



# LES APPLICATIONS GPS, PLUS LIBÉRALES QUE SOCIALES

Trouver le trajet le plus rapide en collaborant avec les autres pour le bien de tous, c'est la promesse des applis GPS. Mais est-ce si simple ? « Égoïstes » ou sociaux : **Étienne Ghys** éclaire par les mathématiques nos choix de circulation... au-delà même de la route.

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, des académiciennes et académiciens analysent et apportent leur éclairage sur les grands enjeux du monde contemporain au travers de questions scientifiques qui font l'actualité.

**W**aze, Google Maps, Mappy, TomTom... Ces applications GPS sont présentes dans nos voitures et dans la plupart de nos smartphones. Nous sommes persuadés qu'elles nous proposent le chemin le plus rapide ou le plus court. Nous sommes tout aussi convaincus qu'il s'agit d'outils collaboratifs, pour le plus grand bien de tous. L'union fait la force : les usagers partagent leurs positions et leurs informations. La situation n'est pourtant pas si simple : ces applications ont une composante qu'on pourrait qualifier de libérale, voire d'égoïste, beaucoup plus que de collaborative.

Comment optimiser la circulation automobile dans les villes ? Que signifie d'ailleurs « optimiser » dans ce contexte ? En 1990, à l'occasion de la Journée de la Terre, la municipalité de New York décida de fermer la 42<sup>e</sup> Rue à la circulation. Cette voie étant l'une des plus animées de Manhattan, on pensait que cette mesure ne manquerait pas de ralentir la circulation et de provoquer des embouteillages supplémentaires. C'est le contraire qui se passa : le fait de fermer la 42<sup>e</sup> Rue rendit la circulation plus fluide ! C'était l'une des premières fois où l'on voyait se réaliser « en vrai » un phénomène mis en évidence de

manière théorique en 1968 par un universitaire allemand : le paradoxe de Braess.

Pour expliquer cela, commençons par décrire un phénomène plus simple découvert par l'économiste Pigou en 1920 (voir figure page 48). Supposons que deux villes, A et B, soient reliées par deux routes. La première est excellente, très large, mais elle est plus longue car elle fait malheureusement un grand détour : il faut une heure pour la parcourir, quel que soit le nombre de véhicules qui l'empruntent – dans des limites raisonnables, par exemple jusqu'à 1 000 véhicules par heure. La seconde passe par une rue très étroite et très courte qu'on peut parcourir en quelques instants à peine, à condition d'être seul. Mais plus le nombre de voitures qui l'empruntent augmente, plus la circulation devient encombrée, et plus le temps de passage s'accroît.

## L'UNION FAIT LA FORCE

Pour faire simple, supposons que le temps de passage par la rue étroite augmente progressivement, depuis une minute si on est seul jusqu'à une heure quand il y a 1 000 automobilistes/heure, et qu'avec 500 automobilistes/heure il sera par exemple de 30 minutes. Supposons maintenant que 1 000 automobilistes/heure souhaitent aller de A à B. On peut envisager deux scénarios différents.

Le comportement libéral : chaque automobiliste choisit sa route comme il le souhaite. Comme de toute façon moins de 1 000 véhicules/heure passeront par la rue étroite, on met moins d'une heure pour traverser la rue étroite, il est donc toujours préférable de prendre la rue étroite plutôt que la route longue. Tout le monde optera donc pour la

**LES ÉTUDES THÉORIQUES MONTRENT QUE L'INDICE DE CONGESTION AUTOMOBILE POURRAIT DIMINUER DE MANIÈRE TRÈS IMPORTANTE SI ON PASSAIT EN MODE « SOCIAL » : C'EST L'EFFET PIGOU.**



**PROFIL**  
Mathématicien, Étienne Ghys est secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences depuis janvier 2019. Directeur de recherche au CNRS, il a contribué à la création et au développement du laboratoire de mathématiques de l'ENS de Lyon. Ses travaux portent sur la géométrie, la topologie et les systèmes dynamiques. Son investissement dans la diffusion des connaissances scientifiques lui a valu la médaille de la médiation scientifique du CNRS en 2022.

CYRIL FRESILLON / CNRS PHOTO THÉRIE

rue étroite, qui sera en conséquence engorgée, et tout le monde mettra une heure pour aller de A à B. Le comportement social : la municipalité, ou la police, peut forcer certains automobilistes à prendre telle ou telle route pour aller de A à B, par exemple en fermant une barrière temporairement sur la rue étroite. Supposons par exemple qu'on force la moitié des 1 000 véhicules/heure à prendre la route longue. Alors, 500 véhicules/heure mettront une heure pour parcourir la route longue mais les 500 autres prendront la rue étroite et ne mettront par exemple que 30 minutes ! Certes, certains automobilistes auront mis une heure pour aller de A à B alors que d'autres n'auront mis que 30 minutes, mais collectivement la situation est meilleure et personne ne peut regretter le choix « égoïste » où tout le monde mettrait une heure. Le temps moyen de passage entre A et B, dans cette option « policière », serait donc de 45 minutes, donc inférieur au temps « égoïste » d'une heure.

C'est la remarque de Pigou : un système de communication régulé de manière « centralisée », imposant des comportements à certains individus, peut circuler beaucoup mieux qu'un système dans lequel chacun peut choisir son comportement comme bon lui semble. L'« optimum social » est (parfois) bien meilleur que l'« optimum libéral ». Pas vraiment une surprise. L'union fait la force...

Le paradoxe de Braess est un peu plus compliqué mais surprenant (voir figure page 48). Imaginez que pour aller de A à B, vous ayez deux options. Le premier chemin commence par une rue étroite AC qu'on traverse en un instant si on est seul, mais qui prend une heure s'il y a 1 000 automobilistes/heure. Il est suivi par un tronçon CB, très large mais qui dure une heure, indépendamment de la circulation. Le deuxième chemin est analogue : il commence par un tronçon large AD qui prend une heure et il est suivi par une rue étroite DB comme précédemment. Que va-t-il se passer si 1 000 automobilistes/heure veulent aller de A à B ? La moitié prendra la première option, ACB, et l'autre moitié la seconde option, ADB. S'il y avait plus d'automobilistes d'un côté que de l'autre, les nouveaux arrivants auraient tout intérêt à aller de l'autre côté. La tendance serait à l'égalisation, le moindre déséquilibre entre les deux options se réduirait de lui-même et on tendrait vers l'équilibre. Tout le monde mettra par exemple une heure et demie.

## LE « PRIX DE L'ANARCHIE »

Supposons maintenant qu'un élu local décide de créer une nouvelle route extrêmement large qui permette de passer de C à D quasiment instantanément. Ce sera la catastrophe. En effet, on a maintenant trois options : ACB, ADB et ACDB. Comme il y a de toute façon moins de 1 000 automobiles/heure sur chacun des tronçons, tout le monde préfère choisir AC plutôt que AD, et DB plutôt que CB. Tout le monde va vouloir choisir ACDB. Au total, tout le monde choisira un chemin qui prendra deux heures, au lieu d'une heure et demie. En ajoutant la connexion rapide CD, on n'a fait que compliquer la situation et gaspiller l'argent du contribuable. Inversement, en fermant une route, on peut fluidifier la circulation : c'est ce qui s'est passé à New York en 1990.

On peut donc imaginer deux sortes d'applications GPS. La première, que j'appellerais de manière provocante « égoïste », travaille exclusivement pour vous : elle cherche le meilleur chemin, étant donné l'état présent du trafic. La seconde, plus « sociale », cherchera en revanche un trajet qui améliorera le temps de trajet moyen de tous »

# LES IDÉES

## CULTURE

» les automobilistes. Souvent, vous y gagnerez, mais parfois vous devrez prendre un chemin un peu plus long pour que d'autres puissent bénéficier de meilleures solutions.

Les algorithmes utilisés par les applications les plus habituelles sont confidentiels et sont probablement plus « égoïstes » que « sociaux ». Si vous deviez télécharger une telle application sur votre smartphone, libérale ou sociale, laquelle choisiriez-vous ? Venons-en maintenant aux embouteillages eux-mêmes : comment les évaluer dans une ville à un instant donné ? Beaucoup d'indicateurs existent. L'un des plus simples est « l'indice de congestion ». Il s'agit du pourcentage d'augmentation du temps de trajet moyen par rapport au temps utilisé lorsqu'il n'y a personne dans les rues, disons vers 4 heures du matin, en respectant les limitations de vitesse. À Mexico, il peut atteindre 100 % aux heures de pointe, alors qu'à Paris l'augmentation n'est « que » de l'ordre de 66 %. Les études théoriques montrent que cet indice pourrait diminuer de manière très importante si on passait en mode « social » : c'est l'effet Pigou. Est-ce ce que nous souhaitons ? Sommes-nous prêts à accepter de fortes contraintes sur nos trajets pour le bien commun ? Préférons-nous rester maîtres de nos choix, quel qu'en soit le prix ? Les spécialistes parlent du « prix de l'anarchie » pour désigner l'augmentation de la congestion lorsqu'on est en mode « égoïste » – ce qui, au passage, montre qu'ils confondent « anarchie » et « chaos ».

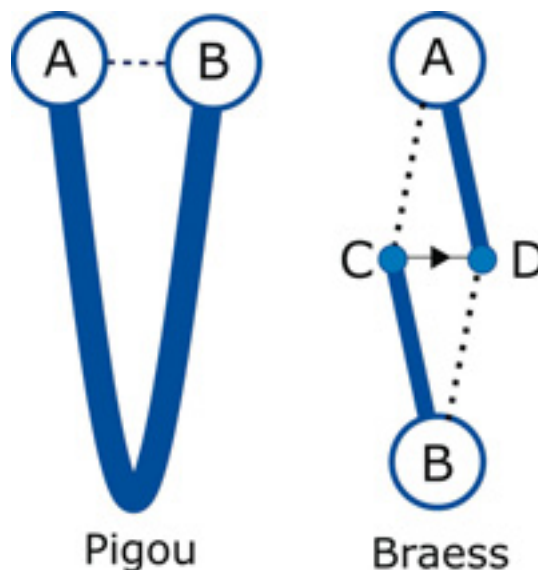
### APPLICABLE À DIFFÉRENTS PROBLÈMES

L'effet Braess, évoqué plus haut, est également présent. Très souvent, il serait judicieux de fermer un certain nombre de rues et de les rendre piétonnes pour améliorer la circulation de manière significative dans une ville. Aujourd'hui, l'informatique permet de déterminer ces rues « inutiles ». Bien entendu, ce n'est pas si simple car les rues qu'il faudrait fermer dépendent du moment de la journée et on envisage difficilement d'ouvrir et de fermer des rues trop fréquemment.

Toutes ces questions dépassent largement le problème des embouteillages et entrent dans le cadre, là aussi mathématique, de la « théorie des jeux ». Un certain nombre d'« agents » en compétition

**TRÈS SOUVENT, FERMER TEMPORAIREMENT DES RUES ET LES RENDRE PIÉTONNES PERMET D'AMÉLIORER LA CIRCULATION DANS UNE VILLE, C'EST LE PARADOXE DE BRAESS.**

Figures illustrant le phénomène de Pigou (économiste britannique) et le paradoxe de Braess (mathématicien allemand), développés dans ce texte.



### EN SAVOIR PLUS

Le site de l'Académie des sciences : [www.academie-sciences.fr](http://www.academie-sciences.fr)

« Théorie des jeux », de Nicolas Eber, Dunod, 2018.

« La Démocratie sous l'angle de la théorie des jeux. Le prix de l'anarchie », vidéo de Lê Nguyễn Hoang, chercheur et médiateur scientifique à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, sur sa chaîne YouTube @ Science4Allfrancais (2017, 20 min).

« Waze », épisode de la série documentaire « Dopamine » de Léo Favier, sur arte.tv (2023, 9 min).

mettent en place des stratégies et prennent des décisions ayant pour but un gain maximal, en étant conscients que le résultat de leur propre choix dépend de celui des autres. On parle d'un « équilibre de Nash » (ou de « Wardrop » dans le contexte automobile) lorsque personne n'a intérêt à changer sa stratégie si les autres agents n'en changent pas. Lorsque les agents sont des automobilistes qui cherchent à se déplacer, il s'agit de la stratégie égoïste que nous avons évoquée plus haut et qui n'est pas la meilleure du point de vue collectif. La théorie des jeux s'applique à des situations très différentes. Il peut s'agir de stratégies géopolitiques, de guerres commerciales, de ventes aux enchères, de compétitions entre entreprises, de stratégies électorales ou simplement de négociations de marchands de tapis, etc. Elle permet également de mieux comprendre les compétitions entre espèces biologiques.

Il n'y a pas que les réseaux de circulation automobile que l'on peut analyser avec des modèles mathématiques. La distribution optimale de l'eau potable, la gestion des eaux usées, la circulation de la sève dans une plante, par exemple, posent des problèmes intéressants. On peut aussi penser à nos e-mails et à l'ensemble des données qui circulent sur Internet. Même les fourmis choisissent leur chemin à la recherche de nourriture et sont soumises à des embouteillages – mais, contrairement à nous, elles utilisent des stratégies sociales, grâce à leur intelligence collective.

Finalement, un comportement social est bien préférable : prenons les transports en commun ! ●