

Quand l'informatique rencontre l'économie

Fanny Pascual

Fluidifier la circulation routière ou décider de la répartition dans un budget participatif. A priori, rien à voir, et pourtant ce sont deux exemples de situations où informatique et économie se rejoignent pour satisfaire au mieux les objectifs des usagers.

Le 11 décembre 2021 était inauguré le Grand contournement ouest de Strasbourg, une autoroute censée désengorger le centre-ville, fluidifier la circulation dans la métropole et accessoirement améliorer la qualité de l'air. Une semaine plus tard, le journal local, les *Dernières Nouvelles d'Alsace*, titrait: «Premier afflux, premier bouchon!» Rien ne s'était passé comme prévu. Les promoteurs du projet, élus en tête, pensaient que le meilleur moyen de supprimer des embouteillages était forcément d'ajouter une voie. Ce n'est pas le cas. En réalité, il vaut parfois mieux au contraire en supprimer... Pour comprendre ce paradoxe, il convient de s'intéresser aux différentes méthodes visant à satisfaire du mieux possible, et dans diverses situations, un grand ensemble d'acteurs comme des automobilistes pressés d'arriver à destination, ou bien des citoyens investis dans l'amélioration de leur cadre de vie.

Ces questions ont profité au xx^e siècle du développement de l'optimisation combinatoire, un domaine de l'informatique dont le but est de concevoir des méthodes qui trouvent la meilleure solution parmi un ensemble de possibilités. Cet ensemble est souvent très grand et même croît en général exponentiellement par rapport au nombre de données, mais l'on souhaite tout de même trouver rapidement la meilleure solution, sans avoir à les examiner toutes. Par exemple, il peut s'agir de trouver le chemin le plus court parmi ceux, nombreux, reliant deux villes (c'est ce que font les GPS). Le mathéma-

ticien néerlandais Edsger Dijkstra publia en 1959 un algorithme résolvant ce problème et reposant, schématiquement, sur un principe dit d'«exploration à partir du meilleur»: de proche en proche, on examine les étapes intermédiaires depuis un départ vers une arrivée en attribuant des valeurs à chaque portion de trajet, l'objectif étant de minimiser la somme des valeurs du parcours entier.

De nombreux autres problèmes existent, comme celui de trouver le meilleur ordre dans lequel fabriquer des pièces dans une usine afin de maximiser la production. Dans tous les cas, il s'agit de satisfaire une seule personne, qu'elle soit automobiliste ou chef d'entreprise, en optimisant un critère. Quand les critères sont multiples, et parfois contradictoires, par exemple minimiser la longueur d'un trajet et le coût des péages, l'algorithme trouve les

solutions de bon compromis et en l'occurrence l'automobiliste choisit parmi les solutions proposées.

UN POUR TOUS ET CHACUN POUR SOI

Que se passe-t-il quand plusieurs personnes interagissent? La question relève cette fois de la théorie des jeux, qui ne s'intéresse pas seulement aux jeux de société. Cette discipline vise à modéliser toute situation où des individus interagissent, chacun devant prendre une décision, les stratégies des uns ayant des conséquences sur celles des autres. Dans ce cadre, le mathématicien et économiste américain John Nash énonça vers 1950 un célèbre théorème: il existe toujours, dans de telles situations, une solution d'équilibre (on parle désormais d'un équilibre de Nash) où personne n'a intérêt à chan-

Un équilibre de Nash est une situation où personne n'a intérêt à changer de stratégie tant que les autres ne le font pas non plus

Interstices est la revue scientifique en ligne éditée par Inria (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique), avec ses partenaires. Ses articles sont rédigés par des scientifiques et couvrent un large panorama de la recherche en informatique et mathématiques appliquées, donnant des clés pour comprendre les enjeux liés au numérique. **Interstices** est en libre accès sur <https://interstices.info>



© Social Media Hub/Shutterstock

▲ Comment empêcher les embouteillages, comme celui-ci à Kuala Lumpur, en Malaisie ?

ger de stratégie tant que les autres ne le font pas non plus.

Ce domaine prit plus d'importance encore au début des années 2000, lors de l'avènement d'internet, un réseau partagé par de multiples entités ayant chacune ses propres intérêts. Il n'était plus possible d'optimiser un critère sans tenir compte des actions des autres entités. En informatique, c'est ainsi que naquit la théorie des jeux algorithmique, qui emprunte des concepts à la théorie des jeux et à l'économie. L'idée est d'analyser dans quelle

mesure, dans une situation d'équilibre de Nash donnée, un comportement individualiste peut détériorer l'efficacité globale du système.

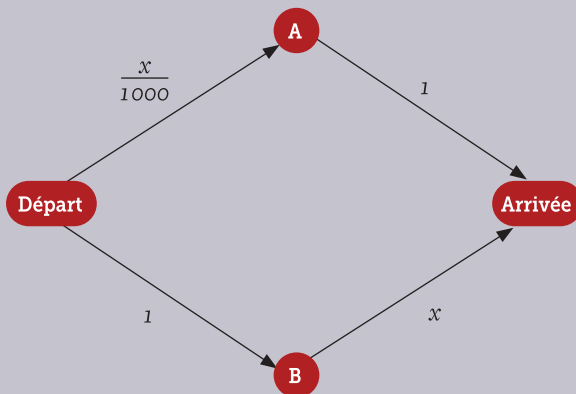
Prenons l'exemple d'un réseau routier sur lequel circulent des automobilistes. Chacun souhaite rejoindre le plus rapidement possible sa destination et prendre le chemin le plus rapide, étant donné ce que font les autres. En d'autres termes, si la route la plus courte en distance est surchargée, un conducteur peut avoir intérêt à en emprunter une autre. Un cas

extrême illustre la situation, celui d'un carrefour sans signalisation ni agent de police: pas de doute, le comportement des automobilistes, tous s'imaginant prioritaires, entraîne rapidement un blocage, un bouchon...

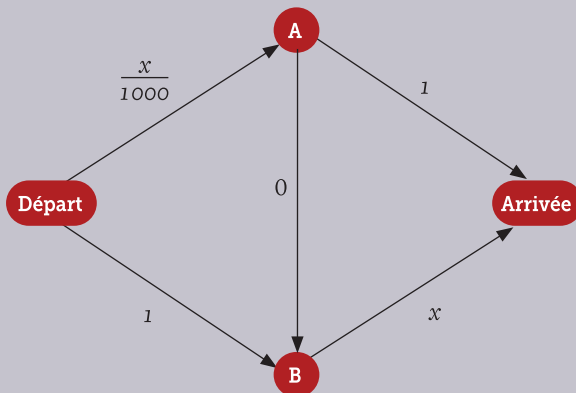
Heureusement, de telles situations sont rares. Au début des années 2000, Tim Roughgarden, de l'université Stanford, aux États-Unis, s'est intéressé au temps moyen de trajet quand des usagers se partagent un réseau routier. Pour chaque tronçon de ce dernier, le temps de par- ▶

LE PARADOXE DE BRAESS

En 1969, à Stuttgart, en Allemagne, des investissements sur le réseau routier visent à fluidifier la circulation. Peine perdue : la situation ne s'est améliorée qu'après la fermeture d'une section de route nouvellement construite. Le mathématicien allemand Dietrich Braess avait pourtant mis en évidence un tel paradoxe... un an auparavant. Pour comprendre, considérons le réseau routier ci-dessous.



Tous les véhicules ont le choix entre deux chemins, soit (Départ, A, Arrivée) soit (Départ, B, Arrivée), et ont intérêt à se répartir équitablement entre les deux. Ici, x représente un nombre de véhicules, avec comme conditions initiales 1000 véhicules qui vont de Départ à Arrivée. Dans un équilibre de Nash, le temps de trajet moyen est de $(1 + 0,5)$ heure, soit 90 minutes. Supposons maintenant qu'une route très rapide soit construite, reliant A à B, et que, pour simplifier les calculs, le trajet s'y fasse « quasi instantanément ». Le réseau devient alors le suivant :



Tous les véhicules ont maintenant intérêt à emprunter le chemin (Départ, A, B, Arrivée), de durée $2x/1000$. Dans la seule situation d'équilibre, le temps de trajet moyen est de... deux heures. Ainsi l'ajout de la nouvelle route ultrarapide a allongé le temps de trajet moyen d'une demi-heure ! C'est le paradoxe de Braess.

Le cours entre les deux extrémités s'exprime sous la forme d'une fonction $ax + b$, où x est le nombre de voitures circulant, et a et b des nombres qui caractérisent le temps de trajet sur ce tronçon: le temps minimal de trajet est donc b , et ce temps augmente (surtout avec un a élevé) avec x .

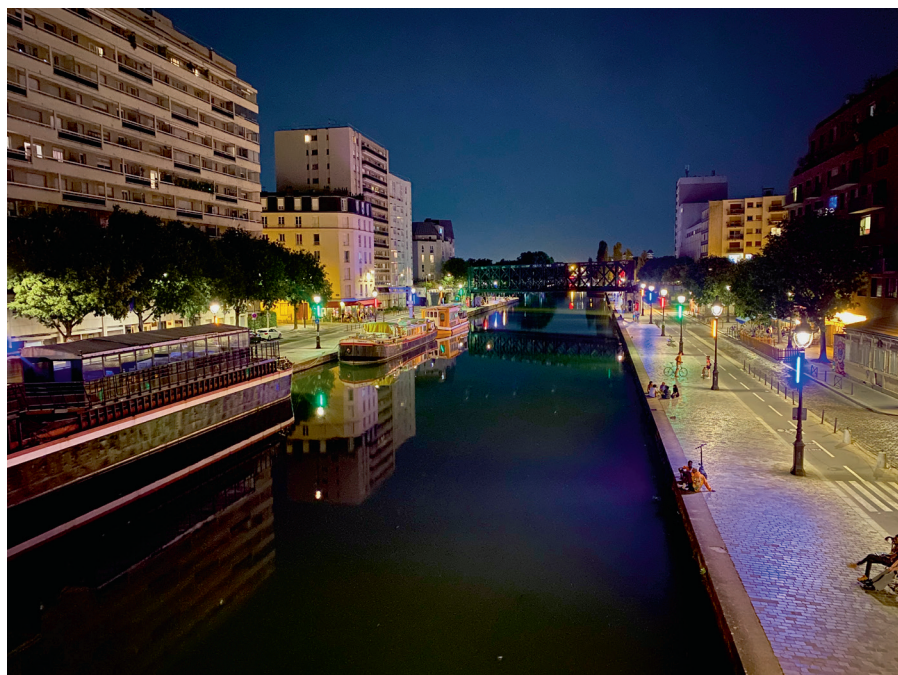
Le chercheur a prouvé que, quel que soit le réseau routier et les points de départ et de destination, le fait que chaque automobiliste choisisse le chemin le plus rapide dans sa situation augmente le temps de trajet moyen d'au plus 33%, par rapport à la même situation où un « organisateur » indiquerait à chaque automobiliste quelle route emprunter.

LE PRIX DE L'ANARCHIE

Ce nombre, 33%, mesure la perte d'efficacité du système due au comportement individualiste des usagers et à leur absence de coordination: c'est le prix de l'anarchie. Quand, dans une situation donnée, le prix de l'anarchie est bas, l'individualisme des usagers et l'absence de coordination ne nuisent pas à l'efficacité du système. Au contraire, quand le prix de l'anarchie est élevé, un moyen d'inciter les usagers à se comporter autrement s'impose. Dans notre cas, une augmentation de 33% du temps de trajet moyen n'est pas insurmontable. Supposons néanmoins que l'on veuille quand même améliorer la situation. Comment s'y prendre?

Attention, créer une nouvelle route n'est pas toujours la meilleure solution! Il est même possible que, au contraire, le temps moyen de trajet augmente en raison d'une « circulation induite » due aux automobilistes qui profitent de l'effet d'aubaine lié à l'ouverture d'une nouvelle infrastructure. C'est le paradoxe de Braess (voir l'encadré ci-contre) dont le Grand contournement ouest de Strasbourg est une illustration, parmi de nombreuses autres...

Avant de bâtir une nouvelle route, une étude approfondie de la situation est indispensable, car des solutions plus simples sont parfois plus utiles et efficaces pour fluidifier la circulation. Une première consiste en des systèmes d'aide de type Bison Futé indiquant aux automobilistes quelles routes emprunter. Une autre serait un système de péages innovant où des prix variables, positifs et même éventuellement négatifs (on paierait les usagers) pour des tronçons particuliers de route inciteraient les automo-



© L. Mangin

▲ L'éclairage multicolore le long du canal de l'Ourcq, à Paris, a été voté dans le cadre du budget participatif de la municipalité.

bilistes, informés, à ne pas se précipiter sur la route *a priori* la plus rapide. Le but est de modifier les « règles du jeu » pour encourager les usagers à changer de stratégie. La seule limite est l'imagination ! Le cas de la circulation routière est un exemple où des usagers cherchent à optimiser leur propre objectif, chacun de son côté. Que se passe-t-il maintenant quand les préférences individuelles portent sur un choix qui doit cette fois être pris en commun ?

JOUER COLLECTIF TOUT SEUL

Cette situation est celle des budgets participatifs, proposés par de plus en plus de villes, de New York à Paris, en passant par Porto Alegre. Le site *participatorybudgeting.org* recense plus de 7000 municipalités ayant utilisé un tel dispositif ces dernières années. Et dans ce cadre, la ville de Paris s'enorgueillit de plus de 3000 réalisations depuis 2014.

Le concept est le suivant : une municipalité alloue un budget S à des projets proposés par les citoyens et soumis aux votes de la population de la ville. Au terme du processus, les élus sélectionnent un sous-ensemble de projets dont la somme des coûts ne dépasse pas la somme S . Comment faire ? La mairie de Paris, par

exemple, qui consacre une enveloppe de l'ordre de 500 millions d'euros à ces projets, a une méthode très simple : elle choisit les projets lauréats, par ordre décroissant du nombre de voix, jusqu'à atteindre le montant S . Des exceptions existent, par exemple pour des projets dans des quartiers populaires, mais le principe est là.


Cette procédure, naturelle et utilisée par de nombreuses municipalités, pose pourtant quelques problèmes. Un projet très cher peut ainsi être sélectionné aux dépens de dix autres beaucoup moins gourmands, et chacun plébiscité par à peine moins de voix que le premier. De plus, imaginez que 51% de la population plébiscite les mêmes projets, alors que le choix des 49% restant se porte sur d'autres idées. Il y a fort à parier que tous les projets sélectionnés satisferont les membres du premier groupe majoritaire, et qu'aucun ne plaira aux autres. Une solution plus équitable est-elle possible ?

Là encore, l'informatique alliée à l'économie peut aider. La théorie du choix social est une branche des sciences économiques qui s'intéresse à l'élaboration et à l'analyse de méthodes pour prendre une décision collective, comme proposer un mode de scrutin pour une élection, une façon de partager équitablement des res-

sources... Depuis la fin du xx^e siècle, grâce à l'informatique, le domaine connexe du « choix social computationnel » s'est développé et se propose pour une large part d'utiliser des concepts du choix social afin de concevoir de « bons » algorithmes résolvant des problèmes de décision collective. Dans ce cadre, des chercheurs s'intéressent à la question du budget participatif pour rendre le processus de sélection plus efficace et équitable.

Reprenons les deux problèmes soulevés par la méthode « parisienne ». Dans le cas des projets coûteux accaparant toutes les ressources, une solution assez simple consisterait à demander aux votants de ne pas sélectionner les projets qu'ils approuvent, mais uniquement ceux qu'ils préféreraient voir choisis étant donné le budget fixé. Chaque citoyen qui vote devrait ainsi approuver un ensemble de projets dont le coût global ne dépasse pas la somme allouée par la municipalité. L'algorithme naturel utilisé par la mairie de Paris serait alors pertinent.

Pour éviter qu'une faible majorité n'impose ses choix à une large minorité, des scientifiques réfléchissent à des algorithmes qui maximisent le nombre de votants ayant au moins un de leurs projets préférés sélectionnés. D'autres algorithmes de sélection de projets, fondés souvent sur des notions issues de la théorie du choix social, ont été proposés ces dernières années, ce qui fait de ce champ de recherche un domaine en plein essor.

L'informatique, en se rapprochant des sciences économiques, permet de mieux modéliser et tenir compte du comportement des humains confrontés à des situations du quotidien, notamment celles où des intérêts antagonistes sont en jeu. La société profiterait de la diffusion de ces connaissances auprès des citoyens et citoyennes, et surtout des décideurs et élus. 

Fanny Pascual

Maîtresse de conférences au
laboratoire d'Informatique
de Sorbonne Université (LIP6), à Paris.

Retrouvez l'original de cet article ici :
<https://bit.ly/Interstices-InfoEco>