continuerons de voir de telles applications en économie, mais aussi en politique, en sociologie, en biologie, dans le sport ou à la guerre.

Selon les mots d'Elinor Ostrom, dont nous avons déjà parlé : « La puissance d'une théorie est exactement proportionnelle à la diversité de situations qu'elle peut expliquer. Toutes les théories, néanmoins, ont leurs limites. » La théorie des jeux apportant un éclairage dans un nombre impressionnant de disciplines, elle est très puissante. Nous verrons aussi petit à petit quelles sont ses limites, et comment les modèles peuvent être affinés pour mieux représenter la réalité.

Chapitre 8

Crash(s)

Le concours de beauté de Keynes et les bulles spéculatives

Le journaliste anglais du XIXe siècle Charles Mackay raconte avec emphase l'anecdote suivante dans l'un de ses livres :

> Un riche marchand […] reçut un jour une marchandise très précieuse du Levant. La nouvelle de son arrivée lui fut apportée par un matelot qui se présenta […] parmi des ballots de marchandises de toutes sortes. Le marchand pour le récompenser lui fit cadeau d'un bon hareng rouge pour son déjeuner. Le marin avait, semble-t-il, une grande appétence pour les oignons, et voyant un bulbe [de tulipe] très semblable à un oignon posé sur le comptoir […] le glissa dans sa poche, pensant s'en servir pour accompagner son hareng. Il s'éloigna avec le cadeau et se dirigea vers le quai pour manger son petit-déjeuner. Le négociant se rendit [rapidement] compte de la disparition de son précieux *Semper Augustus*, valant trois mille florins, soit environ 280 livres sterling. Tout l'établissement se mit alors à rechercher le précieux bulbe, sans succès. […] Après quelque temps, quelqu'un pensa au marin.
>
> Le malheureux marchand se rua dans la rue, suivi de près par toute sa troupe. [On retrouva] le marin tranquillement assis sur un tas de cordes en train de mastiquer le dernier morceau de son « oignon ». Il ne pensait pas qu'il avait mangé un petit-déjeuner dont le coût aurait pu régaler tout l'équipage d'un navire pendant douze mois. […] La partie la plus fâcheuse de cette affaire fut que le marin dut rester en prison pour quelques mois, accusé de crime par le marchand[17].

Dans quelle société et à quelle époque un bulbe de tulipe pouvait-il valoir aussi cher, et le vol d'un tel bulbe coûter une peine de prison ?

Figure 9.1 : Fleur de Semper Augustus, aquarelle anonyme du XVII^e^ *siècle.*

Charles Mackay raconta cette histoire dans ses *Récits d'extraordinaires illusions populaires et de la folie des foules* pour illustrer les comportements irrationnels observés entre 1634 et 1637 aux Provinces-Unies (ancêtre des Pays-Bas actuels). À cette période, la possession de tulipes était devenue chez les bourgeois hollandais une marque de goût et de luxe. Les horticulteurs commencèrent à cultiver diverses variétés de tulipes, parfois très difficiles à obtenir. La plus célèbre d'entre elles était la variété *Semper Augustus*, où la plante était infectée par un virus lui donnant des couleurs marbrées particulièrement appréciées (mais compliquant sa culture). La demande élevée fit rapidement augmenter les prix des divers bulbes et le marché des bulbes commença à ressembler à un marché financier. On pouvait y acheter des « parts de bulbe », comme si on achetait des actions, parts d'entreprise. On inventa d'ailleurs une unité de poids, le *perit*, pour mesurer précisément le poids d'un bulbe et ainsi le diviser en parts[18]. Un *perit* pèse un peu plus d'un vingtième de gramme, soit quatre fois plus qu'un carat. On portait ainsi à peu près autant d'importance aux pierres précieuses qu'aux bulbes de tulipe.

Sur le marché de la tulipe, on pouvait également acheter des contrats à terme[19], c'est-à-dire des promesses de livraison à une date donnée. Par exemple, un marchand de tulipes pouvait s'engager en janvier à livrer un bulbe de tulipe à un bourgeois en avril en échange de 100 florins. Si en avril, le prix du bulbe était de 200 florins, le bourgeois pouvait revendre le bulbe qu'on venait de lui livrer et gagner ainsi 100 florins. Le bourgeois pouvait également revendre le contrat à terme avant avril à quelqu'un d'autre. C'est à ce dernier que le marchand devait alors livrer le bulbe.

Dans ce nouveau marché où on échangeait des parts de bulbes de tulipe, les prix s'élevèrent jusqu'à atteindre des niveaux exorbitants. Ainsi, Mackay raconte la vente d'un contrat promettant la livraison d'un bulbe contre 2 500 florins, soit le salaire d'un artisan pendant 16 ans, ou encore le prix d'un lot comprenant : 4 tonnes de blé, 8 tonnes de seigle, 4 bœufs gras, 8 porcs, 12 moutons, 2 barriques de vin, 4 tonneaux de bière, 2 tonnes de beurre, une demi-tonne de fromage, un lit, un costume complet et un gobelet d'argent.

Fatalement, cette bulle spéculative finit par éclater. En février 1637, les prix des bulbes de tulipe s'écroulèrent jusqu'à perdre jusqu'à 99,99 % de leur valeur maximale[20].

La crise de 1637 est souvent décrite comme une des premières bulles spéculatives de l'histoire, et en présente effectivement les caractéristiques principales[21].

Pour des raisons diverses et variées, un produit dans l'économie peut voir son prix augmenter. Ici, la tulipe était devenue un symbole de richesse et de raffinement, et une grande demande pour une offre limitée a conduit à une hausse des prix. Quelques spéculateurs qui anticipaient une augmentation des prix de la tulipe ont donc commencé à acheter des bulbes dans l'espoir de les revendre plus tard à un meilleur prix. En faisant ce pari, ils ont augmenté la demande sur le marché de la tulipe et donc les prix de celles-ci : lorsque des spéculateurs pensent que le prix d'un produit va augmenter et en achètent, ils contribuent effectivement à l'augmentation des prix : on parle d'une prophétie autoréalisatrice. Pensant que cette hausse des prix va continuer, d'autres spéculateurs rejoignent les premiers, et la hausse continue alors. Néanmoins, cette augmentation ne peut pas durer éternellement : il arrive un moment où le prix du produit sur le marché est bien supérieur à sa valeur réelle, et il devient fortement improbable que les prix continuent à augmenter. Les spéculateurs revendent alors ce qu'ils ont acheté et, la demande baissant subitement, les cours s'effondrent.

La bulle internet est une bulle spéculative qui grandit entre 1997 et 2001. La mise en réseau mondial commença lorsque l'armée américaine lança en 1969 ARPANET, un réseau qui permettait à plusieurs ordinateurs d'échanger des données entre eux. Petit à petit, d'autres réseaux similaires furent lancés aux États-Unis et dans le reste du monde, finalement regroupés pour former internet. Le courrier électronique constitua une première utilisation de cette mise en réseau, et en 1989, Tim Berners-Lee posa les bases du World Wide Web, qui permet aux utilisateurs d'internet de consulter des sites web. Cette invention permit de démocratiser internet en démultipliant ses possibilités et en permettant à tous d'y ajouter du contenu.

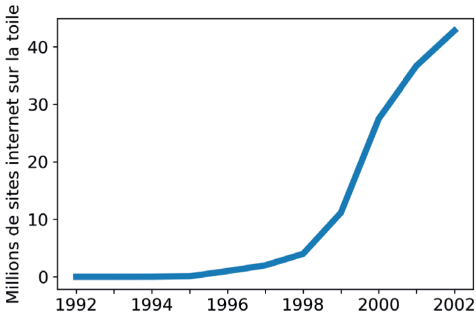


Figure 9.2 : Nombre de sites internet sur la toile (1992-2002)

Le nombre de sites internet sur la toile doubla chaque année entre 1997 et 2001, faisant du secteur des télécommunications un domaine particulièrement attrayant, avec une croissance retentissante et des applications commerciales florissantes. Les entreprises et les investisseurs se ruèrent sur les jeunes firmes *Dot-Com* qui fondaient leur business sur l'expansion d'internet. Les cours boursiers des entreprises de télécommunications s'envolèrent, et les investisseurs se réveillaient chaque matin plus riches que la veille, donnant naissance à une euphorie spéculative. Cette croissance dura jusqu'en 2000 lorsque la bulle atteignit un niveau critique. Les investisseurs, emportés par la montée des cours, avaient investi de façon très risquée et avaient surestimé la croissance du marché lié à internet. Se rendant compte de leurs erreurs, les investisseurs commencèrent à revendre leurs actions. Rapidement, avec plus de vendeurs que d'acheteurs, la valeur des actions baissa fortement, poussant les investisseurs à vendre le plus rapidement possible et précipitant ainsi la chute des cours boursiers des sociétés *Dot-Com* : ce fut l'éclatement de la bulle internet.

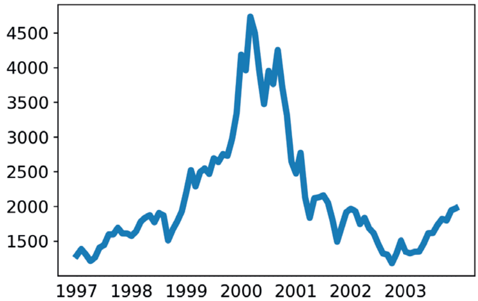


Figure 9.3 : Cours de l'indice IXIC (1997-2003)

Ci-dessus, un graphique représentant le cours de l'indice boursier IXIC qui reflète la valeur des actions cotées au NASDAQ, un marché boursier américain. Dans les trois années qui ont précédé l'éclatement de la bulle internet, la valeur de cet indice boursier a triplé avant de s'effondrer à partir de l'année 2000. De nombreuses firmes dans le domaine des télécommunications ont suivi des cours similaires à celui présenté ici, et l'éclatement de la bulle internet mena à la faillite de nombreuses entreprises liées à internet.

Dans la partie précédente, nous avons vu l'importance capitale d'anticiper les choix de ses adversaires pour prendre de bonnes décisions. Un domaine où tout le monde prend vraiment garde au comportement de ses voisins est le domaine financier.

Sur les marchés financiers, les prix des actions, obligations, etc. sont donc déterminés par les choix des traders et autres acheteurs de produits financiers : s'ils décident de vendre une action en masse, son prix baisse, alors que s'ils décident d'en accumuler, leur prix augmente. Si vous étiez engagé comme trader par une banque, votre but pourrait être d'acheter des produits lorsque leur prix est bas pour les revendre au prix fort. Pour réussir à acheter et vendre au bon moment, il faut anticiper les mouvements de vos adversaires des autres banques : par exemple, si toutes les banques commencent à se débarrasser d'une action en particulier, en faisant baisser le prix, vous devrez vendre les vôtres avant que leurs prix aient totalement dégringolé. De même, si vous estimez que vos adversaires vont acheter beaucoup d'actions dans un certain secteur, vous avez intérêt à en acheter avant eux, tant que leur prix est bas. En anticipant les mouvements de vos adversaires, vous ferez ce qu'on appelle de la spéculation : ce mot vient d'ailleurs du latin *speculor* qui signifie observateur ou espion.

Parfois, les jeux boursiers mènent à des bulles, comme nous l'avons vu. Ces épisodes sont souvent vus comme guidés par une folie spéculative, où les acheteurs fondent leurs choix sur des espérances irrationnelles. Lorsque la bulle éclate, c'est une catastrophe pour l'économie et tout le monde regrette d'avoir acheté à prix d'or quelque chose qui ne vaut plus rien. La théorie des jeux nous apprend que des situations tout à fait regrettables peuvent arriver malgré un comportement rationnel. Nous allons à présent donner quelques éléments de réponse à la question suivante : les bulles spéculatives sont-elles de simples accès de folie de la bourse, ou peuvent-elles émerger lorsque les spéculateurs se comportent de façon rationnelle ?

On peut débattre longuement de l'utilité de la spéculation dans l'économie, de sa capacité à accélérer la croissance ou de son danger lors de l'apparition de bulles. On peut se poser la question de la régulation des activités boursières très spéculatives, pour éviter des crises comme celle des *subprimes* en 2007[a].

Mais dans cet imbroglio boursier, tout le monde peut se mettre d'accord sur un point : pour gagner au jeu de la bourse, il faut acheter lorsque les prix sont bas (avant que beaucoup d'acheteurs se ruent sur le produit), et vendre avant que les autres commencent à revendre ce qu'ils ont acheté (et donc que les prix baissent). Il faut donc avoir toujours un coup d'avance sur ses adversaires, et anticiper leurs actions, comme dans les situations de théorie des jeux que nous avons étudiées en première partie. Par ailleurs, les spéculateurs qui investissent au début de la bulle spéculative (qui la lancent, d'une certaine manière) peuvent agir d'une manière parfaitement rationnelle : ils anticipent la hausse du prix du produit sur lequel ils misent, et s'ils vendent celui-ci avant que la bulle éclate, leur comportement ne leur aura pas porté préjudice. Si le prix du produit augmente tellement qu'il dépasse très largement sa valeur réelle, ce n'est pas si grave pour ces premiers spéculateurs : au contraire, s'ils vendent avant la dégringolade. On pourrait penser qu'un marchand hollandais fasse une erreur en achetant une simple tulipe pour 1000 florins, mais s'il anticipe que les prix vont encore monter jusqu'à 2000 florins, et que cette anticipation se révèle vraie, il aura fait une bonne affaire ! La valeur réelle de la tulipe, qu'on pourrait estimer à quelques florins en temps normal, n'est pas ce qui compte le plus :

a La crise des subprimes fut causée en partie par l'octroi de prêts immobiliers à des foyers qui avaient une probabilité faible de pouvoir les rembourser. Ces crédits spéculatifs à haut risque furent mêlés à d'autres produits financiers moins risqués pour former des produits composés en apparence peu risqués, mais en réalité toxiques.

le profit que le marchand obtient est seulement la différence entre leur prix d'achat et leur prix de vente. Aujourd'hui, un trader rationnel pourrait investir dans un produit dont le prix est largement surestimé et quand même réaliser un profit. Il serait réducteur de dire que les bulles spéculatives sont l'expression d'une folie généralisée : celles-ci ne sont pas nécessairement incompatibles avec un comportement rationnel[b].

Dans sa *Théorie générale de l'emploi, de l'intérêt et de la monnaie*, le célèbre économiste britannique John Maynard Keynes illustre ses idées sur la spéculation boursière en décrivant un concours de beauté fictif qui aurait lieu dans la presse. Sur une page de leur journal, les lecteurs sont face à une centaine de visages pris en photo. Ils doivent envoyer au journal le visage qu'ils trouvent le plus attrayant, et s'ils ont trouvé le visage qui est effectivement considéré comme le plus attrayant, ils gagnent un prix. Comment cette plus belle photo est-elle donc choisie ? C'est tout simplement le cliché qui aura été le plus reçu par le journal.

Si vous êtes un lecteur participant à ce concours, quelle photo envoyez-vous à l'éditeur ? Une stratégie qui semble logique est d'envoyer le visage qui vous semble le plus beau. Néanmoins, cette stratégie n'est pas nécessairement la meilleure pour remporter le prix. En effet, peut-être avez-vous une préférence un peu particulière pour les visages avec des taches de rousseur, ou avec une certaine couleur de cheveux. Si cette préférence n'est pas partagée par la plupart de vos concitoyens, vous avez une bonne chance d'envoyer au journal une photo que peu auront sélectionnée. Il est donc primordial de prendre en compte les choix des autres joueurs si vous voulez gagner. Pour avoir une meilleure chance d'envoyer les photos qui auront été les plus appréciées du public, vous devez donc gommer vos préférences individuelles et choisir les photos qui, selon vous, auront été les plus choisies par les autres. Vous pouvez donc choisir un visage qui a des caractéristiques appréciées par la majorité de la population. Néanmoins, vous savez également que beaucoup de lecteurs feront ce raisonnement. Le bon choix est donc d'envoyer les visages qui, d'après

b Ce propos mérite d'être nuancé : dans une bulle spéculative, les agents peinent à estimer correctement les risques qu'ils prennent. Lors de la bulle internet, un bon nombre d'Américains quittèrent leur travail pour devenir traders amateurs en investissant dans des actions DotCom. Il est clair que beaucoup d'entre eux étaient aveuglés par la hausse incroyable des prix des actions, et peu ont anticipé la dégringolade de celles-ci au moment de l'éclatement de la bulle internet. Cet épisode de spéculation massive reste donc dans la mémoire des Américains comme une période d'irrationalité collective.

vous, auront été choisis par la majorité sachant que ceux-ci cherchent eux-mêmes à imiter les préférences de leurs semblables. Si tous font ce double raisonnement, il faut aller un degré plus loin et anticiper les anticipations des autres lecteurs… On peut faire ce raisonnement encore et encore, à l'infini. Voici les mots de Keynes :

> Il ne s'agit pas pour chacun de choisir les visages qui, autant qu'il en puisse juger, sont réellement les plus jolis ni même ceux que l'opinion moyenne considérera réellement comme tels. Au troisième degré où nous sommes déjà rendus, on emploie ses facultés à découvrir l'idée que l'opinion moyenne se fera à l'avance de son propre jugement. Et il y a des personnes, croyons-nous, qui vont jusqu'au quatrième ou au cinquième degré ou plus loin encore[22].

À la bourse, on ne choisit pas de beaux visages, mais des produits financiers prometteurs. Néanmoins, comme dans le concours de beauté de Keynes, les placements dans lesquels il faut investir en bourse ne sont pas nécessairement ceux qui vont le plus se développer d'après vous. Ce sont ceux qui seront les plus plébiscités par vos pairs. En effet, les placements qui plairont le plus aux autres investisseurs sont ceux dont la valeur va augmenter le plus. Comme dans le concours de beauté, il ne faut pas nécessairement miser sur le meilleur produit d'après vous, ni le produit qui sera considéré comme meilleur par la plupart de vos adversaires, mais celui qui sera le plus acheté par vos concurrents, et qui n'est pas forcément celui qu'ils trouvent le meilleur.

Ainsi, les marchands qui ont investi dans des parts de bulbes de tulipe au XVIIe siècle n'avaient pas nécessairement une passion particulière pour les tulipes (après tout, un quart de bulbe de tulipe n'a pas un grand intérêt). Simplement, ils faisaient la prédiction que beaucoup de leurs pairs investiraient dans de tels bulbes, et ceux-ci constitueraient alors un placement intéressant.

Pour modéliser le concours de beauté proposé par Keynes, les théoriciens des jeux ont introduit le jeu des 2/3. De quoi s'agit-il ? Dans un groupe, tout le monde choisit un nombre entre 0 et 100. Celui qui aura choisi le nombre le plus proche des 2/3 de la moyenne des nombres choisis gagne une récompense. Quel nombre choisir ?

Admettons que vos adversaires ne pensent pas stratégiquement et annoncent un nombre entre 0 et 100 choisi tout à fait au hasard. La moyenne des nombres choisis sera autour de 50, et pour gagner il faut annoncer un nombre qui se rapproche des deux tiers de 50, soit 33 : vous faites une anticipation de premier degré.

Néanmoins, vous savez parfaitement que dans un tel jeu, les individus ne choisissent pas un nombre tout à fait au hasard : par exemple, comme la moyenne des nombres ne peut pas être au-dessus de 100, les deux tiers de la moyenne ne peuvent pas dépasser 67. Il n'est donc pas particulièrement intelligent d'annoncer un nombre qui dépasse 67. Pour gagner, il faut faire preuve d'un peu plus de stratégie.

Si vous pensez que tous les autres joueurs choisissent 33, vous devez annoncer les deux tiers de ce nombre, c'est-à-dire 22 (et faire une anticipation de deuxième degré). Mais si vous anticipez que les autres joueurs joueront 22 comme vous, il faut que vous fassiez une anticipation du troisième degré et que vous annonciez 15. Et si vous pensez que tout le monde annoncera 15, il faut donner 10 comme réponse, allant jusqu'au quatrième degré d'anticipation. Ce cycle d'anticipations s'arrête à 0, l'équilibre de Nash de ce jeu[c]. En effet, tant que la moyenne des nombres choisis est supérieure à 0, bon nombre de joueurs auraient intérêt à diminuer leur annonce. Lorsque tous les joueurs ont choisi 0, tout le monde gagne, car les deux tiers de zéro font… zéro ! Aucun joueur ne regrette alors son choix.

Faut-il donc annoncer 0 pour gagner le jeu à coup sûr ? Non, car il est très peu probable que tous les joueurs aient fait ce raisonnement d'anticipation un grand nombre de fois. S'il est probable que vos adversaires jouent avec un ou deux degrés d'anticipation, ils ne joueront sans doute pas tous 0. Si vous allez jusqu'à un niveau d'anticipation trop élevé, vous annoncerez un nombre trop faible et

c Pour démontrer rigoureusement que 0 est l'équilibre de Nash de ce jeu, on procède par élimination successive de stratégies strictement dominées. Toutes les stratégies dépassant 67 sont strictement dominées, car le nombre à trouver sera nécessairement inférieur ou égal à 67 : la stratégie « 67 » domine toutes les stratégies supérieures, dans la mesure où on a toujours plus de chances de gagner en annonçant 67 que n'importe quel nombre au-dessus de 67. Une fois toutes ces stratégies strictement dominées éliminées, et qu'on considère qu'elles ne seront jamais jouées par un joueur rationnel, on remarque que ce sont les stratégies au-dessus de 44 qui sont strictement dominées, pour les mêmes raisons que précédemment. Lorsque toutes les stratégies au-delà de 44 sont éliminées, on remarque que les stratégies dépassant 29 sont des stratégies strictement dominées. La répétition de ce raisonnement conduit à l'élimination successive de toutes les stratégies, à l'exception de la stratégie « 0 ». Comme cette stratégie est la seule à ne pas être strictement dominée, c'est la stratégie dominante de ce jeu.

perdrez. Pour gagner ce jeu, il faut estimer quel degré d'anticipation vos adversaires auront choisi en moyenne, et donner le nombre qui correspond au degré d'anticipation suivant.

Lorsqu'on effectue cette expérience dans la réalité, on trouve en effet que les joueurs ne jouent pas l'équilibre de Nash en annonçant zéro[23]. Les résultats expérimentaux montrent qu'en moyenne, on observe des réponses assez élevées, autour de 36 pour un échantillon représentatif de la population[24]. Néanmoins, si on demande à cet échantillon de jouer à nouveau au jeu avec les mêmes personnes, la moyenne des réponses baisse. En effet, ceux qui ont donné un nombre trop élevé revoient leur estimation à la baisse, et si on répète le jeu un grand nombre de fois, les joueurs finissent par tous annoncer des résultats proches de 0[25].

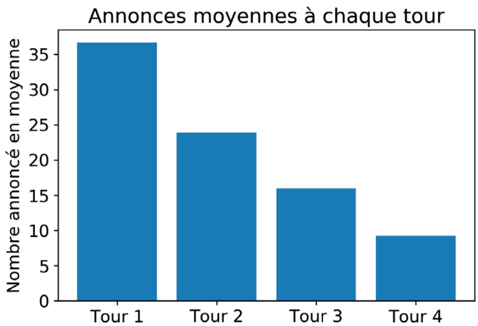


Figure 9.4 : Plus des joueurs jouent au jeu des 2/3, plus ils se rapprochent de l'équilibre de Nash.

Chapitre 9

Ruée vers l'or

Jeux de coordination et paniques bancaires

Lors de l'éclatement d'une bulle spéculative, le premier secteur touché est en général le secteur financier. Ainsi, la crise des *subprimes* a été marquée par la faillite retentissante de la banque d'investissement *Lehman Brothers*. Une banque fait faillite lorsqu'elle n'est plus en mesure de fournir de l'argent liquide à ses clients lorsque ceux-ci en demandent.

En effet, une banque ne fonctionne pas comme une tirelire géante : lorsque vous contractez un prêt auprès de votre banque, l'argent qui apparaît sur votre compte n'est pas présent sous la forme de pièces sonnantes et trébuchantes dans les coffres de la banque. La somme qui figure sur votre relevé de compte constitue simplement une promesse de la banque à vous fournir autant de pièces et billets si vous venez les réclamer. Comme tout le monde ne va pas vider son compte au distributeur en même temps, la banque peut tenir toutes ses promesses sans posséder sous la forme de pièces et billets l'argent contenu dans les comptes de ses clients. Usuellement, les banques ne détiennent dans leurs fonds propres (leur « coffre ») qu'un petit pourcentage de l'argent qui est contenu dans les comptes de ses clients[26].

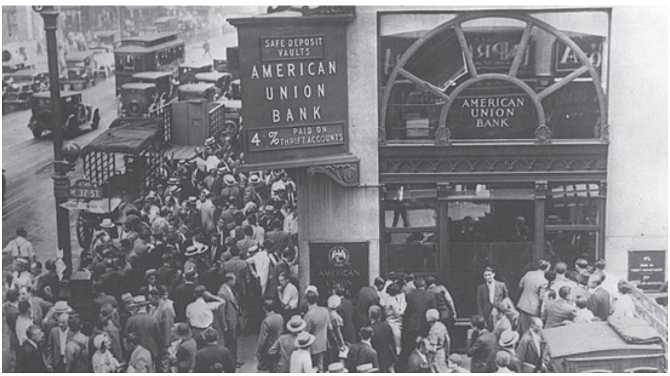


Figure 10.1 : Panique bancaire en avril 1932 à New York devant la banque de American Union, fermée (The National Archives).

Ce mécanisme ne fonctionne correctement que parce que les retraits des clients sont espacés dans le temps. Si tous les clients d'une banque décident de venir récupérer l'argent disponible sur leur compte dans un délai très court, la banque n'est plus en mesure de donner à ses clients l'argent dont ceux-ci disposent sur leur compte et celle-ci fait faillite.

Une telle ruée des clients vers la banque pour récupérer leur argent s'appelle une panique bancaire. Cet événement peut avoir lieu lorsque les clients d'une banque pensent que celle-ci va faire faillite. Pour ne pas perdre leur argent, ils se dépêchent d'aller le chercher avant que la banque fasse effectivement faillite.

Les paniques bancaires constituent un cercle vicieux : lorsque des clients prudents qui perdent confiance en leur banque commencent à retirer massivement l'argent de leurs comptes, la banque est fragilisée.

D'autres clients perdent alors confiance en la solvabilité de la banque, et vident leurs comptes à leur tour. Ceci met la banque dans une posture encore plus désavantageuse et accentue la panique.

La prévision de la faillite d'une banque peut ainsi constituer une prophétie autoréalisatrice. En effet, lorsqu'on annonce la fragilité d'une banque, les clients de celle-ci peuvent vider leurs comptes rapidement, mettant en danger la banque et éventuellement initiant une panique bancaire.

Une panique bancaire peut par ailleurs potentiellement affecter une banque en parfaite santé financière : c'est ce qui se passe à la fin du film *Mary Poppins* de Robert Stevenson. Dans une des dernières scènes du film, le petit Michaël hurle dans la banque de son père « Rendez-moi mon argent ! » alors qu'on lui a pris quelques centimes. Les clients de la banque s'imaginent alors que celle-ci est au bord de la faillite et demandent à vider leur compte. En quelques minutes, la panique s'étend et la banque est obligée de fermer.

Analysons grâce à des outils de théorie des jeux ce qui se passe lors d'une panique bancaire.

Considérons les clients d'une banque répartis en deux groupes. Chaque groupe peut décider de laisser son argent à la banque ou de vider son compte. On modélise les gains des deux groupes de la manière suivante :

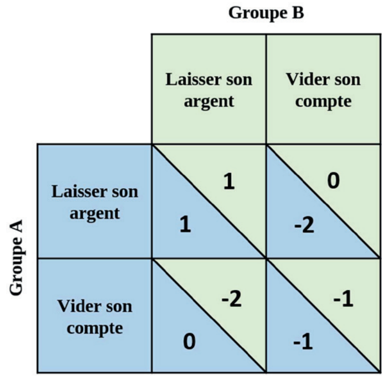


Tableau 10.1 : Un modèle simplifié pour la panique bancaire.

Lorsque tout le monde laisse son argent à la banque, celle-ci fonctionne normalement, et les clients peuvent profiter de ses services, ce qui leur donne un gain de 1 (en haut à gauche du tableau). Lorsque les deux groupes décident de retirer leur argent, la banque fait faillite, et les deux groupes perdent une partie de leur argent, leur donnant un gain négatif de -1 (en bas à droite du tableau). Lorsqu'un des deux groupes seulement vide ses comptes, la banque fait faillite, mais le groupe qui a vidé son compte récupère tout son argent. Il ne peut néanmoins plus profiter des services de la banque, et obtient donc un gain nul. Le groupe qui n'a pas récupéré son argent à temps subit un « gain » de -2.

Analysons ce jeu en en trouvant les stratégies strictement dominantes et les équilibres de Nash. Pour cela, il faut se mettre à la place d'un des groupes, et analyser ses choix possibles. Ainsi, si vous pensez que l'autre groupe va laisser son argent à la banque, vous avez tout intérêt à faire de même : la stratégie « laisser son argent » domine la stratégie « vider son compte » dans ce cas. En effet, si vous videz vos comptes, vous ne pourrez plus profiter des services de la banque, alors que vous ne courez pas le risque de perdre votre argent en l'y laissant. Si au contraire vous pensez que l'autre groupe va vider ses comptes, vous avez intérêt à vider également les vôtres : la banque va faire faillite dans tous les cas, autant récupérer votre argent avant qu'il soit trop tard. Dans les deux cas, vous avez intérêt à faire la même chose que l'autre groupe : un tel jeu s'appelle un **jeu de coordination**.

On peut identifier deux équilibres de Nash dans ce jeu : celui où les deux groupes vident leurs comptes (la panique bancaire), et celui où les clients laissent leur argent à la banque (ce qui correspond à un fonctionnement normal). Un de ces deux équilibres est clairement meilleur que l'autre, mais on peut tout de même arriver à une panique bancaire et donc à un équilibre sous-optimal.

Cette modélisation met en valeur le caractère autoréalisateur des prédictions de panique bancaire : si vous pensez ou annoncez qu'il y aura une ruée vers les distributeurs, les joueurs retireront leur argent, en « jouant » ainsi leur stratégie strictement dominante.

Les paniques bancaires étaient très fréquentes lors des crises financières du XXe siècle, mais se font aujourd'hui plus rares. En effet, l'État intervient de nos jours pour limiter la ruée vers les distributeurs. Ainsi, pendant la crise grecque en 2015, le gouvernement limita les retraits à 60 euros par jour, empêchant les clients des banques grecques de vider leur compte d'un seul coup et ralentissant l'affaiblissement des banques[27]. Par ailleurs, les États de l'Union européenne doivent assurer les dépôts bancaires de leurs citoyens à hauteur de 100 000 euros par compte et par personne. Ainsi, si vous avez moins de 100 000 euros sur vos comptes en banque, vous ne perdrez pas un sou même si toutes les banques dans lesquelles vous avez un compte font faillite. Une telle régulation limite l'incitation des clients à vider leur compte en cas de crise, sachant qu'ils ne perdront pas d'argent[28].

Même si les paniques bancaires ne font plus partie de la vie de tous les jours, on peut trouver des exemples de coordination un peu partout. Un bon exemple de coordination est le sens de circulation sur les routes. Dans la plupart des pays du monde, on roule à droite. Certains pays, comme la Grande-Bretagne, l'Inde ou la Nouvelle-Zélande, imposent quant à eux une conduite à gauche. Néanmoins, dans tous les pays, il n'y a qu'une seule norme : le sens de circulation n'est pas libre, et cela évite un bon nombre d'accidents[29].

Un groupe de pays qui fait du commerce peut également vouloir se coordonner et utiliser les mêmes règles pour faciliter le passage de biens et de personnes. C'est ce qui s'est passé dans les années 1960 et 1970 en Afrique de l'Ouest. La majorité des pays de cette région sont des anciennes colonies françaises qui se sont alignées sur la norme française de circulation à droite. Au cœur de ces anciens territoires français se trouvent quatre anciennes colonies anglaises qui utilisaient elles un sens de circulation à gauche : la Gambie, le Ghana, la Sierra Leone et le Nigeria. Peu après leur indépendance, ces pays ont décidé de se coordonner avec leurs voisins en changeant leur sens de circulation.

De même, en septembre 1967, la Suède décida de changer sa norme de conduite pour s'aligner sur ses voisins scandinaves et pour pouvoir importer plus facilement des voitures étrangères où le conducteur est à gauche.

On peut modéliser ce choix du sens de circulation de la façon suivante : deux groupes de personnes doivent choisir de rouler soit à droite, soit à gauche. S'ils utilisent le même sens de circulation, il y a peu d'accidents et tout le monde peut utiliser les routes sans risque, ce qui leur donne un gain de +1. A contrario, si les deux groupes choisissent des sens de circulation opposés, les routes deviennent dangereuses, ce qui donne à tout le monde un gain de – 1.

		Groupe B	
		Rouler à droite	**Rouler à gauche**
Groupe A	**Rouler à droite**	1 1	-1 -1
	Rouler à gauche	-1 -1	1 1

Tableau 10.2 : Le choix d'un sens de circulation est un jeu de coordination.

On est alors dans une situation similaire à celle de la panique bancaire étudiée précédemment. Dans tous les cas, les joueurs doivent se coordonner et jouer la même stratégie. On a tout de même une légère différence dans ce jeu : alors que dans le jeu de la panique bancaire, un des deux équilibres de Nash était clairement meilleur que l'autre, nos deux équilibres de Nash sont ici équivalents. En effet, que tout le monde roule à droite ou à gauche, les gains sont identiques : pour un gain optimal, il faut simplement que tout le monde utilise la même norme, et quand on choisit la stratégie qu'on joue, on s'aligne sur le choix de la majorité.

Dans le cas du sens de circulation, c'est une loi qui l'impose : dans les faits, on ne choisit pas vraiment une stratégie lorsqu'on décide de quel côté de la route on conduit, on ne fait que respecter la loi. Néanmoins, dans beaucoup de situations, la coordination entre joueurs se fait en dehors de tout cadre légal. C'est le cas par exemple des modes vestimentaires. Lorsque vous décidez de vous habiller selon une certaine mode, vous vous coordonnez avec une bonne partie de la société qui décide de suivre la même mode. Dans ce jeu vestimentaire, il y a autant d'équilibres de Nash que de modes possibles. Régulièrement, la société change de mode, et donc d'équilibre !

Un autre domaine dans lequel le mécanisme de coordination est particulièrement visible est internet, avec le choix d'un réseau social. À l'heure actuelle, Facebook est le réseau social dominant sur le marché. Un nouvel arrivant sur la toile qui veut s'inscrire sur un réseau social veut en choisir un sur lequel sont inscrits ses amis : si ceux-ci sont sur Facebook, c'est cette plate-forme qu'il va rejoindre, rendant l'usage du site encore plus répandu. À l'équilibre, il est donc probable qu'un seul réseau social se démarque comme majoritaire, ou alors un par grande zone géographique[a].

Le mécanisme de base est le même que pour le jeu du sens de circulation : le plus important pour les personnes concernées est d'imiter les choix de leurs semblables. Par ailleurs, même si beaucoup de personnes se retrouvent sur un réseau social à un moment donné, ce choix n'est pas irrévocable : comme les modes vestimentaires qui changent régulièrement, la société peut changer de réseau social de prédilection, passant d'un équilibre de Nash à un autre.

C'est ce qui s'est passé entre 2008 et 2010, lorsque Facebook devint le premier réseau social au monde, dépassant MySpace, qui fut un temps le site le plus visité aux États-Unis, et une plate-forme florissante. En l'espace de quelques mois, le marché fut complètement bouleversé et les utilisateurs de MySpace délaissèrent le site pour rejoindre Facebook qui domine actuellement le marché.

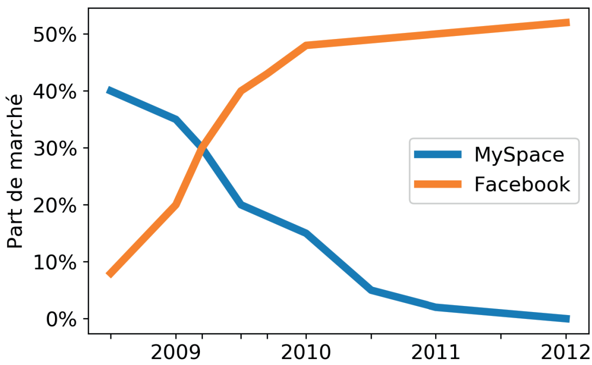


Tableau 10.3 : Part de marché de MySpace et Facebook

a En Chine, où Facebook n'est pas accessible, la population utilise en grande majorité d'autres réseaux sociaux comme Weibo.

Dans les situations que nous avons présentées jusqu'alors, les joueurs avaient intérêt à suivre les mêmes stratégies. Néanmoins, une bonne coordination ne consiste pas toujours à faire la même chose que son voisin, et parfois au contraire vous devez vous coordonner avec lui pour faire des choix différents, complémentaires.

À l'intersection de deux routes, pour éviter des collisions entre automobilistes, il faut une fois de plus une coordination systématique : alternativement, ce sont les voitures d'une route qui doivent traverser l'intersection tandis ce que les voitures de l'autre route attendent la fin de leur passage. Si jamais les voitures des deux routes essayent de passer en même temps, c'est la catastrophe ! Pour assurer une bonne coordination, le système des feux tricolores est encore ce qu'on a inventé de mieux.

Chapitre 10

La main invisible

Une coordination de masse

Lorsque vous voulez manger un sandwich, il n'est pas trop difficile d'en trouver un dans une boulangerie à proximité. Il est heureux d'avoir des boulangeries un peu partout plutôt que de les avoir toutes installées au même endroit. Ce qui est admirable, c'est que tous ces boulangers puissent se faire livrer de la farine régulièrement, avec des livreurs pour faire ce travail de livraison, des meuniers pour moudre le blé, des agriculteurs pour le cultiver, des moissonneuses-batteuses pour le récolter et des constructeurs de machines agricoles pour les fabriquer. À aucun endroit dans la chaîne, il ne manque quelqu'un pour faire le travail : vous pourrez chaque jour acheter un sandwich, car il n'y a pas un jour sur Terre sans qu'un boulanger, un livreur, un meunier, un agriculteur, un constructeur se lève pour accomplir son travail et participer à la marche de l'économie. Ce qui peut étonner, c'est qu'il n'y a pas de chef d'orchestre pour mener ce mécanisme, et allouer les tâches : aucun État (ou presque) n'impose à sa population un métier, des horaires de travail et des objectifs de production. Néanmoins, on ne manque que rarement de travailleurs dans un domaine. Par ailleurs, ces différents travailleurs se coordonnent bien pour obtenir les matières premières dont elles ont besoin. Le constructeur livre bien à temps à l'agriculteur sa moissonneuse-batteuse pour que celui-ci puisse livrer à temps son blé au meunier, pour que celui-ci donne au livreur une farine dont se servira le boulanger.

Dans un travail de groupe, il convient de se répartir les tâches, pour que personne ne fasse un travail en double, et que toutes les tâches soient réalisées : un tel travail est en quelque sorte un grand jeu de coordination. Pour des projets de grande ampleur, on nomme un chef responsable de cette coordination, qui répartit les tâches entre les différents travailleurs. Ce qui est très étonnant, c'est que le plus grand travail de groupe que l'humanité conduit chaque jour n'est dirigé par aucun chef. Ce grand travail de groupe, c'est l'économie. Pour que celle-ci fonctionne bien, il faut que chacun fasse un travail précis, et que le travail soit bien réparti entre les différents agents économiques. Comment cette coordination se fait-elle sans grand coordinateur ?

Dans notre exemple, le constructeur de machines agricoles ne sait pas de quelle quantité de farine le boulanger aura besoin, et ne voit pas nécessairement tous les rouages de l'économie dont il fait partie. Il voit seulement les acteurs avec lesquels il agit directement (ici, les agriculteurs qui lui achètent ses machines et les fournisseurs auprès desquels il achète des matières premières). S'il ne sait pas combien de sacs de farine le livreur apportera au boulanger, le constructeur sait tout de même à quel prix il peut obtenir ses matières premières, et combien d'agriculteurs ont besoin de moissonneuses-batteuses : avec ces informations, il fixe un prix auquel il vend ses machines.

Tous les acteurs de l'économie font ce raisonnement, savent combien leur coûte ce qu'ils produisent, et combien ils doivent en produire pour satisfaire la demande. Ils fixent alors un prix à leur production, et vendent celle-ci sur « le marché ». Chacun y échange biens et services contre de l'argent, en espérant y gagner quelque chose. Cet appât du gain et le mécanisme des prix permettent aux différents acteurs économiques de se coordonner et de contribuer au bon fonctionnement général de l'économie.

Adam Smith popularisa cette idée avec le concept de la « main invisible », développé notamment dans ses *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations*. Il écrit ainsi :

> Ce n'est pas de la bienveillance du boucher, du brasseur ou du boulanger que nous attendons notre dîner, mais plutôt du soin qu'ils apportent à la recherche de leur propre intérêt. Nous ne nous en remettons pas à leur humanité, mais à leur égoïsme[30].

Pour Smith, tout le monde travaillant pour son intérêt contribue individuellement à l'intérêt collectif. Plus loin dans son œuvre, Smith écrit encore :

> Chaque individu […] ne pense qu'à son propre gain ; en cela, comme dans beaucoup d'autres cas, il est conduit par une main invisible à remplir une fin qui n'entre nullement dans ses intentions ; et ce n'est pas toujours ce qu'il y a de plus mal pour la société, que cette fin n'entre pour rien dans ses

> intentions. Tout en ne cherchant que son intérêt personnel, il travaille souvent d'une manière bien plus efficace pour l'intérêt de la société, que s'il avait réellement pour but d'y travailler. Je n'ai jamais vu que ceux qui aspiraient, dans leurs entreprises de commerce, à travailler pour le bien général, faire beaucoup de bonnes choses. Il est vrai que cette belle passion n'est pas très-commune parmi les marchands, et qu'il ne faudrait pas de longs discours pour les en guérir[31].

D'après Smith, tout se passe comme si une main invisible poussait les agents économiques à donner à la société ce dont elle a besoin. Dans cette pensée libérale, le marché, via le mécanisme des prix, permet de fournir une large palette de biens à la société. Plus haut, nous avions trouvé heureux que les boulangers soient équitablement répartis sur le territoire, et non agglomérés dans une seule ville. Comment le mécanisme du marché permet-il une telle coordination ?

Si jamais le hasard faisait qu'il n'y ait que quelques boulangers à Lyon et un trop grand nombre à Paris, les boulangers de Lyon auraient des clients toute la journée même s'ils avaient des prix très élevés. Leur activité serait très lucrative. Au contraire, à Paris, les boulangers devraient baisser leurs prix fortement pour attirer des clients. Une telle situation ne peut être équilibrée : certains boulangers parisiens déménageraient rapidement à Lyon où ils pourraient faire un profit plus important. À l'équilibre, les boulangers auraient à peu près le même salaire à Paris et à Lyon, de sorte que plus personne n'aurait envie de déménager. Grâce à cet équilibre, les boulangers sont répartis à peu près équitablement sur le territoire.

Le marché permet donc de répartir les travailleurs là où il y a du travail pour eux. Comment le marché permet-il un ajustement entre les différents métiers ? Comment se fait-il qu'il y ait presque toujours des ingénieurs, des médecins, des loueurs de voiture, des éboueurs et des économistes quand on en a besoin ? Le mécanisme du marché permet également de répartir les travailleurs entre différentes professions, et ainsi de coordonner l'économie.

Prenons un exemple simple : imaginez un pays amateur de pizza, mais qui n'héberge qu'un seul pizzaïolo. Dans une telle situation où l'offre de pizza est très limitée devant une forte demande, le prix de la pizza est exorbitant : l'unique pizzaïolo du pays se fait payer 200 euros pour chaque pizza qu'il produit. Le secteur est florissant, et rapporte beaucoup : beaucoup de personnes commencent à ouvrir des pizzerias, espérant obtenir de tels profits. Au fur et à mesure que l'offre de pizza augmente, et que les différentes pizzerias se font concurrence, le prix de la pizza diminue, jusqu'à ce qu'il ne soit plus si lucratif d'ouvrir des pizzerias. Les habitants de notre pays ont maintenant accès à une large palette de pizzerias proposant des pizzas à un prix convenable. Dans notre exemple, le mécanisme des prix aura incité la société à produire en plus grande quantité un bien dont elle avait besoin, en incitant des agents économiques à se lancer dans sa production et à choisir le métier de pizzaïolo. Les nouveaux restaurateurs qui ont ouvert une pizzeria ne se sont pas découvert une vocation pour le mets italien : ils étaient simplement appâtés par les gains promis par cette industrie florissante. Lorsque la société a besoin d'un bien ou d'un service insuffisamment produit, son prix augmente, poussant des individus à en produire plus, en augmentant l'offre face à une demande forte.

Ainsi, dans cette pensée libérale, chaque agent de l'économie, en cherchant son profit personnel, contribue à un équilibrage de l'économie et celle-ci peut alors fournir à la société ce dont elle a besoin. Pour les libéraux, il faut donc limiter les interventions extérieures (de l'État par exemple) dans ce processus d'équilibrage et favoriser au maximum les échanges.

Néanmoins, nous l'avons vu, lorsque des agents économiques se battent pour leur propre intérêt et cherchent à maximiser leurs gains, on n'arrive pas toujours à une situation optimale. Le marché n'arrive pas toujours à éviter la tragédie des biens communs et ne résout pas facilement le dilemme du prisonnier.

Lorsque le mécanisme d'ajustement des prix échoue à donner à la société ce dont elle a besoin, on parle de défaillance du marché. Les cartels dont nous avons parlé précédemment en sont une forme : en effet, dans un cartel, même si la demande pour un bien est forte, la production de ce bien reste faible et les prix élevés, car les producteurs s'entendent pour limiter leur production. En maintenant ainsi les prix artificiellement hauts, ils augmentent ainsi leurs profits.

Chapitre 11

Celsius ou Fahrenheit?

Coordination sous-optimale et standardisation

Si le monde a longtemps utilisé des systèmes de mesures très variés, il s'accorde aujourd'hui dans l'utilisation d'un système de mesure unique : le système métrique, fruit de la Révolution française. Particulièrement pratique, il facilite le raisonnement scientifique, les conversions et l'étude d'ordres de grandeur. Après avoir servi à l'unification des différents systèmes de poids et mesures en France, il fut étendu à de nombreux pays dans le monde, et à la majorité des pays anglo-saxons qui utilisaient jusqu'alors le système impérial. Aujourd'hui, tous les pays du monde utilisent le système métrique, et se sont coordonnés sur cette norme pour faciliter le commerce et l'échange technologique. Tous les pays… sauf les États-Unis[32], qui sont restés au système de mesure impérial. Ce système de mesure est particulièrement compliqué et ne facilite pas les calculs. Pour vous donner une idée de la complexité de ce système, voici comment on l'utilise pour mesurer des longueurs : l'unité de base est l'*inch* qui vaut 2,54 cm. Avec 12 *inch*, on fait un *foot*, et avec 5 280 *feet on* obtient un *mile*. Les unités de volume sont encore plus chaotiques, et même la mesure de température en Fahrenheit n'est pas intuitive.

En 1999, la NASA perdit dans l'espace une sonde valant 125 millions de dollars à cause d'une erreur de conversion entre le système impérial et le système métrique[33]. Avant cet événement, un Boeing 767 avait décollé d'Ottawa avec trop peu de carburant pour terminer son voyage, à cause d'une erreur de conversion similaire[34].

Même s'il était bénéfique pour les États-Unis de passer au système métrique, il est improbable qu'un tel changement se produise bientôt : en effet, les Américains sont aujourd'hui coordonnés dans l'utilisation du système impérial, et un Américain isolé n'a pas d'intérêt à passer au système métrique. Dans un pays où tous les verres doseurs sont gradués en *cups* et où les bouteilles contiennent des *gallons* de lait, un livre de cuisine qui parle de litres et de grammes est inutilisable : tous les cuisiniers restent donc avec l'ancien système de mesure. Les voitures américaines mesurant les vitesses en *miles per hour*, il serait peu pratique pour les Américains de voir leurs panneaux de signalisation annoncer des distances en kilomètres. Lorsque les prescriptions médicales sont à prendre en fonction de votre poids en *pounds*, à quoi vous sert-il de connaître votre poids en kilogrammes ? Par ailleurs, changer toutes les indications en système impérial sur les panneaux, les étiquettes et les outils de mesure aurait un coût. Le gouvernement américain a bien proposé à son peuple d'utiliser le système métrique, en signant en 1975 le *Metric Conversion Act*, qui établit le système métrique comme système de mesure préférentiel pour le commerce. Une agence gouvernementale, le *United States Metric Board*, fut créée pour pousser les Américains à adopter les normes de mesure internationales. Néanmoins, cette mesure ne constituait qu'un encouragement, et en aucun cas une obligation. Comme les Américains n'avaient pas intérêt à commencer à utiliser un système étranger au leur, cette loi n'eut qu'un impact limité, et les États-Unis continuèrent d'utiliser le système impérial. En 1982, Ronald Reagan dissolut le *United States Metric Board* : la métrification aura été un échec aux États-Unis. Voici un jeu de coordination où l'équilibre atteint est sous-optimal.

Dans la situation de la panique bancaire vue précédemment, les joueurs se coordonnaient, et soit décidaient tous de laisser leur argent à la banque, soit de faire des retraits massifs. Il y avait deux équilibres de Nash, et l'un était clairement moins bon que l'autre. Néanmoins, ce n'est pas parce qu'une situation de coordination est sous-optimale qu'on n'y arrive jamais, et les paniques bancaires ne sont pas le seul exemple d'une coordination ratée. Nous allons maintenant étudier des exemples où des joueurs se coordonnent mal, atteignant un équilibre sous-optimal.

Il est tout à fait possible qu'un groupe qui se coordonne arrive à un équilibre de Nash tout à fait regrettable. C'est ce qui peut arriver avec la mode et des tendances dont le goût laisse parfois à désirer. Certaines personnes, voulant se coordonner avec les autres, vont choisir un style vestimentaire qui est tendance, mais qui ne leur plaît pas vraiment. On peut potentiellement se retrouver avec une mode que peu de personnes approuvent, mais que la majorité suit, préférant être dans une norme médiocre plutôt que d'apparaître excentrique. Imaginons une situation dans laquelle deux modes pourraient se développer : le port de chapeaux jaunes et celui de jeans verts. Tout le monde préfère porter des jeans verts plutôt que des chapeaux jaunes, mais personne ne veut être le seul à porter un type de vêtement. On peut modéliser cette situation une fois de plus en divisant les joueurs en deux groupes qui ont le choix entre la stratégie « jeans verts » et « chapeaux jaunes ». On leur donne par ailleurs les gains suivants :

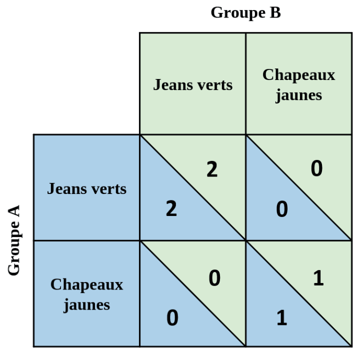


Figure 10.2 : Un jeu de coordination avec un équilibre de Nash sous-optimal.

On a dans ce jeu deux équilibres de Nash : un équilibre où tout le monde porte des jeans verts et l'autre où tout le monde porte des chapeaux jaunes. Dans chacune de ces situations, personne n'a intérêt à changer son style vestimentaire. En particulier, si tout le monde se retrouve à porter des chapeaux jaunes pour une raison ou pour une autre, personne n'aura envie de changer si les autres ne le suivent pas. On peut ainsi se retrouver dans une situation sous-optimale, où chacun porte des vêtements qu'il n'apprécie pas.

Si cette situation est sous-optimale, elle n'est pas particulièrement grave, et l'exemple ici choisi est un peu loufoque. Il permet néanmoins de mettre en valeur le fait que lorsque tous se coordonnent, on peut arriver à une situation sous-optimale[a]. Le cas que nous étudions

a Si on demande à deux personnes de jouer au jeu de coordination très simple proposé ci-dessus, il est clair que la grande majorité des joueurs arriveront à se coordonner de manière optimale, car l'option « jeans verts » est clairement la meilleure. L'économiste Thomas Schelling montra dans des expériences d'économie que des joueurs arrivaient à se coordonner de manière efficace dans des situations a priori beaucoup plus complexes. Une des expériences de Schelling consistait à placer des joueurs dans la situation théorique suivante : « vous devez rencontrer un ami demain dans New York, mais vous ne savez ni où, ni quand, et n'avez aucun moyen de le contacter. Où irez-vous demain pour le rencontrer et quand ? » Schelling observa qu'un bon nombre de joueurs répondaient : « à Central Station, à midi ». Dans cette situation où la coordination paraît presque impossible, des joueurs arrivent tout de même à le faire. De même, si on demande à deux joueurs d'annoncer séparément un nombre, leur promettant un prix s'ils annoncent le même, on trouve que beaucoup de joueurs arrivent à gagner le prix en annonçant tout simplement le chiffre 1. Dans les deux cas, la coordination se fait parce qu'une réponse particulière se démarque des autres : la gare de Central Station est un point central dans New York, l'heure de ici est différent du dilemme du prisonnier que nous avons étudié auparavant : dans le dilemme du prisonnier, une coopération pouvait mener à une situation optimale qu'il était difficile d'atteindre, car les joueurs étaient incités à dévier de la stratégie de coopération qui n'était pas un équilibre de Nash. Ici, la situation optimale est un équilibre de Nash, les joueurs ne sont pas incités à sortir de cette situation. Néanmoins, ce n'est pas parce que la meilleure situation est un équilibre de Nash qu'on y arrive toujours, comme le montre l'exemple des paniques bancaires. Ce n'est pas le seul exemple de coordination malheureuse : si aujourd'hui les paniques bancaires sont rares, le système de mesures américain est toujours d'actualité.

Le choix d'un système de mesure est comme le choix d'un sens de circulation : c'est un jeu de coordination. Malheureusement, les États-Unis n'ont pas réussi à se coordonner avec le reste du monde. Ils sont coincés dans le mauvais équilibre de Nash : au lieu d'utiliser le système métrique, ils utilisent encore un système archaïque source de nombreux problèmes.

Lorsqu'une norme est ancrée à ce point dans la société, le seul moyen de la changer, et de basculer à un équilibre de Nash plus favorable, est de forcer la population à passer à cette nouvelle norme en même temps, de manière coordonnée, en limitant le laps de temps durant lequel plusieurs normes sont utilisées. Le changement doit se faire de façon brutale, sans quoi il ne se fera pas.

Lorsque les pays d'Afrique de l'Ouest ont décidé de changer leur sens de circulation, ils ont dû l'imposer avec une loi pour que tout le monde adopte la nouvelle norme en même temps. Si tout le monde ne fait pas le changement simultanément, cela peut avoir des conséquences désastreuses. Imaginez un changement de sens de la circulation qui se ferait sur plusieurs mois, avec de longues périodes où des automobilistes iraient dans les deux sens : ce serait une catastrophe ! Pour le système métrique aux États-Unis, c'est le même problème : comme personne ne veut d'une période de transition où les deux systèmes sont utilisés, le standard ne change pas.

Quoi qu'il en soit, il n'y a aujourd'hui que deux systèmes de mesure dans le monde, le système impérial et le système métrique, contre plusieurs centaines il y a trois siècles. De même, si tout le monde

---

midi est elle aussi un moment particulier de la journée et le chiffre 1 est le premier nombre strictement positif. Ces réponses qui se démarquent des autres et qui permettent une coordination a priori difficile ont été nommées « points focaux » par Schelling.

Schelling, T. C. (1980). The strategy of conflict. Harvard university press.

en France utilise du courant alternatif 50 Hz, le réseau américain utilise du courant en 60 Hz. Dans ces deux cas, la standardisation est beaucoup plus complète que pour d'autres systèmes, comme le système des prises électriques par exemple, où plus d'une dizaine de standards existent dans le monde.

Chapitre 12

Le clavier ZHKGBV?

Courbes d'expérience, effets de réseau et dépendance au sentier

Aujourd'hui, si vous allez dans un pays anglo-saxon, vous verrez que les claviers d'ordinateur commencent en haut à gauche par les lettres QWERTY. Les systèmes AZERTY et QWERTZ utilisés dans d'autres pays d'Europe sont des petites adaptations du clavier américain. Mais pourquoi donc nos claviers commencent-ils par cette série de lettres ? Elles ne peuvent avoir été choisies au hasard !

Lorsque les machines à écrire commencèrent à se développer aux États-Unis à la fin du XIXe siècle, leurs claviers n'étaient pas standardisés. Les différents fabricants de machines à écrire exploitaient des brevets différents, chacun avec ses avantages. Les claviers du fabricant *Remington* perfectionnèrent le clavier QWERTY en plaçant les lettres utilisées le plus fréquemment le plus loin les unes des autres. Par exemple, les touches T et H, souvent utilisées ensemble dans la langue anglaise, sont placées sur des rangées différentes de sorte que lorsque l'on tape la suite « th », les petites tiges servant à imprimer ces lettres sur le papier ne se bloquent pas.

À cette époque, même s'il y avait pléthore de normes différentes pour les claviers, il y avait un peu plus de claviers QWERTY sur le marché. Lorsque les dactylographes choisissaient leur clavier de spécialisation, ils choisissaient plus souvent le QWERTY, dans la mesure où ils avaient plus de chances de se faire employer sur un clavier de ce type. De leur côté, ceux qui achetaient des machines à écrire décidaient d'acheter des claviers QWERTY, sachant qu'ils auraient plus de facilités à trouver un dactylographe maîtrisant ce standard. En l'espace d'une décennie, les fabricants de machines à écrire s'alignèrent sur le standard de *Remington* et commencèrent à produire des claviers QWERTY, qui devinrent la norme.

Cependant, la raison pour laquelle ce clavier avait été conçu perdit de sa pertinence : les machines à écrire évoluant, leurs mécanismes étaient beaucoup moins sujets aux coinçages et il n'était plus nécessaire de placer le plus loin possible les touches les plus utilisées. Aujourd'hui, avec les claviers d'ordinateur, il est évident que cette contrainte technique a complètement disparu. Dès lors, ne pourrait-on pas remplacer les claviers conçus pour des machines anciennes par des claviers bien adaptés au matériel moderne, permettant une frappe plus rapide ? Aux États-Unis, certains militent pour l'adoption de claviers qui limitent les mouvements à effectuer entre la frappe de deux touches, plaçant les touches les plus utilisées au centre du clavier. En France, on peut regretter qu'il soit difficile de taper certains caractères sur les claviers AZERTY : par exemple, il n'y a pas de touche dédiée au caractère « À » pourtant régulièrement utilisé[35]. Des alternatives existent : aux États-Unis, le clavier DSK développé dans les années 1930 par la marine américaine a montré de meilleurs résultats que le standard QWERTY[36]. En France, un clavier dont la première ligne commence par « BÉPO » est souvent mis en avant. Néanmoins, il semblerait que les normes de claviers ne soient pas près de changer, pour plusieurs raisons.

Nous avons vu que lorsque des joueurs devaient se coordonner et choisissaient entre plusieurs équilibres possibles, il pouvait arriver que les joueurs choisissent une situation qui se révèle sous-optimale. Comment une telle situation peut-elle arriver, et pourquoi les joueurs ne choisissent-ils pas dès le début la solution optimale ? Nous allons voir que pour expliquer ces paradoxes, il faut parfois regarder en arrière et chercher des raisons historiques à un choix malheureux.

Si les États-Unis restent ancrés dans le système impérial, c'est parce qu'ils l'ont utilisé pendant très longtemps et ont produit une large palette de matériels qui utilisent ce système comme référence (panneaux de signalisation, outils de mesure, tableaux de bord des voitures…) et il serait aujourd'hui très coûteux de changer de système. Si les Américains avaient choisi dès la naissance de leur nation le système métrique, dans le sillage de la France, celui-ci serait sans doute resté. Néanmoins, lorsque la déclaration d'indépendance américaine fut signée en 1776, les Américains ne pouvaient imposer le système métrique, dont la conception ne fut décidée par l'Assemblée constituante qu'en 1790 : la jeune démocratie calcula donc avec le système impérial, qui reste encore le standard actuel. L'adoption d'un système, d'une norme ou d'une technologie ne repose donc pas seulement sur les caractéristiques techniques du système en question : il faut également prendre en compte les choix technologiques faits par ceux avec qui vous interagissez, et notamment les choix technologiques qui ont été faits dans le passé.

D'ordinaire, les mécanismes de marché permettent à de nouvelles technologies d'émerger, et conduisent à la production de produits de meilleure qualité. En effet, si un produit de bonne qualité est fabriqué en quantités insuffisantes, son prix va augmenter, incitant plus de fabricants à en produire. Ainsi, lorsque les écrans plats sont arrivés sur le marché des téléviseurs dominé par les écrans à tubes cathodiques, ils étaient produits en petit nombre et coûtaient cher. Les fabricants d'écrans, voyant que le développement des écrans plats pouvait rapporter gros, ont commencé à investir dans le développement de cette technologie supérieure jusqu'à ce que celle-ci domine le marché : les écrans à tube cathodique sont en train de devenir des objets de musée.

Néanmoins, il arrive que le marché échoue dans cette promotion des meilleures technologies, et que nous restions coincés avec des technologies inférieures alors que de meilleures ne demandent qu'à être adoptées. Les exemples de telles défaillances de marché sont nombreux, et le choix des claviers d'ordinateur dont nous venons de parler constitue un exemple largement repris. Il y a plusieurs raisons pour lesquelles un changement de technologie peut être difficile. Les exemples précédents nous ont permis d'en évoquer deux.

La première est le fait que changer de standard a un coût : si les États-Unis passaient au système métrique, ils devraient changer tous leurs panneaux, leurs outils de mesure et leurs étiquettes. Un dactylographe formé sur des claviers QWERTY perdrait du temps à s'habituer à un nouveau type de clavier, même si celui-ci se révélait plus efficace : on parle de **coûts de changement**.

La deuxième est le fait qu'il est préférable d'utiliser les mêmes standards que ses voisins : si les limitations de vitesse sont indiquées en *miles* par heure, un tableau de bord de voiture qui indique la vitesse en kilomètre par heure n'est pas bien pratique. Si vous travaillez dans une équipe où tout le monde utilise des PC, vous risquez d'avoir la vie dure si vous êtes le seul à utiliser un Macintosh. Si tous vos amis sont sur Facebook, vous avez intérêt à rejoindre cette plate-forme plutôt qu'une autre où vous ne les trouverez pas. Lorsqu'on a intérêt à s'aligner sur les choix de ses pairs, on parle d'**effet de réseau**. C'est cet effet qui permet d'expliquer l'alignement rapide des dactylographes sur un seul standard de clavier.

Ces deux effets expliquent en partie pourquoi les standards ont parfois du mal à évoluer, la société restant accrochée aux choix historiques. Il existe une autre raison qui peut expliquer cette tendance à ne pas changer d'habitude : il s'agit de la **courbe d'expérience**.

Lorsqu'une entreprise se met à fabriquer un objet, elle dépense beaucoup d'argent pour produire le prototype et les premières unités. Cependant, plus elle développe sa production, plus elle acquiert de l'expérience et plus elle réduit ses coûts. Ainsi, le premier séquençage du génome humain coûta 3 milliards de dollars et dura 13 ans. Aujourd'hui, une telle opération coûte seulement quelques centaines de dollars, et les coûts devraient encore baisser dans le futur. Nous donnons ci-dessous la courbe des coûts de production de la première voiture produite en grandes séries par Henri Ford : la Ford T[37]. Au fur et à mesure du temps, les usines Ford ont gagné en expérience, optimisé leurs processus de production, installé des chaînes de production plus performantes et formé plus rapidement des techniciens. Il en a résulté une forte baisse des coûts de production : la 50 000e Ford T coûta 3 000 dollars en matières premières et en main d'œuvre. Lorsque 7 millions de voitures eurent été produites, en produire une de plus ne coûtait que le tiers.

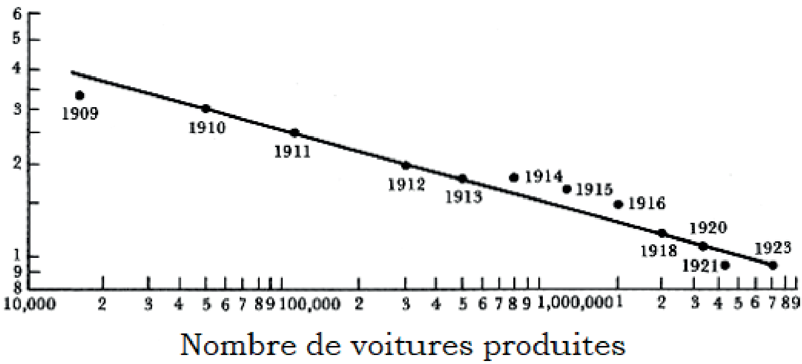


Figure 13.1 : Courbe d'expérience pour la Ford T (coût en milliers de dollars selon le nombre de voitures déjà produites – coordonnées logarithmiques).

Prenons en exemple un producteur A ayant mis au point en 2000 un certain procédé pour fabriquer un objet. Son prix de revient est d'abord de 10 € la première année (après avoir produit 1000 unités), mais celui-ci baisse de 20 % chaque fois que le nombre d'unités produites double. Ainsi, la 2000e unité coûte 8 € à produire, la 4000e 6,40 €, la 8000e 5,12 €.

Supposons qu'un autre producteur mette au point - avec cinq ans de retard - un autre procédé plus performant pour fabriquer le même produit. La 1000[e] unité qui sort de son usine fin 2005 coûte 8 € à produire, et ce prix de revient baisse également de 20 % à chaque fois que la production double.

Chaque année, les deux producteurs sortent 1000 nouvelles unités de leurs usines. Leurs coûts sont résumés dans le graphique suivant :

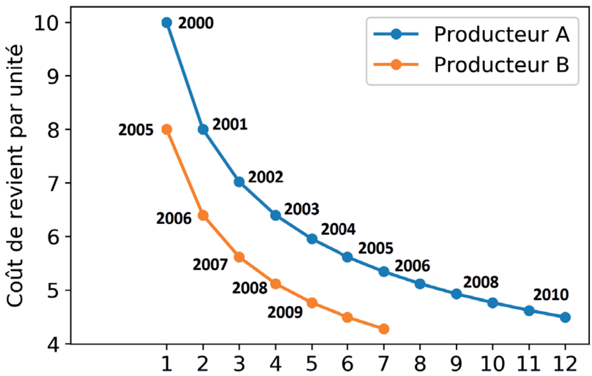


Figure 13.2 : Courbes d'expérience pour les deux producteurs.

On observe que le producteur B, bien qu'ayant un procédé plus performant, a un prix de revient supérieur à celui du producteur A pendant les quatre premières années. Ce n'est qu'en 2009 qu'il rattrapera le producteur A.

En 2005, après la mise au point de son procédé de fabrication, le producteur B a deux possibilités : soit il s'engage dans une guerre des prix et accepte de vendre à perte pendant 4 ans dans l'espoir de remporter le marché plus tard, soit il abandonne et laisse le marché au producteur A, bien que ce dernier possède une technologie moins efficace. Plusieurs exemples de telles technologies efficaces qui n'ont pas été adoptées, car découvertes plus tardivement ou moins utilisées au début de leur existence ont ainsi été documentés[a].

---

a Parmi eux, le choix de technologie pour les réacteurs nucléaires, la lutte contre les parasites dans les champs et les moteurs de voiture.
Cowan, R., & Gunby, P. (1996). Sprayed to death: path dependence, lock-in and pest control strategies. *The economic journal*, 521-542.
Cowan, R. (1990). Nuclear power reactors: a study in technological lock-in. *The journal of economic history*, 50(3), 541-567.
Cowan, R., & Hultén, S. (1996). Escaping lock-in: the case of the electric vehicle. *Technological forecasting and social change*, 53(1), 61-79.

Les effets de réseaux et d'expérience peuvent se combiner. Pour imposer un nouveau produit, un producteur peut avoir intérêt à vendre à perte pendant les premiers mois de production. Ce faisant, il acquiert de l'expérience et baisse rapidement son prix de revient. En même temps, il impose son standard sur le marché. Dès lors, le coût de passage vers une autre technologie même plus performante devient prohibitif. Les utilisateurs adoptent le produit le plus répandu qui devient le standard[b].

Dans les deux exemples du système métrique et des claviers d'ordinateur, des événements historiques ont influencé l'utilisation massive de certaines normes actuelles. Un dactylographe qui se formait au XIXe siècle à une bonne maîtrise du clavier QWERTY ne se doutait sans doute pas qu'il aurait un impact sur l'emploi que nous faisons aujourd'hui de nos claviers d'ordinateur. Ces premières utilisations que nous faisons d'une technologie, parfois guidées par le hasard, peuvent se révéler d'une importance fondamentale pour le futur, et une fois que la société s'est engagée sur un chemin pour utiliser une norme ou une technologie particulière, il est presque impossible de sortir de cette voie. On parle alors de **dépendance au sentier**[38]. Ce qui est intéressant est l'impact énorme que des petits événements peuvent avoir sur l'utilisation de certaines normes. Si *Remington* avait tardé à déposer son brevet pour le clavier QWERTY et que l'entreprise *Blickensderfer* avait réussi à avoir une petite avance sur son concurrent dans la production de machines à écrire, nous utiliserions peut-être aujourd'hui des claviers ZHKGBV! Dans ce standard, les lettres les plus utilisées étaient disposées de manière accessible sur la rangée du bas, permettant d'accélérer la frappe.

Le clavier QWERTY n'est pas le seul exemple de standard qui a éliminé des concurrents qui répondaient au même besoin, et lors de l'émergence de nouvelles technologies, il y a souvent des guerres de format : des entreprises en compétition tentent d'imposer leur standard et se livrent à une bataille commerciale jusqu'à ce qu'un standard devienne dominant. Au début des années 1980, lors de l'émergence des cassettes vidéo, deux formats différents étaient en concurrence : le VHS mis au point par l'entreprise japonaise JVC et le Betamax lancé par Sony. Pendant quelques années les deux formats étaient produits et vendus, jusqu'à ce qu'une petite majorité de

b En anglais, lorsqu'une technologie s'est imposée et qu'il devient quasiment impossible de passer à une autre même si celle-ci se révélerait positive à long terme, on parle de lock-in, de verrouillage.

distributeurs (les vidéoclubs par exemple) décident de n'utiliser que le VHS. À partir de ce moment, la part de marché de ce format augmenta rapidement jusqu'à ce que Sony abandonne le format Betamax.

Plus récemment, une même guerre de format eut lieu sur le marché des films HD, ce qui permit à Sony de prendre sa revanche : la firme japonaise lança en 2006 le disque Blu-Ray pour concurrencer le HD-DVD de Toshiba. Après quelques années de concurrence où les deux formats étaient sur le marché, Toshiba abandonna le HD-DVD en 2008 et commença à produire des lecteurs Blu-Ray.

Chapitre 13

Séparés

Équilibres instables et ségrégation raciale

Le phénomène de ségrégation peut prendre différentes formes : on parle le plus souvent de la ségrégation ethnique qui marqua particulièrement les États-Unis et l'Afrique du Sud (entre autres) au XXe siècle. Les blancs et les personnes dites « de couleur » étaient alors assignés à des quartiers, des écoles et des lieux publics différents. Le siècle dernier aura également été marqué par des exemples de violente ségrégation religieuse. Aujourd'hui, il y a également une ségrégation marquée entre riches et pauvres dans de nombreux pays, avec des regroupements des riches dans des résidences fermées (*gated communities* en anglais) et des pauvres dans des bidonvilles. Par ailleurs, les garçons sont en flagrante majorité dans les cycles d'études scientifiques, tandis que les filles sont largement majoritaires dans l'étude des sciences sociales. En France, les cours universitaires de lettres sont suivis à plus de 70 % par des femmes, alors qu'elles sont moins de 30 % en sciences. Dans ce cas on observe une ségrégation des sexes[a].

Bien entendu, cette ségrégation est principalement due à des stéréotypes historiques[39] et à une ouverture historiquement inégale des différentes filières universitaires aux femmes[40]. Les lois Jules Ferry de 1881 et 1882 qui ouvrent l'éducation à tous, et en particulier aux filles, prévoient une séparation entre garçons et filles dans les établissements scolaires[41], avec des enseignements spécifiques (comme celui de la couture) dans les écoles de filles[42]. La mixité ne sera imposée dans l'enseignement français que dans les années 1970. Ainsi, la fin récente de la ségrégation des sexes explique en partie pourquoi on observe toujours des marques de ségrégation dans l'enseignement en France.

a Le mot *ségrégation* peut porter plusieurs sens. Dans son sens le plus restrictif, la ségrégation correspond à une séparation intentionnelle de plusieurs groupes (ethniques, religieux...) Ici, nous considérons la ségrégation au sens large, dans le sens où celle-ci peut ne pas être intentionnelle.

De même, aux États-Unis, même si les lois Jim Crow ont été abolies par le *Civil Rights Act* en 1964, la ségrégation ethnique reste une réalité prégnante dans les villes américaines. La carte ci-dessous est une représentation de la ville de Detroit, où chaque point représente un habitant : chaque point vert représente un habitant noir[b], chaque point bleu un habitant blanc, chaque point orange un hispanique et chaque point rouge un asiatique[43].

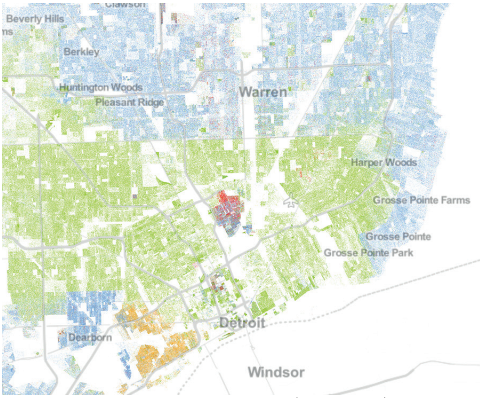


Figure 14.1 : Composition ethnique de Detroit.

Des éléments culturels et historiques permettent d'expliquer pourquoi la ségrégation est apparue dans les universités françaises et dans les villes américaines. La persistance de stéréotypes fait que la ségrégation ne disparaît pas, même si elle s'accompagne usuellement d'effets négatifs. Ainsi, les villes américaines les plus ségrégées sont celles où il y a le plus de conflits sociaux[44], et où l'État investit le moins dans des biens publics (routes, hôpitaux[45], etc.).

Lorsqu'on demande à un échantillon représentatif de la population américaine s'ils aimeraient vivre dans un quartier où la moitié de leurs voisins sont blancs et l'autre moitié noire, seuls 17 % d'entre eux répondent qu'ils y seraient « opposés » ou « fortement opposés[46] ». Il est possible qu'en réalité plus d'Américains soient hostiles à une telle possibilité, mais rechignent à le dire à quiconque leur pose la question, de crainte de passer pour un ou une raciste (ce qu'on appelle un biais de désirabilité sociale). Néanmoins, il reste plausible qu'une bonne majorité d'Américains préféreraient vivre dans un pays moins ségrégé. Pourquoi les quartiers ethniquement mixtes sont-ils alors aussi rares aux États-Unis ? Les inégalités systémiques fortes aux

b La dénomination de « noir » et « blanc » est celle utilisée par le Bureau du recensement des États-Unis, c'est pourquoi nous les utilisons ici.

États-Unis et l'histoire des violentes politiques racistes qui y ont été appliquées fournissent une bonne partie de la réponse. Pour autant, il est probable que l'abolition de ces politiques ne suffît pas pour faire émerger des quartiers mixtes : nous allons voir que la ségrégation est une forme de mauvaise coordination.

Les jeux simples que nous avons étudiés jusqu'à présent nous ont permis d'expliquer pourquoi dans certains jeux de coordination, les joueurs pouvaient arriver à un équilibre de Nash sous-optimal, dont il était difficile de s'extraire. Or, ces explications ne permettent pas d'expliquer le problème de la ségrégation : s'il y a effectivement un coût de changement à déménager, ces coûts ne permettent pas d'expliquer la persistance de la ségrégation sur des décennies. De même, on ne peut pas vraiment dire que des effets de courbe d'expérience ou d'effet réseau soient ici à l'œuvre[c]. Néanmoins, d'autres modèles de théorie des jeux peuvent nous aider à comprendre pourquoi il est difficile de sortir d'une situation ségrégée[47], quand bien même tout le monde préférerait vivre dans une société intégrée[48].

Pour construire un modèle de théorie des jeux décrivant la répartition des blancs et des noirs dans les villes américaines, il faut réfléchir à leurs préférences individuelles : lorsqu'un Américain cherche un logement, comment fait-il son choix ? Nous pouvons considérer que l'Américain moyen préfère vivre dans un quartier mixte, avec autant de blancs que de noirs, plutôt que dans un quartier où il n'y a que des blancs ou que des noirs (et donc dans une ville ségrégée). Néanmoins, quitte à vivre dans une ville ségrégée, il préfère être dans un quartier où vivent uniquement des personnes de son groupe que des personnes d'un groupe différent. Ainsi, un blanc préfère être dans un quartier où il y a une écrasante majorité de blancs que dans un quartier où il n'y a que des noirs (et réciproquement pour les noirs). Malheureusement, la politique fut vite abandonnée, car les blancs américains s'y sont violemment opposés.

---

c On peut tout de même repérer un effet de réseau qui explique certains regroupements ethniques : lorsqu'un membre d'une minorité ethnique s'installe dans une ville, il a tendance à habiter près de membres de la même minorité que lui. Ce comportement mène à l'émergence de quartiers ethniques dans les villes. Ce processus est dit de la « migration en chaîne ».

On peut ainsi modéliser les préférences d'un Américain blanc avec les gains suivants :

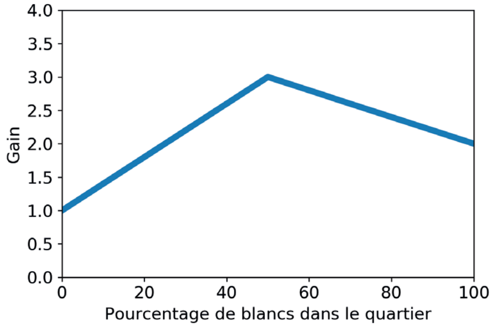


Figure 14.2 : Gain d'un blanc à habiter dans le quartier, en fonction de sa composition.

Les gains de ce graphique permettent de comparer les préférences des habitants pour des situations différentes et il ne faut pas faire attention aux valeurs numériques : un gain deux fois plus important ne signifie pas un bonheur deux fois plus important. Il faut simplement retenir que dans son choix entre deux habitations différentes, un habitant choisira celle qui lui donne le gain le plus élevé.

Ainsi, on remarque sur ce graphique que la situation préférée par un Américain blanc est une mixité complète (au centre du graphique), avec 50 % de blancs et 50 % de noirs. Habiter dans un quartier avec une telle mixité lui donne un gain de 3, supérieur au gain de 2 lorsqu'il habite dans un quartier constitué simplement de blancs (tout à droite du graphique), lui-même supérieur au gain de 1 obtenu lorsqu'il est le seul blanc du quartier (à gauche du graphique).

Une telle répartition des gains modélise donc bien les préférences de l'Américain blanc moyen décrites précédemment.

On peut établir symétriquement les gains obtenus par un habitant noir en fonction de la proportion de blancs qui habitent dans le quartier :

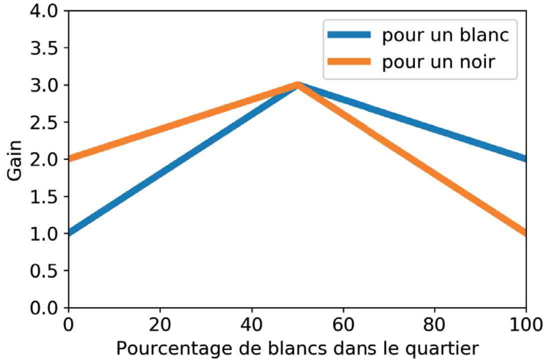


Figure 14.3 : Gain des blancs et des noirs à habiter dans le quartier, en fonction de sa composition.

Imaginons qu'il y ait dans une ville américaine de 200 habitants deux quartiers de taille égale, l'un au nord et l'autre au sud. Cette ville est presque totalement intégrée : sur les 100 blancs de la ville, 60 vivent au nord et 40 vivent au sud. Pour les 100 noirs de la ville, c'est l'inverse : on en trouve 40 au nord et 60 au sud.

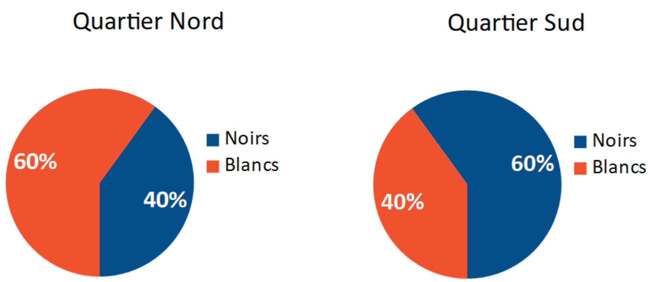


Figure 14.4 : Une situation initiale non ségrégée.

Pour maximiser leurs gains, les habitants de cette vile auraient intérêt à se coordonner : si 10 blancs du quartier nord passaient au sud, et 10 noirs du sud passaient au nord, on aurait deux quartiers avec autant de noirs que de blancs, et tout le monde aurait atteint son gain maximal. Les habitants de la ville peuvent-ils se coordonner pour atteindre cette situation optimale ?

Regardons ce qui se passe si on donne la possibilité aux noirs et aux blancs de déménager entre les deux quartiers. Un noir qui habite dans le quartier nord gagnerait plus à habiter dans le quartier sud : son gain dans un quartier avec 40 % de blancs est en effet supérieur à son gain à habiter dans un quartier avec 60 % de blancs :

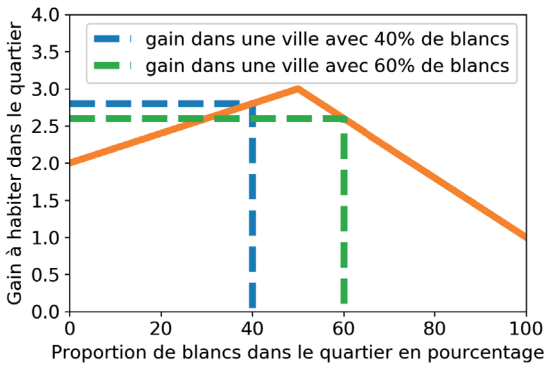


Figure 14.5 : Un habitant noir aura plus tendance à habiter dans le quartier où son groupe ethnique est majoritaire.

De même, un blanc du quartier sud aurait intérêt à vivre dans le quartier nord où il serait entouré par plus de blancs que de noirs :

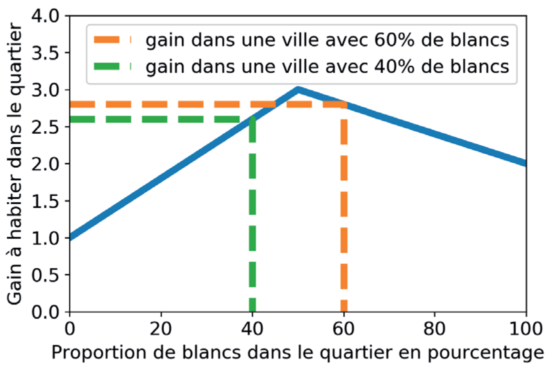


Figure 14.6 : De même pour un habitant blanc.

Ces deux habitants de la ville ont donc intérêt à échanger leurs maisons, ils gagnent ainsi tous les deux au change ! Le résultat de cet échange est une ville un peu plus ségrégée :

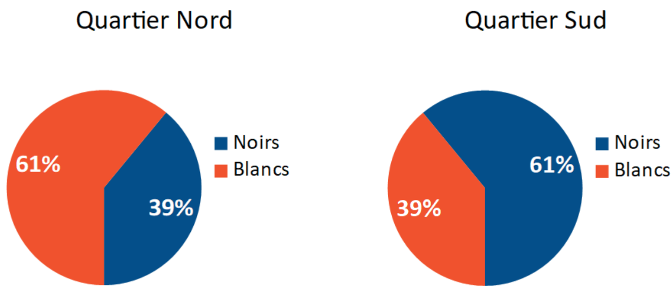


Figure 14.7 : Lorsque les habitants choisissent de déménager (et de choisir leur stratégie dominante en termes d'habitation), la ville devient plus ségrégée.

Mais le processus ne s'arrête pas là ! Là encore, des noirs du quartier nord ont intérêt à échanger leur habitation avec un blanc du quartier sud, menant à une situation encore plus ségrégée. In fine, on arrive à une situation totalement ségrégée, où les blancs vivent exclusivement dans le quartier nord, et où tous les noirs sont regroupés dans le quartier sud. Alors que les habitants auraient intérêt à équilibrer les différents quartiers pour atteindre la mixité et ainsi obtenir un gain maximal, ils échouent à se coordonner.

Par ailleurs, une fois que la ville est dans cet état totalement ségrégé, il devient très difficile de revenir en arrière : pour que la ville devienne à nouveau mixte, il faut que des blancs passent du quartier nord au quartier sud, et réciproquement. Les premiers qui effectuent ce changement seraient alors une petite minorité, et en subiraient un fort coût. Même si tout le monde préfère une situation où il y a un équilibre entre blancs et noirs, personne ne veut faire le premier pas pour arriver à une telle mixité.

Dans la situation totalement ségrégée où tous les noirs sont au sud et tous les blancs au nord, personne n'a intérêt à changer de quartier. On est à un équilibre de Nash. Il y a un deuxième équilibre de Nash dans la situation symétrique, où tous les noirs sont regroupés au nord, et tous les blancs au sud. Comme nous l'avons déjà expliqué, une fois arrivé à un équilibre de Nash, il est difficile de s'en extraire : la ségrégation est alors destinée à rester pour un moment. Il existe également un troisième équilibre : c'est la situation où il y a une mixité parfaite entre blancs et noirs dans les deux quartiers. Tous les habitants obtiennent alors le gain maximum qu'ils puissent avoir : c'est la situation optimale, pour laquelle il faudrait que les habitants se coordonnent. Pourquoi ne peuvent-ils pas tendre vers cet équilibre ?

C'est malheureux, mais dans notre petit modèle, l'équilibre de Nash où les deux ethnies sont réparties équitablement entre les deux quartiers n'est pas stable. Si une personne décide de changer de quartier parce qu'il ne peut absolument pas supporter son voisin actuel (ou pour n'importe quelle autre raison), il crée un déséquilibre : il y a alors un quartier avec légèrement plus de blancs, tandis que l'autre aura une petite majorité de noirs. Nous avons vu précédemment que lorsqu'il y avait un déséquilibre dans la répartition des habitants de la ville, cet écart avait tendance à se creuser jusqu'à atteindre une ségrégation complète. On revient alors à un des deux premiers équilibres de Nash.

La notion d'équilibre en théorie des jeux rejoint la notion d'équilibre en mécanique. En physique, on dit qu'un système est à l'équilibre lorsqu'il reste en place en l'absence de perturbations. Une balle posée sur un sol plat est à l'équilibre : tant que vous ne la faites pas bouger, que du vent ne la fait pas rouler ou que le sol ne bouge pas, elle restera à son emplacement. Par contre, si le sol est légèrement incliné, la balle n'est plus à l'équilibre : elle commence alors à rouler jusqu'à ce qu'elle rencontre un mur, ou qu'elle se loge dans un trou dans le sol où elle est à nouveau à l'équilibre. Imaginons maintenant que la balle soit au sommet d'une colline. Correctement placée au sommet de celle-ci, elle reste en place si on n'y touche pas, mais au moindre coup de vent, elle dévale la pente pour se retrouver en bas : en haut de la colline, la balle était à l'équilibre, mais cet équilibre était instable : si l'on perturbe un peu le système, la balle quitte cet équilibre pour rejoindre un état plus stable. Dans le schéma ci-dessous, la balle ne peut être immobile qu'à trois endroits : en haut de la colline, dans la cuvette de droite et dans celle de gauche. Deux de ces équilibres sont stables (les deux cuvettes), et le dernier est instable (le sommet de la colline).

Le modèle de ségrégation que nous venons d'étudier ressemble à cette situation physique, avec trois équilibres de Nash, deux stables et un instable. On retrouve également dans cette comparaison mécanique une caractéristique des équilibres de coordination vus précédemment : une fois arrivées à un équilibre de Nash stable, des petites perturbations ne permettent pas de passer de cet équilibre à un autre. Un petit coup de vent ne permettra pas à la balle de passer d'une cuvette à l'autre, il faut lui donner beaucoup plus d'énergie !

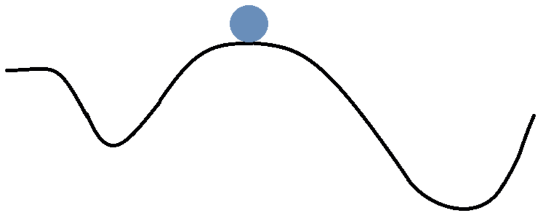


Figure 14.8 : En physique, on trouve aussi des exemples d'équilibres stables et instables : ici, la balle est dans un équilibre instable.

Revenons à la ségrégation : ici, nous avons pris dans notre modèle l'exemple de noirs et de blancs qui habitaient deux quartiers différents. Ce modèle peut s'appliquer à des ethnies qui se ségrègent dans des écoles, des églises, des bars, mais également à d'autres types de groupes : parfois, ce sont les jeunes et les vieux qui se retrouvent dans des groupes séparés, dans d'autres situations il y a une séparation des garçons et des filles. Les États mettent parfois en place des politiques pour lutter contre cette ségrégation non voulue : ainsi, pour amener de la mixité dans les écoles américaines, certains États américains avaient mis en place dans les années 1970 et 1980 des politiques dites de *busing* qui consistaient à dessiner des trajets de bus scolaires qui amenaient des enfants blancs dans les écoles des quartiers majoritairement noirs et réciproquement.

Au-delà de cet exemple de la ségrégation, ce modèle simple nous a permis de mettre en avant une autre raison pour laquelle la coordination pouvait échouer : parfois, la situation optimale est bien un équilibre de Nash, mais si celui-ci est instable, ce qui rend la coordination encore plus difficile.

Chapitre 14

Point critique

Effets boule de neige

À la fin d'un spectacle, d'un discours ou d'une conférence, on assiste parfois à une *standing ovation*. Il est vraiment très rare qu'à cette occasion, seule une moitié de la salle se lève : soit toute la salle se joint à l'ovation, soit tout le monde reste assis. Pourquoi ne trouve-t-on pas un intermédiaire entre ces deux extrêmes ? En général, tout le monde ne s'accorde pas sur la qualité d'une prestation : dans une salle où tout le monde se lève pour applaudir, il y a sans doute des spectateurs qui ne l'ont pas trouvée exceptionnelle. À l'inverse, certaines personnes qui aimeraient se lever pour applaudir ne le font pas si personne n'est debout. On peut comprendre facilement ces comportements : il peut être assez embarrassant d'être le seul à applaudir debout dans une grande salle où tout le monde est assis, et réciproquement, rester assis lorsque tous vos voisins sont debout peut vous coûter quelques regards réprobateurs.

Si vous faites attention, vous remarquez que lors d'une *standing ovation*, on assiste au franchissement d'un point de bascule : au début, seules quelques personnes se lèvent, et parfois elles sont suivies par quelques-uns de leurs voisins. Puis, à un moment, des rangs entiers se lèvent les uns après les autres, dans un effet boule de neige : à partir d'un moment précis, l'intégralité de la salle commence à se lever en quelques instants. Au contraire, si les premières personnes qui se lèvent ne sont pas assez nombreuses pour déclencher cet effet, elles se rassoient rapidement pour éviter une situation gênante.

Dans les deux chapitres précédents, nous avons vu que dans les jeux de coordination, les joueurs avaient tendance à choisir la stratégie que joue la majorité : si les Américains utilisent des claviers QWERTY, c'est parce que la plupart de leurs concitoyens utilisent ce standard. Si aujourd'hui nous utilisons des Blu-Ray et non pas des HD-DVD, c'est parce que tout le monde s'est aligné sur ce standard. Il s'en faut parfois de peu pour qu'un tel standard s'impose : des hasards historiques, des anticipations spéculatives sont souvent ce qui engage l'adoption massive d'une technologie. Il s'en est peut-être fallu de peu pour que les Américains utilisent des claviers ZHKGBV ! Si ces claviers avaient réussi à dégager une légère avance sur leurs concurrents, ce sont eux qui auraient alors réussi à s'imposer. Néanmoins, il y a eu un moment dans l'histoire où les claviers QWERTY ont réussi à prendre la petite avance nécessaire pour attirer vers eux tous les nouveaux utilisateurs de machine à écrire : passé ce point critique, impossible de revenir en arrière. À présent, nous allons étudier ces moments critiques qui, une fois passés, engagent les joueurs sur une route où rebrousser chemin est difficile. L'étude de tels points de bascule permet de comprendre bon nombre de phénomènes sociologiques.

Dans le modèle de ségrégation vu précédemment, on peut identifier un tel point de bascule : si un quartier de la ville accueille plus de 50 % de blancs dans ce modèle, sa population deviendra totalement blanche. À l'inverse, une majorité de noirs dans le quartier entraîne la réduction progressive du nombre de blancs qui arrivent. La frontière de 50 % constitue ici un point critique.

Thomas Schelling (Nobel d'économie 2005), qui fut parmi les premiers à construire des modèles de ségrégation comme celui que nous avons vu[49], avait observé que dans certaines villes américaines, lorsque le nombre de noirs dépassait un certain seuil, ces quartiers devenaient très vite des quartiers noirs. Les Américains blancs, racistes ou craignant la perte de valeur de leurs biens immobiliers, quittaient en masse ces quartiers dont la composition ethnique changeait alors très rapidement : ce phénomène était appelé le *white flight* (la fuite des blancs[50]). Ci-dessous, la répartition ethnique des différents quartiers de Chicago en 1950 et 1970 montre bien ce phénomène : en vingt ans, des quartiers à majorité blanche ont été largement abandonnés par cette population[51].

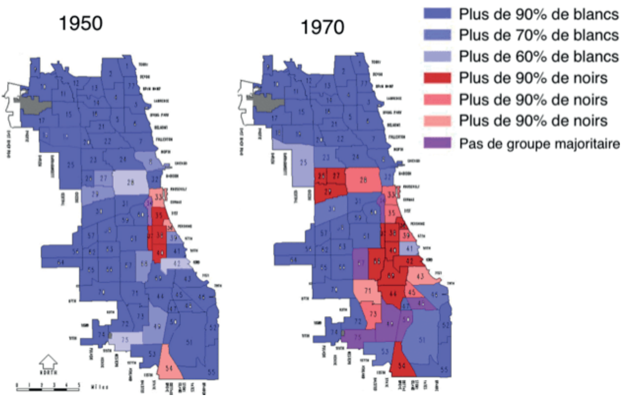


Figure 15.1 : Répartition ethnique dans les différents quartiers de Chicago.

Pour modéliser ce phénomène, Schelling imagine que les habitants d'une ville ont une certaine tolérance à la diversité, et choisissent un lieu d'habitation compatible avec cette tolérance. Par exemple, un blanc qui ne tolère que 30 % de noirs dans son quartier cherche une maison qui satisfait ce critère. Si ce seuil de tolérance est trop bas, la ville se ségrège.

Dans le cas où les habitants de la ville, noirs comme blancs, ne sont satisfaits de leur habitation que si leur ethnie est en majorité stricte, la ségrégation est la seule issue stable. Si blancs et noirs veulent que 60 % de leurs voisins soient du même groupe qu'eux, ils ne peuvent coexister dans une ville où les blancs et les noirs sont répartis équitablement, donnant à chaque habitant un voisinage à moitié noir et à moitié blanc. Les deux groupes se rassemblent alors dans des quartiers où ils sont en majorité, et on arrive à une ville ségrégée.

Schelling montre qu'on peut observer une ségrégation même dans des villes relativement tolérantes, avec le raisonnement suivant. Dans une ville, les habitants ont des tolérances à la diversité différentes : certains refusent de coexister avec un autre groupe, d'autres acceptent la présence d'une minorité, d'autres enfin acceptent de vivre en minorité tant qu'ils ne sont pas trop isolés.

Schelling donne l'exemple d'une ville dans laquelle arriveraient quelques habitants d'une minorité. Les plus intolérants à la diversité quittent alors la ville, laissant plus de place à des habitants de la minorité. La minorité grandit, et d'autres personnes peu tolérantes de la majorité quittent la ville.

Petit à petit, la part de la minorité dans la ville croît, en faisant partir des personnes de plus en plus tolérantes à la diversité, mais qui se retrouvent de plus en plus isolées. La minorité finit alors par devenir majorité et éventuellement être le seul groupe à résider dans la ville. On a alors assisté à un mouvement de bascule, au cours duquel la ville passe d'un groupe à un autre : on parle de « *tipping point* » en anglais[52 et53].

Illustrons cette idée de Schelling avec quelques schémas. On considère que les habitants du quartier sont satisfaits tant que la population du groupe ethnique opposé ne dépasse pas une proportion donnée : c'est leur seuil de tolérance.

Un habitant blanc du quartier quitte celui-ci si la proportion de noirs dépasse son seuil de tolérance. On considère une répartition des seuils de tolérance qui a la forme suivante, pour les habitants blancs par exemple :

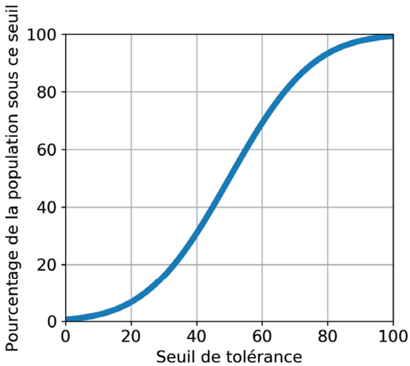


Figure 15.2 : Une autre représentation du seuil de tolérance des habitants de la ville.

Ainsi, on peut lire sur ce schéma que 8 % des habitants ont un seuil de tolérance inférieur à 20 %. Autrement dit, seulement 8 % de la population blanche accepte de vivre dans un quartier où il y a moins de 20 % de blancs. Remarquons toutefois qu'une majorité des habitants ont un seuil de tolérance compris entre 40 % et 60 %, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas particulièrement intolérants ni particulièrement tolérants[54].

Imaginons que, chaque année, les blancs qui sont insatisfaits de la situation de leur quartier le quittent et soient remplacés par des noirs. Le graphique peut être réinterprété comme suit : si en abscisse, on a le pourcentage de noirs dans la ville à une année donnée, on a en ordonnée le pourcentage de noirs dans la ville l'année suivante. En effet, tous les habitants qui avaient un seuil de tolérance inférieur à la proportion de noirs dans la ville ont quitté celle-ci, et leurs logements sont maintenant habités par des noirs[a].

À titre d'exemple, partons d'une proportion de 20 % de blancs dans ce quartier. Le graphique nous dit que seulement 8 % des blancs sont satisfaits de cette situation. Les insatisfaits déménagent et sont

a Remarquons que si les noirs ont les mêmes seuils de tolérance que les blancs et qu'ils sont en nombre égal dans la ville, les noirs qui remplacent les blancs quittant le quartier sont satisfaits de leur situation : les blancs racistes qui partent en premier sont remplacés par des noirs particulièrement tolérants.

remplacés par des noirs : l'année suivante, nous aurons 8 % de blancs dans le quartier dont à nouveau une part importante sera insatisfaite et déménagera, et ainsi de suite.

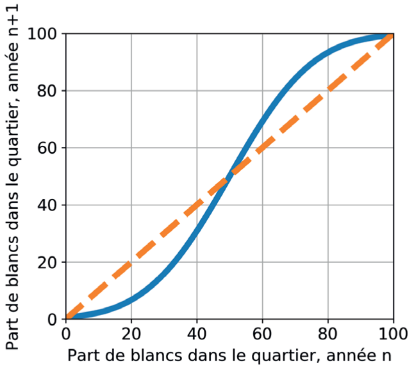


Figure 15.3 : Tous les points sur la droite en pointillés ont même abscisse qu'ordonnée.

Que se passe-t-il si on laisse les blancs et les noirs déménager pendant plusieurs années ? Si le pourcentage de blancs dans le quartier est en dessous de 50 %, la courbe de tolérance est en dessous de la droite en pointillé. Cela veut dire que cette année-là, des blancs quittent le quartier, et l'année suivante, il y aura moins de blancs dans le quartier. La proportion de blancs dans le quartier sera alors encore en dessous de 50 %, et d'autres blancs quitteront le quartier. La situation ne s'équilibre alors que lorsqu'il n'y a plus aucun blanc. A contrario, s'il y a plus de 50 % de blancs dans le quartier à une année donnée, il y aura l'année suivante plus de blancs, encore plus l'année d'après… Jusqu'à ce que le quartier soit habité seulement par des blancs.

On trouve les équilibres de Nash là où la courbe en pointillé croise la courbe des niveaux de tolérance : à ces croisements, la répartition ethnique ne change pas d'une année à l'autre. Comme dans le modèle du chapitre précédent, on en a trois : un quartier où tous les habitants sont noirs, un quartier habité seulement par des blancs, et un quartier avec autant de noirs que de blancs. Comme dans le modèle précédent, l'équilibre mixte est instable : une petite déviation de cet équilibre entraîne la convergence vers l'un des deux équilibres stables.

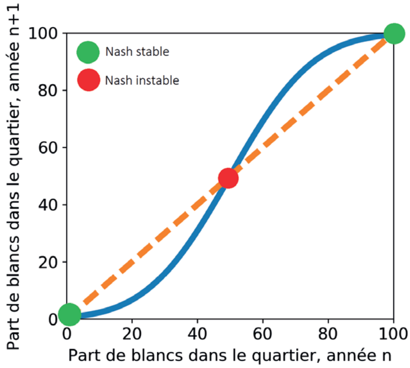


Figure 15.4 : Dans cette situation, l'équilibre où la ville est intégrée est instable.

Sur ce dernier graphique, on voit particulièrement bien le point de bascule : selon que l'on commence avec plus ou moins de 50 % de blancs ou de noirs dans le quartier, on arrive à une situation d'équilibre opposée. Et comme avant, on arrive à une situation malheureuse de ségrégation non voulue[b].

Ce qui est particulièrement frappant avec ces modèles de point de bascule est qu'avec des situations initiales très proches, on peut arriver à des résultats totalement opposés, avec un effet boule de neige. Dans notre exemple de la ségrégation, une ville qui a 49 % de noirs à une année donnée a un destin tout à fait opposé d'une ville qui en comporte 51 %.

Le modèle de Schelling n'a pas été appliqué qu'à la ségrégation raciale : il existe bon nombre de situations de la vie courante dans lesquelles les comportements d'un groupe sont régis par cette dynamique de point critique[55].

Le terme « point critique » est issu de la physique nucléaire et de l'étude des réactions en chaîne. Dans un réacteur nucléaire (ou dans une bombe atomique), on place un combustible composé d'atomes lourds comme l'uranium ou le plutonium. Lorsque ces atomes sont frappés par un neutron, ils se divisent en deux atomes plus petits,

b Même résultat, avec la présence d'un seuil particulièrement important à 50 %, ces deux modèles reposent sur des hypothèses de départ tout à fait différentes. Dans notre premier modèle, les habitants préféraient tous une situation mixte, et il n'y avait pas de racistes, alors qu'il y a des personnes intolérantes dans notre second modèle. Le premier modèle donnait les mêmes préférences à tous les habitants alors que le second se fonde justement sur le fait que les habitants ont des tolérances différentes.

libérant en même temps de l'énergie et d'autres neutrons. Si ces neutrons partent dans la nature, la réaction s'arrête là. Néanmoins, si un des neutrons libérés par la première désintégration touche un autre atome lourd, celui-ci se désintègre à son tour, libérant d'autres neutrons qui peuvent à leur tour faire désintégrer d'autres atomes, etc.

On parle alors de réaction en chaîne, car elle s'autoentretient : la désintégration d'un atome entraîne la désintégration de ses voisins. Par ailleurs, pour qu'une telle réaction apparaisse, il faut que le combustible contienne assez d'atomes radioactifs : en effet, si les neutrons libérés par les désintégrations d'atomes lourds ne touchent pas d'autres atomes, la réaction ne s'alimente plus et finit par s'éteindre.

Pour provoquer une réaction en chaîne, il faut donc concentrer suffisamment de combustible dans un volume restreint. Tant qu'une certaine masse de combustible n'est pas atteinte, il est impossible de déclencher une réaction en chaîne, mais une fois ce point critique dépassé, une réaction en chaîne débute brutalement, libérant une quantité énorme d'énergie.

On voit bien en quoi le terme de point critique de la physique nucléaire s'adapte bien aux modèles de point de bascule : dans les deux cas, de tout petits changements peuvent avoir des effets impressionnants, avec un effet boule de neige.

Un peu moins spectaculaire qu'une réaction nucléaire, la fréquentation d'un restaurant peut suivre le même genre de dynamique : lorsque vous cherchez un restaurant, vous évitez ceux qui sont tout à fait vides (s'ils sont vides, il doit y avoir une raison…), et allez vers ceux qui sont plus fréquentés, plus populaires. Ainsi, les restaurants peu fréquentés le sont de moins en moins, et par un effet boule de neige, ceux qui arrivent à attirer assez de clients en début de soirée restent pleins jusqu'à la fermeture.

Cet effet boule de neige peut également apparaître lors d'un vote, dans la primaire d'un parti par exemple. Si des électeurs ont le choix entre le candidat A et le candidat B, ils vont évidemment choisir en priorité le candidat qu'ils préfèrent, mais si celui-ci est annoncé perdant, ils peuvent décider de reporter leur vote sur le candidat qui semble avoir l'avantage, pour que leur parti soit uni derrière un candidat unique.

Le graphique issu du modèle de ségrégation s'applique alors à ce nouvel exemple :

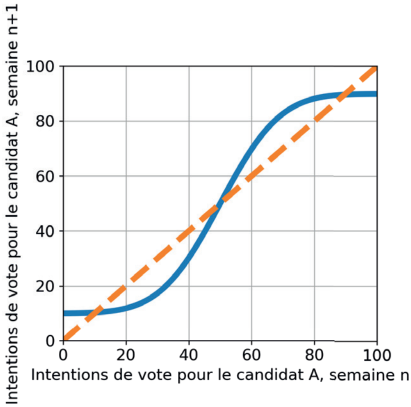


Figure 15.5 : Le modèle précédent peut aussi être utilisé pour représenter une élection.

En abscisse, on a les intentions de vote pour le candidat à une semaine donnée, en ordonnée les intentions de vote pour ce candidat la semaine suivante. Si le candidat A est annoncé gagnant, il aura tendance à conforter son avance, alors qu'un retard dans les premières semaines sera de plus en plus difficile à rattraper. Ici, la courbe est plus aplatie sur bords : 10 % des électeurs voteront toujours pour le candidat A et 10 % des électeurs systématiquement pour le candidat B, quelles que soient les intentions de vote de la semaine précédente. Il est évident que ce modèle simple ne reflète pas complètement ce qui se passe dans une élection, où les préférences des électeurs changent, et où on assiste souvent à des rebondissements inattendus. Néanmoins, ce phénomène est particulièrement important pour les candidats qui partent avec un fort désavantage : pour eux, il est très difficile de remonter la pente.

Tous les quatre ans, les Américains peuvent voter aux primaires de leur parti. Néanmoins, selon l'État où ils habitent, ils déposent leur bulletin dans l'urne à un moment différent : les primaires se ne déroulent pas en même temps dans chaque État. La première primaire, toujours dans le New Hampshire, est alors d'une importance capitale pour les candidats, car ces derniers savent que les électeurs (ainsi que les donateurs) ont tendance à ne retenir que les candidats qui ont été bien placés à cette première primaire. En général, les candidats qui y réalisent un score médiocre abandonnent la course, sachant qu'ils n'ont quasiment aucune chance de rattraper leurs concurrents.

De même, lors d'une élection entre candidats de partis différents, les candidats de petits partis perdent souvent des voix à cause de cet effet de bascule : les électeurs, ne voulant pas « gâcher leur voix » pour un parti qui n'a aucune chance de gagner, votent pour les candidats des partis annoncés comme favoris. Ces derniers sont alors confortés dans leur position tandis que les petits partis peinent encore plus à attirer des électeurs.

Une femme ou un homme politique qui veut gagner une élection ne doit ainsi pas seulement convaincre ses électeurs qu'il est le meilleur candidat pour eux, mais aussi qu'il a une chance de gagner : il doit dire à ses électeurs qu'une voix pour lui ne sera pas une voix perdue, et pourra vraiment faire la différence.

Un responsable syndical d'une usine qui organise une manifestation ou une grève doit également comprendre cette dynamique s'il veut que la contestation ait un grand effet. En effet, si les ouvriers sentent que la manifestation sera de grande ampleur, ils auront tendance à y participer, craignant la réprobation de leurs collègues s'ils ne se joignent pas à la contestation. Au contraire, s'ils sont peu à manifester, l'événement sera perçu comme un échec, et le coût d'une journée de manifestation sera supérieur au bénéfice espéré d'un tel événement. Les ouvriers décident alors de ne pas manifester. Il y a un point critique que le responsable syndical doit franchir s'il veut que le mouvement de contestation s'étende à toute l'usine. S'il échoue à atteindre ce point, il n'aura presque personne pour manifester autour de lui.

Lorsqu'une manifestation a lieu, les chiffres de participation donnés par les organisateurs sont toujours supérieurs à ceux donnés par les autorités. Bien entendu, cette exagération de l'une ou l'autre partie permet de minimiser ou de magnifier l'importance de cette manifestation. Mais de telles exagérations sont aussi faites pour avoir un impact sur les événements suivants : des chiffres de participation élevés incitent de potentiels manifestants à rejoindre les manifestations suivantes, accentuant le mouvement de contestation. Au contraire, une participation annoncée comme faible donne l'impression d'un mouvement en perte de vitesse, et dissuade les manifestants de se déplacer au prochain rassemblement.

Ces exemples montrent bien l'importance du contexte dans les phénomènes sociaux : lorsque des individus choisissent entre plusieurs façons de se comporter, ils ne font pas leur choix simplement en fonction de leurs préférences individuelles : ils observent également les choix de leurs pairs, et font un raisonnement stratégique. L'étude des jeux de coordination nous permet de comprendre quels peuvent être les choix des joueurs dans une situation d'équilibre. Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux événements qui mènent au choix collectif d'un équilibre plutôt qu'un autre : le contexte et des événements du passé permettent de comprendre pourquoi les joueurs s'orientent vers un équilibre plutôt qu'un autre.

Chapitre 15

Shutdown

Le jeu de la guerre des sexes

Parmi les responsabilités du Congrès américain, il y a le vote du budget fédéral : le Sénat et la Chambre des représentants doivent approuver les fonds alloués aux diverses organisations gouvernementales. Si les membres du Congrès n'arrivent pas à atteindre un compromis rapidement, les activités gouvernementales américaines ne peuvent plus fonctionner, et ferment pour la plupart : seuls les employés essentiels continuent à travailler (militaires, médecins, personnel pénitentiaire, contrôleurs aériens…) De nombreux employés gouvernementaux entrent alors dans une période de chômage temporaire, et le pays tourne au ralenti : de tels *shutdowns* ont coûté au pays des milliards de dollars de pertes économiques.

On pourrait imaginer qu'une telle situation soit exceptionnelle, mais elle ne l'est pas tant que ça : depuis le premier arrêt des activités gouvernementales en 1976, on compte une vingtaine de cas où le Congrès n'a pas réussi à voter un budget à temps, et dans huit cas, des employés fédéraux ont été placés au chômage.

Ces arrêts, qui peuvent durer plusieurs semaines, sont l'occasion d'un bras de fer entre démocrates et républicains au Congrès : chaque parti veut orienter le budget fédéral dans un sens qui lui est favorable. Comme l'absence de budget fait du mal aux deux camps, il s'agit pour chacun de faire céder l'autre en premier.

Jusqu'alors, nous avons étudié deux types de jeux de coordination, avec pour chacun deux équilibres de Nash. Dans le premier type de jeu, celui du sens de circulation par exemple, les deux équilibres de Nash donnaient des gains égaux. Dans le second type de jeu, un des deux équilibres était meilleur que l'autre. Le point commun entre ces deux jeux est le fait que, quel que soit l'équilibre atteint, les deux joueurs obtenaient le même gain : nous allons maintenant nous intéresser à une situation où les gains des deux joueurs sont différents, ce qui peut générer des conflits.

Charles et Lucie veulent passer l'après-midi ensemble : Lucie veut aller écouter le dernier concert d'un de ses artistes préférés, tandis que Charles veut aller voir la finale d'un tournoi de baseball. Néanmoins, Lucie préfère aller voir le match de baseball plutôt qu'aller seule au concert, et Charles préfère aller au concert plutôt se retrouver seul sur les bancs du stade. Selon leur choix, voici donc les gains qu'ils obtiennent :

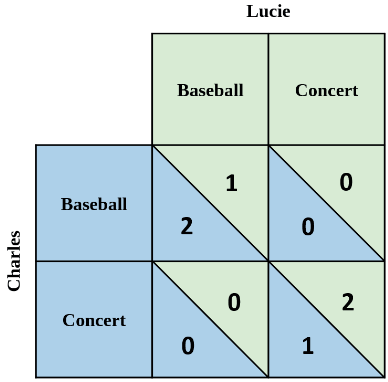


Figure 16.1 : Le jeu de la guerre des sexes.

Dans ce jeu, dit de la « guerre des sexes », on a comme pour les jeux précédents deux équilibres de Nash : un dans lequel Charles et Lucie vont voir le match de baseball, un autre où ils se retrouvent tous deux dans la salle de concert. Dans ces deux situations, aucun des deux amis n'a intérêt à partir ailleurs s'il n'est pas suivi par l'autre, ce qui en fait des équilibres de Nash. Cependant, chaque fois, un des deux protagonistes se sent un peu lésé : il aurait préféré passer l'après-midi ailleurs. Qui sortira avantagé de ce jeu ? Nous précisons ici qu'il est impossible pour Charles et Lucie de séparer leur temps équitablement entre les deux activités, ou de reporter l'une d'elles : il n'y aura pas deux concerts, ni deux finales de ce tournoi ! Au moins un des deux joueurs ne pourra pas obtenir son issue préférée…

Pour se coordonner et éviter les deux pires issues du jeu où Charles et Lucie ne passent pas leur après-midi ensemble, les deux amis vont devoir s'entendre, et choisir ensemble une activité. Une bonne solution pourrait être de tirer ce choix au sort : Charles lance une pièce, et si elle tombe sur pile, Lucie l'accompagnera au baseball. Si c'est au contraire face qui tombe, il se résoudra à passer son après-midi dans une salle de concert. En choisissant ainsi leur activité, les deux joueurs ont une chance sur deux d'obtenir un gain de 2, et une chance sur deux d'avoir un gain égal à 1. En moyenne, leur gain sera donc égal à 1,5 : cette façon de résoudre le conflit semble donc assez juste.

Néanmoins, Lucie pourrait faire pression sur Charles pour aller au concert : en particulier, si elle annonce à Charles qu'elle ira au concert dans tous les cas, elle aura de grandes chances de s'y faire accompagner. En effet, si Charles pense que Lucie choisira comme annoncé d'aller au concert, l'accompagner devrait lui donner un gain de 1, ce qui dépasse le gain espéré de 0 s'il décide finalement d'aller au match de baseball. En procédant ainsi, Lucie obtiendra l'issue qui lui plaît le plus, avec un gain de 2.

Néanmoins, Charles pourrait être tenté de faire la même chose, et annoncer de son côté qu'il choisira de se rendre au stade, quel que soit le choix de Lucie. Un problème se pose : si chacun fait effectivement ce qu'il a promis, le regret sera inévitable et l'un des deux aura intérêt à revenir sur son annonce pour passer l'après-midi avec l'autre. Si Lucie annonce qu'elle ira au concert dans tous les cas, Charles peut très bien décider de ne pas la croire, commencer à aller vers le stade et espérer que Lucie le rejoigne.

On voit alors apparaître un problème de crédibilité : dans une telle négociation, le joueur qui pourra imposer à l'autre sa volonté est celui qui sera le plus crédible dans son annonce. Par exemple, si Lucie achète les billets de concert et l'annonce à Charles, elle rend son engagement à s'y rendre plus crédible, et poussera ainsi son ami à la suivre. L'un des deux joueurs peut également développer une réputation de fermeté, ou d'impulsivité : si Charles sait que Lucie ne revient en général pas sur ses décisions, il aura tendance à la croire si elle annonce qu'elle ira de toute façon au concert, et aura alors intérêt à l'accompagner.

Cette stratégie a évidemment des faiblesses : si Lucie est tellement tyrannique, peut-être que Charles ne voudra plus être son ami, ou sera moins conciliant la prochaine fois. Ici, la stratégie tyrannique fonctionne bien parce que le jeu n'est joué qu'une seule fois : dans les relations d'amitié, de travail ou dans un couple, de tels petits conflits sont réguliers, et mieux vaut ne pas être trop autoritaire ou trop égoïste si on veut que la relation continue. Dans quelques chapitres, nous reviendrons sur les jeux qui s'étendent sur le long terme, avec des rencontres répétées. Avant cela, nous allons étudier dans un autre contexte le problème de crédibilité soulevé ici.

Chapitre 16

Sur la brèche

Le jeu faucon-colombe

En 1962, l'URSS tente d'installer à Cuba des missiles balistiques nucléaires, donnant ainsi aux Soviétiques la possibilité de frapper facilement les États-Unis. Lorsque les États-Unis découvrent que des navires soviétiques se dirigent vers l'île pour y apporter des ogives nucléaires, J.F. Kennedy, alors « leader du monde libre », décide le blocus de Cuba. Pendant quelques semaines, le monde est au bord du précipice : au fur et à mesure que les bateaux s'approchent des côtes cubaines, le risque d'une guerre nucléaire augmente. Les États-Unis menacent d'attaquer les navires soviétiques dans l'Atlantique, bien avant qu'ils atteignent Cuba. En face, Khrouchtchev (alors à la tête de l'URSS) ne montre aucun signe de faiblesse, refusant d'ordonner aux navires de faire demi-tour.

Pendant les semaines durant lesquelles les navires soviétiques traversaient l'Atlantique, Kennedy et Khrouchtchev montraient tous deux qu'ils voulaient mener leur action jusqu'au bout. Khrouchtchev fit ainsi savoir à Kennedy : « Si les États-Unis veulent la guerre, alors nous nous retrouverons en enfer. » Dans un discours télévisé le 22 octobre 1962, Kennedy annonce : « Nous ne nous déroberons pas [au risque d'une guerre nucléaire] à quelque moment que nous ayons à y faire face. »

Après une escalade qui terrifia le monde entier, Khrouchtchev accepta des négociations et un compromis de désarmement acheva la crise cubaine. Kennedy sortit comme vainqueur politique de cet épisode de la guerre froide, Khrouchtchev dans son pays fut critiqué pour son manque de fermeté et finit par être destitué en 1964.

Dans des conflits violents comme celui du conflit de Cuba, une attitude bornée peut avoir des conséquences dramatiques. Dans *La Fureur de vivre*, film de Nicholas Ray, deux adolescents (dont l'un est joué par James Dean) décident de se mesurer l'un à l'autre dans un jeu bien dangereux : les deux rivaux placent leur voiture sur un chemin qui mène à une falaise, et s'élancent vers celle-ci. Le premier qui freine ou sort de la voiture sera considéré comme un froussard, alors que celui qui se sera le plus rapproché du vide gagnera la réputation d'une solide virilité. Chacun des deux adolescents a donc intérêt à s'arrêter juste après l'autre, mais si personne ne fait ce premier pas en acceptant la position de froussard, les deux voitures se précipiteront dans le vide, issue fatale que les deux joueurs veulent éviter à tout prix. Dans le film de Ray, l'intensité dramatique est accentuée par le fait que le rival de James Dean coince sa manche dans la portière de sa voiture, l'empêchant de sortir de celle-ci à temps. Dean, qui réussit à s'extraire de la sienne avant qu'elle se précipite dans le vide prend donc le rôle du peureux, sans doute bien préférable à la mort…

Une autre version de ce jeu consisterait à placer les deux voitures face à face sur une même voie, et à bonne distance : les deux joueurs s'élancent l'un vers l'autre, celui qui dévie de la voie pour laisser la place à l'autre devenant le froussard. Les gains des deux joueurs sont représentés dans le tableau suivant, en nommant une fois de plus les joueurs Charles et Lucie :

		Lucie	
		Rester sur la voie (stratégie faucon)	**Dévier (stratégie colombe)**
Charles	**Rester sur la voie (stratégie faucon)**	-10 / -10	0 / 2
	Dévier (stratégie colombe)	2 / 0	1 / 1

Figure 17.1 : Le jeu faucon-colombe.

Si les deux joueurs restent sur la voie, ils entrent en collision, leur donnant le gain le plus faible. Néanmoins, chacun des deux joueurs a intérêt à rester sur sa voie s'il pense que son adversaire déviera. On appelle ce jeu « faucon-colombe[a] », car les joueurs choisissent parmi deux stratégies, une agressive (celle du faucon), et une autre plus conciliante (la colombe).

Comme dans le jeu de la guerre des sexes, il y a ici deux équilibres de Nash, et dans chacun d'eux un joueur est désavantagé par rapport

a Dans la littérature anglo-saxonne, on parle aussi régulièrement du « *Chicken game* » : en effet, il sort de ce jeu un courageux et un froussard (« chicken » en anglais).

à l'autre. De même, comme dans le jeu précédent, si un des joueurs réussit à faire croire à son adversaire qu'il restera dans sa voie quoiqu'il arrive, il sortira vraisemblablement victorieux de ce jeu.

Il existe néanmoins une grande différence entre ce jeu et le jeu de la guerre des sexes : ici, agir avec fermeté peut vous coûter très cher si votre adversaire décide d'agir de la même manière. Les deux joueurs ont donc beaucoup plus intérêt à être conciliants que dans le jeu de la guerre des sexes. Par conséquent, si les rivaux ont intérêt à annoncer tous deux qu'ils resteront sur la voie coûte que coûte, leur crédibilité est assez faible : il est fort probable que l'un des deux joueurs revienne sur son annonce et dévie au dernier moment, craignant la collision.

Un joueur qui voudrait absolument gagner à ce jeu pourrait fixer son volant pour s'interdire de le tourner pour dévier de la voie, et attacher l'accélérateur au plancher. S'il se liait les mains dans le dos, l'effet serait le même : en agissant ainsi, le joueur s'interdit de dévier et s'engage de manière crédible à rester sur la voie. Si son adversaire voit cela, sa stratégie dominante sera de dévier, acceptant la place du froussard. Notons bien qu'il est crucial que le joueur qui s'est lié les mains le montre à son adversaire, sans quoi l'engagement du premier à rester sur sa voie n'a pas beaucoup d'impact sur l'issue du conflit.

Ce jeu semble bien particulier : il n'y a guère que dans les films ou peut-être dans des gangs mafieux que l'on s'amuse à de tels combats. Néanmoins, la crise de Cuba a souvent été comparée à un jeu faucon-colombe, l'opposition frontale des deux blocs ressemblant alors à la situation précédente :

		Khrouchtchev	
		Aller vers Cuba	**Ramener les navires**
Kennedy	**Attaquer les navires soviétiques**	-10 -10	0 2
	Continuer un blocus défensif	2 0	1 1

Figure 17.2 : La crise de Cuba a souvent été vue comme un jeu faucon-colombe.

Dans la situation où les deux blocs décidaient d'être conciliants, il n'y aurait pas eu de guerre, même si chacun des deux joueurs avait alors intérêt à se montrer agressif pour profiter de la peur de l'autre et ainsi remporter une victoire politique et militaire. Néanmoins, si les deux présidents avaient continué à se montrer agressifs, ils se seraient précipités non plus dans le vide, mais dans une guerre sanglante.

Évidemment, la crise de Cuba ne peut se résumer à un choix parmi deux stratégies : le conflit d'octobre 1962 se déroula en plusieurs étapes et les deux dirigeants ont dû faire un choix parmi de nombreuses postures militaires et rhétoriques à chaque instant du conflit. Le parallèle fait par certains analystes entre cette crise et le jeu faucon-colombe doit donc être complété par une analyse historique fine. Néanmoins, le jeu faucon-colombe est utile dans l'analyse de bon nombre de situations, comme en biologie : nous le verrons dans quelques chapitres.

Point théorique

Des jeux plus complexes

Dans les quelques jeux que nous avons vus jusqu'à présent, nous avons considéré des interactions où deux joueurs devaient choisir parmi deux stratégies.

La théorie des jeux étant la branche de l'économie qui s'intéresse aux interactions entre plusieurs agents (aux décisions dites « stratégiques »), une telle situation est la plus simple que nous puissions imaginer. S'il n'y avait qu'un joueur, ses choix ne seraient pas stratégiques : il n'aurait qu'à choisir l'option qu'il préfère.

De même, si les joueurs n'ont qu'une seule stratégie disponible, ils n'ont pas vraiment de choix à faire. Pour cette raison, nous nous concentrerons dans ce livre sur des situations simples avec deux joueurs qui doivent faire un choix parmi deux stratégies. Néanmoins, il ne faut pas perdre de vue que la théorie des jeux permet d'étudier des situations plus complexes.

Nous allons voir comment il est possible d'analyser des jeux un peu plus complexes, avec trois joueurs, trois stratégies, ou plus.

Avec trois stratégies

Commençons par voir ce qui se passe lorsque les joueurs peuvent choisir parmi plus de deux stratégies, en prenant l'exemple d'Albert et Bertille qui négocient l'organisation de leurs vacances.

Albert doit décider du moyen de transport à utiliser (la voiture, l'avion ou le bateau) et Bertille du lieu de destination (la mer, la montagne ou la ville).

Les deux n'ont pas les mêmes préférences, celles-ci sont récapitulées dans le tableau suivant :

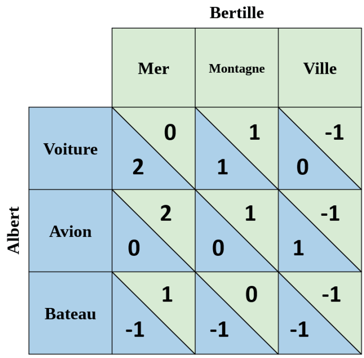


Figure 18.1 : Une matrice de gain avec deux joueurs et trois stratégies.

Ainsi, l'option qu'Albert préfère est de partir à la mer en voiture, alors que Bertille voudrait y aller en avion. Bertille ne veut pas de vacances à la ville et Albert n'aime pas le bateau. Les deux amis font leurs choix, et la négociation se termine lorsque chacun n'a plus intérêt à changer d'avis.

L'élimination itérée de stratégies strictement dominées

Comment ce marchandage va-t-il se terminer ? Ici, aucun des deux joueurs n'a de stratégie strictement dominante (c'est-à-dire que ni Albert ni Bertille n'ont intérêt à jouer la même stratégie, quelle que soit la décision de leur adversaire).

Pour trouver un potentiel équilibre de Nash, nous ne pouvons donc pas faire comme dans le jeu des pêcheurs et simplement trouver les stratégies strictement dominantes des deux joueurs.

Néanmoins, nous pouvons remarquer que les joueurs ont des stratégies strictement dominées. Ainsi, jouer « ville » est une stratégie strictement dominée pour Bertille qui aura toujours intérêt à choisir la montagne ou la mer, quel que soit le choix d'Albert.

Comme Bertille ne fera jamais ce choix, nous pouvons ignorer toutes les cases de la matrice de gain correspondantes (elles sont grisées dans la figure suivante).

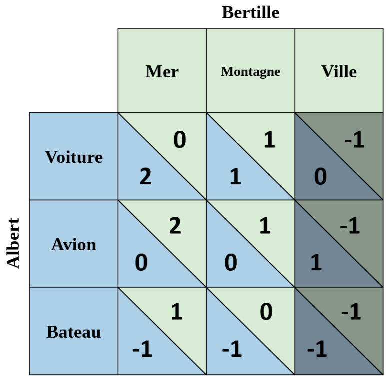


Figure 18.2 : Nous éliminons une première stratégie strictement dominée.

Une fois cette dernière colonne ignorée, nous pouvons remarquer qu'Albert a maintenant une stratégie strictement dominante : prendre la voiture (et deux stratégies strictement dominées, l'avion et le bateau). Nous pouvons alors ignorer les deux dernières lignes. Il ne reste alors que deux options possibles : aller à la mer en voiture ou aller à la montagne en voiture. Entre ces deux options, Bertille choisit la montagne qui lui rapporte un gain de 1 plutôt que la mer qui lui donne 0.

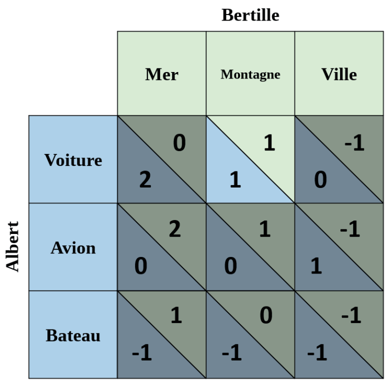


Figure 18.3 : En éliminant successivement les stratégies successivement dominées, on trouve l'équilibre de Nash.

L'analyse des meilleures réponses

Si la méthode d'élimination itérée des stratégies strictement dominées est générale, il existe des situations dans lesquelles aucun joueur n'a de stratégie strictement dominée (par exemple le jeu d'Alexandre à la bataille de Gaugamèles). Dans de tels cas, comment faire pour trouver les potentiels équilibres de Nash ?

Revenons à la définition d'un équilibre de Nash : c'est une situation dans laquelle aucun joueur n'a intérêt à changer de choix de stratégie sachant les choix de ses adversaires. Pour trouver les équilibres de Nash du jeu d'Albert et Bertille, on peut considérer les 9 issues possibles du jeu, et regarder si chaque issue remplit le critère de Nash ou non. Par exemple, l'issue (avion, ville) est-elle un équilibre de Nash ? La réponse est non, car au moins un joueur a intérêt à changer d'avis : si Albert annonce qu'il veut prendre l'avion, Bertille a intérêt à choisir la mer plutôt que la ville (on dit que c'est sa meilleure réponse). Cette nouvelle situation (avion, mer) n'est pas non plus un équilibre, car Albert a alors intérêt à choisir la voiture. La situation (voiture, mer) n'est pas un équilibre non plus, car lorsqu'Albert choisit la voiture, la meilleure réponse de Bertille est la stratégie « montagne ». Enfin, la situation (voiture, montagne) est un équilibre de Nash, car ni Albert ni Bertille n'ont intérêt à changer de stratégie[a].

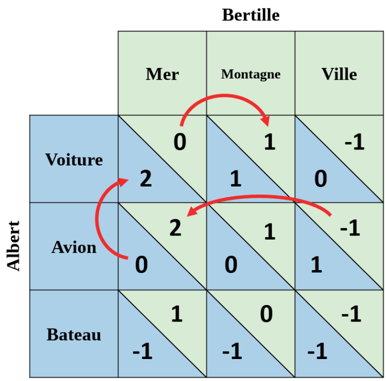


Figure 18.4 : (avion-ville) n'est pas un équilibre de Nash, mais (voiture-montagne) en est un.

En regardant les déviations possibles des joueurs, on peut rapidement savoir si une situation est un équilibre de Nash ou non. Si nous répétions le raisonnement du paragraphe précédent avec plusieurs

a Dans cette situation (voiture, montagne), la meilleure réponse d'Albert est de choisir « voiture » et la meilleure réponse de Bertille est de choisir « montagne ». On dit que cette situation est un « point fixe de la fonction de meilleure réponse » : toutes les situations qui satisfont cette propriété sont des équilibres de Nash.

points de départ, nous pourrions rapidement trouver que le jeu étudié n'a qu'un seul équilibre de Nash, celui que nous avons trouvé avec la méthode précédente.

Ainsi, nous venons de voir deux méthodes pour trouver les équilibres de Nash d'un jeu dans lequel les joueurs ont à faire un choix parmi plus de deux stratégies. Cette méthode peut évidemment se généraliser à des situations dans lesquelles les joueurs ont à faire un choix entre 4, 10 ou 100 stratégies (et même une infinité de stratégies). Revenons maintenant à une situation dans laquelle les joueurs doivent faire des choix parmi deux possibilités, mais ajoutons un joueur à la partie.

Avec trois joueurs

Imaginons que Charles se joigne à Albert et Bertille pour partir en vacances. Albert doit décider du lieu de destination (la mer ou la montagne). Bertille doit quant à elle déterminer comment ils partiront (en voiture ou en avion). Enfin, Charles doit décider de l'activité qu'ils feront sur place (de la randonnée ou du kayak). Chaque joueur reçoit un gain qui dépend de son choix ainsi que des choix des autres joueurs.

Avec deux joueurs, nous pouvions représenter les gains sous la forme d'un tableau à double entrée dont un joueur choisissait la colonne et dont l'autre choisissait la ligne. Avec trois joueurs, nous devons ajouter un degré de liberté supplémentaire et utiliser une autre représentation. Une possibilité est d'utiliser deux tableaux. Albert choisit un des deux tableaux, Bertille une ligne et Charles une colonne. On trouve les gains de chaque joueur dans le tableau choisi par Albert, à l'intersection des ligne et colonne choisies par Bertille et Charles.

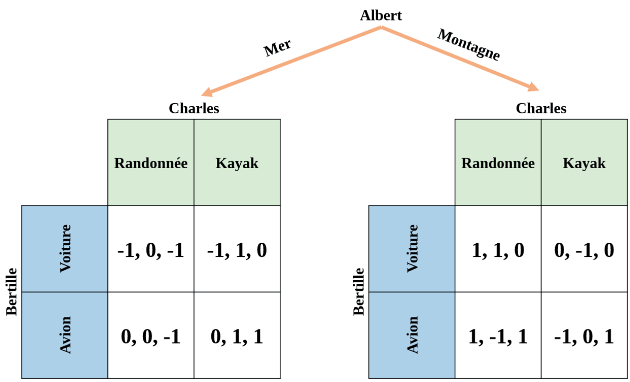


Figure 18.5 : Avec trois joueurs, on peut représenter la matrice de gain avec deux tableaux.

Ainsi, si Albert joue « mer », Bertille joue « voiture » et Charles joue « randonnée », on trouve les gains des trois joueurs dans la cellule en haut à gauche du premier tableau : Albert obtient -1, Bertille obtient 0 et Charles obtient -1. Pour savoir si cette situation est un équilibre de Nash, nous pouvons nous intéresser aux changements de stratégie que les joueurs peuvent faire. Par exemple, que se passe-t-il si Albert change d'avis et annonce qu'il veut aller à la montagne à la place ?

On peut lire dans le tableau que l'issue (montagne, voiture, randonnée) lui donne un gain de 1. Ce changement de stratégie lui est profitable, et l'issue (mer, voiture, randonnée) ne peut donc pas être un équilibre de Nash. Nous pouvons réitérer ce raisonnement pour chacune des huit issues possibles du jeu, correspondant aux huit cellules des tableaux. Si on observe qu'un joueur peut augmenter son gain en changeant de stratégie, cette issue n'est pas un équilibre de Nash.

Dans le tableau suivant, nous avons grisé les issues pour lesquelles une déviation profitable existe, ne laissant que deux cases pour lesquelles une telle déviation n'existe pas[b]. Ces deux issues sont donc les équilibres de Nash du jeu.

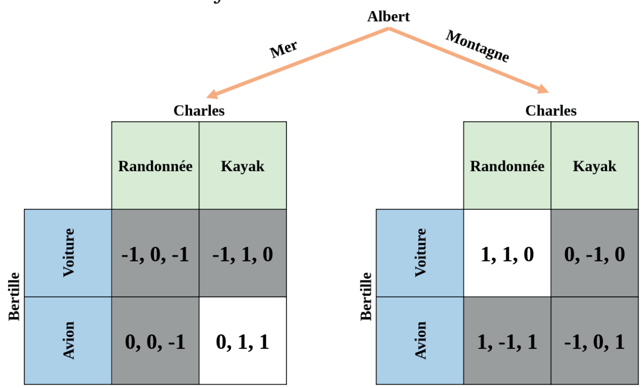


Figure 18.6 : Il n'y a que deux équilibres de Nash, les cellules grisées. Dans toutes les autres issues possibles du jeu, au moins un joueur a intérêt à changer de stratégie.

b Dans le détail : dans la situation (mer, voiture, kayak), Albert peut augmenter son gain en utilisant la stratégie « montagne », comme pour l'issue (mer, avion, randonnée). A l'issue (montagne, voiture, kayak), Bertille peut augmenter son gain en jouant « avion ». A l'issue (montagne, avion, randonnée), elle peut augmenter son gain en choisissant « voiture ». Il en est de même à l'issue (montagne, avion, randonnée). (montagne, avion, kayak) n'est pas non plus un équilibre de Nash, car Albert a intérêt à jouer « mer » à la place de montagne. Dans les deux issues restantes (l'issue [mer, avion, kayak] et [montagne, voiture, randonnée]), aucun des trois joueurs n'a de déviation profitable.

Lorsqu'il y a plus de trois joueurs et un grand nombre de stratégies, il devient difficile de représenter le jeu sous la forme de tableaux simples, mais on peut continuer à utiliser les méthodes vues dans cette partie pour trouver les équilibres de Nash (éliminer les stratégies strictement dominées et s'intéresser aux déviations profitables des différents joueurs). Ces méthodes peuvent très facilement être mises en application par un ordinateur qui trouvera rapidement les équilibres de Nash.

Chapitre 17

Goal!

Stratégies mixtes et penalty

Si le football est si imprévisible, c'est qu'il y a en général très peu de buts dans un match : un but marqué sur un coup de chance ou une inattention peut donc facilement faire basculer la partie. Particulièrement, les penaltys sont un des événements les plus importants d'un match : dans les matchs professionnels, environ 75 % des penaltys mènent à un but.

Lorsqu'un penalty est accordé, le tireur doit décider où il tirera dans la cage, à droite ou à gauche[56]. D'ailleurs, ces deux options ne sont pas équivalentes : un joueur droitier aura une plus grande facilité à tirer à sa gauche et un gaucher préférera tirer à sa droite. Néanmoins, les joueurs ne choisissent pas toujours de tirer là où c'est le plus simple pour eux : en effet, s'ils agissaient ainsi, les gardiens plongeraient toujours dans la direction favorite des tireurs et arrêteraient une bonne partie de leurs tirs. Les tireurs doivent donc rester imprévisibles, et tirer tantôt à droite, tantôt à gauche. De même, les gardiens ne plongent pas toujours du même côté pour que les tireurs ne puissent pas savoir à l'avance où il sera le plus simple de marquer.

Une caractéristique du football complique encore le penalty : entre le moment où le tireur touche le ballon et où celui-ci dépasse la ligne de but, il s'écoule environ 30 centièmes de seconde, ce qui est bien trop court pour que le gardien puisse observer la direction prise par le ballon avant de plonger. Le gardien doit décider de plonger à droite ou à gauche avant le tir sans connaître la décision du tireur.

Mais alors, comment les joueurs doivent-ils faire leur choix ? Les tireurs doivent-ils tirer autant à droite qu'à gauche pour être totalement imprévisibles, ou un peu plus de leur côté favori ? Comment les gardiens doivent-ils réagir ? La théorie des jeux permet de répondre à cette question, comme nous allons le voir.

Avant de résoudre ce problème des penaltys, revenons au concept favori des théoriciens des jeux : l'équilibre de Nash. Dans tous les exemples que nous avons étudiés dans ce livre, nous avons réussi à trouver un tel équilibre. Tous… sauf un ! Au début de ce livre, nous nous sommes intéressés à une situation où aucun équilibre de Nash ne se démarquait particulièrement, lorsque nous avons évoqué la bataille de Gaugamèles qui opposa Alexandre le Grand à Darius. Alexandre devait choisir d'attaquer de jour ou de nuit, et Darius de préparer une défense pour la nuit ou le lendemain matin.

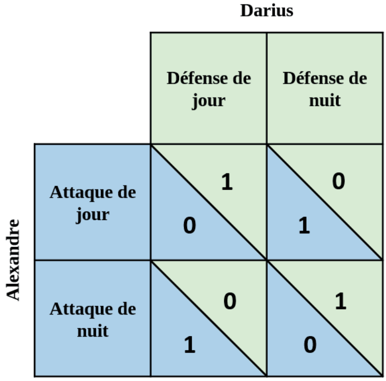


Figure 19.1 : Bataille de Gaugamèles : un 0 représente une défaite, un 1 une victoire.

Dans cette situation, un équilibre de Nash ne se démarquait pas parce qu'un des deux joueurs était toujours amené à regretter sa décision : à la fin de la bataille, il n'y a qu'un vainqueur ! Ces jeux dans lesquels les gains de l'un sont les pertes de l'autre sont appelés les **jeux à somme constante** : quelles que soient les stratégies utilisées par les deux joueurs, la somme des gains est une constante. Cette somme est égale à 1 dans le jeu de Gaugamèles. Le poker est un autre exemple de jeu à somme constante : la somme d'argent totale emportée par les joueurs à la fin d'une partie correspond exactement à la somme totale avec laquelle ils sont arrivés à la table de jeu. Dans le cas particulier où la somme des gains est nulle, on parle d'un **jeu à somme nulle**[a]. Le dilemme du prisonnier, lui, n'est pas un jeu à somme constante : en effet, lorsque les deux joueurs coopèrent, ils gagnent tous deux plus que s'ils ne coopéraient pas. On peut de la même manière voir le commerce comme un jeu à somme non constante.

Le jeu de la bataille de Gaugamèles est intéressant pour une autre raison : en analysant les choix d'Alexandre et de Darius, nous avions

a Les deux concepts sont quasiment équivalents. Ajouter une constante à tous les gains de tous les joueurs ne change pas leur comportement dans un jeu, ce qui fait qu'on peut aisément transformer un jeu à somme constante en jeu à somme nulle.

conclu qu'un stratège confronté à une telle situation devait être imprévisible. Dans le chapitre précédent, nous avions vu que dans une situation de conflit qui nécessitait un peu de coordination, une bonne stratégie était d'annoncer bien à l'avance ce qu'on comptait faire et de s'y tenir. Le jeu d'Alexandre et Darius montre qu'une telle prévisibilité n'est pas un atout dans n'importe quelle situation de conflit : dans la situation générale où aucune coordination n'est nécessaire entre les deux belligérants, mieux vaut au contraire agir par surprise.

Quand la meilleure décision est de tirer à pile ou face

Surprendre ses adversaires n'est pas utile qu'à la guerre : dans de nombreux jeux bien plus innocents, être prévisible mène à la défaite. Dans un épisode des *Simpson*, Bart et Lisa jouent à pierre-feuille-ciseaux. Bart joue comme d'habitude la pierre, et Lisa gagne la partie en jouant la feuille. « Pauvre Bart, tellement prévisible : il prend toujours la pierre ! » pense Lisa… Mieux vaut ne pas avoir de coup favori à pierre-feuille-ciseaux !

Si vous et votre adversaire jouez à chaque coup au hasard, vous gagnerez une fois sur trois, une fois sur trois vous perdrez, et le reste du temps il y aura match nul. Si par contre vous jouez la pierre le plus souvent, une fois sur deux par exemple, votre adversaire pourra prendre l'avantage : au lieu de jouer chaque coup au hasard (ce qui continuerait à lui donner la victoire dans un tiers des cas), il pourrait jouer à chaque coup la feuille, lui permettant alors de gagner une fois sur deux. Cette situation est évidemment instable : si votre adversaire joue toujours la feuille, vous cesserez de jouer la pierre et jouerez plus souvent les ciseaux. Au fur et à mesure que vous jouez, vous gommerez tout ce qui vous rend prévisible, arrivant à un équilibre lorsque vous serez tous deux totalement imprévisibles, en jouant chacun de vos coups au hasard.

Le cas de pierre-feuille-ciseaux ressemble à la situation de la bataille de Gaugamèles étudiée précédemment dans le sens où il n'y a pas d'équilibre de Nash simple : à la fin de la partie, un des deux joueurs regrette son choix. Néanmoins, il existe quand même un équilibre de Nash lorsque les joueurs choisissent leur stratégie au hasard : on parle alors de **stratégie mixte**. En effet, ils choisissent aléatoirement leur stratégie parmi plusieurs stratégies possibles, appelées **stratégies pures**. Les stratégies pures sont des stratégies qui ne font pas appel au hasard, ce sont celles que nous avions étudiées jusqu'à présent. Dans le tableau suivant, on donne des exemples de stratégies pures et de stratégies mixtes pour différents jeux.

Jeu	Exemple de stratégie pure	Exemple de stratégie mixte
Dilemme du prisonnier	Trahir	Tirer à pile ou face, trahir si on tombe sur pile et coopérer si on tombe sur face.
Jeu faucon-colombe	Jouer « faucon »	Jouer « faucon » avec probabilité 1/3 et « colombe » avec probabilité 2/3.
Jeu de la guerre des sexes	Aller jouer au baseball	Jeter un dé, et aller jouer au baseball si on tombe sur 5 ou 6. Sinon, aller au concert.

Si Alexandre le Grand et Darius s'étaient comportés comme des théoriciens des jeux, ils auraient décidé de leur stratégie en tirant à pile ou face, et auraient chacun remporté la victoire avec une chance sur deux.

Il est assez rare que des chefs de guerre jouent le sort de leur armée à pile ou face, et il pourrait paraître complètement irrationnel pour un stratège de choisir sa stratégie avec un lancer de dés. Les stratégies mixtes ne sont pas pour autant qu'un artefact théorique : elles permettent d'expliquer beaucoup de comportements. Tout d'abord, le comportement de joueurs (de poker, de foot) – après tout, nous parlons bien de théorie des jeux – mais également des contrôleurs du fisc, ou ceux des transports en commun. Enfin, la théorie des jeux a permis de faire de nombreuses avancées en biologie : grâce aux stratégies mixtes, nous expliquerons par exemple pourquoi il y a quasiment autant d'hommes que de femmes sur Terre !

Stratégies mixtes dans le sport, au poker et dans les aéroports

Le jeu de pierre-feuille-ciseaux peut paraître enfantin et peu intéressant, mais de nombreuses situations en sport nécessitent comme au pierre-feuille-ciseaux d'utiliser des stratégies mixtes. Reprenons notre exemple du penalty : il y a dans ce « jeu » deux joueurs, le tireur et le gardien. Chacun des joueurs a le choix entre deux stratégies : le tireur décide de tirer vers la droite ou vers la gauche, et le gardien tente de l'arrêter en plongeant à droite ou à gauche. Comme il ne s'écoule qu'un tiers de seconde entre le moment où le ballon quitte le sol et le moment où il entre dans les cages, tout se passe donc comme si le gardien et le tireur faisaient le choix d'une stratégie (« droite » ou « gauche ») de manière simultanée.

Si le tireur arrive toujours à marquer un but s'il tire dans la direction où le gardien n'a pas plongé, et si son ballon est systématiquement arrêté s'il tire dans la direction où le gardien a plongé, le jeu du tir au but a exactement la même matrice de gains que le jeu Alexandre-Darius.

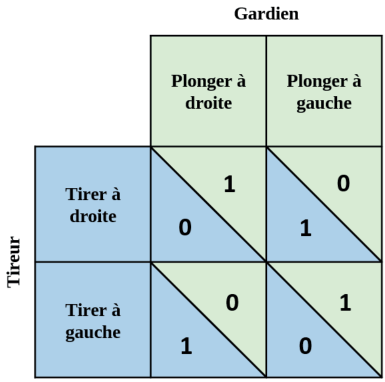


Figure 19.2 : Tir au but, pour le tireur, un zéro représente un tir manqué et un 1 un but marqué ; pour le gardien, un 0 représente un but encaissé et un 1 un ballon arrêté.

Nous avons vu que dans une telle situation, les deux joueurs avaient intérêt à choisir au hasard leur stratégie, en tirant/plongeant à droite ou à gauche avec une chance sur deux. Dans cette situation, on a un équilibre, et aucun joueur n'a intérêt à en dévier : cela le rendrait plus prévisible, et tournerait à son désavantage.

On peut trouver cet équilibre en traçant un petit graphique : si on se met dans la peau du gardien pendant une série de tirs au but, et qu'on essaye de trouver la stratégie qui permet d'arrêter un maximum de ballons, on commence par analyser ce que fait le tireur. Celui-ci tire à droite avec une probabilité p. Si p vaut 1, le tireur tire à droite tout le temps, si $p = 0,75$, il tire à droite trois fois sur quatre, etc.

Sachant cette probabilité, le gardien peut analyser le gain qu'il pourrait obtenir avec chacune des stratégies pures « plonger à droite » et « plonger à gauche ».

Sur le graphique suivant, on donne les gains moyens pour le gardien lorsqu'il choisit chacune des deux stratégies pures, en fonction de la probabilité p.

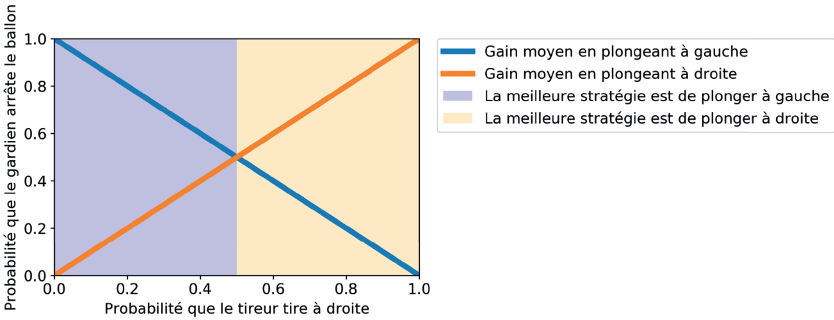


Figure 19.3 : Les gains du gardien pour chaque stratégie dépendent de la probabilité que le tireur vise à droite.

Deux zones se démarquent dans ce graphique : si le tireur a tendance à tirer plus souvent à droite qu'à gauche, la stratégie dominante pour le gardien sera de plonger à droite tout le temps, et vice versa. Si le gardien utilise toujours sa stratégie dominante, ses gains seront les suivants :

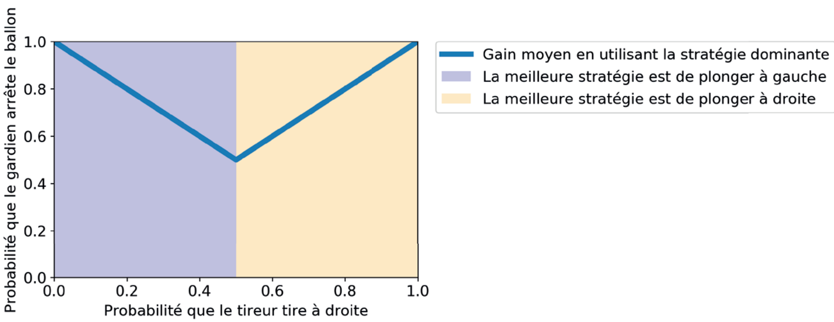


Figure 19.4 : Gains du gardien quand celui-ci utilise toujours sa stratégie dominante.

Le tireur cherche à maximiser ses gains, et cela correspond à minimiser les gains du gardien : pour ce faire, il va donc choisir p = 0,5 : il tire aléatoirement à droite et à gauche avec la même probabilité, en étant ainsi le plus imprévisible possible.

Dans cette configuration, le gardien obtient le même gain, quelle que soit sa stratégie : s'il plonge toujours à droite, toujours à gauche, où à droite ou à gauche avec une certaine probabilité, il obtiendra toujours le même gain en moyenne : 0,5. Si toutes les stratégies du gardien sont équivalentes, laquelle choisir ? Si le gardien décide de plonger toujours à droite tandis ce que le tireur continue de tirer à droite ou à gauche avec une chance sur deux, un ballon sur deux sera arrêté.

Néanmoins, cela ne durera pas longtemps si la série de tirs au but continue assez longtemps : le tireur se rendra compte que le gardien plonge toujours à droite et commencera à tirer de plus en plus à gauche. Le gardien a donc intérêt à lui aussi être imprévisible, et plonger à droite ou à gauche avec une probabilité 1/2.

Lorsque les deux joueurs utilisent ainsi le hasard pour se rendre ainsi imprévisibles, ils arrivent à un équilibre : un équilibre de Nash en stratégies mixtes.

Si cet exemple nous a permis de comprendre comment un équilibre en stratégies mixtes pouvait se mettre en place, il était un peu simpliste : dans la réalité, un joueur de foot qui tire là où le gardien n'est pas ne marque pas à tous les coups et un gardien n'arrête pas toujours le ballon même s'il plonge dans la bonne direction.

Par ailleurs, nous avons vu que les joueurs ont une plus grande facilité à tirer d'un côté que de l'autre, selon qu'ils sont droitiers ou gauchers. Les 0 et les 1 que nous avions placés dans la matrice des gains ne reflétaient donc pas parfaitement la réalité. Pour rendre le modèle plus réaliste, on peut remplacer les 0 et les 1 par les probabilités pour le tireur de marquer (ou pour le gardien d'arrêter le ballon) dans chaque situation.

En 2001, un chercheur a décidé de voir si les joueurs de foot tiraient aléatoirement à droite ou à gauche du but selon les prévisions de la théorie des jeux[57]. Il analysa plus de 1400 tirs de penalty observés dans des matchs de football professionnel, et il trouva la matrice de gains suivante[58] :

Tireur \ Gardien	Plonger à droite	Plonger à gauche
Tirer à droite	0,58 / 0,42	0,95 / 0,05
Tirer à gauche	0,93 / 0,07	0,70 / 0,30

Figure 19.5 : Gains au jeu du penalty mesurés expérimentalement (pour un joueur droitier).

Comment interpréter ce tableau ? Imaginons par exemple que le tireur décide de viser à droite, et que le gardien plonge à droite. Le tableau nous montre que le tireur aura une probabilité de marquer de 0,58 (c'est-à-dire qu'il marquera « dans 58 % des cas »). Le gardien, lui, arrêtera le ballon (ou le verra passer en dehors des cages) dans 42 % des cas, d'où le 0,42 qui apparaît dans le tableau dans la case en haut à droite.

Analysons ce jeu. Tout d'abord, comme dans la situation précédente, il n'y a pas d'équilibre de Nash en stratégies pures : à chaque tir, un des deux joueurs regrettera son choix. Peut-on donc trouver alors un équilibre en stratégies mixtes ? Ici, aucun équilibre ne se démarque particulièrement : pour essayer d'en trouver un, on peut tracer une nouvelle représentation graphique, montrant le gain moyen du gardien selon qu'il plonge à droite ou à gauche, en fonction de la probabilité avec laquelle le tireur tire à droite :

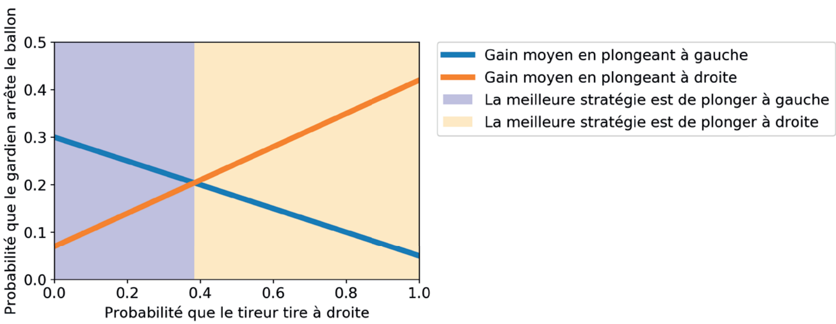


Figure 19.6 : Gains du gardien selon les choix du tireur, dans une situation réaliste.

Aux extrémités de la courbe bleue, on trouve les gains du gardien lorsqu'il plonge à gauche, lorsque le tireur tire toujours à droite (0,05 – à droite du graphique) ou à gauche (0,3 – à gauche du graphique). De même, on peut tracer la courbe orange en reportant à ses extrémités les valeurs du tableau.

En utilisant le même raisonnement que précédemment, on peut trouver l'équilibre de Nash en cherchant l'intersection des deux courbes : on trouve alors qu'à l'équilibre, un tireur droitier tirera à droite dans 38 % des cas et à gauche dans 62 % des cas. Le gardien arrivera à arrêter le ballon dans un peu plus de 20 % des cas. Ces résultats approchent particulièrement bien la réalité : dans les faits, les joueurs droitiers tirent à droite dans 40 % des cas et à gauche dans 60 % des cas. La théorie des jeux arrive donc bien à expliquer les choix faits par les joueurs de foot : ces professionnels qui s'entraînent chaque jour utilisent la stratégie optimale !

Choisir au hasard ses mouvements est une tactique qui ne s'applique pas qu'au foot : dans les jeux de raquette aussi, il faut tirer de manière imprévisible à droite ou à gauche pour que son adversaire ne puisse pas anticiper vos mouvements.

Dans des jeux moins sportifs, l'usage de probabilités est parfois tout aussi important : au poker, les joueurs peuvent décider de bluffer : lorsqu'ils ont un jeu faible, ils peuvent miser beaucoup pour faire croire qu'ils ont un jeu fort et pousser les autres joueurs à se coucher. Au contraire, lorsqu'ils ont un jeu fort, ils peuvent miser peu pour faire croire aux autres qu'ils n'ont pas un bon jeu et les pousser à miser beaucoup.

Au poker comme au foot, être prévisible peut vous faire perdre beaucoup. Un joueur qui reste toujours très prudent et ne bluffe jamais ne pourra pas tromper les autres joueurs tout en pouvant se faire avoir par ses adversaires, tandis ce qu'un joueur qui bluffe tout le temps ne sera pas crédible lorsqu'il mise beaucoup : les autres joueurs ignoreront ses mises et le bluff n'aura aucun effet. Un bon joueur de poker devra donc bluffer de manière imprévisible, en utilisant une stratégie mixte : lorsqu'il a un mauvais jeu, il doit bluffer avec une certaine probabilité, pour pouvoir tromper parfois ses adversaires sans totalement perdre sa crédibilité (et son argent !)

Les stratégies mixtes permettent également à certaines institutions d'être beaucoup plus efficaces, notamment lorsqu'il s'agit de lutter contre la fraude. Lorsqu'on veut éviter qu'une population agisse dans l'illégalité, il est en général impossible de contrôler les actions de tout le monde : cela prendrait beaucoup trop de temps ou d'argent. On choisit alors de vérifier les agissements d'une partie seulement de la population.

Dans les aéroports, les douanes luttent contre la contrebande, et procèdent donc à des fouilles. Là aussi, des fouilles prévisibles mèneraient à leur échec. Si les contrebandiers savent que les douaniers fouillent les bagages de tel ou tel vol, ou les passagers qui viennent d'un pays en particulier, ils n'auront qu'à passer par d'autres routes. Pour éviter une telle situation, les douaniers procèdent à des contrôles aléatoires : sur tous les vols, ils contrôlent une certaine proportion des bagages et des passagers, ce qui correspond à inspecter chaque bagage ou passager avec une probabilité p[b].

De même, dans les transports en commun, les contrôleurs ne peuvent pas être partout et vérifier que tout le monde a bien acheté son billet : ils procèdent donc, comme dans les aéroports, à des contrôles aléatoires, inspectant les billets d'une proportion p des voyageurs. En étant imprévisibles, ils diminuent le risque de fraude : quelqu'un qui n'a pas acheté son billet n'est jamais absolument certain de pouvoir passer entre les mailles du filet. En imposant de fortes amendes et des contrôles réguliers, une compagnie de transport peut s'assurer qu'une majorité des usagers payera son billet : si un ticket de bus coûte 1 €, et que la compagnie de bus facture une amende de 50 € à tout voyageur trouvé sans ticket, un usager rationnel payera son billet dès lors qu'il a une chance sur 50 de se faire contrôler. Ainsi, les contrôleurs peuvent en théorie s'assurer du bon comportement des usagers en ne vérifiant les billets que d'un peu plus de 2 % des voyageurs[c].

---

b Si vous contrôlez chaque bagage avec une probabilité 1/2 (par exemple, en tirant à pile ou face à chaque bagage, et en le fouillant à chaque fois que vous tombez sur pile), alors vous contrôlez à peu près la moitié des bagages. Si vous avez 100 bagages et que vous voulez les contrôler avec une probabilité de 0.1, il suffit d'en sélectionner 10 au hasard : mathématiquement, cela revient au même que de prendre chaque bagage un à un et de le contrôler à chaque fois avec probabilité 0.1.

c Par exemple, si les contrôleurs vérifient les billets d'un voyageur sur 25 et que vous décidez de frauder, vous payerez en moyenne 2 € par trajet, ce qui est supérieur au prix d'un billet : vous aurez donc intérêt à acheter votre billet à chaque fois même si la probabilité de vous faire contrôler est assez faible.

Chapitre 18

Sex Ratio

Stratégies mixtes et biologie

On entend parfois que la sélection naturelle sélectionne les comportements qui permettent la survie de l'espèce, ou qu'elle sélectionne des caractères « pour son bien ». Cette affirmation est fausse ! Ce qui est sélectionné par la sélection naturelle, ce sont les caractères qui permettent à un individu d'avoir un maximum de descendants. Ce n'est pas la même chose, et nous allons voir pourquoi.

Prenons un exemple simple pour expliquer ce qui se passe. Imaginons un groupe d'animaux qui peuvent avoir deux types de pelage : un pelage rayé ou un pelage à carreaux. Pour une raison quelconque, ceux qui ont un pelage rayé laissent à la génération suivante deux descendants au pelage rayé, tandis ce que ceux qui ont un pelage à carreaux ne laissent qu'un descendant (lui aussi à carreaux). Cette différence peut être due à un grand nombre de facteurs : peut-être est-il plus simple de se camoufler avec des rayures qu'avec des carreaux et que les prédateurs attaquent donc en priorité ceux qui ont un pelage à carreaux ! Imaginons un groupe de 10 animaux de cette espèce, avec 5 animaux rayés et 5 animaux à carreaux. À la première génération, il y a donc 50 % d'animaux rayés. À la génération suivante, il y a deux fois plus d'animaux rayés que d'animaux à carreaux : ceux-ci ne constituent plus que 33 % de la population. À la troisième génération, les animaux rayés constituent 80 % de la population, et à la dixième génération plus de 98 % des animaux sont rayés ! Le caractère « rayé » a donc été sélectionné, tandis que le caractère « à carreaux » est devenu très minoritaire, car il ne permettait pas d'avoir autant de descendants.

Comme les caractères qui permettent d'avoir plus de descendants sont souvent des caractères qui augmentent la survie (parce qu'être vivant est nécessaire pour se reproduire), le processus de la sélection naturelle donne souvent des espèces remarquablement bien adaptées à leur environnement. Un des exemples les plus connus à ce sujet est l'observation faite par Darwin des pinsons des Galápagos. Lors de son séjour dans cet archipel du Pacifique, Darwin remarqua que les becs des pinsons des Galápagos étaient assez différents selon l'île sur laquelle ils vivaient, et par ailleurs, les formes des becs étaient adaptées aux aliments présents sur chaque île. Sur chaque île, les oiseaux qui avaient les becs les mieux adaptés mangeaient plus que les autres et pouvaient avoir plus de descendants : sur chaque île, c'est un type de bec différent qui avait été sélectionné petit à petit.

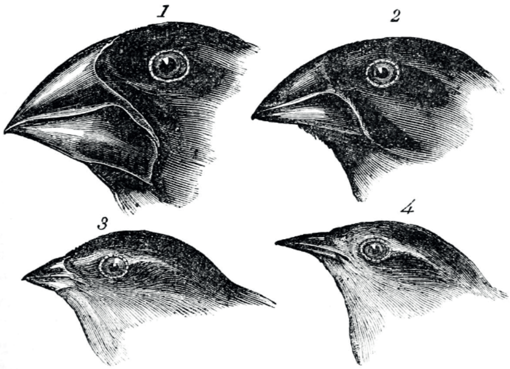


Figure 20.1 : Les pinsons étudiés par Darwin dans les Galápagos.

Mais alors, pourquoi est-il faux de dire que la sélection naturelle sélectionne des caractères qui contribuent au développement optimal de l'espèce ? C'est encore une fois parce qu'on n'atteint pas toujours une situation optimale pour le groupe lorsque chacun cherche à maximiser son propre profit !

Dans la sélection naturelle, les comportements ou les caractères sélectionnés sont ceux qui permettent à chaque individu d'avoir un maximum de descendants. Néanmoins, le fait que chaque individu cherche à maximiser le nombre de ses descendants n'implique pas que l'espèce en elle-même se développe au mieux.

Un exemple marquant est le sex-ratio. Même si les mécanismes sous-jacents ne sont pas encore toujours bien compris, il est connu que dans le monde animal, les femelles ont une influence sur le sexe de leur progéniture. Par exemple, le sexe de certains lézards et des alligators d'Amérique est déterminé par la température à laquelle leurs œufs ont été conservés. On peut également citer comme exemple les fourmis, qui peuvent décider œuf par œuf du sexe de leurs larves. Des études ont montré que les mammifères étaient également capables d'influencer le sex-ratio de leur progéniture[59]. Dans la plupart des espèces, le sex-ratio est généralement de 1 : 1, c'est-à-dire qu'il y a autant de mâles que de femelles dans la population.

Si ce ratio peut sembler optimal, il ne l'est pas pour le développement des espèces ! En effet, un sex-ratio biaisé avec beaucoup plus de femelles que de mâles permettrait à l'espèce de se développer bien plus vite qu'un sex-ratio équilibré ! Comme un mâle peut s'accoupler avec un grand nombre de femelles, il est inutile pour le développement de l'espèce d'en avoir trop : avec un mâle pour dix femelles, l'espèce peut continuer à se renouveler sans problème, et peut même se développer beaucoup plus rapidement qu'avec un sex-ratio équilibré. Pourtant, dans la nature, ce n'est pas cette configuration qui est observée. Pourquoi ?

La réponse est donnée par un argument simple, le **principe de Fisher** : d'après ce principe, le sex-ratio 1 : 1 souvent observé vient du fait qu'un animal aura plus de descendants s'il est du sexe minoritaire dans une population que s'il est du sexe majoritaire[60]. Imaginons une espèce où les femelles peuvent avoir un enfant par an, et où les mâles s'accouplent chacun avec le même nombre de femelles chaque année. Dans une population où il n'y a presque que des femelles, une femelle ne pourra avoir qu'un enfant chaque année en s'accouplant avec l'un des mâles. Par contre, un mâle n'aura que très peu de concurrents et pourra s'accoupler avec un grand nombre de femelles, et ainsi avoir de nombreux descendants. Au contraire, dans une population avec beaucoup de mâles et très peu de femelles, de nombreux mâles ne pourront pas s'accoupler et n'auront pas de descendants : une femelle aura au contraire chaque année un petit. Pour maximiser son nombre de descendants, il faut alors être une femelle.

Dans une population de 100 animaux, voici le nombre de petits qu'auront en moyenne chaque année un mâle et une femelle, en fonction de la proportion de mâles dans la population.

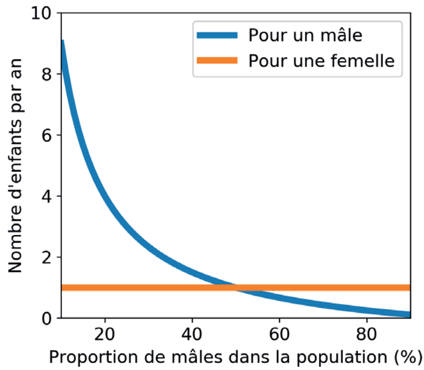


Figure 20.2 : Nombre d'enfants pour un mâle et une femelle en fonction du sex-ratio dans la population.

On voit bien qu'il vaut mieux être un mâle lorsqu'il y a une majorité de femelles et une femelle lorsqu'il y a une majorité de mâles. Lorsqu'il y a un sex-ratio de 1 : 1, avec 50 % de femelles et 50 % des mâles, être une femelle ou un mâle permet d'avoir autant de descendants (un en l'occurrence). Si les animaux pouvaient choisir leur sexe, ils choisiraient tous le sexe en minorité, conduisant petit à petit à un équilibre entre le nombre de mâles et le nombre de femelles.

Il se trouve que les animaux ne peuvent en général pas choisir leur sexe[a]… Par contre, ils peuvent choisir le sexe de leurs petits pour que ceux-ci aient à leur tour plus de petits ! En ayant plus de petits du sexe en minorité, un animal peut ainsi avoir plus de descendants en augmentant le nombre de leurs petits.

Ainsi, même si une espèce se développait rapidement avec un sex-ratio biaisé en faveur des femelles, comme chaque individu cherche à maximiser son nombre de descendants, on arriverait à des populations avec autant de mâles que de femelles.

Quel rapport avec la théorie des jeux ? Ici, tout se passe comme si les animaux avaient à choisir une stratégie, en choisissant la proportion de mâles et la proportion de femelles qu'ils souhaitent avoir dans leur progéniture. Le gain qu'ils obtiennent est le nombre de leurs descendants. Le graphique précédent montre que la stratégie dominante dépend de la proportion de mâles et de femelles dans la population, mais qu'on trouve un équilibre de Nash en stratégies mixtes lorsque tous les individus ont autant de petits mâles que de petites femelles. Les biologistes ne considèrent en général pas que les animaux choisissent une stratégie de manière consciente, mais plutôt que leurs actions sont conditionnées par leur code génétique. Au fur et à mesure de l'évolution, ce sont les animaux qui utilisent les stratégies dominantes qui sont sélectionnés, et avec eux le génome qui induit un tel comportement.

L'explication de l'équilibre du sex-ratio est l'une des premières applications de la théorie des jeux à la biologie. D'autres suivirent rapidement, et la théorie des jeux est aujourd'hui un outil important en biologie de l'évolution.

Un autre mystère du monde animal a été éclairé grâce à la théorie des jeux évolutionnaires : la compétition entre animaux pour prendre le contrôle de ressources. Les relations entre les animaux sont comme celles entre les hommes : elles sont marquées par des conflits pour

a On observe néanmoins quelques espèces de poissons et d'amphibiens hermaphrodites qui peuvent changer de sexe au cours de leur vie !

des ressources. Là où les hommes se battent pour de l'argent ou du pouvoir, les animaux se battent pour des territoires, de la nourriture, des partenaires. Néanmoins, si on observe parfois de féroces combats entre cerfs, lions, et autres animaux, ces confrontations sont loin d'être la règle, et les animaux ont souvent des interactions pacifiques, acceptant de céder à l'autre certaines ressources et refusant le combat. Les biologistes du XXe siècle ont aussi été intrigués par les combats « rituels » observés entre animaux, qui limitaient leur violence dans des confrontations pour une ressource. Ainsi, de nombreuses espèces de serpents combattent en s'enroulant autour de leur adversaire, mais n'utilisent pas leurs crocs. De même, des scientifiques ont observé que lorsque des cerfs se battaient, ils se donnaient des coups bois contre bois, sans toucher le reste du corps de leur adversaire[61].

À première vue, ce comportement peut sembler étonnant : si les serpents mordaient leurs adversaires et les cerfs frappaient leurs concurrents dans l'abdomen et non dans les bois, ils pourraient gagner le combat plus facilement. Comment expliquer que les animaux refusent parfois de se battre violemment pour une ressource qu'ils veulent obtenir ? Certains biologistes, comme Konrad Lorenz, affirmèrent que de tels comportements montraient la réticence des animaux à tuer des membres de leur propre espèce, une sorte « d'analogue comportemental à la moralité [des humains] » selon ses dires[62]. Or, les animaux ne sont en général pas tendres avec les membres de leur propre espèce qui n'ont pas de lien de sang avec eux. Par exemple, lorsqu'un nouveau mâle dominant arrive à la tête d'une troupe de lions, il est courant qu'il tue les lionceaux de l'ancien mâle dominant. Ce comportement permet au nouveau mâle dominant d'augmenter le nombre de ses descendants : en effet, les lionnes de la troupe sont plus rapidement fécondables lorsqu'elles n'ont pas de petits que lorsqu'elles doivent s'occuper d'une bande de lionceaux… Comment expliquer la tendance des animaux à restreindre dans certaines circonstances leur violence alors qu'ils n'hésitent pas à l'employer dans d'autres ?

La solution fut petit à petit apportée par des biologistes qui appliquèrent la théorie des jeux à leur domaine d'étude. Ils remarquèrent que les animaux restreignaient leur violence lorsqu'une escalade risquait de leur faire du mal : ainsi, des serpents risquent des blessures s'ils commencent à utiliser leurs crocs lors d'un combat, tout comme les cerfs qui ne profiteront pas longtemps des ressources acquises par une confrontation violente s'ils ont été blessés au cours de celle-ci. Au contraire, les lions ne perdent pas grand-chose en tuant la progéniture de leurs nouvelles partenaires lorsqu'ils prennent la tête d'une troupe.

En particulier, le biologiste John Maynard Smith compara les interactions entre animaux à un jeu faucon-colombe. Lors d'une confrontation, les animaux ont à choisir parmi deux options :

- Se comporter de manière douce, en combattant de manière rituelle et en battant en retraite en cas d'escalade de la violence (stratégie « colombe ») ;
- Utiliser toutes leurs forces pour combattre (stratégie « faucon »).

Si deux « colombes » se rencontrent, ils se partagent la ressource en jeu, alors qu'un « faucon » qui rencontre une colombe s'accapare toute la ressource tandis que la colombe ne récupère rien. Enfin, lorsque deux faucons se rencontrent, il y a une escalade de la violence qui peut se solder par des blessures d'un côté comme de l'autre. Accéder à la ressource permet à un animal d'augmenter son nombre de descendants, alors que des blessures impactent ses chances de reproduction. On peut alors imaginer une matrice de gains qui ressemblerait à cela :

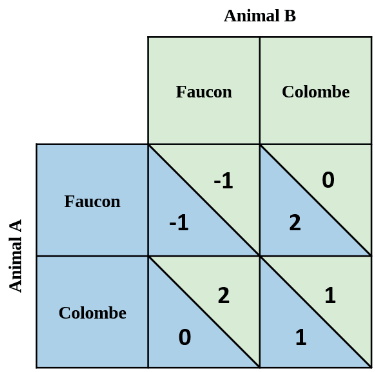


Figure 20.3 : Jeu faucon-colombe (avec de vrais animaux !).

On retrouve un tableau assez similaire à celui étudié précédemment lorsque nous évoquions la crise de Cuba et le film *La Fureur de vivre*. Là aussi, l'interaction entre animaux s'apparente au jeu « faucon-colombe ». Lorsque nous avons étudié pour la première fois ce jeu, nous avons vu qu'il comportait deux équilibres de Nash en stratégies pures. Depuis, nous avons découvert une autre possibilité de la théorie des jeux : les joueurs peuvent utiliser une stratégie mixte. Nous avons également vu qu'un équilibre de Nash en stratégies mixtes pouvait s'interpréter de deux façons différentes lorsqu'on s'intéresse à une population : soit on considère que chaque joueur tire au hasard sa stratégie, soit on considère que chaque joueur utilise toujours la même stratégie, mais différents joueurs de la population utilisent des stratégies différentes sans qu'on puisse savoir à l'avance quels joueurs utilisent quelles stratégies.

Le jeu faucon-colombe a-t-il un équilibre de Nash en stratégies mixtes ? Pour le savoir, on peut faire une analyse similaire à celle des tirs au but : selon la probabilité que l'adversaire utilise la stratégie faucon, on peut estimer le gain espéré des deux stratégies :

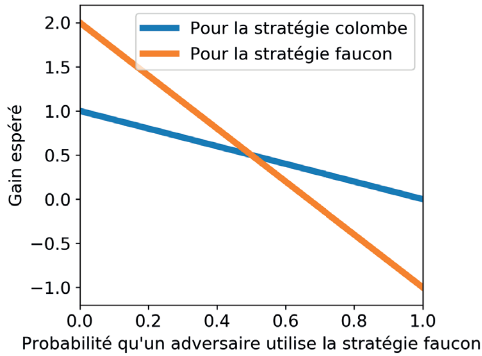


Figure 20.4 : On peut trouver un équilibre de Nash en stratégies mixtes pour le jeu faucon-colombe, en plus des deux équilibres de Nash en stratégies pures.

On observe que les deux droites tracées se croisent lorsque la probabilité que l'adversaire soit un faucon est de 0,5. Le gain espéré pour la stratégie faucon et celui pour la stratégie colombe sont alors tous deux égaux, eux aussi à 0,5. Si on n'a pas d'équilibre de Nash en stratégies pures pour ce jeu, on en a un en stratégies mixtes.

Dans le cadre du jeu faucon-colombe, on peut donc imaginer deux façons d'interpréter une stratégie mixte :

- Soit, à chaque interaction, les animaux décident au hasard d'être violents ou non (avec une probabilité de 1/2 pour chacun des deux comportements) ;
- Soit il y a dans la population autant de faucons que de colombes, mais un animal qui en rencontre un autre ne peut pas savoir a priori s'il fait face à un faucon ou une colombe.

En biologie évolutive, les scientifiques considèrent que le comportement d'un animal est défini par son code génétique : un animal ne change donc pas de comportement pendant sa vie, ce qui favorise donc la deuxième option.

Dans la situation théorique que nous venons d'étudier, lorsqu'il y a plus de faucons que de colombes, les colombes qui fuient des prédateurs violents arrivent à avoir plus de descendants que les faucons qui se battent entre eux.

Comme les animaux transmettent leur code génétique à leur descendance, au fur et à mesure des générations, le nombre de colombes augmente jusqu'à s'équilibrer avec le nombre de faucons.

Au contraire, s'il y a plus de colombes que de faucons, les faucons peuvent facilement arracher des ressources à leurs congénères peu violents : ils ont alors plus de descendants que les colombes, ce qui mène là aussi à un équilibre.

Imaginons maintenant une situation dans laquelle un combat violent (qui correspond à la rencontre entre deux faucons) est particulièrement coûteux pour ceux qui y prennent part : on a alors une matrice des gains un peu différente, celle-ci par exemple :

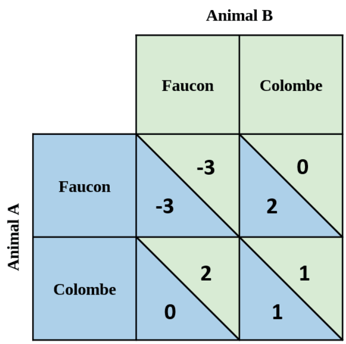


Figure 20.5 : Le jeu avec, cette fois-ci, un affrontement plus coûteux.

Dans cette nouvelle situation, si on trace les gains des deux stratégies en fonction de la proportion de faucons dans la population, on a un graphique un peu différent :

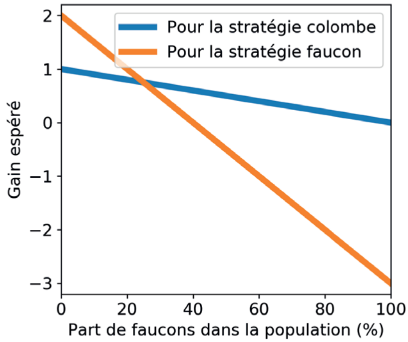


Figure 20.6 : Cette fois-ci, les animaux se battent moins à l'équilibre de Nash.

Là aussi, on trouve un équilibre de Nash en stratégies mixtes, mais désormais, il y a à l'équilibre seulement 25 % de faucons dans la population : plus les combats sont coûteux, moins il y a dans la population des animaux qui ont tendance à se lancer dans de tels combats.

Ce modèle simple des relations animales a permis de donner une première explication des combats rituels des animaux, qui ne font pas usage de toute leur force dans des batailles pour les ressources : l'évolution n'a pas sélectionné ces comportements « pour le bien de l'espèce », mais parce que de tels comportements sont parfois une stratégie optimale pour avoir plus de descendants.

Ce modèle a tout de même ses limites, et dans les faits, les relations conflictuelles entre animaux sont plus complexes. Ces derniers peuvent en effet commencer par évaluer la force de leur adversaire avant d'entrer en confrontation : si leur adversaire leur semble bien plus fort qu'eux, ils auront tendance à déguerpir avant de recevoir des coups. Au contraire, lorsqu'ils sentent qu'ils ont de fortes chances de gagner le combat en cas d'escalade de la violence, ils auront plus tendance à se battre avec force. Les animaux peuvent donc utiliser l'une ou l'autre stratégie selon la situation. Par ailleurs, se limiter à deux stratégies est un peu simpliste : on peut imaginer d'autres façons de réagir pour les animaux. Les biologistes ont par exemple montré que dans plusieurs espèces, les animaux combattaient violemment lorsqu'ils étaient sur leur propre territoire, mais cédaient à l'adversaire s'ils étaient sur le sien[63].

Si le modèle faucon-colombe est un peu simpliste pour des espèces complexes, il s'applique parfaitement bien à ses espèces simples.

Des chercheurs ont par exemple montré que le modèle permettait d'expliquer l'évolution de populations de levures. Les levures s. *cerevisiae* (des champignons utilisés par les boulangers, viticulteurs et brasseurs) se nourrissent de sucres simples (glucose et fructose), et peuvent transformer des sucres plus complexes (comme le sucrose) en glucose et fructose lorsqu'elles n'ont pas accès directement à ces sucres simples. Néanmoins, lors de cette transformation, ces petits champignons libèrent dans le milieu environnant la plupart des sucres simples ainsi produits, et qui peuvent être utilisés par d'autres levures. On observe dans la nature des levures qui ont la capacité de transformer des sucres complexes en sucres simples, et des levures qui ont perdu cette capacité. Ces deux types de levures correspondent à deux stratégies : les levures qui transforment les sucres ont une stratégie « gentille », et aident leurs voisines à croître, tandis que celles qui ont perdu la capacité de transformer les sucres exploitent le travail de leurs congénères en pompant dans leur environnement les sucres simples produits par les levures « gentilles ». On peut appeler ces levures « tricheuses ». Une telle situation s'apparente à un jeu faucon-colombe (où les levures gentilles sont les colombes et les tricheuses les faucons). Lorsqu'il y a principalement des levures gentilles dans la population, celles-ci produisent assez de sucres pour que des levures tricheuses puissent survivre en leur compagnie sans en produire elles-mêmes. Comme elles utilisent moins d'énergie pour se nourrir que les levures gentilles, elles peuvent se développer plus facilement que ces dernières et leur nombre augmente. Au contraire, lorsque les levures gentilles sont en minorité, les levures tricheuses ne peuvent pas trouver assez de sucres dans leur environnement pour se reproduire aussi vite que les levures gentilles, qui ne manquent pas de nourriture. Ce sont alors les levures gentilles qui se développent. À l'équilibre, il y a donc à la fois des levures gentilles et des levures tricheuses qui cohabitent[64].

Un exemple célèbre d'application de la théorie des jeux à la biologie concerne les lézards Uta[65]. Au sein de cette espèce de lézards, on trouve trois types de mâles, qui ont des gorges de couleurs différentes :

- Ceux qui ont des gorges orange sont plus gros que les autres, et vivent sur de larges territoires avec de nombreuses femelles qu'ils défendent agressivement. Néanmoins, ils ne peuvent pas surveiller toutes leurs femelles en même temps…
- Ceux qui ont des gorges jaunes sont plus sournois et profitent de cette inattention : ils ne défendent pas de territoire particulier, mais s'infiltrent discrètement sur des territoires gardés par

les lézards orange pour s'accoupler avec des femelles protégées par ceux-ci.
- Ceux qui ont des gorges bleues utilisent encore une autre stratégie : ce sont des lézards monogames qui concentrent toutes leurs ressources sur une seule femelle.

Ces trois types de lézards ont donc trois types de stratégies pour se reproduire. Laquelle est la plus efficace ?

Lorsque les lézards bleus sont en majorité, ils se font battre par les oranges qui ont un territoire plus vaste et s'accaparent plus de femelles. Par contre, si les oranges étaient en majorité, les jaunes pourraient facilement se reproduire avec des femelles non surveillées par les oranges. Ces lézards sournois se développeraient donc rapidement. Enfin, si les lézards jaunes étaient en majorité, ils favoriseraient l'apparition des bleus, qui ne s'occupent que d'une femelle et peuvent ainsi repousser les jaunes qui essayeraient de s'en approcher.

Cette situation s'apparente donc à un jeu de pierre-feuille-ciseaux, où aucune des trois stratégies n'est dominante. Au jeu de pierre-feuille-ciseaux, nous avions vu qu'à l'équilibre, il fallait choisir au hasard sa stratégie parmi les trois possibilités. Pour les lézards, il y a aussi un équilibre en stratégies mixtes : les trois types de lézards cohabitent entre eux, et si un type devient minoritaire, il dispose d'un avantage sur les deux autres types, ce qui lui permet d'augmenter en proportion.

Lorsqu'il entendit parler de cette histoire, John Maynard Smith (un des premiers biologistes à avoir utilisé la théorie des jeux pour étudier les interactions entre animaux) annonça à propos de ces lézards : « Ils ont lu mon livre ! »

Chapitre 19

Moscou en feu

Le raisonnement rétrograde

En 1812, Napoléon Bonaparte lance l'empire français dans la campagne de Russie contre le tsar Alexandre I^{er}. Sa Grande Armée est forte de 650 000 hommes, et avance rapidement dans le territoire russe. Napoléon arrive bientôt près de Moscou, et annonce à ses troupes le 7 septembre :

> « Soldats ! Voilà la bataille que vous avez tant désirée. Désormais, la victoire dépend de vous ; elle nous est nécessaire, elle vous donnera l'abondance, de bons quartiers d'hiver et un prompt retour dans la patrie. »

La bataille de la Moskova sera l'une des plus sanglantes de l'histoire napoléonienne, avec plus de 50 000 morts chez les Français et les Russes. Le lendemain, Koutousov, chef de l'armée russe, décide d'évacuer Moscou, laissant l'empereur continuer son avancée. Napoléon s'établit le 15 septembre au Kremlin.

Néanmoins, lors de la première nuit d'occupation française, un feu éclate à Moscou, et ravage la ville pendant plusieurs jours. Le gouverneur de Moscou, Fédor Rostopchine, avait ordonné à un petit détachement de police de déclencher des incendies dans les maisons de bois de la capitale russe.

À la fin de l'incendie, près des quatre cinquièmes de Moscou sont en cendres : Napoléon est contraint de quitter la ville, et c'est le début de la retraite de Russie. La Grande Armée en déroute est harcelée par des escarmouches russes et la maladie, le froid, le manque de vivres déciment les troupes napoléoniennes. Moins de 30 000 hommes reviendront en France après l'hiver 1812. Les bons quartiers d'hiver et le retour à la patrie promis par l'empereur à la Moskova auront été une illusion pour l'immense majorité de l'armée napoléonienne.

Lorsque nous avons décrit ce qu'était la théorie des jeux, nous avions dit qu'elle consistait à résoudre des problèmes à la manière d'un joueur d'échecs : il s'agit de prendre des décisions rationnelles pour maximiser son gain. Par ailleurs, il est indispensable de prendre en compte les choix de son adversaire pour prendre les meilleures décisions.

Néanmoins, il y a une énorme différence entre le jeu d'échecs et les jeux que nous avons étudiés jusqu'ici. Au jeu d'échecs, les joueurs jouent tour à tour, et non pas en même temps comme dans les jeux que nous avons étudiés jusqu'alors.

Lorsque deux joueurs jouent aux échecs, celui qui joue les blancs doit commencer par choisir parmi vingt coups possibles, celui qui joue les noirs doit ensuite répondre à ce coup, lui aussi choisissant parmi vingt possibilités.

Ensuite, selon les coups joués par les uns et les autres, chaque joueur aura, tour à tour, le choix parmi un nombre limité de possibilités, et le meilleur coup sera fonction de tous les coups joués auparavant : l'ordre dans lequel les pièces sont avancées est donc crucial. Nous allons maintenant nous intéresser à des jeux qui ressemblent beaucoup plus aux échecs, où les joueurs choisissent alternativement de jouer tel ou tel coup.

Partons de l'histoire de la retraite de Russie pour expliquer un concept majeur de la théorie des jeux : le raisonnement rétrograde.

Après la bataille de la Moskova, le général en chef Koutousov doit décider d'une stratégie pour pousser l'empereur à battre en retraite et quitter Moscou : en particulier, il peut ordonner de mettre le feu à la ville pour priver la grande armée de toits et de nourriture.

L'empereur peut de son côté choisir de poursuivre Koutousov dans les terres russes ou de rentrer en France. Si Moscou brûle, Napoléon n'aura pas le temps de rassembler correctement son armée et aura du mal à battre les armées russes. De leur côté, les Russes n'ont pas intérêt à réduire en cendres leur ville. Selon les choix des deux généraux, on donne dans le tableau suivant des issues pour la campagne de Russie[a] :

a Il est clair que l'histoire militaire de la campagne de Russie ne peut se résumer à ce petit tableau, qui sert simplement d'illustration. Néanmoins, les concepts stratégiques que nous tirerons de l'analyse de celui-ci sont bel et bien utilisés par les hommes de guerre.

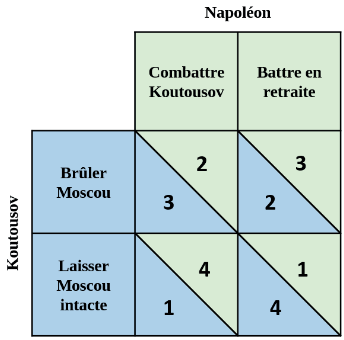


Figure 21.1 : Une représentation simple du jeu Napoléon à Mouscou où les choix sont simultanés.

L'issue que Napoléon préfère est celle où il peut réorganiser son armée à Moscou pour combattre Koutousov. L'issue qu'il veut éviter à tout prix est celle que les Russes préfèrent : la retraite alors que Moscou reste intacte. Néanmoins, si Moscou brûle, Napoléon aura de grandes difficultés à battre Koutousov, la retraite sera alors un meilleur choix. En observant ce tableau, on ne trouve pas d'équilibre de Nash : comme dans l'affrontement entre Alexandre et Darius du chapitre précédent, chaque fois un des généraux regrettera son choix.

Néanmoins, ce tableau ne représente pas vraiment les possibilités des deux joueurs. En effet, Napoléon met du temps pour rassembler son armée avant de partir combattre les Russes ou de battre en retraite, alors que Koutousov peut choisir sa stratégie dès que Napoléon entre dans Moscou. Dans les faits, Koutousov fait le choix de brûler ou de ne pas brûler Moscou, et Napoléon choisit ensuite sa stratégie en réaction à celle des Russes. Les deux généraux ne font pas leurs choix simultanément, mais séquentiellement. Plutôt que représenter ce jeu par un tableau, nous pouvons tracer le schéma suivant :

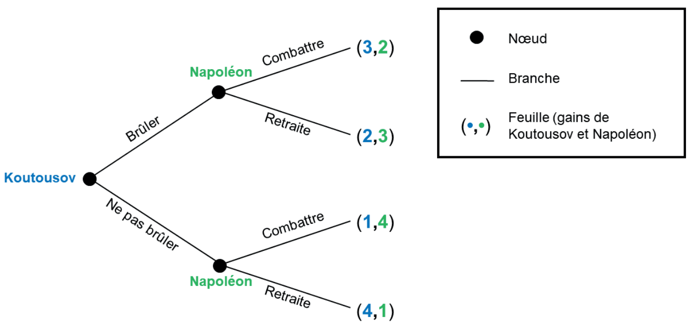


Figure 21.2 : Le même jeu, mais avec des choix séquentiels.

Une telle figure s'appelle un **arbre de décision**. Dans un tel arbre, on a des **nœuds**, qui correspondent à une étape du jeu, des **branches**, qui correspondent à des choix possibles pour un joueur, et à l'extrémité de l'arbre, on trouve des **feuilles**, qui donnent les gains obtenus par les joueurs. On parle de représentation du jeu sous **forme extensive**, alors que la représentation en tableau est appelée **forme normale**. La forme normale est particulièrement utile lorsque les joueurs font leurs choix simultanément, comme au jeu de pierre-feuille-ciseaux par exemple. La forme extensive est, elle, largement utilisée dans l'analyse de jeux séquentiels.

D'abord, c'est Koutousov qui doit faire le choix de brûler ou de ne pas brûler Moscou (au premier nœud). Puis Napoléon observe le choix de Koutousov (il se trouve alors à l'un de ses deux nœuds) et prend sa décision de combattre ou de battre en retraite (il choisit une branche). Quel choix doit faire Koutousov ? L'idéal pour lui serait de ne pas brûler Moscou tout en espérant une retraite de l'empereur, mais en brûlant la ville, il écarte la pire issue possible, si Napoléon l'attaque en ayant eu largement le temps de se préparer.

Comme nous l'avons mis en avant dans les chapitres précédents, pour faire les meilleurs choix, le général russe doit se mettre à la place de son adversaire, pour anticiper ses mouvements. Si jamais Koutousov décide de brûler Moscou, Napoléon aura le choix entre le combat avec Koutousov, lui donnant un gain de 2, et la retraite, lui donnant un gain de 3. Le choix des Français sera donc de battre en retraite. De même, si les Russes laissent Moscou intacte, les Français obtiendront un gain de 4 en attaquant Koutousov et ne choisiront pas de battre en retraite, car cette stratégie leur donne un gain bien inférieur. Koutousov sait donc que les Français ne choisiront jamais deux stratégies : combattre lorsque Moscou brûle, et battre en retraite s'ils peuvent s'y réfugier. On peut donc ignorer les branches qui correspondent à ces choix des Français. Sur l'arbre suivant, elles sont marquées en pointillé.

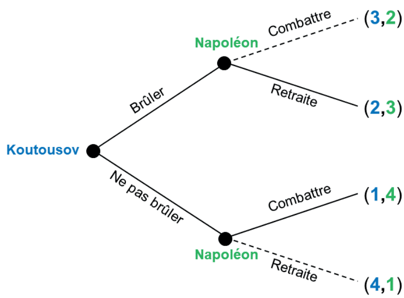


Figure 21.3 : Napoléon élimine dans les deux cas ses stratégies dominées.

En anticipant les choix français, Koutousov sait maintenant ce qui l'attend s'il choisit l'une ou l'autre stratégie :

- S'il décide de brûler la ville, les Français battront en retraite, donnant aux Russes un gain de 2 ;
- S'il laisse la ville intacte, Koutousov se fera attaquer, et son gain sera de 1.

Les Russes choisissent donc de brûler Moscou, privant les Français d'un abri et les poussant à rentrer en France dans des conditions impitoyables. Grâce à cette politique dite de la terre brûlée, les Russes imposèrent à Napoléon une des défaites militaires les plus cinglantes de son règne, précipitant la fin du Premier Empire.

Figure 21.4 : L'incendie de Moscou, Viktor Mazourovski.

Ce qu'il faut retenir de cet exemple n'est pas que Napoléon aurait dû anticiper l'incendie de Moscou, mais le raisonnement à effectuer lors de l'analyse d'un jeu séquentiel. Pour choisir une stratégie dans de tels jeux, il faut avoir plusieurs coups d'avance, et imaginer les réactions de ses adversaires à chacun des choix que l'on pourrait faire : on parle de raisonnement rétrograde. Au jeu d'échecs, pour faire un choix entre la multitude de coups possibles, il faut penser à la réaction de votre adversaire face à chaque coup, sachant qu'il fera lui-même son choix en fonction de toutes vos réactions possibles face à son choix, etc.

L'opposition entre Napoléon et Koutousov était un jeu assez simple, où chaque joueur n'a qu'un seul choix à faire parmi deux possibilités, et le raisonnement rétrograde est très simple à effectuer. Aux échecs, les joueurs doivent faire un grand nombre de choix, chaque fois parmi de multiples possibilités : le raisonnement devient alors beaucoup plus compliqué, et il est quasiment impossible de le mener jusqu'au bout. Néanmoins, dans des situations plus simples, le raisonnement rétrograde permet des analyses intéressantes : nous allons voir comment l'utiliser dans les prochains chapitres.

Chapitre 20

Guerre et paix

Biais psychologiques

En 1965, des troupes américaines sont déployées au Viêt Nam pour soutenir le sud Viêt Nam proaméricain contre le nord Viêt Nam communiste. Le but de la manœuvre était d'empêcher la propagation du communisme dans le Sud-Est asiatique, et d'éviter qu'une ribambelle de pays tombent dans le giron de l'URSS par un effet domino.

Durant les premières années de la guerre, les États-Unis s'engagent de plus en plus dans le conflit, et finissent par s'enliser. Après quelque temps, les Américains savaient qu'ils ne pouvaient remporter la guerre. Les Américains avaient le choix de se replier rapidement en subissant ainsi un sérieux revers, ou de continuer la guerre sans perdre la face, mais en sachant qu'elle était perdue d'avance. In fine, il fallait choisir entre une défaite maintenant et une défaite plus tard… Néanmoins, c'est cette dernière option que les Américains ont choisie : en 1973, le retrait des troupes américaines est décidé. Plus de 3,5 millions de jeunes Américains auront été envoyés au front, près de 60 000 d'entre eux seront tués, et bien d'autres mutilés. La guerre du Viêt Nam constitua la première grande défaite militaire américaine, et entacha sérieusement l'image du pays.

Continuer une guerre perdue d'avance semble être complètement irrationnel : c'est pourtant ce qui s'est passé au Viêt Nam dans les années 1970, puis dans les années 2000 lors de l'engagement militaire américain en Irak. Dans les deux cas, la même rhétorique aura été utilisée pour justifier la poursuite du combat : trop de moyens ont déjà été engagés, se replier maintenant voudra dire que les centaines de soldats tués et les milliards de dollars dépensés l'auront été pour rien.

En 2006, lors d'une allocution aux troupes américaines, le président américain Georges W. Bush annonce à ses soldats :

> « Je vais vous faire cette promesse. Je ne permettrai pas le sacrifice des 2527 hommes qui sont morts en Irak d'être en vain, en se retirant avant que le travail soit fini[66]. »

Au moment du discours, l'Irak s'enlise dans une guerre civile sanglante, et les pertes américaines augmentent : les États-Unis déploreront près de 4500 morts lorsque le dernier soldat américain quittera le pays en 2011.

Si des raisons politiques permettent d'expliquer en grande partie la difficulté américaine à se retirer d'un théâtre d'opérations enlisé, les événements du Viêt Nam et d'Irak sont caractéristiques d'un biais psychologique bien connu des économistes : le biais des coûts irrécupérables. Lorsque nous nous sommes engagés sur une voie qui s'avère finalement mauvaise, nous avons des difficultés à nous en séparer.

Imaginez par exemple que vous ayez acheté un billet non remboursable pour un concert d'été. Lorsque le soir du concert arrive, vous vous apercevez que vous n'avez pas tellement envie d'y aller : il pleut, vos amis ne peuvent pas vous y accompagner, et vous n'avez pas envie de rester debout pendant des heures à écouter une musique trop forte. Vous préféreriez largement rester à la maison regarder la télévision assis tranquillement sur un canapé. Néanmoins, il y a des chances que vous soyez quand même tenté d'aller au concert, pour « rentabiliser » le prix du billet : vous l'avez acheté, autant ne pas le « gâcher ». Un tel raisonnement est irrationnel : à ce stade, vous avez deux choix : passer une bonne soirée chez vous ou aller à un concert auquel vous n'avez pas envie d'aller. Comme vous avez déjà payé le billet, les deux options ont le même coût (nul), mais l'une vous fait plus plaisir que l'autre. Comme l'achat du billet est un coût passé, irrécupérable, il ne doit pas intervenir dans la prise de la meilleure décision.

Néanmoins le biais psychologique des coûts irrécupérables nous pousse à persévérer là où on a déjà engagé des moyens. Certains continuent à fréquenter des amis de longue date même s'ils n'éprouvent plus de plaisir à passer du temps avec eux : comme ils ont déjà investi du temps pour cette relation, ils ont tendance à la continuer même si elle n'est qu'une perte de temps. De même, des personnes qui ont perdu de l'argent au casino peuvent continuer à jouer en pensant pouvoir récupérer ce qu'ils ont déjà perdu, alors que le meilleur choix (d'un point de vue financier) est de déguerpir au plus vite !

Ce biais psychologique n'est pas le seul : il en existe des dizaines. On peut citer par exemple l'effet de halo, qui consiste à voir sélectivement ce qu'on cherche à voir, le biais de confirmation, où l'on prend en compte les éléments qui confirment une hypothèse plus que ceux qui l'infirment, ou encore l'effet Ikea, qui consiste à donner plus de valeur aux produits que l'on a partiellement créés (un effet largement mis à contribution par le constructeur suédois).

Quel rapport entre les biais psychologiques et la théorie des jeux? La théorie des jeux est l'étude des relations entre individus lorsque ceux-ci se comportent de manière rationnelle, or dans la réalité, c'est loin d'être toujours le cas. Pour bien analyser les résultats de la théorie des jeux, et comprendre pourquoi ils ne s'appliquent pas toujours parfaitement à la réalité, il est essentiel de bien connaître les mécanismes psychologiques qui font que nous n'agissons pas toujours de façon rationnelle.

Les théoriciens des jeux se basent sur deux hypothèses importantes lorsqu'ils établissent des modèles :

- on considère que les joueurs cherchent à maximiser leur gain;
- on considère que les joueurs sont tous rationnels, savent que les autres joueurs sont tous rationnels, savent que les autres joueurs savent que tous les joueurs sont rationnels, etc. Quand on dit qu'un individu est rationnel, on sous-entend qu'il est capable d'anticiper parfaitement les mouvements des autres joueurs lorsque ceux-ci maximisent leur gain.

Ces hypothèses ne sont pas complètement tirées par les cheveux, mais il faut être conscient de leurs limites.

S'il paraît évident qu'un individu normalement constitué cherche à maximiser son gain, la notion de gain reste assez difficile à définir. En économie, le «gain», ou **l'utilité**, est une mesure de la satisfaction ou du bonheur. Lorsqu'on étudie des situations où interviennent des échanges d'argent, on peut être tenté d'assimiler le gain à l'argent engrangé. Or, comme le dit l'adage, l'argent ne fait pas le bonheur, et souvent, nous ne nous comportons pas de manière à maximiser l'argent que l'on gagne. Une étude menée en Autriche montre par exemple que l'intention de donner ses organes baisse très significativement lorsqu'on propose un dédommagement financier aux potentiels donneurs[67].

En effet, les donneurs d'organe font ce geste par altruisme, et faire du don d'organe un «achat» d'organe dénature cette action. Il faut donc faire attention dans les modèles de théorie des jeux à ce qui est sous-entendu lorsqu'on décrit les gains des différents joueurs. Lorsqu'on analyse le comportement d'entreprises dont le but est de gonfler leur profit au maximum, calculer les gains en termes strictement monétaires n'est pas une trop grande approximation. Néanmoins, il faut se souvenir que les gains des joueurs peuvent être plus difficiles à quantifier dans des relations humaines complexes.

Par ailleurs, l'hypothèse selon laquelle les joueurs sont tous rationnels est loin d'être vérifiée : comme nous l'avons vu, de nombreux biais psychologiques font que nous prenons des décisions irrationnelles. Les modèles simples de théorie des jeux peuvent ne pas se révéler pertinents à cause de tels biais. De même, si dans un jeu vous considérez que vos adversaires ne sont pas rationnels, il peut être tout à fait rationnel de prendre une décision qui ne correspond pas à un équilibre de Nash.

C'est ce qui peut se passer si on vous propose de jouer au jeu des 2/3 utilisé pour modéliser le concours de beauté de Keynes. Maintenant que vous lisez ce livre, vous savez bien que l'équilibre de Nash de ce jeu est la situation dans laquelle tous les joueurs répondent 0. En d'autres termes, des joueurs rationnels qui savent que tous les joueurs sont rationnels savent que tous les joueurs savent que tous les joueurs sont rationnels, etc. répondront tous 0. Néanmoins, si on vous propose de jouer à ce jeu contre des personnes qui ne connaissent pas la théorie des jeux, vous ne répondrez sans doute pas 0, car vous savez que vos adversaires ont peu de chances de répondre 0. Même si vous jouez contre des personnes qui connaissent tous bien le jeu, mais qui ne savent pas que leurs adversaires le connaissent, il est quasiment certain que la plupart des joueurs ne répondra pas 0. Lorsqu'on analyse les conclusions d'un modèle de théorie des jeux, il faut donc se poser la question de la rationalité des joueurs, et des informations que les joueurs détiennent sur leurs adversaires.

Une dernière chose à propos des hypothèses mentionnées ci-dessus : ici, nous n'avons considéré que des situations dans lesquelles les joueurs connaissent parfaitement le jeu auquel ils jouent : en particulier, ils connaissent les gains obtenus par tous les joueurs en fonction des stratégies jouées par chacun d'entre eux. Cette hypothèse peut paraître très contraignante, dans la mesure où on ne connaît pas en général les préférences de ceux avec qui nous avons des interactions. Il faut savoir que la théorie des jeux permet d'enlever cette contrainte, en ajoutant dans les modèles la notion d'information : on peut en plus de stratégies assigner à chaque joueur les informations dont il a connaissance, et lui donner des croyances à propos des préférences des autres joueurs[a]. Néanmoins, ces modèles

a On parle de jeux bayésiens.

sont plus complexes et nous ne les aborderons pas ici. Nous allons maintenant voir un autre jeu célèbre de la théorie des jeux : le jeu du mille-pattes. Grâce à ce jeu, nous allons voir qu'il y a parfois un écart important entre les prédictions théoriques et la réalité.

Charles et Lucie se racontent des secrets : ils en ont chacun deux qu'ils peuvent décider de dévoiler ou non, tour à tour. Si l'un des deux joueurs refuse de révéler un secret, le jeu s'arrête. Lorsque Charles et Lucie annoncent un secret, cela leur coûte 1, mais connaître un des secrets de l'autre leur donne un gain de 2. On a l'arbre de décision suivant, en imaginant que Charles commence :

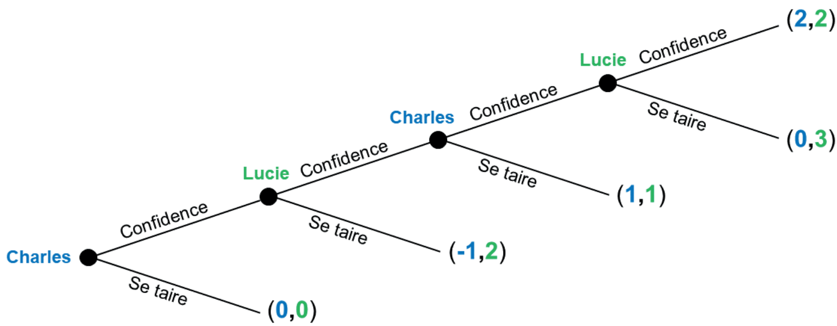


Figure 22.1 : Le jeu du mille-pattes.

La situation optimale pour les deux joueurs semble être la situation où ils révèlent tous les deux leurs secrets, et où ils engrangent tous deux un gain de 2. Si Charles et Lucie jouent rationnellement, coopéreront-ils pour atteindre cette issue ?

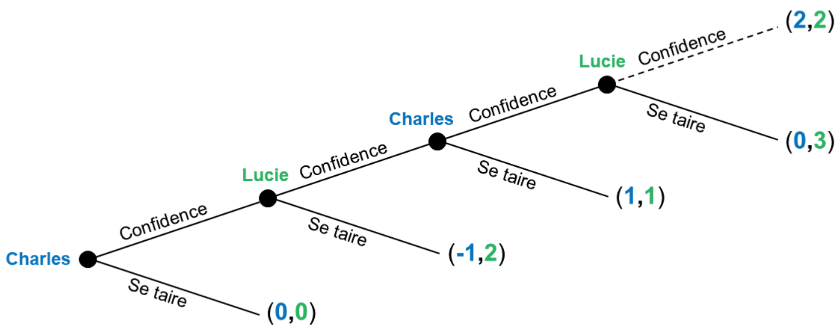


Figure 22.2 : Lors d'un raisonnement rétrograde, on commence par la fin du jeu en éliminant les stratégies dominées.

Charles joue en premier : s'il refuse de partager son premier secret, il ne pourra pas connaître les secrets de Lucie, mais s'il fait une confidence à celle-ci sans qu'elle lui donne rien en retour, il regrettera son choix. Pour prendre la meilleure décision, Charles doit se mettre à la place de Lucie, qui est confrontée à un dilemme similaire… Pour résoudre le jeu, imaginons qu'aux trois premiers tours, Charles et Lucie aient décidé de révéler leurs secrets, et intéressons-nous à ce qui pourrait se passer au dernier tour, lorsque Lucie décide de révéler ou non son second secret. Si elle fait sa confidence, elle gagnera un gain de 2, alors qu'elle engrange un gain de 3 en se taisant. Si Lucie joue de façon rationnelle, elle décidera donc de ne pas faire sa seconde révélation (révéler son second secret est une stratégie dominée). Si Charles pense que Lucie jouera ainsi, il peut donc ignorer dans l'arbre cette branche, et c'est alors lui qui prendra la dernière décision importante : choisira-t-il de révéler son deuxième secret ?

En ayant éliminé la dernière branche de l'arbre et en anticipant que Lucie ne coopérera pas au dernier tour, Charles a lui aussi intérêt à ne pas donner son deuxième secret : il empochera un gain de 1, supérieur au gain nul qu'il recevrait en faisant sa confidence. Si elle anticipe ce comportement de la part de Charles, que fera donc Lucie au deuxième tour ? Elle sait que Charles finira le jeu au tour suivant, et élimine toutes les autres possibilités dans l'arbre :

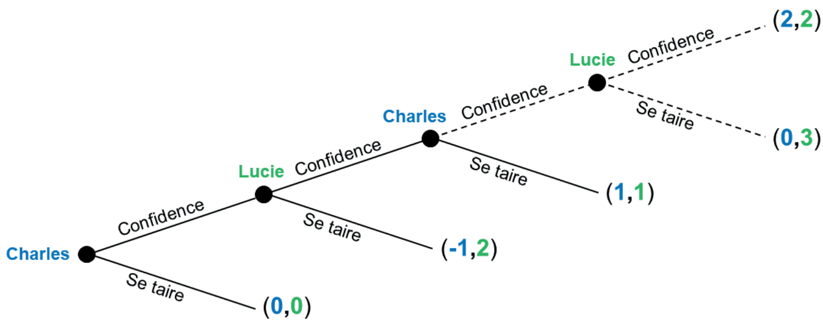


Figure 22.3 : Après s'être intéressé à la dernière étape du jeu, on analyse à la précédente.

En faisant ce raisonnement et anticipant que Charles finira le jeu au troisième tour, Lucie sait qu'elle n'a pas intérêt à révéler son premier secret.

Charles, qui anticipe ce comportement, décide donc de ne pas faire sa première confidence et termine le jeu au premier tour : finalement, on peut anticiper que les deux joueurs resteront muets, alors qu'ils auraient gagné à se raconter leurs secrets.

Cet exemple permet de bien montrer le principe du raisonnement rétrograde : pour déterminer l'issue d'un jeu séquentiel, on peut éliminer successivement les stratégies dominées des différents joueurs, en partant de la fin du jeu, et en remontant petit à petit l'arbre : c'est pour cela que ce raisonnement est dit « rétrograde ».

Il existe en théorie des jeux de nombreuses versions de ce jeu. Ici, on l'étudie avec quatre tours seulement, mais il existe des versions du jeu avec beaucoup plus de tours : l'arbre de décision ressemble alors à un mille-pattes (d'où le nom du jeu). Quel que soit le nombre de tours, un raisonnement rétrograde montre que le jeu se terminera au premier tour, si les joueurs jouent de manière rationnelle.

Si la théorie des jeux prédit que Charles décidera d'arrêter le jeu au premier tour, qu'en est-il de la réalité ? Pour le savoir, les économistes font des expériences : ils prennent un groupe de personnes associées par paires, et ils les font jouer à ce jeu du mille-pattes. Il ne s'agit alors pas de faire des confidences ou de se taire, mais de gagner de l'argent : à chaque tour, les joueurs décident de continuer le jeu ou non, et à la fin du jeu, les joueurs gagnent une somme d'argent plus ou moins grande. Dans les années 1990, des chercheurs américains ont fait jouer des étudiants au jeu suivant[68] :

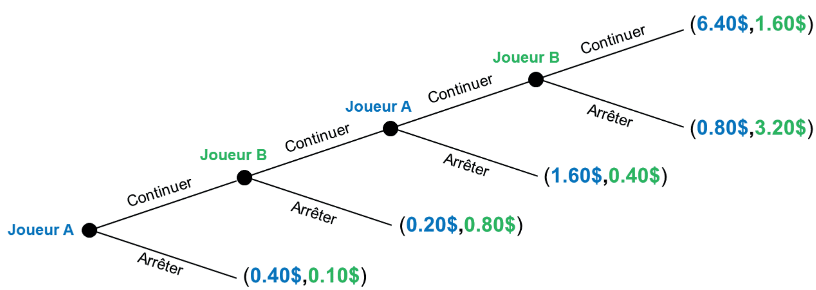


Figure 22.4 : Une expérience réelle du jeu du mille-pattes.

C'est exactement la même configuration que le jeu précédent : à chaque étape, les étudiants avaient le choix de continuer le jeu ou de l'arrêter, et à la fin du jeu, ils gagnaient la somme indiquée sur la feuille qu'ils avaient atteinte.

Que se passe-t-il ? Les prévisions de la théorie des jeux sont-elles observées dans les faits ? Si c'était le cas, on devrait voir le premier joueur systématiquement arrêter le jeu à son premier tour.

Dans les faits, ce n'est pas ce qui se passe… Cette prévision de la théorie des jeux ne se concrétisait que dans 7 % des cas, et dans 25 % des cas, le jeu atteignait la dernière feuille, c'est-à-dire que le joueur B décidait à son dernier tour de gagner 1,60 $ au lieu de 3,20 $ pour que son adversaire puisse empocher 6,40 $. Néanmoins, lorsque les chercheurs ont augmenté la quantité d'argent en jeu, les joueurs étaient plus prompts à arrêter le jeu. Par ailleurs, plus le jeu avançait, plus les joueurs avaient tendance à l'arrêter, prenant conscience du fait qu'ils risquaient de perdre de l'argent s'ils continuaient à jouer trop longtemps.

Que dire de ce résultat ? D'abord, il est plutôt heureux, dans la mesure où les joueurs coopèrent plus que ce qui est prévu par la théorie. Par contre, il pose problème pour la théorie des jeux : dans certains jeux, les joueurs ne se comportent pas du tout comme la théorie le prédit. Cela veut-il dire que la théorie des jeux ne vaut rien, que tous les modèles présentés jusqu'ici sont à jeter, car ils ne représentent pas la réalité ?

Comme nous l'avons vu, il faut faire attention lorsqu'on analyse les résultats de la théorie des jeux. Tout d'abord, dans cette expérience, nous avons assimilé le gain monétaire au gain « de satisfaction » du joueur : comme nous l'avons vu, l'argent ne fait pas toujours le bonheur. Dans le cas du mille-pattes, les joueurs peuvent donner une valeur à la coopération : le fait de continuer le jeu et d'aider l'adversaire à gagner de l'argent peut constituer en soi un gain pour le joueur, rendant alors complètement rationnelle la coopération. Cela explique pourquoi dans un quart des cas, la dernière feuille du jeu a été atteinte : pour un joueur tout à fait égoïste, une telle décision est tout à fait irrationnelle, mais pour un joueur qui veut maximiser la somme des deux gains (le sien et celui de son adversaire), c'est un choix naturel.

Par ailleurs, il est fort possible que les joueurs de l'expérience ne comprennent pas au début du jeu qu'ils risquent de perdre de l'argent s'ils n'arrêtent pas le jeu rapidement : si le raisonnement rétrograde n'est pas très complexe dans ce cas, le résultat de ce raisonnement est assez contre-intuitif. Par ailleurs, si vous êtes tout à fait conscient du résultat de la théorie des jeux, mais que vous pensez que votre adversaire est altruiste ou ignorant, continuer le jeu peut être le meilleur choix à faire. Dans une expérience économique, on a fait jouer des joueurs d'échecs professionnels et des étudiants au jeu du mille-pattes. Les résultats montrent que les joueurs d'échecs ont tendance à terminer le jeu beaucoup plus tôt que les autres joueurs, et se comportent ainsi comme prévu par la théorie des jeux. La différence de comportement observée entre les joueurs d'échecs et les étudiants peut s'expliquer par le fait qu'au jeu d'échecs, l'anticipation rationnelle des coups adverses par raisonnement rétrograde est essentielle pour remporter la partie[69]. Les étudiants qui avaient au contraire moins l'habitude de faire de tels raisonnements avaient plus tendance à coopérer.

Chapitre 21

Pris en otage

Problèmes de crédibilité

L'histoire de la stratégie militaire subit l'un de ses plus grands tournants le 6 juin 1945 lorsque la ville portuaire nipponne d'Hiroshima est presque intégralement rasée par la bombe *Little Boy*. Le monde entre alors dans l'ère nucléaire : à la conférence de presse de la Maison-Blanche sur le premier bombardement atomique, Truman annonçait :

> « La force d'où le soleil tire sa puissance a été lâchée contre ceux qui ont déclenché la guerre en Asie. […] S'ils n'acceptent pas maintenant nos conditions, ils doivent s'attendre à un déluge de destructions comme il n'en a jamais été vu de semblable sur cette Terre. »

Avant l'apparition de la bombe atomique, la stratégie militaire tournait essentiellement autour de l'idée de défense : comment utiliser ses moyens pour empêcher l'adversaire de prendre ce qui nous appartient ? Avec l'arme atomique, l'enjeu central devient la dissuasion : il s'agit désormais d'ôter à l'ennemi l'envie de nous attaquer, par crainte d'une riposte particulièrement destructrice.

D'un point de vue purement stratégique, le concept n'est pas nouveau : il se rapproche de la tradition millénaire des prises d'otages. Les otages sont pris pour dissuader un adversaire de mener une action hostile. Ainsi, lors de la Seconde Guerre mondiale, l'Allemagne nazie avait pour politique dans ses territoires occupés d'exécuter des otages en grand nombre si un soldat allemand était tué par la résistance locale[a].

Dans les rues de Varsovie en 1944, on pouvait ainsi voir placardée dans les rues l'affiche suivante, qui annonce l'exécution de cent otages à la suite de la mort de deux soldats allemands[b].

---

a Cette politique a été en partie initiée par le décret « Keitel » qui préconise l'exécution de jusqu'à cent « communistes » par soldat allemand tué.

b L'affiche annonce : « Avis. Malgré des avertissements répétés, le 1er février 1944, des éléments criminels de l'organisation secrète PZP à la solde de l'Angleterre, ont à nouveau commis une attaque ignoble et sournoise dans laquelle deux Allemands

Figure 23.1 : Affiche nazie, Varsovie (1944).

Les prisonniers pris en otage par les nazis constituaient pour ces derniers une protection : en menaçant la résistance de représailles totalement disproportionnées (et en l'exécutant parfois pour montrer que la menace était bien réelle), les nazis dissuadaient leurs adversaires de toute attaque.

Tout comme le but d'une prise d'otage n'est pas de tuer les otages faits prisonniers, la bombe atomique n'est pas faite pour être utilisée. Elle n'est utilisée que comme menace, qui ne serait exécutée qu'en cas d'agression. Lorsqu'un État détient la bombe atomique et est capable de détruire ses ennemis, tout se passe à peu près comme les habitants des pays ennemis étaient des otages, qui seraient exécutés en cas d'agression.

Cette politique a largement été employée pendant la guerre froide, épisode de l'histoire pendant lequel la menace nucléaire a souvent été proférée. Début 1954, le secrétaire d'État américain John Dulles lança une doctrine qui porte son nom, et qui ancre la dissuasion nucléaire dans la politique militaire américaine. Il annonce dans un discours sa stratégie pour combattre l'extension de la sphère d'influence soviétique :

> « Il n'est pas économiquement soutenable, ou une bonne politique étrangère, de soutenir de façon permanente d'autres

---

ont perdu la vie. La cour martiale de la police de sécurité et des services de sécurité a donc pris la décision d'exécuter publiquement à Varsovie le 2 février 1944 cent membres du PZP faits prisonniers pour des délits politiques et qui devaient être graciés. » Traduction de l'auteur.

> pays ; car à long terme, cela crée autant de mauvaise volonté que de bonne volonté. […] Nous avons besoin d'alliés et d'une sécurité collective. Notre intention est de rendre ces relations plus efficaces, moins coûteuses. Ceci peut être fait en recourant plus au pouvoir dissuasif et nous appuyant moins sur la défense au niveau local. […] La défense locale doit être renforcée par le pouvoir de dissuasion de représailles massives[70]. »

Dans les années qui suivirent, les Américains et les Soviétiques n'hésitèrent pas à menacer de l'apocalypse nucléaire le bloc ennemi si celui-ci faisait un pas de trop de l'autre côté du rideau de fer. Le 22 octobre, le président Kennedy annonce dans un discours devenu célèbre qu'il impose un blocus autour de Cuba pour empêcher des navires soviétiques d'y apporter des charges nucléaires. Il annonce par ailleurs :

> « Toute fusée nucléaire lancée à partir de Cuba, contre l'une quelconque des nations de l'hémisphère occidental, sera considérée comme l'équivalent d'une attaque soviétique contre les États-Unis, attaque qui entraînerait des représailles massives contre l'Union soviétique. »

De même, lorsque l'URSS menaça en 1958 d'intégrer la petite enclave occidentale de Berlin-Ouest au sein de la RDA communiste, les Américains annoncèrent qu'ils enverraient leurs bombes détruire l'URSS si les chars soviétiques dépassaient la ligne rouge.

Pendant cette période, le chef soviétique Khrouchtchev aurait annoncé : « Pourquoi 200 millions de personnes devraient-elles mourir pour 2 millions de Berlinois[71] ? ». En 1959, Khrouchtchev annonça par ailleurs à un diplomate américain : « Vos généraux parlent de maintenir votre position à Berlin par la force. C'est du bluff[72]. »

Le problème soulevé ici par Khrouchtchev est le problème de la crédibilité de la menace nucléaire. Nous allons à présent étudier ce problème grâce à la théorie des jeux.

Le problème de Berlin-Ouest peut se résumer (de façon simpliste) de la manière suivante : les Soviétiques ont le choix d'envahir Berlin, ou de respecter le statu quo. Le statu quo n'apporte de gain ni aux Soviétiques, ni aux Américains. En revanche, une invasion soviétique de Berlin appelle à une riposte américaine : soit une riposte mesurée, soit le déclenchement d'une guerre nucléaire. Une riposte mesurée américaine ferait certainement du mal aux Russes, mais ceux-ci sortiraient vainqueurs de l'épisode, ayant prouvé que la couverture nucléaire américaine ne sert pas à grand-chose, et ayant unifié Berlin sous drapeau soviétique. En revanche, le déclenchement d'une guerre nucléaire est la pire issue que les deux parties peuvent imaginer.

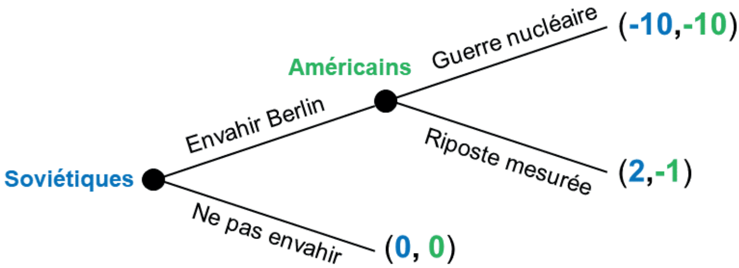


Figure 23.2 : Une modélisation simple de la crise de Berlin.

Comment se comportent les Américains et les Soviétiques dans ce jeu ? Pour le savoir, procédons par raisonnement rétrograde, et commençons par voir ce qui se passe à la dernière étape possible du jeu. Si les Soviétiques envahissent Berlin, les Américains ont le choix entre la guerre nucléaire, qui leur rapporte un gain de (-10), et une riposte plus mesurée, pour un gain de (-1). Le meilleur choix pour les Américains semble donc être de ne faire qu'une riposte mesurée. C'est sans doute ce que Khrouchtchev sous-entend lorsqu'il se demande « pourquoi 200 millions de personnes devraient-elles mourir pour 2 millions de Berlinois ? »

Sachant cela, les Soviétiques doivent désormais décider d'envahir Berlin ou non : le statu quo leur donne un gain nul, tandis qu'une invasion de Berlin leur donne un gain de 2 si les Américains décident d'une riposte mesurée, comme prévu par le raisonnement rétrograde. Il apparaît donc que les Soviétiques ont intérêt à envahir Berlin-Ouest.

Seulement, ils ne l'ont pas fait ! La crise de Berlin s'est terminée en 1961 par la construction du mur de Berlin, qui ne fut détruit qu'à la fin de la guerre froide… Il faut croire que la menace d'une riposte nucléaire américaine était tout de même une possibilité crédible, malgré l'impact dévastateur d'une telle attaque. Dans l'instabilité de la guerre froide, les escalades de violence poussèrent souvent le monde au bord de la catastrophe nucléaire, et au vu de la rhétorique violente utilisée par les leaders de l'époque, une attaque atomique ne paraissait pas invraisemblable. Certains commentateurs estimèrent que les escalades de violence qui marquèrent certains épisodes de la guerre froide faisaient partie d'une stratégie bien réfléchie : la stratégie du bord de l'abîme. Utiliser une rhétorique guerrière permet de rendre plus crédible une menace qui serait ignorée si elle était proférée par un interlocuteur apparemment calme et mesuré.

Le problème de la dissuasion nucléaire est particulièrement extrême : la perspective d'une guerre nucléaire est tellement effrayante qu'il est difficile d'être tout à fait rationnel lorsqu'on y réfléchit. Néanmoins, la question de la crédibilité de la menace nucléaire américaine fut un grand sujet de discussion lors de la guerre froide, et nous verrons un peu plus loin quelles furent les mesures prises par les deux blocs pour rendre leur menace crédible.

Par ailleurs, il n'est pas nécessaire d'aller chercher aussi loin que la guerre nucléaire pour trouver des menaces dont on peut douter de la crédibilité. Prenons l'exemple de parents qui adorent leur enfant : ils l'adorent tellement qu'ils refusent absolument de le rendre triste. Un jour où l'enfant est particulièrement agité, les parents le menacent : s'il n'arrête pas de chahuter, il sera privé de dessert ! Si l'enfant connaît bien ses parents, il peut anticiper ce qui se passerait s'il refusait de se calmer : ses parents préféreront le laisser faire que lui imposer une punition, qui leur fera de la peine autant qu'à lui. Il sait donc qu'il peut ignorer la menace parentale, celle-ci n'étant pas crédible.

Nous avons vu avec l'exemple de la guerre nucléaire que pour des raisons tout à fait compréhensibles, des joueurs pouvaient décider de se plier à des menaces même si celles-ci n'étaient pas tout à fait crédibles. Il y a également de nombreux exemples de situations dans lesquelles des menaces ont été exécutées, alors qu'il pouvait sembler irrationnel de le faire.

Nous avions déjà mentionné le cartel de l'OPEP. Lorsque les États-Unis se sont lancés dans la production de gaz de schiste, rendant le marché des hydrocarbures bien plus concurrentiel, les pays de l'OPEP ont largement augmenté leur production pour faire baisser les prix du pétrole, rendant le gaz de schiste peu rentable. Le but de l'OPEP était de dissuader les États-Unis d'investir dans le secteur pétrolier et ainsi de garder la maîtrise des hydrocarbures. Seulement, en faisant baisser les prix du pétrole, les membres de l'OPEP n'infligeaient pas seulement des dégâts aux entreprises pétrolières américaines, mais également à eux-mêmes. S'ils voulaient maximiser leurs profits dans le court terme, la meilleure décision aurait été pour eux d'accepter des prix légèrement réduits par la concurrence américaine.

Un autre choix apparemment irrationnel a été fait par l'Arabie saoudite en août 2018, lorsque la ministre canadienne des Affaires étrangères s'est alarmée sur Twitter du non-respect des droits de l'Homme dans le royaume. Immédiatement après cette déclaration, l'Arabie saoudite a gelé ses relations commerciales avec le Canada, des vols ont été annulés entre les deux pays, l'ambassadeur canadien en Arabie saoudite a été expulsé pour « ingérence » et le royaume a rappelé le sien du Canada. Cette décision peut sembler un peu extrême pour un simple tweet, et elle handicape légèrement l'Arabie saoudite à court terme : pour maximiser ses gains économiques, le royaume aurait mieux fait d'ignorer les quelques phrases de la ministre canadienne.

Pourquoi l'OPEP et l'Arabie saoudite ont-ils pris ces deux décisions qui leur ont été coûteuses ? Si dans ces deux cas, un comportement agressif a mené à des dommages financiers, ces choix permettaient à l'OPEP et au royaume d'établir une réputation d'intransigeance qui les protège contre de futures actions hostiles.

Si la chute des prix du pétrole a largement nui aux pays de l'OPEP pendant quelques années, la décision du cartel n'était pas nécessairement irrationnelle à long terme : en infligeant des dommages économiques aux États-Unis, les pays pétroliers se sont construit la réputation de protéger leur monopole, dissuadant d'autres pays qui voudraient se lancer dans la production de gaz de schiste de faire comme les États-Unis, et de prendre le risque de subir des dommages comme eux.

Par ailleurs, en montrant au monde qu'ils n'hésiteraient pas à nuire aux pays qui critiquent leur non-respect des droits de l'Homme, l'Arabie saoudite dissuade les autres nations de se lancer dans un plaidoyer pour les libertés fondamentales.

Parfois, des menaces a priori peu crédibles sont exécutées afin de les rendre plus crédibles dans le futur et de dissuader de potentiels adversaires. La menace nazie d'exécuter des dizaines de prisonniers pour chaque soldat allemand tué par des actions de résistance est sans doute apparue bien plus crédible aux habitants des pays occupés lorsque des centaines de prisonniers furent effectivement massacrés par la Wehrmacht.

Chapitre 22

Brûler les ponts derrière soi

Comment rendre une menace crédible?

> « Sache qu'à main droite des Indes il y a une île appelée Californie très proche du bord du paradis terrestre ; elle est peuplée de femmes noires, sans aucun homme parmi elles, car elles vivent à la façon des Amazones. Elles étaient belles et robustes, de valeur fougueuse et de grande force. L'île était grande, avec ses rochers escarpés. Leurs armes étaient toutes en or. Elles domptaient des animaux sauvages et leur mettaient des harnais. Dans toute l'île, il n'y avait aucun métal sinon de l'or[73]. »

C'est ainsi qu'on décrivait la Californie en 1510, à Séville. Les géographes du XVI^e^ siècle pensaient que la péninsule à l'ouest des États-Unis était séparée du reste du continent américain par une mer. Les Espagnols de l'époque savaient bien que cette description de l'écrivain Garci Rodriguez de Montalvo était romancée, mais ils croyaient que le Nouveau Monde regorgeait effectivement d'or. Déjà implantés à Cuba, les Espagnols envoyèrent des missions explorer d'autres territoires en vue de rapporter en Europe des cargaisons de métal précieux.

Parmi ces explorateurs des Amériques, il y a Hernán Cortès. Fin 1518, celui-ci quitte Cuba avec un petit millier d'hommes (soldats et marins) à la recherche de l'or qu'on lui a promis à l'Ouest. Après cinq mois de voyage, il arrive sur la côte est du Mexique actuel, aux limites de l'empire aztèque. Il y fonde une ville, Veracruz, et prépare une expédition pour entrer dans les terres de l'empire. Néanmoins, tous ses hommes ne le suivent pas : certains commencent même à se mutiner, et veulent rentrer chez eux à Cuba. Cortès sait que s'il part avec sa petite armée à l'intérieur des terres, les marins restés à Veracruz en profiteront pour prendre le large et retourner à Cuba. Sans base arrière pour le ravitailler, l'expédition serait un échec.

Cortès décide alors de barrer la route à ses marins : pour les empêcher de quitter Veracruz, il fait échouer ses navires. Bloqués au Mexique, les hommes de Cortès n'ont guère le choix que de soutenir son expédition : si celle-ci échoue, c'est une mort quasi assurée pour les marins.

Des biographes de Cortès voulant magnifier l'événement ont rapporté que le conquistador brûla ses navires avant de partir à la conquête du Mexique. Aujourd'hui, l'expression reste : lorsqu'on se barre la route volontairement, on « brûle ses vaisseaux ». Un tel comportement peut paraître irrationnel : pourquoi se priver de certaines options ? En rendant sa flotte inutilisable, Cortès rend son propre retour à Cuba difficile…

Pourtant, cette stratégie se révéla gagnante pour le conquistador : celui-ci put partir vers le centre du Mexique et entrer fin 1519 dans Tenochtitlan, la capitale de l'empire aztèque. Il faut dire qu'il fut aidé par un événement imprévu : les Aztèques, fascinés par les chevaux et les armes à feu amenés par Cortès au Mexique, pensèrent dans un premier temps que le conquistador était une incarnation de Quetzalcóatl, une divinité de la mythologie aztèque. Les autochtones laissèrent donc entrer Cortès au cœur de l'empire qu'il pilla de l'intérieur, tuant par la même occasion des milliers d'Aztèques dans des massacres particulièrement sanglants.

On trouve bien après l'histoire de Cortès un autre exemple de personnes s'étant barré la route de la fuite : au début au XXe siècle, les suffragettes, qui réclamaient le droit de vote des femmes en Angleterre, s'enchaînaient parfois à des grillages métalliques lors de manifestations, s'empêchant toute fuite en cas d'intervention de la police. Ce traitement d'apparence désagréable pouvait néanmoins jouer en faveur des manifestantes : les policiers, ne pouvant frapper quelqu'un qui ne présente clairement aucun danger, les épargnaient. Les suffragettes avaient également tout le temps de manifester leur mécontentement tandis que les forces de l'ordre s'affairaient à briser leurs chaînes. Pourquoi le fait de se barrer la route est-il une stratégie gagnante dans ces deux cas ?

Nous avons vu que pour arriver à ses fins, il pouvait être utile de menacer ses adversaires, mais qu'une difficulté pouvait rapidement survenir : de nombreuses menaces ne sont pas crédibles, car elles font du mal à celui qui profère la menace comme à celui qui la reçoit. En d'autres termes, il est difficile de s'engager à faire quelque chose qui va nous nuire, alors que d'autres options sont ouvertes. L'histoire de Cortès nous montre une solution disponible pour rendre une menace crédible : il suffit de rendre son exécution certaine.

Le moyen sans doute le plus utilisé pour s'engager à faire une chose ou une autre est le mécanisme des contrats : un contrat engage celui qui le signe, et le non-respect de ses clauses entraîne souvent des amendes ou des poursuites judiciaires. Néanmoins, on ne peut pas faire des contrats pour tout, surtout pour menacer un adversaire !

Reprenons le problème de la dissuasion nucléaire. Comment Kennedy aurait-il pu se prémunir à coup sûr d'une invasion de Berlin-Ouest ? Une des solutions possibles aurait été de mettre en place un mécanisme qui lancerait une riposte nucléaire automatique dès l'entrée d'un char en RFA, et d'en informer les Soviétiques. Sachant qu'un pas de trop de l'autre côté du rideau de fer reviendrait à une condamnation à mort, ils prendraient bien garde à rester à l'Est. Évidemment, un risque de défaillance technique trop élevé rend l'idée d'un tel dispositif totalement folle : néanmoins, elle est reprise par Stanley Kubrick dans son film de 1964, *Docteur Folamour*.

Dans le film, les Russes décident de mettre en place un mécanisme qui déclenche l'apocalypse nucléaire si un missile vient à frapper l'URSS. Toute l'intrigue du film repose autour d'une erreur de la part des Soviétiques : ceux-ci n'ont pas prévenu les Américains de l'activation du mécanisme, appelé la *doomsday machine* (la machine apocalyptique). Un militaire américain décide alors de lancer une attaque contre l'URSS, sans se douter qu'il déclencherait par la même occasion la fin du monde. Ici est bien mise en valeur l'importance de montrer à ses adversaires qu'on s'est barré la route : c'est uniquement si ces derniers savent que la menace est crédible qu'ils se plieront à votre volonté.

Même si l'idée d'une *doomsday machine* paraît surréaliste, des dispositifs lui ressemblant ont été déployés pendant la guerre froide : ce fut le cas du dispositif soviétique *Perimeter*, qui a été mis en place pour garantir une riposte soviétique en cas d'attaque nucléaire massive de la part des États-Unis. Si jamais le dispositif détectait l'explosion de têtes nucléaires sur le sol soviétique, que l'état-major de l'Armée rouge n'envoyait pas de signal, un ordre était envoyé pour lancer une attaque atomique sur les États-Unis. Peu de choses sont connues sur le dispositif resté assez secret, et il est probable qu'il ait été essentiellement inactivé pour éviter des erreurs malheureuses[74]. Les Américains eux aussi avaient mis en place un dispositif, moins automatisé, pour garantir une riposte nucléaire en cas d'attaque soviétique : entre 1961 et 1990, des avions américains capables d'une attaque nucléaire étaient continuellement en vol pour garantir la survie d'une partie du potentiel atomique américain en cas d'attaque soviétique sur le sol des États-Unis. En cas d'attaque nucléaire qui détruirait les bases militaires américaines, des missiles équipés d'émetteurs radio étaient lancés dans l'espace aérien pour annoncer l'attaque aux avions placés en alerte[75]. Pour faire de ce système un moyen efficace de dissuasion, les Américains annoncèrent aux Soviétiques sa mise en place. À la fin de la guerre froide, le dispositif fut désactivé, jugé à présent inutile.

L'exemple de la *doomsday machine* est particulièrement extrême : on peut rendre des menaces crédibles sans craindre de déclencher l'apocalypse ! Prenons l'exemple d'une guerre commerciale entre Pepsi et Coca-Cola. Imaginons que Coca-Cola lance une nouvelle boisson sucrée, et que Pepsi doive décider de se lancer sur ce nouveau marché ou d'en laisser le monopole à Coca-Cola. Si jamais Pepsi décide d'entrer en concurrence avec Coca-Cola, ce dernier peut lancer une guerre des prix ou non.

Si Coca-Cola est seule sur le marché, l'entreprise empoche un gain de 100. Ce gain est partagé de manière égale avec Pepsi si jamais les deux entreprises se lancent sur le marché sans guerre des prix. Néanmoins, une guerre des prix nuit aux deux firmes qui produisent alors à perte et obtiennent un gain de (- 10).

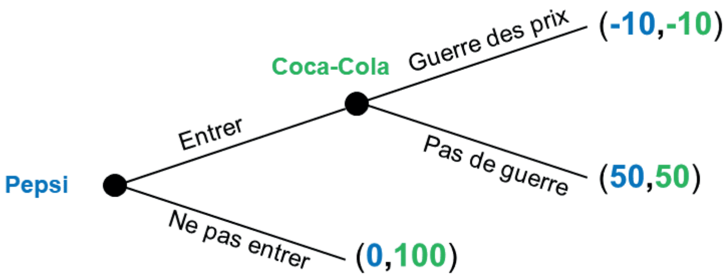


Figure 24.1 : Une guerre des prix entre entreprises.

Coca-Cola, qui a envie d'obtenir le monopole, peut menacer Pepsi d'une guerre des prix si jamais celui-ci entre sur le marché. Néanmoins, cette menace manque de crédibilité : si jamais Pepsi décide effectivement d'entrer en concurrence avec Coca-Cola, ce dernier aura le choix entre lancer une guerre des prix pour un gain de (- 10), et de ne pas lancer de guerre commerciale en empochant un gain de 50. Le choix est vite fait, et Pepsi peut donc a priori ignorer la menace de son concurrent.

Si Coca-Cola réussissait à rendre sa menace crédible, elle pourrait dissuader Pepsi d'entrer sur le marché et ainsi empocher un gain maximal. Si l'option d'une cohabitation pacifique entre les deux entreprises est totalement exclue, Pepsi n'a plus qu'à décider entre une guerre des prix qui lui donnera un gain de (-10) et de rester en dehors du marché pour un gain nul. Le choix est vite fait pour Pepsi, qui décide de laisser à son concurrent un monopole sur le marché de la boisson sucrée.

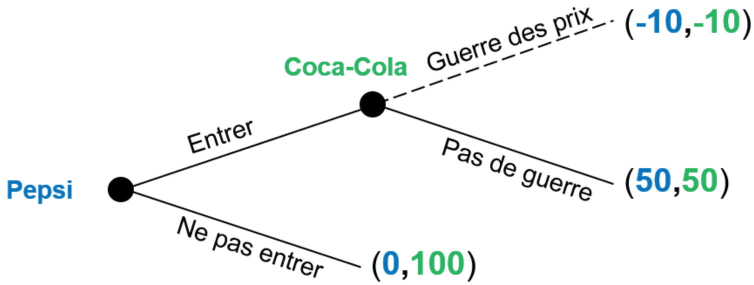


Figure 24.2 : Un raisonnement rétrograde montre que la menace de Coca-Cola n'est pas crédible.

Comment Coca-Cola peut-il faire comme Cortès, et se forcer à lancer une guerre des prix si jamais Pepsi entre sur le marché ? Une des solutions consiste à laisser le choix de la stratégie de Coca-Cola à quelqu'un qui a personnellement intérêt à mener une guerre des prix. Le conseil d'administration de Coca-Cola peut par exemple annoncer que si le PDG de l'entreprise ne combat pas toute entrée d'un concurrent avec une guerre des prix, il sera remplacé. Le PDG peut également confier la régulation des prix de ses produits à un agent interne à l'entreprise, payé pour lancer une guerre des prix si jamais Pepsi entre sur le marché. Dans les deux cas, Pepsi peut penser à juste titre que la menace d'une guerre des prix est crédible : en effet, même si un tel conflit commercial nuirait à Coca-Cola comme entreprise, il ne nuirait pas à celui qui met en application la menace, bien au contraire.

Coca-Cola peut également faire comme l'OPEP ou l'Arabie saoudite, et utiliser le mécanisme de la réputation pour rendre sa menace crédible : il n'est pas rare que des entreprises lancent de coûteuses guerres commerciales de temps en temps pour dissuader d'éventuels concurrents de faire leur entrée sur le marché.

Dans le même ordre d'idée, de nombreux pays ont pour politique affirmée de ne pas payer de rançon pour récupérer leurs citoyens pris en otage à l'étranger, et se sont construit une réputation de respect de cette politique. Ainsi, les Américains refusent de négocier avec les preneurs d'otages et la justice américaine peut même poursuivre ceux qui tenteraient de payer des rançons pour faire libérer leurs proches ou employés, les accusant de financer des organisations terroristes. En refusant toute négociation, les Américains se privent de moyens de faire libérer leurs ressortissants : la France, qui elle accepte de négocier avec les preneurs d'otages, a parfois plus de facilités à libérer ses citoyens faits prisonniers. Néanmoins, en se barrant la route, les États-Unis dissuadent les organisations terroristes de prendre des otages américains : celles-ci savent en effet qu'une telle prise d'otages ne leur permettra pas de gagner de l'argent.

Qu'est-ce qui engage alors les Américains à respecter leur politique de ne pas négocier avec les preneurs d'otages ? Finalement, rien ne les empêche de changer de politique et d'assouplir leurs lois ! C'est là que le mécanisme de réputation vient peser dans la balance : si les Américains décident un jour d'entreprendre des négociations avec des preneurs d'otages, ils détruiront la réputation qu'ils ont construite petit à petit, et enverront aux autres nations le signal que les États-Unis ne suivent pas systématiquement la politique qu'ils annoncent. Ainsi, continuer à refuser les négociations permet aux Américains de préserver leur réputation, ce qui rend crédible leur menace faite aux preneurs d'otages de ne jamais payer de rançon.

Point théorique

Formalisation d'un jeu sous forme extensive

Avant de passer à la suite, nous présentons de manière formelle un jeu sous forme extensive, pour que les intéressés puissent avoir un nouvel exemple de formalisation. Cette partie plus technique est tout à fait indépendante du reste du livre, et vous pouvez aller directement au chapitre suivant si vous ne souhaitez pas vous attarder sur cette formalisation.

À la fin des années 1990, Robert Powell s'est intéressé aux disputes entre États liées aux ressources, et s'est demandé pourquoi certaines disputes éclataient en guerre violente tandis que d'autres n'allaient pas jusque-là[76]. Pour placer ce problème dans un cadre théorique, il considère un modèle dans lequel deux pays (A et B) se battent pour une ressource (par exemple des champs de pétrole) sur deux périodes (par exemple deux décennies). La ressource est initialement sous le contrôle du pays A, et rapporte un gain de 1 à chaque période. B voudrait en prendre le contrôle. À chaque période, A peut partager une partie de la ressource avec B, et les deux pays peuvent se déclarer la guerre. Que va-t-il se passer ?

Description du jeu

Première période. Au début du jeu, le pays *A* doit choisir entre deux options :

- Soit il entre en guerre avec *B* pour couper court à toute tentative d'invasion ;
- Soit il fait une offre à *B*, lui proposant pour la période une compensation $x_1 = \in [0,1]$ qui correspond à une partie du profit généré par la ressource[a].

a Notez que l'on peut avoir $x_1 = 0$, ce qui correspond à rester au statu quo.

Si A fait une offre à B, alors B peut décider d'accepter l'offre ou de la refuser. S'il accepte l'offre, les deux pays restent en paix, sinon une guerre commence. Si un conflit éclate entre A et B, les deux joueurs payent le coût du conflit $c > 0$ et l'issue du conflit est incertaine : B a une probabilité p_1 de gagner le conflit et prendre le contrôle de la ressource, tandis que A a une probabilité $1 - p_1$ de garder le contrôle de la ressource. Si un conflit éclate, le jeu s'arrête.

Les gains des deux joueurs sont alors les suivants, selon l'issue du conflit :

- En cas de victoire de A :
  - A gagne $1 - c$ à la première période, car il peut exploiter entièrement la ressource pendant la période, mais a payé le coût du conflit. À la seconde période, A exploite également la ressource qui lui donne un gain de 1. Le gain total de A pendant l'ensemble du jeu sera donc $2 - c$.
  - B n'a jamais accès à la ressource, et doit payer le coût de la guerre, c. Son gain est donc de $-c$.
- En cas de victoire de B, les choses s'inversent : A obtient $-c$ et B obtient $2 - c$.

Comme B gagne le conflit avec une probabilité p_1, le gain espéré de A en cas de conflit à la première période est : $(1 - p_1)(2 - c) + p_1(-c) = 2 - 2p_1 - c$.
Le gain espéré de B est de : $(1 - p_1)(-c) + p_1(2 - c) = 2p_1 - c$.

Seconde période. Si à la première période A fait une offre à B et B l'accepte, alors la ressource est partagée pour cette période : A donne x_1 à B et garde $1 - x_1$ pour lui. À la seconde période, A doit à nouveau prendre une décision parmi deux alternatives :

1. Soit il entre en guerre avec B;
2. Soit il lui fait une nouvelle offre de partage de la ressource pour cette période, en lui laissant une part $x_2 = \in [0,1]$ des profits générés par la ressource.

De même que précédemment, B peut décider d'accepter l'offre ou de la refuser. Un refus mène à un conflit, que B a une probabilité p_2 de gagner. Si une guerre éclate, les deux pays doivent chacun payer le coût c, identique à celui de la période précédente. Si un conflit éclate, les gains des joueurs sont les suivants :

- En cas de victoire de A :

- A a déjà obtenu un gain de $1 - x_1$ à la première période et peut exploiter la ressource à la deuxième période, mais doit payer le coût c du conflit. Son gain total pour les deux périodes est donc de $(1 - x_1) + (1 - c) = 2 - x_1 - c$.
- B a obtenu x_1 à la première période, ne peut pas exploiter la ressource à la deuxième période, et doit payer le coût du c conflit. Son gain total est de $x_1 - c$.

• En cas de victoire de B :

- A obtient $1 - x_1$ à la première période et $-c$ à la seconde, lui donnant un gain total de $1 - x_1 - c$.
- B obtient x_1 à la première période et à la seconde, pour un gain total de $1 + x_1 - c$.

B gagne le conflit avec une probabilité p_2. Le gain espéré par A en cas de conflit est donc de : $(1 - p_2)(2 - x_1 - c) + p_2(1 - x_1 - c) = 2 - x_1 - p_2 - c$.

Et le gain espéré par B est : $(1 - p_2)(x_1 - c) + p_2(1 + x_1 - c) = x_1 + p_2 - c$.

Si A fait une nouvelle offre à B et que l'offre est acceptée, alors il n'y a pas de conflit et la ressource est partagée à nouveau. Le gain total du pays A est de $(1 - x_1) + (1 - x_2) = 2 - x_1 - x_2$ et le gain total de B est $x_1 + x_2$.

Arbre de décision et résolution du jeu

Nous avons maintenant entièrement décrit les interactions entre ces deux pays. Nous pouvons représenter cette situation dans un arbre de décision en plaçant sur les feuilles de l'arbre les gains des deux joueurs. Comment résoudre ce jeu ? Les deux pays entreront-ils en guerre ou pourront-ils apaiser le conflit par un partage de la ressource convoitée ?

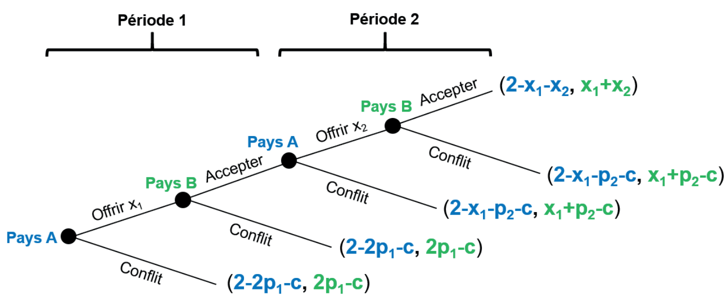


Figure 25.1 : Un jeu séquentiel qui s'étale sur deux périodes.

Powell décide de se placer dans un cas particulier du problème, dans lequel le pays B, qui convoite la ressource, se développe militairement. Cela veut dire que sa probabilité de victoire en cas de conflit augmente entre les deux périodes ($p_1 < p_2$).

Pour résoudre le jeu, nous procédons comme nous l'avons fait, précédemment : par raisonnement rétrograde. Il faut noter que ce jeu est plus complexe que les précédents pour deux raisons : la première est la présence de divers paramètres (p_1, p_2, c) dont les valeurs vont changer l'issue du jeu. La seconde tient de l'infinité de stratégies parmi lesquelles le pays A peut choisir : en effet, il peut choisir à chaque étape du jeu n'importe quelle offre entre 0 et 1. Conduisons notre raisonnement rétrograde en partant de la dernière étape du jeu et en remontant jusqu'au premier nœud de l'arbre de décision. Nous ne nous intéresserons qu'aux équilibres de Nash en stratégies pures.

4e étape. Si on arrive au dernier nœud du jeu, lorsque B doit faire un choix entre accepter une offre x_2 de la part de A et commencer un conflit, le pays B choisira l'option qui lui donnera le gain le plus important, soit :

- Le conflit si $x_2 < p_2 - c$;
- Le partage si $x_2 > p_2 - c$;
- N'importe quelle option si $x_2 = p_2 - c$[b].

3e étape. À la troisième étape, le pays A doit choisir entre entrer en conflit et proposer une offre à B. Commençons par étudier le cas de figure où A fait une offre à B. Le pays A sait que la réaction de B sera fonction de l'offre x_2 proposée. Si A propose moins de $p_2 - c$, il y aura conflit, et l'option de l'offre ne sera pas plus profitable que l'option du conflit.

Pour apaiser le pays B, A doit choisir une offre qui dépasse $p_2 - c$. Parmi toutes les stratégies qui permettent d'éviter le conflit, celle qui rapporte le plus grand gain à A est d'offrir $p_2 - c + \varepsilon$, où est une quantité très petite.

A doit donc choisir entre un conflit (en entrant directement en guerre ou en proposant $x_2 < p_2 - c$) et un partage en proposant $p_2 - c + \varepsilon$. Le conflit lui donne un gain de $2 - x_1 - p_2 - c$ et le partage $2 - x_1 - x_2 = 2 - x_1 - p_2 + c - \varepsilon$. Le pays A choisit donc le partage. Nous avons donc trouvé ce qui se passe à la deuxième période du jeu : si A a décidé d'apaiser le conflit

b C'est-à-dire le conflit, le partage, ou n'importe quelle stratégie mixte qui « mélange » ces deux choix.

à la première période, alors il décidera également d'un partage à la seconde période, en proposant la plus petite offre qui garantira la paix.

2[e] étape. Passons maintenant au deuxième nœud du jeu, lorsque B doit décider d'accepter ou non une offre x_1 faite par A. S'il accepte l'offre, alors il sait qu'il se verra offrir une nouvelle offre à la période suivante, qu'il aura intérêt à l'accepter et que son gain sera alors de $x_1+x_2=x_1+p_2-c+\varepsilon$. S'il refuse la première offre du pays A, alors B empoche un gain de $2p_1-c$.

Le pays B accepte donc l'offre si $x_1>2p_1-p_2-\varepsilon$, entre en conflit si $x_1<2p-p_2-\varepsilon$ et est indifférent s'il y a égalité.

1[re] étape. Lorsque le jeu commence, A doit décider de faire une offre ou non. Il sait que son offre pourra mener à un apaisement seulement si $x_1>2p_1-p_2-\varepsilon$. Deux possibilités s'offrent alors à lui :

1. Soit $2p_1-p_2-\varepsilon>0$. Alors s'il veut apaiser le conflit, A doit proposer une offre $x_1=2p_1-p_2$ au minimum (et c'est cette offre minimale qui sera optimale parmi toutes les offres qui mènent à un partage). Si le partage se fait, A gagnera à la fin du jeu : $2-x_1-x_2=2-\ 2p_1+p_2-p_2-c-\varepsilon.$ Un conflit, lui, donne le gain $2-2p_1-c$, qui est inférieur au gain associé à l'offre. Le pays A choisira donc le partage.
2. Soit $2p_1-p_2-\varepsilon\leq 0$. Alors le pays A peut proposer l'offre $x_1=0$ au pays B ou entrer en guerre. Son gain en fin de partie est alors de $2-p_2+c-\varepsilon$ en cas de partage et de $2-2p_1$ en cas de conflit. Le conflit éclate donc si $2-2p_1-c>2-p_2+c-\varepsilon$, soit $p_2>2p_1+2c-\varepsilon$[c].

La condition du conflit est donc $p_2>2p_1+2c-\varepsilon$. Comment interpréter ces résultats ? Tout d'abord, nous avons vu que si un partage avait lieu lorsque B est faible (à la première période), alors il y a un partage une fois que B s'est fortifié (à la seconde période). Si un conflit a lieu, c'est dès la première période, et à deux conditions : premièrement, le coût du conflit ne doit pas être trop grand. Si est très élevé, le conflit n'aura jamais lieu et le pays A préférera toujours faire des offres au pays B que risquer un conflit.

Deuxièmement, même avec un coût nul du conflit, il faut que p_2 soit au moins deux fois plus grand que p_1 pour qu'un conflit éclate (c'est-à-dire que la capacité militaire du pays B augmente très largement

c On peut noter que si cette condition est réalisée, alors nous sommes nécessairement dans le cas où $2p_1-p_2-\varepsilon\leq 0$.

entre la première et la deuxième période). Comme les offres que A doit faire à B augmentent avec la probabilité de victoire de B, le pays A préfère éliminer la menace posée par son voisin à la première période, avant que celui-ci devienne puissant. Ce qui compte n'est pas en soi la puissance militaire initiale ou finale du pays prise indépendamment, mais bien sa variation entre les deux périodes. D'après Powell, ce modèle permet de donner une première intuition pour expliquer pourquoi on observe davantage de conflits dans des zones où les équilibres de pouvoir changent beaucoup dans le temps.

Chapitre 23

Vivre et laisser vivre

Jeux répétés, altruisme et tournoi d'Axelrod

Parmi les espèces étranges du règne animal, on trouve une espèce de chauve-souris qui se nourrit du sang de ses proies : en conséquence, on les appelle les chauves-souris vampires. Lorsqu'elles mordent un animal, elles absorbent assez de sang pour survivre deux jours environ, mais rien ne leur garantit qu'elles arriveront à trouver chaque jour une nouvelle proie. Pour contourner le manque de nourriture, les chauves-souris vampires font preuve d'altruisme : lorsqu'elles voient qu'une de leurs congénères manque de nourriture, elles régurgitent une partie de leur repas pour le partager avec la chauve-souris affamée. Lorsque les sources de nourriture se font rares, ce système de partage permet à l'ensemble des chauves-souris d'avoir un accès plus régulier à une source de nourriture et ainsi de mieux survivre.

On trouve également des formes d'altruisme chez d'autres espèces : les suricates montent la garde lorsque leurs congénères sont en train de manger pour les alerter si un prédateur arrive. Les dauphins s'occupent d'autres dauphins lorsque ces derniers sont malades, les aidant à nager et à respirer. Chez certaines espèces de singes, on peut observer des animaux qui s'entraident pour se débarrasser de leurs poux. En étudiant cette coopération, les chercheurs se sont rendu compte d'autre chose : les singes ont plus de chances de se faire aider par les singes qu'ils ont aidés auparavant que par les singes qu'ils n'ont jamais aidés. En quelque sorte, les singes s'échangent des services, et il se développe entre eux des relations mutuellement avantageuses.

Cet altruisme observé chez les animaux a beaucoup étonné les chercheurs qui se sont demandé comment le processus d'évolution des espèces avait pu mener à de tels comportements… En effet, en aidant les autres, les animaux altruistes perdent du temps et de l'énergie qu'ils auraient pu utiliser pour se reproduire eux-mêmes, et aident leurs congénères à se reproduire. Le processus de sélection naturelle favorisant les comportements qui maximisent le nombre de descendants, les animaux altruistes auraient dû être désavantagés par rapport à des congénères égoïstes qui profiteraient de l'altruisme des autres sans rien donner en retour.

Les animaux seraient-ils naturellement bons ? Pourquoi la sélection naturelle a-t-elle laissé se développer des comportements altruistes dans le monde naturel ?

Pour commencer, essayons de comprendre pourquoi il est étonnant à première vue de trouver dans la nature des comportements altruistes. Nos chauves-souris vampires et nos singes peuvent a priori avoir deux comportements différents lorsqu'ils rencontrent un de leurs congénères : ils peuvent coopérer avec lui (en partageant sa nourriture, en l'aidant à s'épouiller...) ou ne pas coopérer. En fonction des décisions prises par chacun des deux animaux qui se rencontrent, ceux-ci obtiennent des gains différents, qui peuvent se mesurer sous la forme de mois d'espérance de vie, de nombre de descendants, etc.

Coopérer correspond à donner des ressources à l'autre, et ne pas coopérer à les garder pour soi : on peut donc imaginer pour les deux animaux qui se rencontrent les gains suivants, en fonction de la stratégie qu'ils utilisent.

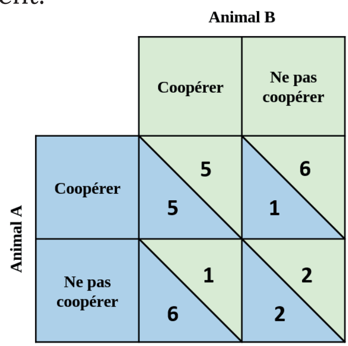


Figure 26.1 : La coopération entre animaux s'apparente à un dilemme du prisonnier.

Ce tableau devrait vous rappeler quelque chose : il correspond exactement à la situation du dilemme du prisonnier ! Pour chacun des deux animaux, ne pas coopérer est la stratégie dominante : cela veut dire que, quel que soit le choix de leur congénère, le choix de ne pas coopérer leur rapportera un gain systématiquement supérieur à celui obtenu en coopérant. Comme la sélection naturelle favorise les comportements qui permettent aux animaux d'obtenir des gains supérieurs, elle devrait sélectionner ceux qui décident systématiquement de ne pas coopérer. Pourquoi observe-t-on malgré tout dans la nature de nombreux comportements altruistes ?

Certains biologistes ont découvert que les animaux avaient plus tendance à coopérer avec les membres de leur propre famille qu'avec leurs congénères qui n'ont pas de lien de sang avec eux. Cette observation aide à résoudre une partie du mystère : comme les membres d'une même famille partagent une bonne partie de leur code génétique, aider quelqu'un de sa famille facilite la diffusion de ses gènes sans directement avoir une descendance propre. Ce mécanisme s'appelle la sélection de parentèle.

Néanmoins, on observe également des comportements altruistes entre animaux qui n'ont aucun lien de parenté : les animaux qui coopèrent ainsi avec leurs congénères utilisent leurs ressources pour aider d'autres animaux à se reproduire, bien qu'ils ne partagent pas de larges portions de génome. Pourquoi cette coopération en dehors du cercle familial a-t-elle été sélectionnée petit à petit par la nature ? La théorie des jeux nous aide à comprendre ce mystère !

Lorsque nous avons comparé les relations entre animaux à un dilemme du prisonnier, nous avons considéré que les animaux choisissaient une fois pour toutes leur stratégie (coopérer ou ne pas coopérer), puis en subissaient les conséquences lorsqu'ils rencontraient un de leurs congénères. Cette vision est trop simpliste : en effet, les animaux sont confrontés à ce dilemme du prisonnier de nombreuses fois au cours de leur existence, et ils peuvent changer de stratégie au fur et à mesure des rencontres. Souvenons-nous des singes qui s'épouillent, et qui ont plus tendance à aider ceux qui les ont aidés que ceux qui ne les ont jamais aidés : les animaux peuvent décider d'utiliser la stratégie « coopérer » avec leurs congénères qui utilisent souvent cette stratégie, et d'utiliser la stratégie « ne pas coopérer » avec les animaux qui sont égoïstes. On parle alors d'**altruisme réciproque**. Ainsi, les animaux égoïstes ne pourront pas profiter de l'aide de leurs congénères, alors que les animaux altruistes, s'ils n'aident pas leurs congénères égoïstes, pourront avoir une relation mutuellement avantageuse avec les autres altruistes.

La relation de deux animaux qui vivent ensemble peut être résumée comme une série d'interactions qui prennent la forme d'un dilemme du prisonnier. Les animaux savent qu'ils interagiront plusieurs fois avec leurs congénères, et ne considèrent pas chaque interaction comme un simple dilemme du prisonnier, mais un dilemme du prisonnier parmi de nombreux autres dans cette relation. Dans ce **dilemme du prisonnier itéré** (ou répété), il y a bien plus que deux stratégies. Nous allons maintenant étudier ce jeu qui se révèle plus complexe que le dilemme du prisonnier simple.

Voici quelques stratégies que des joueurs peuvent utiliser dans le dilemme du prisonnier itéré :

- L'altruisme pur : coopérer à chaque rencontre.
- L'égoïsme pur : ne pas coopérer à chaque rencontre.
- La stratégie « pas de pardon »[a] : commencer par coopérer, puis coopérer tant que l'adversaire coopère. Si l'adversaire ne coopère pas à un tour, ne plus jamais coopérer.
- La stratégie « donnant-donnant »[b] : commencer par coopérer, puis utiliser la stratégie que l'adversaire a utilisée au dernier tour.
- La stratégie lunatique : tirer sa stratégie au hasard.

On peut en imaginer bien d'autres : une stratégie pourrait être d'alterner coopération et non-coopération (ce qui se rapproche de la stratégie lunatique), ou alors de toujours coopérer jusqu'à ce que l'adversaire ne coopère pas pendant deux tours, et alors ne plus jamais coopérer (une autre version de la stratégie « pas de pardon »).

On peut modéliser la vie de deux animaux en interaction par une série de dilemmes du prisonnier successifs, et voir quel gain les animaux obtiennent en moyenne lorsqu'ils utilisent l'une ou l'autre stratégie contre un autre animal.

Par exemple, voici ce qui se passe lorsqu'un animal qui utilise la stratégie « lunatique » rencontre un animal qui utilise la stratégie « donnant-donnant » dans une série de six dilemmes du prisonnier successifs (un C représente la stratégie « coopérer » et NC représente la stratégie « ne pas coopérer »).

Tour	1	2	**3**	**4**	**5**	**6**	**Gain moyen**[c]
Lunatique	C	C	NC	C	NC	NC	**4,2**
Donnant-donnant	C	C	C	NC	C	NC	**3,3**

a Connue sous le nom de stratégie *grim trigger* en anglais.
b Connue sous le nom de stratégie *tit-for-tat* en anglais.
c On obtient ces chiffres de la manière suivante :
- aux deux premiers tours, chaque joueur gagne 5 ;
- au troisième et au cinquième tour, le lunatique gagne 6 et le donnant-donnant gagne1 ;
- au quatrième tour c'est le contraire ;
- et au dernier tour les deux joueurs gagnent 2. Le lunatique aura donc un gain moyen de (5+5+6+1+6+2)/6 = 4,2 ;
- le donnant-donnant un gain moyen de (5+5+1+6+1+2)/6=3,3.

On observe que la ligne du bas correspond à peu près à la ligne du haut, avec un décalage d'un tour : cela vient du fait que l'animal qui utilise la stratégie « donnant-donnant » choisit la stratégie de l'animal lunatique au tour d'avant.

De même, voici les choix d'un animal qui utilise la stratégie « pas de pardon » contre un égoïste pur.

Tour	1	2	3	4	5	6	Gain moyen
Pas de pardon	C	NC	NC	NC	NC	NC	**1,8**
Égoïste pur	NC	NC	NC	NC	NC	NC	**2,7**

Si l'animal égoïste arrive à tirer parti de la coopération de son adversaire au premier tour, la suite de la relation n'est pas du tout fructueuse, et les deux animaux arrivent à l'issue de la série avec un gain assez faible. Si, au lieu de ne jamais coopérer, cet animal avait choisi d'être altruiste, ou d'utiliser la stratégie « donnant-donnant » ou même « pas de pardon », le jeu aurait été une longue série de coopérations, avec un gain moyen de 5 pour les deux animaux.

Contrairement au dilemme du prisonnier simple où ne pas coopérer (la stratégie égoïste) est toujours la stratégie qui rapporte un gain maximal, ce n'est plus le cas ici, où une stratégie « gentille » peut rapporter plus que la stratégie « égoïste ». Dans ce cas de figure, comment savoir quelle est la meilleure stratégie ?

Un chercheur américain, Robert Axelrod, a tenté de répondre à cette question dans une expérience restée célèbre : le **tournoi d'Axelrod**. En 1979, ce scientifique a invité des psychologues, mathématiciens, sociologues et économistes à lui proposer des stratégies pour le dilemme du prisonnier répété : Axelrod en reçut alors 15 plus ou moins complexes, dont la stratégie « donnant-donnant », « pas de pardon » et « lunatique ». Puis il fit des « rencontres » entre toutes les stratégies possibles, pour voir quelle stratégie arrivait aux meilleurs résultats en moyenne. La stratégie « lunatique » obtint les pires résultats, ce qui n'était pas une surprise. Ce qui était plus étonnant était le bon résultat de la stratégie « donnant-donnant » : c'est elle qui en moyenne permettait d'avoir les meilleurs gains[77]. Un peu plus tard, Axelrod recommença le tournoi, avec cette fois-ci 62 participants qui avaient vu les résultats du premier tournoi. Une fois de plus, c'est la stratégie « donnant-donnant » qui remporta le tournoi[78].

En observant le classement des différentes stratégies, Axelrod tenta de trouver les caractéristiques des stratégies gagnantes. Il remarqua tout d'abord que les stratégies qui obtenaient les meilleurs gains étaient des stratégies « gentilles » : tant que leurs adversaires coopéraient, les meilleurs joueurs faisaient de même sans tenter de les trahir. La stratégie « gentille » qui obtenait les pires résultats était la stratégie « pas de pardon », et de manière générale, les stratégies indulgentes qui permettaient de revenir à la coopération après quelques tours sans coopération avaient de meilleurs résultats que les stratégies intransigeantes. Avec le deuxième tournoi, Axelrod mit en avant une caractéristique supplémentaire d'une stratégie gagnante : une telle stratégie devait toujours riposter face à une trahison.

À première vue, on pourrait penser que ce résultat entre en contradiction avec la théorie des jeux. Dans un dilemme du prisonnier répété un nombre fini de fois, personne ne coopère à tous les tours à l'équilibre de Nash. Pour obtenir ce résultat, il faut procéder par raisonnement rétrograde : au dernier tour, le jeu se résume à un simple dilemme du prisonnier, et les deux adversaires ne coopèrent pas. À l'avant-dernier tour, les deux joueurs savent que leur adversaire ne coopérera pas, et donc peuvent donc ignorer ce dernier tour dans leur raisonnement. L'avant-dernier tour est donc assimilé à un dilemme du prisonnier simple, et les deux joueurs ne coopèrent pas. On peut remonter ensuite à l'avant-avant-dernier tour, l'avant avant avant-dernier tour, etc. On arrive enfin au premier tour : les joueurs savent que leur adversaire ne coopérera à aucun des tours suivants, et décident donc de ne pas coopérer. À l'équilibre de Nash, tout se passe donc comme si cette série de dilemmes du prisonnier n'était que des dilemmes du prisonnier indépendants. Comment réconcilier la théorie des jeux avec le résultat d'Axelrod ? Ce n'est pas si compliqué : lorsque des animaux ou des humains interagissent, ils ne savent pas combien de fois ils auront à interagir entre eux. En d'autres termes, ils ne savent pas quand sera le dernier tour du « dilemme du prisonnier répété ». Or, le raisonnement rétrograde prend comme hypothèse que les deux joueurs savent quand est le dernier tour de jeu, et savent qu'à ce dernier tour, leur adversaire ne coopérera plus (car justement, ils savent que c'est le dernier et qu'ils ne peuvent rien espérer gagner après ce dernier dilemme). Lorsqu'une incertitude plane sur le nombre de tours qu'aura en tout le dilemme du prisonnier répété, le raisonnement rétrograde ne tient plus, et les résultats de la théorie des jeux n'excluent en aucun cas la coopération, réconciliant celle-ci avec les résultats d'Axelrod. Le résultat qu'apporte le raisonnement rétrograde mérite également de l'attention : lorsque dans un dilemme du prisonnier répété, les deux joueurs savent combien de tours il leur reste à jouer, la coopération cesse. Ce résultat donne un éclairage intéressant sur les relations humaines, et le délitement accéléré des relations qui arrivent à terme : un employé qui arrive bientôt à sa retraite aura tendance à moins donner de son temps à son entreprise, et l'entreprise aura moins tendance à lui donner des promotions. Chacun des joueurs (l'employé et l'entreprise) sait en effet qu'ils n'ont plus grand-chose à tirer de cette relation de travail.

Pour maintenir des relations de long terme, les hommes peuvent recourir à des contrats qui les forcent à agir d'une certaine manière sous peine de poursuites. Les animaux, qui ne disposent évidemment pas d'un système juridique bien établi, n'ont pas ce mécanisme pour s'extraire des dilemmes du prisonnier qui marquent leurs interactions de la vie courante. Le résultat d'Axelrod montre que si ces interactions sont suffisamment répétées, la coopération n'est plus une stratégie dominée (et devient donc possible). Les animaux, à défaut de contrats, peuvent coopérer grâce à des mécanismes comme l'altruisme réciproque, où la coopération n'est pas institutionnalisée. Cette coopération tacite n'est pas qu'une caractéristique des animaux : on trouve dans l'histoire humaine des exemples de coopération échappant à tout contrat.

Un exemple célèbre est la « fraternisation » observée entre soldats de lignes ennemies pendant la Première Guerre mondiale, caractérisée par l'expression « vivre et laisser vivre[79] ». Après un début de conflit exceptionnellement violent, quelques brèves trêves ont eu lieu sur le front ouest en décembre 1914 pour le réveillon de Noël. Quelques autres trêves eurent lieu en 1915 et 1916. Néanmoins, les autorités militaires ont rapidement interdit ces cessez-le-feu, considérés comme des trahisons. Pour autant, la coopération n'a pas tout à fait cessé entre soldats ennemis après 1916 : elle est simplement devenue tacite. Sur certaines parties du front, les soldats continuaient de tirer vers les lignes ennemies, mais sans chercher à tuer les soldats qui leur faisaient face. Puisque les soldats étaient forcés de tirer pour ne pas être considérés comme des mutins, ils coopéraient en tirant mal ! Un soldat du premier conflit mondial raconte : « Nous avions tiré quelques centaines de livres de munitions les uns sur les autres, mais aucun côté n'avait montré de réelle animosité ou de méchanceté.[80] » Un autre officier écrivait : « Le feu [était] peu soutenu, car chaque côté n'avait pas de réelle volonté de causer des problèmes ; certains coups devaient évidemment être tirés, sinon des questions arriveraient.[81] » Le même officier écrit par ailleurs : « L'infanterie n'était pas d'humeur pour des mesures offensives, et il était évident que, des deux côtés, les fusils et les mitrailleuses visaient haut[82]. »

Pour Axelrod, une journée de combats dans les tranchées pouvait être assimilée à un dilemme du prisonnier. Les soldats de chaque camp avaient deux stratégies : se comporter de manière agressive, ou alors combattre de façon « rituelle », en tirant en l'air ou de façon prévisible. Si les deux camps coopéraient en ne montrant pas d'agressivité, chaque partie limitait ses pertes par rapport à la situation où les deux camps combattaient agressivement. Par ailleurs, la pire situation pour chaque camp est de coopérer en tirant en l'air tandis que le camp adverse tente de viser juste. Lorsque deux unités se faisaient face pendant plusieurs semaines, le conflit n'était plus un dilemme du prisonnier simple, mais un dilemme répété.

Axelrod estime que la coopération observée lors de la Première Guerre mondiale correspond à l'utilisation d'une stratégie « donnant-donnant[83] » : lorsqu'un camp coopérait en tirant en l'air, le camp adverse pouvait rendre la pareille et lancer une relation de coopération. Même dans un environnement particulièrement hostile, une coopération peut émerger en raison de rencontres répétées. Pour contrer ces actions de coopération tacite, les chefs de guerre changèrent le « jeu » auquel leurs soldats jouaient. Les troupes placées en première ligne étaient régulièrement relevées, pour que les interactions entre unités ennemies ne durent pas longtemps : le dilemme du prisonnier n'était alors plus autant répété, rendant la coopération plus difficile. Les soldats étaient également envoyés à l'assaut dans les tranchées ennemies, dans une situation où une ritualisation du combat et tirer en l'air n'était alors plus une solution possible : il fallait alors tuer ou être tué[84].

Chapitre 24

Pourquoi voter?

Le paradoxe du vote

Presque partout dans le monde, voter est un droit. Néanmoins, dans de nombreux pays dans le monde, le nombre de personnes qui glissent régulièrement un bulletin dans l'urne baisse d'année en année. À l'élection présidentielle américaine de 2016, seulement 60,2 % de la population américaine en mesure de voter s'est effectivement présentée aux urnes. Aux élections législatives françaises de 2017, le taux d'abstention dépassa 50 % aux deux tours. Le problème d'un absentéisme aussi élevé est le manque de légitimité dont peuvent souffrir les élus ainsi choisis : il est plus difficile d'affirmer qu'un élu représente les citoyens d'un pays ou d'une circonscription si une majorité de ses citoyens n'a même pas pris part à l'élection.

Pour combattre l'abstention, certains pays ont tout simplement décidé de rendre le vote obligatoire. Cette mesure n'est d'ailleurs pas une idée récente : la Belgique a commencé à rendre le vote obligatoire en 1892. Une vingtaine de pays dans le monde ont aujourd'hui des lois qui rendent le vote obligatoire, avec des sanctions plus ou moins lourdes pour ceux qui contreviennent à cette règle. Ainsi, jusqu'à l'an 2000, les citoyens grecs devaient voter s'ils voulaient recevoir un passeport ou un permis de conduire. Les citoyens suisses, argentins et chypriotes doivent aujourd'hui théoriquement s'acquitter d'amendes s'ils ne votent pas aux élections (même si les sanctions ne sont pas systématiquement appliquées). De telles mesures augmentent assez significativement le nombre de personnes qui se présentent aux urnes : avant que l'Australie mette en place l'obligation d'aller voter, en 1924, la dernière élection fédérale avait un taux de participation qui ne dépassait pas 58,7 %. À la première élection fédérale où le vote fut obligatoire, 91,4 % des citoyens en mesure de voter se présentèrent au suffrage, et les taux d'abstention y sont restés très bas depuis[85].

Les adversaires du vote obligatoire affirment que le droit de vote implique également le droit de ne pas l'exercer. Ils craignent également qu'une telle mesure ne fasse qu'augmenter le nombre de votes nuls, blancs, extrêmes ou aléatoires. Ceux qui sont en faveur d'une telle obligation indiquent qu'elle renforcerait le processus démocratique, et que sans elle, les électeurs n'ont pas assez intérêt à aller voter.

Pourquoi des électeurs n'auraient-ils pas intérêt à aller voter ? Le droit de choisir un représentant dans ses institutions publiques n'est-il pas une incitation suffisante pour exercer ce droit sans trop réfléchir ?

Il est indéniable que des élections bien tenues sont essentielles au bon fonctionnement d'une démocratie, et les hommes politiques en campagne répètent jour après jour que « chaque voix compte. » Mais qu'en est-il vraiment ? Votre voix, seule parmi des millions, a-t-elle une chance de changer la donne ?

Imaginons que vous faites partie d'une association de 11 personnes, et que vous devez décider dans une élection si, oui ou non, le président de l'association doit changer. Au moment de tous voter, vous vous demandez si votre voix peut faire une différence, ou si vous pourriez tout autant vous abstenir. Si 6 de vos collègues (ou plus) ont voté pour changer de président, votre voix ne fera pas de différence : une majorité a déjà été établie, et si vous pouvez la renforcer ou la réduire en votant, votre voix ne changera pas l'issue de l'élection. De même, si 6 de vos collègues (ou plus) ont voté pour ne pas changer de président, l'issue de l'élection est aussi déterminée, quel que soit votre choix. La seule situation où votre voix peut faire basculer le résultat de l'élection est la situation dans laquelle 5 de vos collègues votent pour changer de président, et 5 autres votent pour le garder. Dans cette situation, et dans cette situation seulement, votre voix fera la différence.

Cette observation faite sur une élection à 11 électeurs vaut pour n'importe quelle élection, y compris avec des millions d'électeurs : à moins qu'une seule voix sépare le vainqueur et le deuxième d'une élection, le résultat de celle-ci n'aurait pas changé selon que vous vous soyez déplacé pour aller voter, ou que vous soyez resté chez vous.

Les élections extrêmement serrées existent, mais sont extrêmement improbables : dans de nombreuses élections nationales, vous avez plus de chances de gagner au loto en achetant un seul billet que d'influencer le résultat de celle-ci avec votre suffrage. Alors, lors de la prochaine élection, si on vous donne le choix entre acheter un billet de loterie et ajouter un bulletin dans l'urne, sachez que vous aurez « en moyenne » plus à gagner en choisissant la première option.

Néanmoins, ce constat n'empêche pas une grande partie de la population d'aller voter lorsqu'elle en a l'occasion : ce décalage entre le gain apparemment faible d'aller voter et le nombre de personnes qui le font effectivement s'appelle le paradoxe du vote[86].

Si de nombreuses personnes vont tout de même voter, c'est parce qu'elles considèrent ce geste comme une chance et un devoir civique. Le vote permet également aux individus d'exprimer leur opinion sur les candidats : si le seul but du vote était de tenter de faire pencher la balance, on n'observerait pas autant de votes pour des petits partis qui n'ont aucune chance de gagner. C'est ainsi que le paradoxe se résout : le « gain » que les citoyens obtiennent lorsqu'ils votent ne se limite pas à l'opportunité de faire basculer la balance d'un côté ou de l'autre. En votant, les citoyens d'un pays font vivre la démocratie, ce qui est au moins aussi important que le résultat d'une élection.

Chapitre 25

And the winner is...

Théorème d'impossibilité d'Arrow, et mécanismes de votes

En plus d'être tous deux des présidents républicains des États-Unis, Georges W. Bush et Donald Trump partagent une caractéristique commune : ils ont été élus présidents en récoltant moins de voix que leurs adversaires[a] ! S'ils ont tout de même gagné ces élections, c'est parce que les présidents américains sont élus au suffrage indirect, contrairement aux présidents français qui eux sont élus au suffrage direct.

Cet exemple des présidents américains montre que récolter des voix ne suffit pas toujours à gagner une élection : la procédure suivie est parfois tout aussi importante. Il existe par ailleurs de nombreuses façons de tenir des élections : en voici quelques exemples.

Les démocraties anglo-saxonnes utilisent très souvent le système de scrutin majoritaire à un tour (aussi appelé système de pluralité) : chacun vote pour un unique candidat, et le candidat qui obtient le plus de voix est désigné vainqueur. Pour élire le président français, on utilise aussi un scrutin uninominal, mais à deux tours. Néanmoins, dans certains pays, les électeurs sont amenés à choisir plus qu'un seul candidat lors du scrutin. En Australie, pour l'élection des membres de la chambre des représentants ou en Irlande pour l'élection du président, on utilise le système du vote alternatif. Chaque électeur classe tous les candidats par ordre de préférence, du meilleur au moins bon. Si un candidat est classé premier par plus de la moitié des électeurs, il est déclaré vainqueur. Sinon, on enlève de la course le candidat qui a été choisi le moins de fois en premier. Si alors un des candidats restants est le préféré d'une majorité parmi cette liste restreinte, il est déclaré vainqueur. Sinon, on recommence cette même démarche jusqu'à ce qu'un candidat obtienne la majorité des suffrages.

Parmi toutes ces procédures de vote, y en a-t-il une qui est « meilleure » que les autres, c'est-à-dire qui donne un résultat reflétant le mieux

a En 2000 et en 2016, contre Al Gore et Hillary Clinton respectivement.

la volonté des électeurs? Les discussions sont vives à ce sujet : en 2011, la Grande-Bretagne a décidé de garder le système de pluralité lors d'un référendum proposant son remplacement par un système de vote alternatif (comme en Irlande).

Nous allons apporter ci-après des éléments de réponse à cette question complexe.

Le but d'une élection est d'agréger des préférences individuelles en un choix collectif, par un système de vote. Voyons plus précisément comment fonctionnent ceux mentionnés plus haut.

Une question a priori complexe

Prenons un exemple, en considérant un corps électoral de 14 personnes qui doivent faire un choix parmi 4 candidats : A, B, C et D. Chaque électeur a des préférences différentes, et il s'agit de tirer de cette variété de préférences un choix unique. Si on demandait à chaque électeur de classer les candidats, on pourrait par exemple arriver au résultat suivant :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	D	D
D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C
C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B
B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Figure 28.1 : Les préférences de 14 électeurs.

Ici, le premier électeur préfère A à D à C à B, et le dixième électeur C à D à B à A. Si on choisit d'utiliser un système uninominal majoritaire (comme en Grande-Bretagne), les électeurs ne doivent renseigner sur leur bulletin de vote que le candidat qu'ils préfèrent. On ne s'intéresse alors qu'à la première ligne du tableau, et on s'aperçoit que dans cette configuration, c'est le candidat A qui gagne l'élection.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	D	D
D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C
C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B
B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Figure 28.2 : Avec un scrutin uninominal majoritaire à un tour, A gagne.

Que se passerait-il alors si les électeurs utilisaient un système à deux tours ? Les candidats qui auraient le plus de voix au premier tour seraient A et B. Si les électeurs ne changent pas d'avis entre les deux tours, on peut savoir ce qu'ils voteraient au deuxième tour en éliminant C et D du tableau : on s'aperçoit alors que c'est le candidat B qui gagnerait l'élection.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B
B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Figure 28.3 : Si le scrutin est à deux tours, c'est B qui gagne.

Ainsi, choisir un système à un ou deux tours n'est pas neutre, et peut changer le résultat de l'élection. C'est par exemple ce qui s'est passé lors de l'élection présidentielle française de 1995 : Lionel Jospin y a devancé Jacques Chirac au premier tour de près de 3 %, mais s'est fait battre par lui au second tour.

Examinons maintenant ce qui se passerait en utilisant un système de vote alternatif, comme en Irlande ou en Australie. Au premier tour, aucun candidat ne récolte plus de la moitié des voix : on élimine alors le candidat D qui en a reçu le moins.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C
C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B
B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Figure 28.4 : Lors d'un vote alternatif, D serait éliminé au premier tour.

À ce stade, il n'y a toujours pas de candidat qui récolte plus de 7 voix, et on élimine alors le candidat B qui en a une de moins que A et C. Enfin, lorsqu'il ne reste plus que ces derniers en lice, c'est le candidat C qui remporte le plus de voix.

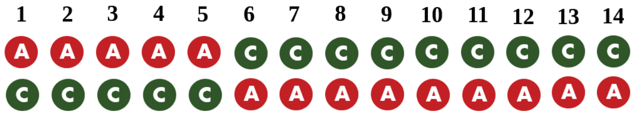


Figure 28.5 : C est le gagnant du vote alternatif.

Ainsi, dans cette configuration, le gagnant désigné est encore différent de celui désigné par les deux premiers modes de scrutin. Une telle situation s'est observée par exemple en Irlande lors de l'élection présidentielle de 1990 : le candidat désigné vainqueur n'était pas celui que la majorité avait préféré. Si les Irlandais avaient utilisé un scrutin uninominal à un tour (comme en Grande-Bretagne), ils auraient eu un autre président !

Une possibilité : le critère de Condorcet

On le voit, le choix d'un système électoral est crucial dans une démocratie : selon le système utilisé, les résultats peuvent être très différents, et il paraît assez difficile de dire a priori lequel des trois modes de scrutin est le meilleur. Il existe d'ailleurs une multitude d'autres systèmes électoraux dans le monde. Comment choisir le meilleur ?

Le mathématicien et homme politique Nicolas de Condorcet est l'un des premiers à s'être penchés sur cette problématique. Il proposa un critère électoral intéressant : si un candidat est préféré à tout autre par une majorité d'électeurs, alors il doit être élu. Ce critère est appelé le **critère de Condorcet**.

Pour mieux expliquer ce critère, nous allons partir de l'exemple précédent. Si nous comparons les résultats des candidats pris par paires, on obtient :

Scrutin	Résultat
A contre B	B gagne à 9 contre 5
A contre C	C gagne à 9 contre 5
A contre D	**D gagne** à 9 contre 5
B contre C	C gagne à 10 contre 4
B contre D	**D gagne** à 10 contre 4
C contre D	**D gagne** à 11 contre 3

On remarque que le candidat D gagne toutes les confrontations avec les autres candidats : une majorité d'électeurs préfère D à A, une autre majorité préfère D à B et enfin une troisième majorité préfère D à C. Le candidat D satisfait donc le critère de Condorcet : on dit que c'est le **vainqueur de Condorcet**.

Le critère de Condorcet est un bon critère pour désigner le vainqueur d'une élection, car il limite le nombre d'électeurs déçus. Si le vainqueur d'une élection n'était pas le vainqueur de Condorcet, alors une majorité des électeurs aurait préféré qu'un autre candidat soit élu. L'exemple précédent nous montre qu'aucun des systèmes étudiés (le scrutin uninominal majoritaire à un ou deux tours, le vote alternatif) ne permet d'élire systématiquement le vainqueur de Condorcet.

De telles situations où le vainqueur d'une élection n'est pas le vainqueur de Condorcet sont assez fréquentes. Imaginez une situation dans laquelle la population est divisée en trois catégories : les partisans de gauche, les partisans de droite et les partisans du centre droit. Ils doivent choisir lors d'une élection un représentant parmi trois candidats : un candidat de droite D, un candidat de gauche G, et un candidat centriste C.

	Partisans de gauche (45 % des électeurs)	**Partisans du centre-droit (15 % des électeurs)**	**Partisans de droite (40 % des électeurs)**
Premier choix	G	C	D
Deuxième choix	C	D	C
Troisième choix	D	G	G

Si ce corps électoral désignait son représentant à l'aide du scrutin uninominal majoritaire à un tour, c'est le candidat G qui serait choisi. S'il y avait deux tours, ce serait le candidat D. Néanmoins, le seul candidat qui satisfasse le critère de Condorcet est le candidat C : 60 % des électeurs préfèrent C à D et 55 % préfèrent C à G.

Pourquoi les pays ne choisissent-ils donc pas un système qui permette d'élire un candidat satisfaisant au critère de Condorcet ? Pour le comprendre, nous allons raisonner sur l'exemple suivant avec 20 électeurs et trois candidats.

	7 électeurs	**7 électeurs**	**6 électeurs**
Premier choix	A	B	C
Deuxième choix	B	C	A
Troisième choix	C	A	B

Pour trouver le vainqueur de Condorcet, il faut s'intéresser aux confrontations opposant les candidats deux à deux. Ici, il y a trois rencontres deux à deux possibles :

Scrutin	Résultat
A contre B	A gagne à 13 contre 7
B contre C	B gagne à 14 contre 6
C contre A	C gagne à 13 contre 7

Dans une telle configuration, aucun candidat n'est préféré par une majorité face à ses deux opposants. Il n'y a donc pas de vainqueur de Condorcet. Ce résultat paradoxal s'appelle le **paradoxe de Condorcet**. Un individu rationnel qui préfère A à B, et B à C préfère nécessairement A à C. Or, un groupe d'individus rationnels ne satisfait pas une telle propriété (dite de transitivité) : ici, une majorité préfère A à B et une majorité préfère B à C, mais seulement une minorité d'électeurs préfère A à C.

L'inconvénient du critère de Condorcet réside dans le fait qu'il peut y avoir des configurations dans lesquelles aucun candidat ne peut être élu. On ne peut pas annoncer de vainqueur à l'issue du scrutin.

Qu'est-ce qu'un « bon système » ?

Nous l'avons vu, même si le critère de Condorcet est intéressant, il ne permet pas de classer les candidats en toutes circonstances : on dit que ce mode de scrutin n'est pas universel. L'universalité est une première règle importante que doit respecter un « bon » système électoral.

Quelles sont les autres propriétés souhaitables d'un mode de scrutin dans une démocratie ? Tout d'abord, il est souhaitable que le mode de scrutin ne soit pas dictatorial, c'est-à-dire qu'aucun des électeurs ne peut déterminer de manière automatique le classement final des candidats (il n'y a pas de dictateur).

Une autre règle souhaitable pour un système de vote est l'unanimité, une condition beaucoup moins forte que le critère de Condorcet. On dit qu'un scrutin respecte la règle d'unanimité si, lorsque tous les électeurs préfèrent un candidat A à un candidat B, alors le scrutin déclare que le candidat A est préféré au candidat B. Cela signifie qu'un candidat ne peut pas être élu si tous les électeurs préfèrent un autre candidat à lui.

Enfin, une dernière règle souvent retenue est l'indépendance des options non pertinentes. Imaginons que lors d'une élection avec deux candidats, un scrutin déclare qu'un candidat A est préféré à un autre candidat B. Imaginons maintenant que l'on renouvelle le scrutin avec un troisième candidat C : si le scrutin déclare maintenant que B est préféré à A, alors on dit que le scrutin ne respecte pas la règle de **l'indépendance des options non pertinentes**.

Cette dernière règle est la plus difficile à comprendre. Voyons tout d'abord une situation dans laquelle cette règle n'est pas respectée, en reprenant l'exemple du scrutin entre les candidats de gauche, de droite et du centre.

	Partisans de gauche (45 % des électeurs)	Partisans du centre-droit (15 % des électeurs)	Partisans de droite (40 % des électeurs)
Premier choix	G	C	D
Second choix	C	D	C
Troisième choix	D	G	G

Si le candidat du centre ne se présente pas et que les électeurs ont à choisir parmi D et G dans un scrutin uninominal majoritaire à un tour, alors le résultat du scrutin est le suivant : D est préféré à G. Mais si le candidat du centre se présente et qu'on utilise le même mode de scrutin, on aura le résultat : G est préféré à D et D est préféré à C.

Le fait d'ajouter un candidat change l'ordre de D et G dans les résultats du vote, quand bien même le candidat C ne gagne pas l'élection… Ainsi, le scrutin uninominal majoritaire à un tour ne satisfait pas la règle de l'indépendance des options non pertinentes.

Mais pourquoi inclut-on cette règle dans une liste des propriétés intéressantes pour un «bon» système électoral ? Pour mieux comprendre cette règle, imaginez que, devant un vendeur de glaces, vous ayez à choisir entre une glace à la vanille et une glace au chocolat, et que vous annonciez que vous préférez la vanille au chocolat.

Si jamais le vendeur vous dit que vous pouvez également choisir de prendre une glace à la fraise, et vous demande vos préférences, vous pourrez répondre de trois manières différentes (si vous êtes rationnel) :

- soit vous préférez la vanille au chocolat et le chocolat à la fraise ;
- soit vous préférez la vanille à la fraise et la fraise au chocolat ;
- soit vous préférez la fraise à la vanille et la vanille au chocolat.

Mais vous ne pourrez pas annoncer que vous préférez le chocolat à la vanille et la vanille à la fraise sans entrer en contraction avec votre première annonce. Il paraît naturel que lorsqu'une option est ajoutée aux deux précédentes et que l'on vous demande à nouveau celle que vous préférez, soit vous ne changez pas votre avis, soit vous choisissez la nouvelle option.

Il semblerait naturel qu'une telle logique soit présente dans un système électoral.

Le théorème d'impossibilité d'Arrow

Ainsi, nous avons défini quatre règles qui semblent importantes à satisfaire par un « bon » mode de scrutin :

1. L'universalité ;
2. L'absence de dictateur ;
3. L'unanimité ;
4. L'indépendance des options non pertinentes.

Il faudrait donc trouver un mode de scrutin satisfaisant ces quatre règles… Or c'est impossible dès lors qu'il y a plus de deux candidats ! Tout mode de scrutin ne respecte pas au moins une de ces quatre règles, selon une démonstration mathématique publiée en 1950 par l'économiste américain Kenneth Arrow[87]. Ce résultat, connu sous le nom de **théorème d'impossibilité d'Arrow**, souligne la difficulté d'agréger les préférences d'électeurs de manière cohérente.

Chapitre 26

Pourquoi Donald Trump ?

Théorie des jeux et règle du *winner takes all*

Le théorème d'impossibilité d'Arrow n'est valable que lorsque plus de deux candidats sont en lice dans une élection. A priori, lorsqu'il n'y a que deux candidats, aucun problème ne se pose : inutile d'organiser deux tours, de répartir les voix données aux candidats les moins bien placés… Un scrutin majoritaire simple suffit : chacun vote pour un candidat, celui qui récolte le plus de voix gagne.

Aux États-Unis, même si des candidats indépendants se présentent à chaque élection présidentielle, le choix des électeurs se fait essentiellement entre deux candidats : le candidat républicain et le candidat démocrate. Pourquoi alors, dans une telle configuration, les Américains ont-ils été amenés à élire comme président Georges W. Bush ou Donald Trump alors qu'ils avaient recueilli moins de voix que leurs adversaires démocrates[a] ?

Nous l'avons dit, les résultats des élections de 2000 et 2016 sont la conséquence du suffrage indirect utilisé aux États-Unis : chacun des 50 États américains (ainsi que Washington, D.C.) doit élire un certain nombre de grands électeurs, et ces grands électeurs doivent à leur tour élire le président américain. Notez bien que ce système n'engendre pas nécessairement les résultats paradoxaux de 2000 ou de 2016 : si chaque État nomme ses grands électeurs de sorte qu'ils représentent le mieux possible sa population (à la proportionnelle), le collège électoral américain devrait représenter fidèlement l'électorat américain, élisant le candidat ayant gagné le vote populaire. Néanmoins, aucun État américain n'utilise un tel système à la proportionnelle, et l'immense majorité d'entre eux utilise la règle du *winner-takes-all* (le

a Dans les deux cas des élections présidentielles de 2000 et 2016, les candidats démocrates avaient tout de même obtenu moins de 50 % du nombre total des suffrages exprimés, en raison de la présence des candidats indépendants. Néanmoins, il est tout à fait possible qu'un candidat obtienne lors d'une élection présidentielle américaine plus de la moitié des suffrages exprimés, mais ne soit pas pour autant élu président. C'est ce résultat paradoxal que nous étudions ici.

gagnant emporte tout) : tous les grands électeurs dont l'État dispose sont affectés au candidat qui a remporté le plus grand nombre de voix dans l'État en question.

La constitution américaine fixe le nombre de grands électeurs dont chaque État dispose, mais laisse aux États le choix du mode de désignation de ses grands électeurs. Dans les premières élections présidentielles des États-Unis, la règle du *winner-takes*-all n'était presque pas utilisée : les États utilisaient alors des règles différentes, notamment la nomination indépendante d'un grand électeur par circonscription électorale. Néanmoins, dès le milieu du XIXe siècle, la règle du *winner-takes-all* devint quasiment universelle aux États-Unis et aujourd'hui, 48 des 50 États américains l'utilisent (le Maine et le Nebraska utilisent un système légèrement différent, mais qui n'est pas non plus un système à la proportionnelle[88]).

Avec ce système, un candidat à la présidence peut tout à fait obtenir plus de voix que tous ses adversaires, et même plus de la moitié des suffrages exprimés, et échouer dans la course à la Maison-Blanche. Il est même envisageable (mais assez improbable) qu'un candidat à la présidence soit élu en ne récoltant que 23 % des suffrages exprimés[89] !

L'utilisation d'un système où le gagnant emporte tout est critiqué pour les écarts qu'il induit entre le vote populaire et le vote des grands électeurs : en 1980, Ronald Reagan emporta 50,7 % des suffrages exprimés, mais près de 91 % des voix des grands électeurs ! Par ailleurs, ce système induit une différence entre les États traditionnellement affiliés à un parti (comme la Californie pour les démocrates et le Texas pour les républicains) – les *safe states* – et les États plus compétitifs qui pourraient être remportés par chacun des deux partis – les *swing states*. Il est peu utile pour un parti de mener une campagne intense dans un *safe state* et d'y dépenser de l'argent en publicité et rassemblements. L'attention est donc essentiellement portée sur une poignée de *swing states*, déterminants pour le vote final. Les adversaires du système du *winner-takes-all* arguent que la voix d'un électeur du New Hampshire (un *swing state*) compte plus que la voix d'un électeur en Californie.

Il paraît étrange que les États américains aient choisi comme mode de désignation des grands électeurs le système du gagnant qui emporte tout : une désignation à la proportionnelle permettrait une meilleure adéquation entre le vote populaire et le vote du collège électoral.

Le fait que les États américains s'accrochent au système du *winner-takes-all* malgré ses critiques semble paradoxal : un système dans lequel le président élu serait systématiquement le candidat ayant obtenu le plus de voix à l'échelle du pays serait préférable. En effet, avec une telle démarche, le nombre d'électeurs satisfaits est maximisé et le nombre d'électeurs déçus est minimisé.

Pour comprendre ce paradoxe, il faut revenir à l'une des premières remarques de ce livre : lorsque des agents font indépendamment des choix, la situation d'équilibre n'est pas nécessairement un optimum pour l'ensemble. Comme les États choisissent indépendamment leur méthode de désignation des grands électeurs, des inefficiences peuvent apparaître.

Imaginez que vous soyez citoyen d'un État américain et que vous soyez chargé de mettre en place un système de désignation des grands électeurs de votre État. Votre but est de trouver le système qui profite le plus aux électeurs de votre État : vous savez que le système optimal pour les États-Unis est un système à la proportionnelle, ou tout autre système qui élit le candidat qui aura récolté le plus de suffrages au niveau national, mais peut-être pouvez-vous mieux faire pour ceux qui habitent dans votre État. Pour que le nombre d'électeurs satisfaits dans votre État soit maximal, il faut que le président élu soit celui qui a obtenu le maximum de voix dans votre État. Si vous êtes dans un État plutôt démocrate (respectivement républicain), vous devrez faire le maximum pour que le candidat démocrate (respectivement républicain) soit élu. Cela revient à donner tous vos grands électeurs au candidat qui aura obtenu le plus de voix dans votre État, autrement dit à mettre en place la règle du *winner-takes-all*.

Mettre en place cette règle a un autre avantage pour votre État, notamment s'il s'agit d'un *swing state*. Si vous mettez en place un système à la proportionnelle, quelques pour cent de différence dans les résultats électoraux ne changeront pas grand-chose pour les partis en lice. Au contraire, l'utilisation d'une règle du *winner-takes-all* rend chaque voix importante : avec une très légère avance, un parti peut faire pencher la balance de son côté et emporter d'un coup un grand nombre de grands électeurs. En 2000, Georges W. Bush emporta les 25 grands électeurs de Floride avec une marge de 0,009 %, soit 537 voix. Cette très faible avance lui permit de devenir le 43e président américain ! Ainsi, en adoptant la règle du *winner-takes-all*, les États américains incitent les partis à plus s'investir sur leur territoire, en rendant cet investissement plus profitable.

Ainsi, l'utilisation du système actuel aux États-Unis correspond à l'utilisation d'une stratégie dominante par chacun des États de l'Union, même si le résultat est sous-optimal.

Néanmoins, il est possible que les États américains se coordonnent dans les années à venir : actuellement, onze États et le district de Columbia, représentant 32 % des voix du collège électoral ont mis en œuvre des lois les liant au Pacte interétats pour le vote populaire national (*National Popular Vote Interstate Compact*). Ce pacte, pour l'instant inactif, prendra effet lorsque ses signataires représenteront plus de la moitié des votes du collège électoral. Lorsqu'il entrera en vigueur, les États signataires alloueront tous leurs grands électeurs au candidat qui aura gagné le vote populaire au niveau national, rendant son élection automatique. La stratégie du *winner-takes-all* est une stratégie dominante, aucun État n'a donc intérêt à en dévier seul, et une coopération est nécessaire. Elle ne peut être crédible et durable que si les États s'engagent fermement à rester coopératifs, ce qui est assuré par l'ancrage du pacte dans la loi. Par ailleurs, comme le pacte n'entrera en vigueur que lorsqu'il rendra automatique l'élection du candidat ayant recueilli le plus de voix, il ne pénalise pas les États « coopératifs » en attendant cette entrée en vigueur.

Chapitre 27

Voter utile

Le vote stratégique

Jusqu'ici, nous n'avons mentionné qu'un seul système électoral dans lequel les électeurs classent les candidats selon leurs préférences : la méthode du vote alternatif. Néanmoins, on peut imaginer bon nombre de systèmes électoraux qui classent des candidats en agrégeant une série de listes de candidats classés par les électeurs. L'une de ces méthodes est la méthode Borda, qui consiste à donner des points à chaque candidat. Lorsqu'un électeur fait son classement, il donne un point au candidat qu'il préfère, deux au deuxième sur sa liste, trois au troisième, etc. Le gagnant est le candidat qui récolte le moins de points (on peut imaginer des variantes de la méthode en changeant la méthode d'allocation des points). Cette méthode, décrite en 1770 par Jean-Charles de Borda, est utilisée en politique dans quelques pays, et dans le monde académique pour nommer des professeurs. On l'utilise aussi dans le monde du sport, et dans le concours Eurovision de la chanson !

Parmi les premières institutions à utiliser la méthode de Borda, on trouve l'Académie des Sciences dont Borda faisait partie. Le système fut rapidement abandonné, car les électeurs de l'Académie surent rapidement comment le détourner : ceux qui voulaient soutenir avec force un candidat plaçaient ses adversaires les plus forts en bas de leur liste. En d'autres termes, des membres de l'Académie donnaient des listes qui ne reflétaient pas leurs véritables préférences, mais étaient destinées à maximiser les chances d'arriver à leurs fins : ils votaient de manière stratégique. Borda comprit la faille de son système, et répondit en disant : « Mon scrutin n'est fait que pour d'honnêtes gens. »[90]

Le vote stratégique retrouva une place importante dans les discussions politiques françaises à la suite de l'élection présidentielle de 2002. Le principal candidat de gauche, Lionel Jospin, était concurrencé par sept autres candidats de gauche et d'extrême gauche, fragmentant l'électorat. Conséquence de cette fragmentation, Lionel Jospin ne récolta pas assez de voix pour participer au second tour de l'élection présidentielle, et fut dépassé par le candidat d'extrême droite Jean-Marie Le Pen. Les commentateurs politiques de l'époque jugèrent que le résultat de l'élection aurait été différent si les électeurs de gauche avaient voté de manière « stratégique » pour Lionel Jospin au lieu d'un autre candidat de gauche qui leur plaisait plus. Ainsi, au second tour, ils n'auraient peut-être pas eu à choisir entre deux candidats à droite du système politique.

Avec le théorème d'impossibilité d'Arrow, nous avons vu qu'aucun système de vote n'était tout à fait parfait, dans le sens où chaque système électoral vient avec ses paradoxes, comme la dépendance aux options non pertinentes. Les exemples ci-dessus mettent en avant un autre problème potentiel des systèmes électoraux : leur sensibilité au vote stratégique (aussi appelé vote tactique ou vote utile). Lorsqu'on utilise comme système électoral la méthode de Borda ou le vote uninominal majoritaire à deux tours, les électeurs peuvent être amenés à ne pas révéler leurs préférences réelles et à mettre en avant des candidats qui ne sont pas leurs premiers choix. Un bon système de vote devrait limiter ce genre de vote stratégique, dans la mesure où il brouille le signal envoyé par les électeurs. Existe-t-il un système qui empêche tout vote stratégique (c'est-à-dire où la stratégie dominante des électeurs est de révéler leurs préférences réelles dans leur vote) ?

Le système du vote alternatif pourrait être une bonne solution : en effet, même si le candidat que l'on préfère n'a aucune chance de gagner, on peut le mettre en premier dans sa liste en sachant qu'il se fera éliminer lors des premiers tours de la sélection. Dans les tours ultérieurs du vote alternatif, ce seront alors les candidats classés un peu plus loin dans la liste qui seront pris en compte.

Lorsque nous avions mentionné l'exemple des trois électeurs de gauche, de droite et du centre, nous avions supposé que les électeurs votaient pour leur candidat préféré et révélaient donc leurs préférences de manière authentique. Un scrutin uninominal majoritaire à un tour (le système de pluralité) donnait alors gagnant le candidat de gauche.

	Partisans de gauche (45 % des électeurs)	**Partisans du centre-droit (15 % des électeurs)**	**Partisans de droite (40 % des électeurs)**
Premier choix	G	C	D
Second choix	C	D	C
Troisième choix	D	G	G

Néanmoins, le résultat peut changer si les électeurs votent de manière stratégique : les électeurs du centre-droit savent que s'ils votent pour leur candidat préféré (C), alors le gagnant de l'élection sera G, leur troisième choix. Au contraire, s'ils votent pour leur deuxième choix D, ils assureront la victoire de ce dernier. Dans ces circonstances, les électeurs du centre-droit ont donc intérêt à utiliser un vote tactique et voter pour le candidat D. Cela montre que dans le scrutin majoritaire à un tour, les électeurs peuvent être incités à ne pas voter pour leur candidat préféré.

Le système du vote alternatif est-il résistant au vote stratégique ? Dans les années 1970, Allan Gibbard et Mark Satterthwaite montrèrent que non : il existe des circonstances dans lesquelles les électeurs n'ont pas intérêt à révéler leurs véritables préférences même dans le système du vote alternatif. Leur résultat va même plus loin, et est connu sous le nom de **théorème de Gibbard-Satterthwaite**[91]. Selon ce théorème, un système électoral dans lequel les électeurs classent leurs candidats qui n'est pas dictatorial n'est pas résistant à la stratégie dès lors que plus de deux candidats sont de potentiels vainqueurs[a].

Ce résultat représente une nouvelle difficulté dans la recherche d'un « bon » système de vote : en démocratie, chaque système de vote a ses défauts.

---

a Pour contourner ce problème, certains proposent d'utiliser des systèmes de vote où l'on note les candidats plutôt que de les classer. Un exemple d'un tel système de vote est le jugement majoritaire, mode de scrutin dans lequel les électeurs attribuent une mention à chaque candidat, de « très bien » à « à rejeter ». Le gagnant du scrutin est celui qui obtient la meilleure mention médiane. Balinski, M., & Laraki, R. (2011). Majority judgment: measuring, ranking, and electing. MIT press.

Point théorique

L'importance de l'information

Dans la scène finale du western *Le Bon, la Brute et le Truand*, les trois personnages qui donnent leur nom au film se retrouvent au milieu d'un immense cimetière. Ils savent que sous l'une des tombes sont enterrés 200 000 dollars en pièces d'or sonnantes et trébuchantes. Tous sont armés, et ces excellents tireurs veulent atteindre le trésor en premier. Le Bon (joué par Clint Eastwood) est le seul qui sait où se trouve la tombe dans laquelle est cachée l'or. Par ailleurs, le bon a donné au Truand un revolver qui n'est pas chargé, et est le seul à le savoir. Pour savoir qui pourra obtenir l'or, les trois personnages s'engagent dans un duel à trois : qui tire sur qui et qui gagne le duel ?

Au cours de la scène, le suspense monte, mais l'issue du duel est déjà déterminée. Comme le Bon est le seul à connaître sous quelle tombe se cache le trésor, aucun des deux autres personnages ne lui tirera dessus : tuer le Bon revient à renoncer au trésor. La Brute tire donc sur le Truand et le Truand sur la Brute. Sur qui tire le Bon ? Il sait que le Truand ne dispose pas d'un revolver chargé et ne constitue donc aucun danger. Pour se protéger, il tue la Brute qui a lui une arme chargée. Après la mort de la Brute, le Bon se retrouve seul avec le Truand qui n'a qu'un revolver vide. Avant même que le premier coup de feu soit tiré, l'issue du duel est déjà scellée.

Pour anticiper l'issue d'un conflit, il ne faut donc pas seulement connaître les motivations des différents joueurs, mais également savoir de quelles informations ils disposent. Souvent, les joueurs ne disposent que d'une information incomplète : on parle d'asymétrie d'information. Dans ce livre, nous nous sommes intéressés à des situations dans lesquelles il n'y avait aucune asymétrie d'information : on parle de **jeux à information parfaite**. Cette hypothèse forte peut évidemment être relâchée et les théoriciens des jeux ont à leur disposition des outils pour spécifier dans leurs modèles les informations auxquelles chacun des joueurs a accès. Nous allons voir ici un exemple d'asymétrie d'information que les économistes connaissent bien.

Le marché des voitures d'occasion

En 1970, l'économiste George Akerlof a écrit un modèle simple pour décrire une inefficacité possible des marchés en prenant pour exemple le marché automobile[92]. Si vous achetez une voiture d'occasion, vous risquez d'avoir de mauvaises surprises : des pièces peuvent se révéler défectueuses, et d'autres peuvent casser rapidement après l'achat. Cela dépend de l'utilisation passée de la voiture : si vous l'achetez à quelqu'un de prudent et de soigneux, vous ne devrez pas trop souffrir de défauts cachés de la voiture. Au contraire, si vous l'achetez à un chauffard, vous courez plus de risques. Le problème est qu'à l'achat, il vous est quasi impossible de différencier un conducteur prudent d'un chauffard, et la plupart des défauts des voitures sont difficiles à observer. À moins d'embaucher un spécialiste qui vous certifiera la qualité de la voiture que vous achetez, votre achat peut être un coup de poker, où vous ne savez pas si la voiture que vous achetez est de bonne ou de mauvaise qualité. Par contre, le vendeur de la voiture, lui, sait si vous faites une bonne ou une mauvaise affaire : il y a une asymétrie d'information. Que se passe-t-il dans un tel marché ?

Dans son modèle, Akerlof considère qu'il y a deux types de voitures, les bonnes et les mauvaises : les vendeurs de bonnes voitures veulent les vendre à un prix haut, les vendeurs de mauvaises voitures veulent bien s'en débarrasser à un prix bas. Les acheteurs, eux, savent qu'il y a de bonnes et des mauvaises voitures sur le marché : pour se couvrir du risque d'achat d'une mauvaise voiture, ils ne veulent bien acheter une voiture qu'à un prix moyen, d'autant plus bas que la probabilité qu'ils achètent une mauvaise voiture est élevée. Le problème est que s'il y a trop de voitures de mauvaise qualité sur le marché, le prix d'achat baisse tellement que les propriétaires de bonnes voitures refusent de vendre les leurs à ce prix et se retirent du marché. Ne restent alors sur le marché que les vendeurs de voitures de mauvaise qualité. À cause de l'asymétrie d'information, le marché des bonnes voitures d'occasion disparaît peu à peu.

Vous avez peut-être déjà observé la chose suivante : on observe un écart de prix significatif entre les voitures neuves et les voitures d'occasion qui n'ont parcouru que quelques centaines ou quelques milliers de kilomètres. D'un point de vue purement technique, il n'y a normalement pas de grande différence entre les voitures neuves et les voitures presque neuves. Néanmoins, il y a pour un acheteur une différence importante entre ces deux types de voitures : les voitures qui sortent tout juste de l'usine ont la garantie d'être en parfait état, sans usure. Au contraire, les acheteurs manquent d'information sur les voitures d'occasion : ne sachant pas exactement quelle est leur qualité, ils retranchent à leur prix une prime de risque. C'est notamment à cause de cette asymétrie d'information que le prix de marché d'une voiture chute nettement dès que son premier propriétaire l'utilise un peu.

Une modélisation formelle

Comment une telle situation est-elle modélisée formellement ? Pour simplifier les choses, considérons les hypothèses suivantes :

1. Il y a deux types de voitures : les bonnes voitures et les mauvaises voitures ;
2. Les vendeurs connaissent la qualité de la voiture qu'ils vendent, mais pas les acheteurs ;
3. Les acheteurs et les vendeurs donnent une valeur différente aux voitures :
    - Une bonne voiture a une valeur de 3 000 $ pour l'acheteur, mais seulement une valeur de 2 000 $ pour le vendeur qui souhaite s'en débarrasser ;
    - Une mauvaise voiture a une valeur nulle pour l'acheteur comme pour le vendeur.
4. Il y a autant de bonnes voitures que de mauvaises voitures, chaque vendeur est mis en relation avec un acheteur, et le jeu se déroule en deux étapes :
    - Le vendeur décide d'abord de mettre sa voiture sur le marché ou de la garder pour lui ;
    - L'acheteur décide ensuite d'acheter la voiture au prix de marché ou de refuser la transaction.
5. Le prix de marché pour les voitures est de 2500λ à l'équilibre, où λ est la fraction de bonnes voitures sur le marché[a].

a Ainsi, s'il n'y a que de bonnes voitures sur le marché, leur prix sera de 2500, à mi-chemin entre la valeur qui leur est donnée par les acheteurs et celle qui leur est donnée par les vendeurs. S'il n'y a que de mauvaises voitures en vente, leur prix sera nul.

Comme le jeu se déroule en deux étapes, nous allons le représenter sous forme extensive, comme nous l'avons fait précédemment. Néanmoins, le jeu du marché des voitures d'occasion a deux caractéristiques que nous n'avons pas vues jusqu'à présent. Tout d'abord, il y a la présence de probabilités : il faut représenter le fait qu'un acheteur possède soit une bonne soit une mauvaise voiture, avec une probabilité de 1/2. Et, crucialement, il faut représenter l'asymétrie d'information entre le vendeur et l'acheteur.

Pour représenter la présence d'un événement aléatoire (le fait que le vendeur possède une bonne ou une mauvaise voiture), nous ajoutons un autre joueur à la partie, que l'on appelle la nature. Ce joueur factice choisit aléatoirement entre une stratégie « bonne » et une stratégie « mauvaise », avec la même probabilité. Si la nature joue la stratégie « bonne », l'acheteur possède une bonne voiture, et si elle joue la stratégie « mauvaise », l'acheteur dispose d'une voiture de mauvaise qualité.

Puis, pour représenter le fait que l'acheteur et le vendeur disposent d'informations différentes, nous associons les nœuds par ensembles d'information. Un **ensemble d'information** regroupe tous les nœuds qu'un joueur est incapable de distinguer. Voyons à quoi cela ressemble sur l'arbre de décision.

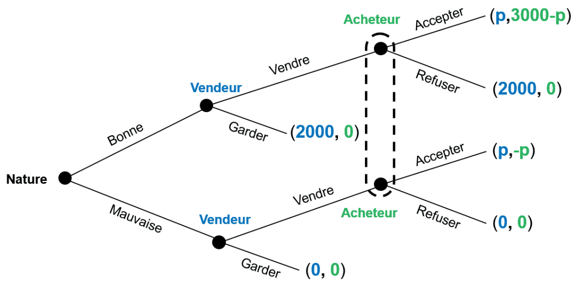


Figure 31.1 : Le modèle du marché d'occasion d'Akerlof (« the market for lemons »).

L'ensemble d'information est représenté sur ce graphe par l'ovale en pointillé, qui englobe les deux nœuds où l'acheteur doit jouer. Cela veut dire que l'acheteur est incapable de distinguer les deux nœuds : il sait que le vendeur a décidé de vendre sa voiture plutôt que de la garder, mais il ne connaît pas la qualité de la voiture, déterminée aléatoirement par la nature.

Le vendeur, lui, sait si sa voiture est de bonne ou de mauvaise qualité. Les deux nœuds qui lui sont associés ne sont donc pas regroupés dans un seul ensemble d'information.

Que se passe-t-il? S'il n'y avait pas d'asymétrie d'information, les choses seraient simples. Nous aurions deux marchés, un marché pour les voitures de bonne qualité et un marché pour les voitures de mauvaise qualité. Le prix des voitures de mauvaise qualité serait nul et le prix d'une voiture de bonne qualité serait de. Le jeu pourrait se résoudre de la façon suivante par raisonnement rétrograde : un acheteur confronté à une voiture de mauvaise qualité est indifférent entre l'acheter ou refuser la transaction, chaque option lui rapportant un gain nul. Par contre, il accepterait toujours d'acheter une voiture de bonne qualité (car $3\,000 - 2\,500 > 0$). Un vendeur disposant d'une voiture de mauvaise qualité est indifférent entre vendre sa voiture et la garder, et un vendeur qui possède une voiture de bonne qualité la vendra toujours pour empocher un gain de 500. Ainsi, dans un jeu d'information parfaite, toutes les bonnes voitures sont vendues, et l'acheteur comme le vendeur ont des gains positifs : c'est la situation optimale.

Lorsqu'il y a une asymétrie d'information, les choses sont plus complexes. Cette fois-ci, il y a un marché unique (et donc un prix unique) pour toutes les voitures. Les propriétaires de voitures de mauvaise qualité ont tout intérêt à tenter de vendre leur voiture plutôt que la garder : ils n'ont après tout rien à perdre. Il y aura donc sur le marché une proportion $\lambda \leq 0{,}5$ de voitures de bonne qualité. Cela implique que le prix de marché sera inférieur à $2\,500 \times 0{,}5 = 1250$. Les propriétaires de voitures de bonne qualité n'ont donc pas intérêt à vendre leur voiture, dans la mesure où $1250 < 2\,000$. À l'équilibre, il n'y a que des voitures de mauvaise qualité sur le marché, tout le monde le sait, et le prix de marché est nul. À cause de cette asymétrie d'information, la vente de voitures de bonne qualité ne se fait pas, alors qu'elle profiterait à l'acheteur comme au vendeur en information parfaite.

D'autres exemples de sélection adverse

Dans le modèle d'Akerlof, les voitures qui restent sur le marché sont de mauvaise qualité : on parle alors de **sélection adverse** (les « bons » éléments ont quitté le marché). Ce terme est bien connu des assureurs qui sont régulièrement confrontés à ce problème. Lorsqu'ils assurent des clients, ils ne savent pas toujours si ceux-ci sont à fort ou à faible risque, et doivent alors proposer les mêmes tarifs à tous. Les clients à fort risque achètent systématiquement une assurance, car il est assez probable qu'ils aient à l'utiliser. La présence de ces clients risqués fait augmenter le prix de l'assurance, car l'assureur devra régulièrement les rembourser. Si le prix augmente trop, les clients « sûrs », qui savent qu'un accident est pour eux peu probable, ne souscrivent pas à l'assurance, car ils estiment que celle-ci coûte bien plus cher que ce qu'ils pourraient en gagner. Alors, l'assureur n'a plus que des clients risqués à assurer, ce qui rend sa tâche difficile. Pour limiter ce problème, les assureurs peuvent par exemple enquêter sur le passé de leurs clients ou leur demander des examens médicaux dans le cas d'assurances santé. Ainsi, elles peuvent estimer le niveau de risque de leurs clients et ajuster leurs prix selon celui-ci.

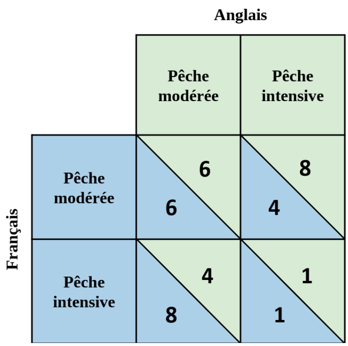
Le problème de la sélection adverse pose également problème lors de crises financières. Les banques font elles aussi face à un problème d'asymétrie d'information lorsqu'elles accordent des prêts à des particuliers ou à des entreprises : si les récipiendaires des prêts savent bien s'ils sont solvables ou non, les banques ne peuvent pas savoir à l'avance si leurs clients seront en mesure de les rembourser. Lors d'une crise, le nombre de clients à risque augmente, et il devient plus coûteux de contracter un emprunt (les taux d'intérêt associés aux prêts augmentent). La conséquence de cette évolution peut mener à un problème similaire à celui du marché automobile. Les clients sûrs, face à l'augmentation des taux d'intérêt, peuvent décider de ne plus emprunter, estimant le coût de l'emprunt trop élevé sachant qu'ils devront le rembourser en intégralité. Les clients à risque, eux, savent qu'il est plausible qu'ils fassent défaut sur le prêt qui leur est accordé, et acceptent alors les taux d'intérêt élevés. Les banques ont alors parmi leurs clients une proportion bien plus élevée de clients à risque, ce qui les pousse à augmenter encore leurs taux d'intérêt pour couvrir ce risque, les faisant entrer dans un cercle vicieux. Dans les faits, en temps de crise, les banques limitent fortement leurs prêts et ne prêtent qu'à des clients dont elles savent qu'ils sont solvables pour éviter ce problème de sélection adverse.

Conclusion

De l'utilisation des modèles

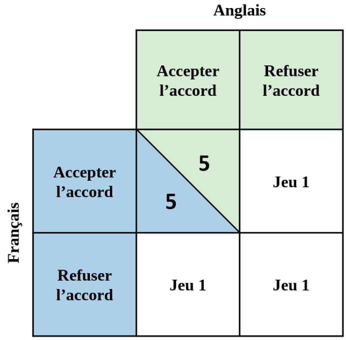
Dans ce livre, nous avons étudié ensemble un grand nombre de modèles et étudié en quoi ils pouvaient apporter un éclairage sur certaines situations de la vie de tous les jours, des paradoxes ou des mécanismes économiques. Nous avons besoin de modèles pour comprendre le monde qui nous entoure, ils nous permettent de simplifier des mécanismes complexes pour en comprendre le fonctionnement. Chaque modèle vient par ailleurs avec ses hypothèses simplificatrices : un physicien qui étudie le mouvement d'objets peut par exemple décider de négliger les frottements, un chimiste décider de négliger les variations de température lors d'une réaction… Lorsque l'on tire des conclusions d'un modèle, il ne faut pas oublier les hypothèses qui ont permis d'y aboutir. Les modèles de théorie des jeux que nous avons étudiés se fondent sur des hypothèses fortes : les agents étudiés sont rationnels, connaissent parfaitement ce qu'ils gagneront selon les décisions prises par tous les joueurs, etc. Il faut donc prendre avec précaution les conclusions amenées par de tels modèles. Évidemment, tous les jeux que nous avons étudiés peuvent être complexifiés pour rendre compte de manques d'information, de mouvements irrationnels ou de dynamiques compliquées : les théoriciens en économie améliorent sans cesse leurs modèles de manière qu'ils reflètent le mieux possible la réalité.

Néanmoins, comme aucun modèle n'est parfait, il s'agit toujours de faire preuve d'humilité intellectuelle et d'utiliser avec précaution leurs conclusions. Dans un des premiers chapitres de ce livre, nous avons parlé d'Elinor Ostrom qui a passé l'essentiel de sa vie à travailler sur les questions de partage des ressources. Cette dernière, dans *La Gouvernance des biens communs*, mentionne les modèles du dilemme du prisonnier et de la tragédie des biens communs qui permettent d'expliquer des cas de surexploitation de ressources naturelles. Elle cite plusieurs économistes qui utilisent ces modèles pour faire des recommandations politiques : ainsi, un libertarien affirme : « Le seul moyen d'éviter la tragédie des biens communs pour les ressources naturelles et la faune est d'en finir avec le système de propriété commune en créant un système de droit à la propriété privée[93]. » Un autre auteur affirme que « Si nous arrivons à éviter la tragédie des biens communs, ce ne sera qu'en ayant recours à la tragique nécessité du Léviathan[94]. » Ces deux possibilités (celle de la privatisation et d'un contrôle par l'État) sont les deux solutions à la tragédie des biens communs que nous avions mises en avant en étudiant celle-ci. Comme nous l'avions remarqué, ces deux solutions ne sont pas universellement applicables : il est difficile de privatiser un banc de poissons dans l'océan Atlantique, et un agent étatique ne peut pas toujours vérifier que les citoyens respectent bien les règles qui leur sont imposées. Par ailleurs, ces affirmations partent de l'hypothèse que l'utilisation de ressources partagées vient nécessairement avec une tragédie des biens communs, et que ceux qui partagent les ressources sont piégés dans une inextricable surexploitation des ressources. Ostrom pense au contraire que les hommes ne sont pas comme les prisonniers du dilemme, mais peuvent construire des institutions capables de les extraire de la tragédie à laquelle ils semblent promis. Reprenons un exemple similaire à celui des pêcheurs français et anglais du début de ce livre :



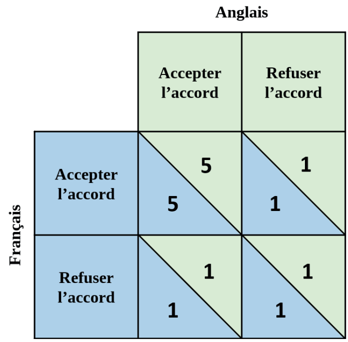
Le jeu 1 : Un dilemme du prisonnier simple.

Si l'État ne peut pas toujours forcer les pêcheurs à mener une activité modérée, les pêcheurs peuvent eux-mêmes construire un mécanisme qui les force à pêcher modérément : ils peuvent mettre en place un tribunal local pour régler les contentieux, embaucher un agent privé pour surveiller l'activité de l'ensemble des pêcheurs… De manière générale, les joueurs peuvent mettre en place un accord, un mécanisme qui force les deux joueurs à pêcher de manière modérée. Évidemment, la mise en place d'un tel accord a un coût. Imaginons dans notre exemple que la mise en place de l'accord se fasse avec un coût de 1 pour chaque joueur, et que si les deux pêcheurs ne parviennent pas à un accord, ils reviennent au premier jeu, le dilemme du prisonnier classique.



Le jeu 2 : La possibilité d'un accord.

Nous savons bien qu'à l'équilibre, le jeu 1 donne un gain faible aux deux joueurs, conséquence d'une surexploitation des ressources. Ne pas accepter l'accord revient alors à l'équilibre et à accepter un gain de 1.



Dans le jeu 2, la coopération est un équilibre de Nash.

Dans cette nouvelle situation, il est clair que les deux joueurs vont avoir naturellement tendance à choisir un accord plutôt qu'à s'enfermer dans un cercle vicieux : la stratégie de coopération est devenue un équilibre de Nash grâce à ce changement des règles du jeu.

Cet exemple simple montre que changer quelques paramètres dans un jeu peut en changer radicalement l'issue. Il est donc assez dangereux d'accepter les conclusions tirées d'un modèle comme des vérités absolues : Elinor Ostrom, première femme à avoir reçu le prix Nobel d’économie (et la seule jusqu’en 2019), nous incite donc à la prudence vis-à-vis des modèles, surtout lorsqu’ils amènent à des conclusions trop tranchées.

Remerciements

De nombreuses améliorations proposées par Dominique, François-Xavier et Jean-Marie ont largement amélioré la qualité de ce texte : je souhaite les remercier pour leurs remarques précises et toujours pertinentes.

Anne, Côme, Margaux, Paul, Pierre, Raphaël et Romain m'ont également aidé à mieux expliquer certains concepts. Si les explications contenues dans ce livre vous ont semblé claires, c'est aussi grâce à eux.

Ce livre n'aurait pas pu voir le jour sans le remarquable travail éditorial de Stéphane : toujours plein d'idées, il a largement contribué à donner au livre sa structure et à équilibrer concepts théoriques et anecdotes. J'espère que celles-ci éclairent bien les concepts présentés et vous aideront à mieux les retenir.

Enfin, je souhaite remercier Fiammetta pour son attentif travail de composition : c'est elle qui a donné au livre son apparence et qui a rendu sa lecture agréable.

Références et notes

1. Michael T. McGee, *The modern day border war : how Kansas can end its economic development battle with Missouri in the Kansas City Metropolitan Area*, 2015.
2. The Kansas City Star, *Curb tax incentives to more effectively stoke private development in Kansas City area*, 30 octobre 2015.
3. NextCity, K.C. *Economic Border War Takes One Step Forward, Two Steps Back*, 4 mai 2016. Traduction de l'auteur.
4. Campbell, J. Gabriel. « Collective management of hill forests in Nepal: the community forestry development project. » Proceedings of the *Conference on Common Property Resource Management*, April 21-26, 1985. National Academies, 1986.
5. Ostrom, Elinor. *Governing the commons.* Cambridge university press, 2015. Page 23.
6. Ibid, page 23.
7. Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859), 1243-1248.
8. Thucydide, *Guerre du Péloponnèse* (Traduction par Jean Alexandre Buchon), Livre I, 141. Panthéon littéraire, 1850.
9. Levenstein, Margaret C., and Valerie Y. Suslow. "What determines cartel success?." *Journal of economic literature* 44.1 (2006): 43-95.
10. Tim Daiss, 'Unfortunately, We Tend To Cheat,' Ex-Saudi Oil Chief Says Of OPEC, *Forbes*, 4 décembre 2016.
11. Traités SALT I et II, START I et II, SORT et New START.
12. Hotelling, H. (1990). Stability in competition. In *The Collected Economics Articles of Harold Hotelling* (pp. 50-63). Springer, New York, NY.
13. Ici, les gains du tableau ne sont pas des gains monétaires, mais des gains en « bien-être ». En économie, on parle d'utilité. Nous reparlerons de cette notion au chapitre 21.
14. On parle de duopole lorsque deux firmes sont en compétition. Dans ce modèle, on suppose qu'il n'y a pas collusion : s'il y

avait la possibilité d'une entente entre les deux entreprises, ces dernières baisseraient légèrement leur production pour conduire les prix à la hausse et espérer ainsi des marges plus importantes.

15. Caro, Robert A. *The power broker: Robert Moses and the fall of New York*. Alfred a Knopf Incorporated, 1974.

16. En particulier, on ne sait pas encore s'il y a un avantage à jouer les blancs (donc en premier) aux échecs.

17. Charles Mackay, *Memoirs of Extraordinary Popular Delusions and the Madness of Crowds*. 1852. Chapitre 3. Traduction de l'auteur.

18. P. T. Barnum. 1866. *The humbugs of the world : An account of humbugs, delusions, impositions, quackeries, deceits and deceivers generally, in all ages.*

19. Earl Thompson, « The tulipmania: Fact or artifact? », *Public Choice*, vol. 130, no 1–2, 2007.

    Dans son article, Thompson estime que les contrats échangés lors de la tulipomanie n'étaient pas des contrats à terme à proprement parler, mais plutôt des contrats d'options, dans la mesure où les contrats à terme étaient alors annulables à peu de frais.

    Dans un contrat d'option, le vendeur s'engage à livrer le bien à une date donnée et pour le prix convenu dans le contrat si l'acheteur le veut. Par exemple, si un bourgeois achète un contrat d'option à un marchand pour un bulbe à un prix de 100 florins et à échéance de trois mois, le bourgeois a deux options lorsque le contrat arrive à échéance : si le prix du bulbe sur le marché est supérieur à 100 florins, le bourgeois demande la livraison du bulbe, paie le marchand 100 florins comme spécifié dans le contrat, et peut le revendre directement au prix du marché, réalisant ainsi une plus-value. Si le prix du bulbe sur le marché est inférieur à 100 florins, le bourgeois n'a pas intérêt à acheter pour 100 florins un bulbe au marchand : en effet, il est plus profitable pour lui de l'acheter au prix du marché inférieur à 100 florins. Il décide donc de ne pas exercer son droit à acheter au marchand un bulbe à 100 florins. On dit alors que le bourgeois abandonne son option. Un contrat à terme annulable facilement a donc des caractéristiques très proches d'un contrat d'option : en effet, l'annulation du contrat à terme correspond au choix d'abandonner son option. Thompson dans son article montre qu'avec cet éclairage, la tulipomanie n'est pas un exemple de spéculation désastreuse aussi spectaculaire que Mackay et d'autres ne pourraient le laisser croire. Dans la mesure où la plupart des spéculateurs ont simplement décidé de ne pas exercer leurs options à la fin de la crise, ils n'ont pas perdu autant d'argent que ce que Mackay prétend dans *Memoirs of Extraordinary Popular Delusions and the Madness of Crowds*.

20. Peter M. Garber. Famous First Bubbles. *The Journal of Economic Perspectives*, Vol. 4, No. 2. (Spring, 1990), pp. 35-54.

    Dans son article, Garber met en valeur le fait que cette chute dramatique des prix n'a pas pour autant mené à une crise économique majeure comme raconté par Mackay et n'a pas mis fin à l'âge d'or que les Provinces Unies connurent au XVIIe siècle. En effet, au moment de la crise tulipière, le gouvernement hollandais donna aux échangeurs de tulipes le moyen d'annuler les contrats dans lesquels ils s'étaient engagés à peu de frais.
21. La tulipomanie donne encore lieu à de nombreux débats d'interprétation. Les économistes et historiens sont encore divisés sur les raisons qui ont mené à l'apparition de cette bulle, et certains - Thompson en particulier - considèrent qu'il est même incorrect de parler de bulle spéculative. Il y a un consensus général sur le fait que Mackay a exagéré sa description de la crise pour soutenir sa thèse de l'irrationalité des foules.
22. *Théorie générale de l'emploi, de l'intérêt et de la monnaie* (chapitre 12), John Maynard Keynes, 1936.
23. De nombreuses études ont tenté de savoir quels sous-groupes de la population étaient les plus susceptibles de donner des réponses proches de l'équilibre de Nash. Ainsi, une étude a montré que les joueurs d'échecs n'étaient pas particulièrement « meilleurs » à ce jeu (quelque soit leur niveau) malgré leur habitude à se mettre à la place de leurs adversaires (*Chess players' performance beyond 64 squares: A case study on the limitations of cognitive abilities transfer*, Christoph Bühren, Björn Frank). Néanmoins, des chercheurs ont montré que de meilleures capacités cognitives étaient associées à des réponses plus basses au jeu des deux tiers (*Higher cognitive ability is associated with lower entries in a p-beauty contest*, Terence C. Burnham, David Cesarini, Magnus Johannesson, Paul Lichtenstein, Björn Wallace, *Journal of Economic Behavior & Organization*, Volume 72, Issue 1, 2009).
24. Unraveling in Guessing Games: An Experimental Study, Rosemarie Nagel, *The American Economic Review*, Vol. 85, No. 5 (Dec.

1995), 1313-1326. Voir également : Instinctive and cognitive reasoning: a study of response times, Ariel Rubinstein, *Economic Journal* 117 (2007), 1243–1259

25. Inspired and inspiring: Hervé Moulin and the discovery of the beauty contest game, Rosemarie Nagel , Christoph Bühren, Björn Frank, *Mathematical Social Sciences*, Volume 90, November 2017.
26. La BCE (Banque Centrale européenne) impose aux banques de détenir dans leurs fonds propres un pourcentage fixé de l'argent prêté à leurs clients. Voir la recommandation de la Banque Centrale européenne du 13 décembre 2016 relative aux politiques de distribution de dividendes.
27. Le Monde. *En Grèce, les banques et la Bourse fermées pour une semaine*. 28 juin 2015.
28. Directive européenne 2009/14/CE. Aux USA, une régulation similaire existe, avec la *Federal Deposit Insurance Corporation* (FDIC) qui assure les clients des banques américaines.
29. Cette règle est entérinée dans le droit international : une convention sur le trafic routier signée à Genève en 1949 stipule qu'un pays doit avoir un sens de circulation uniforme sur tout son territoire.
30. Smith, A. (1776). *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations*, traduction française de Germain Garnier, tome I, chapitre 2, livre 1.
31. Ibid. Tome II, chapitre 2, livre 4.
32. La Birmanie et le Liberia sont également restés à d'anciens systèmes de mesure, ainsi que les îles Palaos, Marshall et enfin la Micronésie.
33. Los Angeles Times. Mars Probe Lost Due to Simple Math Error. 1er octobre 1999.
34. The New York Times. *Jet's Fuel ran out after metric conversion errors*. 30 juillet 1983.
35. Ministère de la culture, Délégation générale à la langue française et aux langues de France, *Vers une norme française pour les claviers informatiques*, 2016.
36. La sous-optimalité du système QWERTY a été largement popularisée par l'article de Paul David, Clio and the Economics of QWERTY, même si la supériorité du clavier DSK fait toujours matière à débat : en effet, les études qui ont montré sa meilleure qualité ont été menées par son inventeur, Dvorak. Ce dernier

avait une incitation financière à développer l'adoption d'un clavier donc il était propriétaire.

David, P. A. (1985). Clio and the Economics of QWERTY. *The American economic review*, 75(2), 332-337.

The Economist, The QWERTY myth, 1er Avril 1999.

37. Abernathy, W. J., & Wayne, K. (1974). *Limits of the learning curve. Harvard Business Review*, 52(5), 109-119.
38. Arthur, W. B. (1989). Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *The economic journal*, 99(394), 116-131.

    Cowan, R. (1991). Tortoises and hares: choice among technologies of unknown merit. The economic journal, 101(407), 801-814.
39. Breda, Thomas. « 5. Pourquoi y a-t-il si peu de femmes en science ? », *Regards croisés sur l'économie*, vol. 15, no. 2, 2014, pp. 99-116.
40. Christen-Lécuyer, Carole. « Les premières étudiantes de l'Université de Paris », *Travail, genre et sociétés*, vol. 4, no. 2, 2000, pp. 35-50.
41. Loi française du 16 juin 1881 instituant la gratuité de l'enseignement primaire public dite Loi Ferry 1.
42. Loi du 21 décembre 1880 sur l'enseignement secondaire des jeunes filles.
43. The Racial Dot Map. *Weldon Cooper Center for Public Service. University of Virginia.*
44. Olzak, S., Shanahan, S., & McEneaney, E. H. (1996). Poverty, segregation, and race riots: 1960 to 1993. *American Sociological Review*, 590-613.
45. Trounstine, J. (2016). *Segregation and inequality in public goods. American Journal of Political Science*, 60(3), 709-725.
46. *General Social Survey*, 2016 NORC at the University of Chiago.
47. C'est le prix Nobel d'économie Thomas Schelling qui a introduit pour la première fois en théorie des jeux l'étude des phénomènes de ségrégation dans un article célèbre. Schelling, T. C. (1971). *Dynamic models of segregation. Journal of mathematical sociology*, 1(2), 143-186.
48. Le modèle qui suit a été développé par Junfu Zhang, dans Zhang, J. (2004). *Residential segregation in an all-integrationist world. Journal of Economic Behavior & Organization*, 54(4), 533-550.

49. Schelling, T. C. (2006). *Micromotives and macrobehavior*. WW Norton & Company.

50. Schelling est loin d'être le premier à avoir décrit ce phénomène : ainsi, dans un article publié en 1928, on peut lire : « [Le passage d'un groupe ethnique majoritaire à un autre dans une zone urbaine] est un phénomène décrit par plusieurs étapes : (1) l'invasion [sic], qui commence souvent sous la forme d'une pénétration peu remarquée ou graduelle, puis (2) une réaction, soit la résistance modérée ou violente des habitants de la communauté, ce qui mène habituellement à (3) une arrivée de nouveaux arrivants et l'abandon rapide du voisinage par ses anciens occupants et (4) un paroxysme, ou l'accomplissement d'un nouvel équilibre communautaire stable. » (traduit de l'anglais par l'auteur)

    Burgess, E. W. (1928). Residential segregation in American cities. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 140(1), 105-115.

51. Données de la *Chicago Area Geographic Information Study*, University of Illinois.

52. Le modèle de Schelling est toujours sujet à débat. Même si les phénomènes de bascule ont été observés dans certaines villes américaines, comme en témoigne l'étude de Card & al. dans Tipping and the Dynamics of Segregation, un tel mouvement n'est pas automatique, et des villes ethniquement diversifiées peuvent être stables, comme William Easterly l'a montré dans Empirics of strategic interdependence : the case of the racial tipping point. Malgré la critique de l'idée initiale de Schelling, la théorie du tipping point reste un incontournable largement étudié dans les sciences économiques.

    Card, D., Mas, A., & Rothstein, J. (2008). Tipping and the Dynamics of Segregation. *The Quarterly Journal of Economics*, 123(1), 177-218.

    Easterly, W. (2009). Empirics of strategic interdependence: the case of the racial tipping point. *The BE Journal of Macroeconomics*, 9(1).

53. La notion de *tipping point* a été largement popularisée par le livre The tipping point de Malcom Gladwell :

    Gladwell, M. (2006). *The tipping point: How little things can make a big difference*. Little, Brown.

54. Pour être précis, nous avons ici considéré que les seuils de tolérance des habitants de la ville sont distribués selon une loi

normale (ou « gaussienne ») centrée en 0,5. La fonction de répartition associée à cette loi est une courbe en « S » que l'on retrouve ici.

55. Les articles suivants détaillent bien le fonctionnement de ces modèles de points de bascule et fournissent des exemples intéressants d'application :

    Granovetter, M. (1978). *Threshold models of collective behavior. American journal of sociology*, 83(6), 1420-1443.

    Lamberson, P. J., & Page, S. E. (2012). Tipping points. *Quarterly Journal of Political Science*, 7(2), 175-208.

56. Tireurs et gardiens ne choisissent que très rarement de tirer ou de rester (respectivement) au centre de la cage, dans 7,5 % et 1,7 % des cas respectivement dans l'échantillon de 1417 penaltys étudiés dans l'étude d'Ignacio Palacios-Huerta utilisée comme référence plus bas. Palacios-Huerta, Ignacio. « Professionals play minimax. » *The Review of Economic Studies* 70.2 (2003): 395-415.
57. Palacios-Huerta, Ignacio. "Professionals play minimax." *The Review of Economic Studies* 70.2 (2003): 395-415.
58. Évidemment, les matrices de gains ne sont pas les mêmes pour un joueur droitier et un joueur gaucher, mais elles sont symétriques. Ici, on représente ce qui se passe pour un joueur droitier (la situation la plus commune). Pour un joueur gaucher on a une situation symétrique (il suffit d'échanger « droite » et « gauche » dans le tableau pour trouver les gains correspondants).
59. Thogerson, Collette M., et al. « Winning the genetic lottery: biasing birth sex ratio results in more grandchildren. » 2013.
60. Smith, John Maynard. *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge university press, 1982.
61. Smith, J. Maynard, and George R. Price. "The logic of animal conflict." *Nature* 246.5427 (1973) : 15.
62. Konrad, Lorenz. "On aggression." Trans. Marjorie Kerr Wilson. *New York : Harcourt, Brace & World* (1966).
63. Les biologistes ont nommé cette stratégie « bourgeois », et ont montré qu'elle donnait dans tous les cas de meilleurs résultats que les stratégies « faucon » et « colombe » : on parle d'une stratégie évolutivement stable.
64. Gore, Jeff, Hyun Youk, and Alexander Van Oudenaarden. "Snowdrift game dynamics and facultative cheating in yeast." *Nature*

459.7244 (2009) : 253.
65. Sinervo, Barry, and Curt M. Lively. "The rock–paper–scissors game and the evolution of alternative male strategies." *Nature* 380.6571 (1996) : 240.
66. *New York Times*, Adressing soldiers, Bush denounces early pull-out in Iraq, 5 juillet 2006. Traduction de l'auteur.
67. Mayrhofer-Reinhartshuber, D., et al. "Effects of financial incentives on the intention to consent to organ donation: a questionnaire survey." *Transplantation proceedings*. Vol. 38. No. 9. Elsevier, 2006.
68. McKelvey, Richard D., and Thomas R. Palfrey. "An experimental study of the centipede game." *Econometrica: Journal of the Econometric Society* (1992): 803-836.
69. Palacios-Huerta, I., & Volij, O. (2009). Field centipedes. *American Economic Review*, 99(4), 1619-35.
70. John Foster Dulles, "The Evolution of Foreign Policy," *Before the Council of Foreign Relations*, New York, N.Y., Department of State, Press Release No. 81 (January 12, 1954). (Traduction de l'auteur.)
71. Peterson, Susan. *Crisis bargaining and the state: The domestic politics of international conflict*. University of Michigan Press, 1996.
72. Life, *My Alarming Interview With Khrushchev* by Avrell Harriman, 13 juillet 1959.
73. Garci Rodriguez de Montalvo, *Las sergas de Esplandián* (*Les Exploits d'Esplandien*), 1510.
74. *Wired*, Inside the apocalyptic soviet doomsday machine, 21 septembre 2009.
75. Le dispositif était nommé Emergency Rocket Communications System.
76. Powell, R. (1999). In *The shadow of power: States and strategies in international politics*. Princeton University Press.
77. Axelrod, Robert. « Effective choice in the prisoner's dilemma. » *Journal of conflict resolution* 24.1 (1980): 3-25.
78. Axelrod, Robert. « More effective choice in the prisoner's dilemma. » *Journal of Conflict Resolution* 24.3 (1980): 379-403.
79. La coopération tacite entre soldats de lignes adverses a été particulièrement mise en avant par Tony Ashworth dans Trench Warfare 1914-1918 : the live and let live system (1980). Ashworth fonde son analyse sur des lettres et témoignages de soldats de la

Première Guerre mondiale.

80. Tony Ashworth, *Trench Warfare 1914-1918 : the live and let live system*, 1980. Page 100. (Traduction de l'auteur).
81. Ibid. Page 101. (Traduction de l'auteur).
82. Ibid. Page 101. (Traduction de l'auteur).
83. Axelrod R, Hamilton WD. The evolution of cooperation. *Science*. 1981 Mar 27;211(4489):1390-6.
84. Gelman A. Methodology as ideology: some comments on Robert Axelrod's The Evolution of Cooperation. QA *Rivista dell'Associazione Rossi-Doria*. 2008 Sep 15.
85. Louth, Jonathon, and Lisa Hill. "Compulsory voting in Australia: Turnout with and without it." *Australian Review of Public Affairs* 6.1 (2005): 25-37.
86. On observe néanmoins la tendance suivante : plus une élection est serrée, plus le taux d'abstentionnisme est faible. Ainsi, à l'élection présidentielle américaine de 2016, les États où les taux d'abstention étaient le plus élevés étaient les États d'Hawaï et de Virginie de l'Ouest (58 % et 50 % respectivement) : ces États étaient parmi ceux où l'écart de voix était le plus important entre les deux candidats majeurs, de 32 % et 42 % des voix respectivement. Au contraire, dans les États du Minnesota et du New Hampshire, où les taux d'abstention étaient les plus faibles (à 26 % et 29 % respectivement), les élections étaient beaucoup plus serrées : seuls 1,5 % et 0,4 % des voix (respectivement) séparaient Donald Trump d'Hillary Clinton dans ces États.
87. Arrow, K. J. (1950). A difficulty in the concept of social welfare. *Journal of political economy*, 58(4), 328-346.
88. Dans ces États, deux grands électeurs sont alloués au parti qui remporte le plus de voix dans l'État tout entier, et chaque parti remporte par ailleurs un grand électeur supplémentaire pour toute circonscription électorale dans laquelle il remporte la pluralité. Ainsi, si un parti remporte une légère majorité dans chaque circonscription électorale, il remportera l'ensemble des grands électeurs : le système utilisé par le Maine et le Nebraska ressemble donc dans les faits à la règle du winner-takes-all. Dans leur histoire, ces deux États ont toujours donné leurs grands électeurs à un unique parti, sauf à deux reprises où elles ont séparé leurs grands électeurs entre les démocrates et les républicains.
89. National Public Radio, *How To Win The Presidency With 23 Per-*

cent Of The Popular Vote, 2 novembre 2016.

90. Crépel, P. (1997). Condorcet : homme des Lumières et de la Révolution. ENS Éditions.

91. Gibbard, A. (1973). Manipulation of voting schemes: a general result. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 587-601.

    Satterthwaite, M. A. (1975). Strategy-proofness and Arrow's conditions: Existence and correspondence theorems for voting procedures and social welfare functions. *Journal of economic theory*, 10(2), 187-217

92. Akerlof, G. A. (1978). The market for "lemons": Quality uncertainty and the market mechanism. In *Uncertainty in economics* (pp. 235-251). Academic Press.

93. Smith, R. J. (1981). *Resolving the tragedy of the commons by creating private property rights in wildlife*. Cato J., 1, 439. (Traduction de l'auteur.)

94. Ophuls, W. (1973). *Leviathan or oblivion. Toward a steady state economy*, 214, 219. (Traduction de l'auteur.)

Achevé d'imprimer en juin 2020

Dépôt légal juin 2020