

Leonhard Euler. Selon lui, l'atmosphère solaire ne peut s'étendre jusqu'à la Terre. C'est l'impulsion des rayons solaires sur la matière aurorale qui produit les effets observés, tout comme cela se produit dans la queue des comètes. En réponse, Mairan publie en 1754 une seconde édition de son *Traité*, qui complète la première par des éclaircissements aussi longs que le mémoire initial. Euler n'apporte aucune défense, et la situation évolue vers un dédain, ou du moins une ignorance mutuelle des trois principaux auteurs d'une théorie aurorale au XVIII^e siècle, Halley, Mairan et Euler étant chacun persuadé de la solidité de sa théorie.

Le magnétisme triomphe...

Au début du XIX^e siècle, l'engouement pour le magnétisme favorise encore la thèse de Halley au détriment de celle de Mairan. En 1820, la découverte de la connexion entre l'électricité et le magnétisme par le physicien danois Hans Christian Oersted encourage deux savants parisiens, François Arago et Alexandre de Humboldt, à dégager une nouvelle vision du monde où éléments et phénomènes sont interconnectés. Les deux hommes veulent mettre au jour une physique du ciel et de la Terre qui montrerait cette interconnexion. Selon eux, cette vision globale et unifiée du cosmos ne s'appréhende que par l'observation systématique et précise des particularités et des singularités – dont les aurores boréales. Dans cette pensée cosmique, le magnétisme joue un rôle particulier : l'indication de la boussole est un élément de mesure du monde, qui doit être enregistré de façon systématique sur tous les points du globe, afin de rendre visible l'invisible et de dévoiler le cosmos.

Le magnétisme est ainsi privilégié dans la description des aurores boréales. En 1825, Arago écrit que « les zones, les arcs, les jets lumineux, dont les aurores boréales se composent, alors même qu'ils ne sont pas visibles dans un lieu donné, y exercent une influence manifeste sur la position de l'aiguille aimantée. Les journaux des deux célèbres navigateurs [Perry et Franklin] que je viens de nommer, comparés à nos registres

d'observations magnétiques, ne laisseront pas à cet égard l'ombre d'un doute ». Pour Arago, cette relation entre magnétisme et aurore s'élargit même à l'électricité de par leur interconnexion ; on s'est d'ailleurs aperçu que les aurores perturbent tout autant les aiguilles magnétiques que les tout récents télégraphes électriques.

Lorsque Arago en vient à s'interroger sur les causes des aurores boréales, il ne peut que concéder une ignorance totale, tout en appelant à continuer l'enregistrement des observations et des particularités de chaque phénomène, en lien avec le magnétisme. À Halley, il attribue la paternité d'une relation entre magnétisme et aurores. Il critique en revanche les hypothèses de Mairan sur l'identité de la lumière aurorale et le rôle de l'atmosphère solaire en reprenant l'argument d'Euler. Selon Arago, la lumière zodiacale ne peut se retrouver piégée dans l'atmosphère terrestre car, à cause des frottements, l'atmosphère solaire tourne autour du Soleil à une vitesse telle que la pesanteur terrestre n'est pas assez grande pour happer de la matière solaire. L'aurore boréale est donc un phénomène atmosphérique et non cosmique.

C'est aussi la conclusion de Humboldt, en 1855, dans son *Cosmos : essai d'une description physique du monde* : « D'intimes rapports unissent à la fois le magnétisme du globe et les forces électrodynamiques qu'Ampère a mesurées à la production de la lumière polaire, ainsi qu'à la chaleur de notre planète, dont les pôles magnétiques sont considérés comme des pôles de froid. Il y a plus de 128 ans, Halley soupçonnait que les aurores boréales pourraient bien être de simples phénomènes magnétiques : aujourd'hui, la brillante découverte de Faraday, qui fit naître de la lumière par l'action des seules forces magnétiques, a donné à ce vague soupçon la valeur d'une certitude expérimentale. » Pour Humboldt, l'aurore est un orage magnétique, l'équivalent (magnétique) des éclairs (d'origine électrique) que l'on aperçoit lors d'un orage.

La théorie cosmique de Mairan est donc discréditée au profit de la théorie atmosphérique de Halley, chez des savants pourtant tenants d'une vision cosmique du monde. En fait, l'objectif de Humboldt et Arago s'ap-

parente plus à la construction d'une physique du globe, où le voyage scientifique est un élément déterminant de leur méthode. À cette époque, sous l'influence d'Arago, le grand patron de l'astronomie française, l'Observatoire de Paris domine le monde savant et impose la valeur de l'intensité magnétique à Paris comme référence pour la plupart des observateurs continentaux ; mais des réactions apparaissent, notamment en Grande-Bretagne et en Allemagne. S'il veut conserver son hégémonie, il doit donner des chiffres toujours plus précis, d'autant que deux physiciens allemands, Gauss et Weber, ont mis au point une théorie mathématique qui fournit une bonne approximation du magnétisme terrestre. Aussi Arago et Humboldt étudient-ils les aurores boréales avant tout comme un facteur d'influence du magnétisme terrestre, qui doit être mesuré et précisé vis-à-vis des éléments permanents fournis par la théorie de Gauss et Weber.

... avant le retour de Mairan

Ce n'est qu'à partir de la fin du XIX^e siècle que le monde savant s'intéresse à nouveau à l'origine des aurores boréales. Le télégraphe est devenu un moyen de communication répandu, et l'influence de l'électricité atmosphérique sur les phénomènes météorologiques et la qualité de la transmission un enjeu important. Non seulement sa thèse n'est plus exclue, mais Mairan est de plus en plus cité pour la rigueur de sa méthode (par le physicien Alexandre Dauvillier, notamment). Avec la découverte des rayonnements cosmiques, au début du XX^e siècle, il devient même la figure emblématique d'une nouvelle discipline, la physique cosmique.

Par rapport à Halley, toujours influencé par une philosophie du merveilleux qui marque encore le XVII^e siècle, Mairan a cherché à construire une méthode qui, au travers des régularités observées dans l'histoire des phénomènes, vise à faire sortir ces derniers du surnaturel. En ce sens, Mairan a largement participé à la construction de notre rationalité moderne. C'est précisément sur ce point qu'il est devenu une référence au début du XX^e siècle.

LOGIQUE & CALCUL

La malédiction de la mauvaise file

Sur la route, quand vous être pris dans un ralentissement, la file voisine semble presque toujours plus rapide que la vôtre. Vérité ou impression ?

Jean-Paul DELAHAYE

Vous êtes sur l'autoroute, la circulation est chargée. Vous hésitez entre la voie de gauche et la voie de droite. Vous changez une première fois, puis une deuxième, et encore et encore. Au bout de quelques minutes, vous perdez patience : « C'est quand même un peu fort, je suis toujours sur la mauvaise file, sans cesse on me double et si je change de file, c'est la voie que je viens de quitter qui accélère. »

Tous les automobilistes ont ressenti cette curieuse sensation de persistante malchance, évidemment impossible : tout le monde ne peut pas toujours être sur la mauvaise file, ni même y être presque toujours ! Cette impression de toujours tomber dans la mauvaise file a intrigué les scientifiques. Ils ont procédé à des enquêtes, à des simulations informatiques et à des calculs mathématiques. Des explications variées et des réflexions inattendues ont été proposées sur ce thème étrange...

Notons que les files des magasins, des banques, des cinémas et des administrations provoquent le même sentiment d'injustice obstinée et engendrent la même impatience : bien des remarques proposées ici pour les files de voitures y restent valables. Voyons les solutions fantaisistes au paradoxe de la mauvaise file.

• **Explication par la loi de Murphy (vulgairement : loi de l'emmerdement maximum).** « Si ça peut mal se passer, cela se passera mal. Il n'y a donc rien d'étonnant à se retrouver toujours dans la mauvaise file. » Bien sûr, invoquer cette loi est ridicule : il est

absurde de croire que tout le monde a tout le temps de la malchance en tout !

• **Explication par la maladresse.**

« Les files avancent alternativement l'une plus vite que l'autre, et moi, gros maladroit, je change de file quand cela va bientôt être à la mienne d'avancer. »

Celui qui s' imagine être poursuivi par le mauvais sort peut se satisfaire de cette explication, mais là encore ce n'est pas sérieux. À moins d'une raison particulière et identifiée, il n'est pas rationnel de penser qu'une personne, quelle qu'elle soit, change toujours malencontreusement de file.

Ces deux premières explications irrecevables amènent la question : *Y a-t-il une illusion de mauvaise chance de la part des automobilistes ?* Une expérience menée par deux chercheurs canadiens, Donald Redelmeier et Robert Tibshirani, a établi que c'est le cas.

De l'intérieur d'une voiture prise dans un ralentissement, ils ont longuement filmé la file voisine. Une séquence de plusieurs minutes a été sélectionnée, comportant un grand nombre de dépassements soit de la file voisine, soit de la file de la voiture portant la caméra. La séquence retenue est telle que pendant sa durée la voiture portant la caméra est légèrement plus rapide que la file voisine. Celui qui est dans la voiture de la caméra doit donc juger qu'il a de la chance et ne pas être tenté de changer de file. Le film sélectionné a été projeté à 120 sujets, qui ont indiqué à l'issue de la projection comment ils avaient évalué la situation. Une proportion de 86 % des sujets

a jugé que le film était réaliste, 70 % des sujets ont considéré que la file voisine avançait plus vite que celle de la caméra, et 65 % ont admis qu'au volant de la voiture à la caméra, ils auraient changé de file.

L'illusion de malchance est patente. Reste à l'expliquer par des considérations raisonnables.

Biais de mémorisation ?

• **Explication par un biais de mémorisation dû à des oublis sélectifs.**

« Je me souviens mieux de ce qui est désagréable que de ce qui est agréable. Donc, même si ce n'est pas vrai, j'ai l'impression d'être plus souvent dépassé que l'inverse. »

Les psychologues qui ont étudié ces questions ont conclu que s'il y a des biais de mémorisation liés aux situations de plaisir et de déplaisir, ils conduisent le plus souvent, au contraire, à oublier sélectivement ce qui est pénible, provoquant même dans certains cas extrêmes des amnésies graves des événements traumatisants. Une tentative d'explication de l'illusion de la mauvaise file par les biais généraux de mémorisation ne semble donc pas possible.

• **Explication par un biais de mémorisation dû aux conditions d'observation.**

« À l'arrêt, je m'ennuie, mon cerveau est disponible, je regarde la file d'à côté plus animée que la mienne. Lorsque je suis dans la file rapide, je suis concentré sur la voiture qui me précède, je ne regarde pas la file

1. EMBOUTILLAGE MONSTRE :

23 voies de circulation, toutes bouchées
sur plusieurs dizaines de kilomètres...

Avez-vous intérêt à changer de file
si la vôtre vous semble plus lente ?



© Dinanet.fr

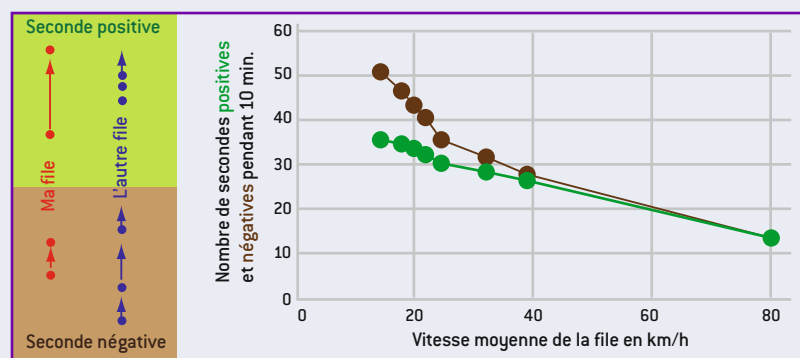
2. Doubler ou être doublé ?

L'illusion de la file lente (croire qu'on se trouve toujours dans la plus mauvaise file d'un ralentissement autoroutier) provient de la dynamique des files de voitures. Les files lentes sont denses, alors que les files rapides sont composées de voitures en général bien

espacées. Même lorsque ma file et la file voisine avancent en moyenne à la même vitesse, je vis plus de « secondes négatives » (secondes pendant lesquelles on me dépasse) que de « secondes positives » (secondes durant lesquelles je dépasse). Cela me donne l'illu-

sion de me trouver dans la mauvaise file et l'effet est d'autant plus important que la vitesse moyenne est faible.

Cette explication proposée en 2000 par Donald Redelmeier et Robert Tibshirani a été testée par des simulations informatiques.



d'à côté. De ce fait, je surévalue le nombre de cas où je suis dépassé. »

À cette explication plausible, s'ajoute une autre explication du même type :

« Quand je suis doublé, je le suis par des véhicules largement espacés, car ils vont assez vite, je les vois passer les uns après les autres très distinctement et longuement puisqu'ils partent devant moi. En revanche, lorsque je double une file de voitures immobilisées ou presque immobilisées, elles sont serrées, je les double très vite souvent à raison de plusieurs par seconde. »

Comme la précédente, cette explication est assez vraisemblable. Pour lui donner de la consistance, D. Redelmeier et R. Tibshirani ont simulé informatiquement un ralentissement autoroutier, mesuré les flux de véhicules ainsi créés et mesuré l'impression subjective qu'en tire un automobiliste présent dans ces files artificielles.

Les embouteillages simulés étaient tels que toutes les files avançaient à la même vitesse moyenne : aucun automobiliste ne devait s'y trouver favorisé ou défavorisé. Dans leur modèle informatique, chaque véhicule d'un encombrement simulé possède

un objectif de vitesse (par exemple 90 km/h). S'il roule à une vitesse inférieure et qu'il n'y a pas d'autre véhicule juste devant lui, il accélère jusqu'à atteindre cette vitesse, qu'il ne dépasse pas. Bien sûr, si un véhicule B est devant et roule moins vite qu'un véhicule A, le véhicule A ralentit pour éviter le choc, adopte la vitesse de B en laissant une distance de sécurité entre B et lui.

Davantage de secondes négatives que de positives !

Des études menées en psychologie ont montré que les gens pris dans des queues parallèles évaluent leur vitesse en regardant les files voisines. D'où l'idée de définir des *secondes positives* et des *secondes négatives*. Une seconde positive est, par définition, un intervalle de temps d'une seconde pendant lequel je dépasse une ou plusieurs voitures. Une seconde négative est un intervalle de temps d'une seconde durant lequel je suis dépassé par une ou plusieurs voitures.

Dans les simulations réalisées, une proportion relativement faible des secondes écoulées était des secondes positives ou des secondes négatives. Sur une période de 10 minutes, les chercheurs ont trouvé une moyenne de 76 des 600 secondes dans l'une des deux catégories. Les résultats des calculs indiquent que sur 600 secondes, 43 sont négatives et 33 positives, ce qui explique l'illusion de la mauvaise file, qui est donc non seulement réelle, mais compréhensible grâce au modèle informatique.

Bien sûr, lorsque deux files avancent à la même vitesse moyenne, une voiture est dépassée en moyenne autant de fois qu'elle dépasse (46 fois sur une période de 10 minutes dans la simulation). L'inégalité vient du fait mentionné plus haut que les dépassements que l'on fait ont tendance à se produire de manière rapprochée (plusieurs par seconde), alors que les dépassements que l'on subit sont plus espacés (donc moins souvent regroupés dans une même seconde).

La conclusion est bien évidemment que si aucune file n'est plus rapide qu'une autre, il faut corriger notre jugement. C'est important du point de vue de la sécurité, car tout changement de file entraîne un certain risque qu'il est stupide de prendre inutilement. Éduquer les conducteurs pour qu'ils soient conscients de l'illusion de la mauvaise file diminuerait les accrochages.

Ces explications proposées par les chercheurs canadiens sont complétées par d'autres études fondées uniquement sur le calcul.

Le problème posé n'est pas exactement le même, mais il confirme qu'il y a des raisons identifiables de se tromper quand on tente d'évaluer la vitesse moyenne des autres véhicules sur une route ou une autoroute.

Lorsque vous roulez à une certaine vitesse, cette fois sur une autoroute dégagée, vous ne voyez pratiquement aucune voiture roulant à la même vitesse que la vôtre : si un véhicule roule à la même vitesse que vous, vous ne le dépassez pas et vous n'êtes pas dépassé par lui !

Quelqu'un qui tente de calculer la moyenne des vitesses des voitures présentes en même temps que lui sur l'autoroute en

prenant en compte les véhicules qu'il aperçoit (par exemple pendant une heure) fera un calcul biaisé. Il ne verra pratiquement aucune voiture roulant à des vitesses proches de la sienne, il verra un peu plus les voitures dont la différence de vitesse avec la sienne est de 10 km/h et il verra de nombreuses voitures sensiblement plus rapides que la sienne, ou sensiblement plus lentes.

Des biais d'observation

Comment ce biais d'observation se traduit-il ? Bryan Dawson et Troy Riggs, tous deux professeurs de mathématiques à l'*Union University* de Jackson, ont mené des calculs pour répondre à ces questions. Ils ont supposé que les vitesses des voitures sur une autoroute (sans bouchon) se répartissent selon une loi normale, ce qui est l'hypothèse la plus raisonnable. Sur cette base, ils ont calculé le biais d'observation des automobilistes qui tentent d'évaluer la vitesse des autres automobilistes en faisant la moyenne des vitesses qu'ils observent pour les véhicules qui les dépassent et ceux qu'ils dépassent (les automobilistes calculant ces moyennes disposent de moyens pour connaître la vitesse des véhicules et la leur).

Le biais d'observation dépend bien sûr de la vitesse de celui qui fait l'évaluation. Les courbes de la figure 3 montrent les résultats des calculs :

— Si vous êtes un peu au-dessous de la moyenne générale des véhicules de l'autoroute, vous aurez l'impression que les voitures roulent plus rapidement que cette moyenne. Vous aurez donc le sentiment d'être particulièrement lent, ce qui sans doute vous incitera à accélérer un peu.

— Si, au contraire, vous êtes un peu au-dessus de la moyenne générale, vous percevrez la moyenne des autres véhicules comme sensiblement inférieure à ce qu'elle est vraiment. Vous aurez donc le sentiment d'être vraiment trop rapide par rapport aux autres véhicules, ce qui vous encouragera à ralentir.

L'effet global de la mauvaise appréciation des vitesses des autres véhicules dans le cas d'un trafic fluide est donc favorable à la sécurité de tous : il tend à uniformiser les vitesses et augmente donc la sécurité.

Les biais de perception n'ont pas nécessairement des effets désastreux !

Notons cependant qu'il n'y a pas de contradiction entre les conclusions des chercheurs canadiens obtenues par simulation et les conclusions des mathématiciens de l'Université de Jackson. En effet, bien que s'appliquant aux situations de circulation fluide (à cause de l'hypothèse d'une distribution normale des vitesses), il n'est pas absurde de penser que la surévaluation de la vitesse des autres véhicules aperçus par un véhicule lent s'applique grossièrement aussi aux voitures prises dans un embouteillage.

Le calcul mathématique de B. Dawson et T. Riggs confirme l'idée des Canadiens : dans une file lente, on surévalue la vitesse moyenne des autres véhicules, ce qui incite à changer de file inutilement : l'effet intéressant d'accélération des files lentes et de ralentissement des files rapides dans un trafic fluide devient dangereux dans le cas des embouteillages.

Tout semble clair et bien cohérent puisque les expériences avec des films, les

simulations informatiques, et les calculs mathématiques aboutissent aux mêmes conclusions dans le cas des embouteillages.

Malheureusement, les problèmes d'évaluations probabilistes présentent d'autres pièges dans le cas d'une autoroute avec plusieurs voies de circulation roulant à des vitesses moyennes différentes.

Les conclusions que nous avons obtenues dans le cas des embouteillages l'ont été sous l'hypothèse que les files ont en moyenne des vitesses égales. Bien sûr, dans la réalité ce n'est pas toujours le cas. Il existe une multitude de raisons conduisant deux files d'autoroute ou de périphérique à avoir des vitesses différentes. Un accident sur l'une des voies, une bretelle d'entrée quelques centaines de mètres en avant, la suppression d'une des voies due à un rétrécissement, un conducteur excessivement prudent et timoré qui ralentit tous ceux qui le suivent, une file réservée aux camions...

Tout cela conduit à la mise en place de régimes de circulation où l'une des files

3. La vitesse moyenne perçue

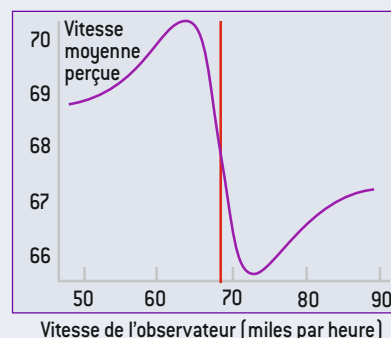
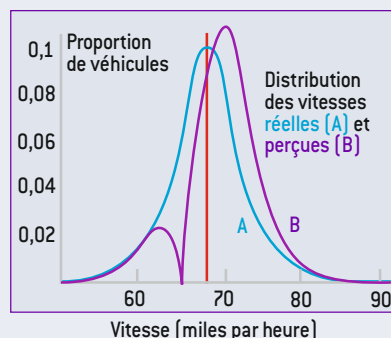
Bryan Dawson et Troy Riggs ont évalué le biais d'observation d'un automobiliste essayant de calculer la moyenne des vitesses des véhicules qu'il aperçoit sur une autoroute fluide.

Ils ont supposé, hypothèse raisonnable, que la vitesse des véhicules se répartissait selon une loi normale de Gauss-Laplace, centrée sur 68 miles par heure (les calculs ont été faits par des Américains...).

Une voiture voit très peu de voitures roulant à la même vitesse. Les voitures ayant des vitesses bien différentes sont sur-représentées (on en dépasse plus ou, au contraire, on est souvent dépassé par elles) : d'où une distribution de vitesses perçue très différente de la distribution réelle des vitesses. Une voiture roulant à 65 miles par heure voit ainsi la fausse distribution de la première courbe qui lui donne

l'impression que beaucoup plus de voitures qu'il n'y en a en réalité vont plus vite qu'elle. L'effet général sur la vitesse moyenne perçue dépend de la vitesse à laquelle on roule. Il est donné par la courbe de droite.

Si on roule un peu en dessous de la moyenne, on perçoit une vitesse moyenne surévaluée, alors qu'inversement si on roule un peu au-dessus, on sous-évalue la vitesse moyenne.



4. Le paradoxe des files lentes et rapides

Une section d'autoroute d'une longueur de 18 km possède deux voies R et L. À cause de trous dans la chaussée (par exemple), la voie L est lente et la voie R est rapide. Les voitures n'ont pas le droit de changer de file sur cette section.

La voie L avance à 18 km/h (5 m/s). Les voitures sur la voie L sont séparées de 5 mètres et donc, en un point donné de la voie L, il passe une voiture chaque seconde. Une voiture engagée sur L y reste une heure avant d'arriver à l'extrémité de la section. À chaque instant, il y a 3 600 voitures sur la voie L.

La voie R avance à 72 km/h (20 m/s). Les voitures sur la voie R sont espacées de 10 mètres et donc en un point donné de la voie R, il passe deux voitures par seconde. Une voiture engagée sur R y reste 15 minutes. À chaque instant, il y a 1 800 voitures sur la voie R. Une voiture sur la voie R double trois voitures de la voie L par seconde et une voiture sur la voie L est doublée trois fois toutes les deux secondes.

Je suis sur cette autoroute, il se produit un dépassement ; quelle est la probabilité P_1 que je sois celui qui double ? Quelle est la proba-

bilité P_2 que je sois celui qui est doublé ?

Raisonnement 1

À chaque dépassement, il y a une voiture dépassée et une voiture qui dépasse : j'ai donc autant de chance d'être dans l'une ou l'autre. La réponse est $P_1 = P_2 = 1/2$.

Raisonnement 2

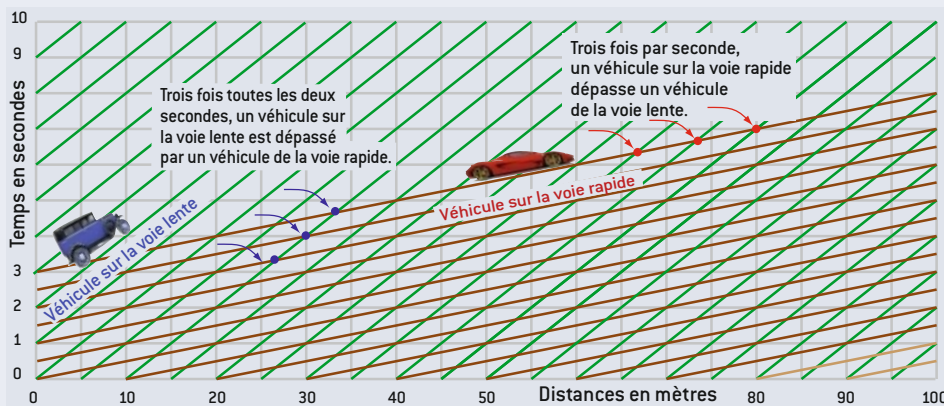
Sur les 18 kilomètres de la section d'autoroute, il y a 3 600 voitures lentes et 1 800 voitures rapides. J'ai donc deux chances sur trois d'être dans une voiture lente et une chance sur trois d'être dans une voiture rapide. Si je suis dans une voiture lente, au

prochain dépassement, je serai dépassé, si je suis dans une voiture rapide, je dépasserai. Les réponses sont donc $P_1 = 1/3$ et $P_2 = 2/3$.

Raisonnement 3

À l'entrée de la section, il passe une voiture lente par seconde, et deux voitures rapides par seconde (c'est le cas en fait en chaque point du tronçon). En me présentant à l'entrée de l'autoroute, si je ne sais pas quelle est la voie rapide et la voie lente, et que les voitures se disposent au hasard, je serai 2 fois plus souvent sur la voie rapide que sur la voie lente (elle absorbe deux fois moins de véhicules). Quand j'emprunte cette section d'autoroute, je suis donc deux fois sur trois dans une voiture qui dépasse et une fois sur trois dans une voiture qui est dépassée. Les réponses sont donc $P_1 = 2/3$ et $P_2 = 1/3$.

C'est ennuyeux ! les trois calculs parfaitement rigoureux aboutissent à trois conclusions différentes ! Comment expliquer ce qui apparaît comme une absurdité totale ? (La solution du paradoxe est donnée dans le texte principal.)



avance réellement moins vite que sa ou ses voisines. Si vous êtes pris dans une telle file, il devient rationnel d'en changer. L'illusion de la file lente existe, oui, mais les vraies files lentes aussi !

La situation créée par ces files avançant à des vitesses différentes est délicate à traiter du point de vue des statistiques. Plusieurs effets de sélection et de perspective s'y produisent et perturbent les évaluations des probabilités quand nous voulons répondre à la question : ai-je de la chance, oui ou non ?

Il y a trois raisonnements possibles (voir la figure 4). Le premier est qu'à chaque dépassement, il y a une voiture dépassée et une voiture qui dépasse. Quand il y a un dépassement, j'ai donc une chance sur deux d'être dépassé ou de dépasser.

Le deuxième est que si l'une des files avance plus vite, les véhicules y seront

plus espacés que dans la file lente où les voitures s'agglomèrent. Sur la section d'autoroute, il y aura donc plus de voitures dans la file lente que dans la file rapide et en moyenne nous nous trouverons plus fréquemment dans la file lente (dont l'effectif est plus grand) que dans la file rapide (comportant moins de véhicules). Si toutes les files ne vont pas à la même vitesse, le sentiment de ne pas avoir de chance est donc fondé objectivement : d'après ce deuxième raisonnement, on se retrouve vraiment plus souvent dans la mauvaise file. Remarquons que cette conclusion contredit la conclusion du premier raisonnement... mais ce n'est pas fini.

Un troisième raisonnement est encore possible. Les files rapides, même si les véhicules y sont moins serrés, ont des débits plus importants que les files lentes (souvent presque immobilisées) : il y passe un

plus grand nombre de voitures par seconde, car elles ne se gênent pas mutuellement (un bouchon diminue le débit de voitures). Il en résulte que parmi toutes les voitures qui s'engagent dans une section où il y a une file lente et une file rapide et que personne ne change de file, il y a plus de voitures qui empruntent la file rapide que de voitures qui empruntent la file lente. Celui qui, à l'entrée de la section, choisit au hasard une file se trouvera plus fréquemment dans la file rapide que dans la file lente.

Trois raisonnements donnent trois conclusions différentes ! Sur la figure 4, avec des chiffres précis, la probabilité d'être dans la file rapide est égale, selon les raisonnements, à $1/2$, $1/3$ ou $2/3$, ce qui bien sûr est paradoxal. Comment s'en sortir ?

La situation est analogue à celle du paradoxe de Bertrand où l'on s'interroge sur la pro-

babilité que la longueur d'une corde tirée au hasard sur un cercle soit plus longue que le côté du triangle équilatéral inscrit dans le cercle (voir : http://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_de_Bertrand).

Les trois raisonnements calculent trois probabilités qui, contrairement aux apparences, ne correspondent pas à la même question. En effet, il n'est pas équivalent :

- de choisir au hasard une voiture en train d'être dépassée ou de dépasser (raisonnement 1) ;

- de choisir une voiture au hasard à un instant donné sur la section d'autoroute, et de s'interroger pour savoir si, lors du prochain dépassement, elle dépassera ou sera dépassée (raisonnement 2).

Et ces deux questions sont différentes de celle qu'on se pose avant d'arriver sur la section d'autoroute : vais-je avoir de la chance et me retrouver sur la voie rapide ? (raisonnement 3).

Se poser la bonne question

Sachant cela, le problème devient : quelle question le conducteur doit-il se poser pour savoir s'il a de la chance ou pas ? Il me semble que c'est la troisième question, celle qui aboutit à la réponse la plus positive nous indiquant qu'on sera dans la bonne file plus d'une fois sur deux.

Cette conclusion semble contraire au sentiment de malchance persistante ressentie dans les embouteillages, mais l'explication de ce sentiment est simple et nous ramène à la première partie de l'article. Pour les raisons identifiées, quand les files ont des vitesses équivalentes, nous croyons avoir moins de chances que nous devrions en avoir. Lorsque les files ont des vitesses différentes, les mêmes biais de mémorisation se produisent pour des raisons de même nature, et pour une raison supplémentaire qui n'a pas encore été évoquée. Quand nous sommes sur la voie la plus rapide, nous en sortons vite et oublions aussitôt que nous venons d'avoir de la chance !

En clair, et dans notre vie à propos de bien d'autres choses que les encombrements de circulation, nous considérons normal d'avoir de la chance et nous ne nous en

réjouissons pas comme nous le devrions (ce que les probabilités nous permettent d'analyser), alors que nous trouvons injustes les désagréments qu'un peu de malchance provoque et cela surtout lorsque le désagrément est plus long que la satisfaction.

Changer de file ?

La réponse est assez claire, ce qui ne veut pas dire facile à appliquer.

- Si vous pensez que la file d'à côté avance plus vite que la vôtre, effectuez un contrôle aussi objectif que possible de votre jugement (il se peut que vous soyez victime de l'illusion de la file voisine).

- Si vous concluez que la file voisine est vraiment meilleure, alors il sera intéressant de changer de file.

Cependant, n'oubliez pas que vous prenez un risque d'accident en changeant de file et qu'il faut l'intégrer à votre calcul. Cette prise en compte pourrait en effet en changer la conclusion, comme le montre une étude récente de D. Redelmeier (décidément soucieux de circulation routière).

Les résultats publiés dans la revue *Medical Decision Making* sont troublants, ils résultent de calculs menés à partir des statistiques de mortalité dans les accidents et des données de circulations routières. Ils indiquent que :

- une heure passée à conduire une voiture diminue l'espérance de vie de 20 minutes (du fait qu'on prend un risque d'accident mortel) ;

- une augmentation de vitesse d'un kilomètre par heure entraîne pour un conducteur moyen, une perte de temps de 26 secondes, car le gain de temps obtenu par la vitesse accrue est plus que compensé par la diminution d'espérance de vie résultant de l'augmentation du risque d'accident.

- une diminution de vitesse de trois kilomètres par heure est ce qui produit pour le conducteur moyen le meilleur gain de temps total (différence entre le temps perdu immédiatement par la vitesse moindre, et la prolongation de l'espérance de vie due à la diminution du risque d'accident pour celui qui ralentit). Des calculs à méditer, là encore !

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIIL).

BIBLIOGRAPHIE

P. Barthélémy, *L'autre file avance-t-elle vraiment plus vite ?*, *Le Monde*, 19 novembre 2011.

D. Redelmeier et A. Bayoumi, *Time lost by driving fast in the United States*, *Medical Decision Making*, vol. 30(3), pp. E12-E19, 2010.

B. Dawson et T. Riggs, *Highway relativity*, *The College Mathematics Journal*, vol. 35(4), pp. 246-250, 2004.

L. Clevenson *et al.*, *The average speed on the highway*, *The College Mathematics Journal*, vol. 32(3), pp. 169-171, 2001.

D. Redelmeier et R. Tibshirani, *Are those other drivers really going faster ?*, *Chance*, vol. 13(3), pp. 8-14, 2000.

N. Bostrom, *Cars in the next lane really do go faster*, *Plus*, nov. 2001 (<http://plus.maths.org/content/os/issue17/features/traffic/index>).

D. Redelmeier et R. Tibshirani, *Why cars in the next lane seem to go faster ?*, *Nature*, vol. 401, p. 35, 1999.

IDÉES DE PHYSIQUE

Le repassage, c'est physique

Pour bien faire disparaître les plis formés dans un tissu, il faut le repasser en l'humidifiant. On comprend mieux aujourd'hui pourquoi.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment se débarrasser des plis de nos vêtements ? En les repassant avec une « centrale à vapeur », dont la haute pression permet à la vapeur de pénétrer et d'hydrater les fibres des tissus ? En fait, le repassage fait intervenir à la fois la température, la pression exercée par le fer et l'humidité. Et des physiciens français viennent de donner un nouvel éclairage sur la question. Contrairement à une idée répandue, l'action de l'humidité dans le repassage ne se limite pas à altérer les propriétés mécaniques des fibres : elle crée aussi des ponts liquides entre les fibres, ce qui facilite l'effacement du pli.

Les vêtements portés ondulent et plient au gré de nos mouvements. Le plus souvent, une simple pression de la main suffit pour faire disparaître ces plis. Certains, bien plus tenaces, nous obligent à la corvée du repassage. Des trois caractéristiques du fer à repasser ou de sa variante plus perfectionnée, la centrale à vapeur, on comprend bien le rôle du poids de la semelle : une forte contrainte mécanique sur le tissu apla-

nit le pli. Mais comment agissent la température (150 °C recommandés pour la laine, 200 °C pour le coton) et l'humidité du jet de vapeur ? Pour répondre à ces questions, examinons de plus près nos vêtements.

Molécules d'eau contre liaisons

Les textiles sont élaborés par le tissage de fibres (éventuellement regroupées en fils) de quelques centimètres de long et de quelques dizaines de micromètres de rayon. Ces fibres sont des associations de longues chaînes de molécules, des polymères, dont l'origine peut être biologique (la cellulose pour le coton, la kératine pour la laine) ou synthétique (le polyéthylène téréphtalate ou PET pour les polyester, les polyamines pour le nylon). Ces chaînes sont résistantes, mais leur association est bien plus fragile : elle est assurée par des liaisons hydrogène, où œuvre une faible attraction entre un atome avide d'électrons, tel l'oxygène ou l'azote, et un atome moins gourmand, tel l'hydrogène d'une molécule voisine.

Lorsque la fibre est étirée, les chaînes moléculaires glissent les unes sur les autres jusqu'à rompre leurs liaisons hydrogène : la fibre s'allonge, mais les liaisons se reconstituent dès que la contrainte cesse, et la fibre reprend sa forme originelle.

Quel peut être alors le rôle de l'humidité ? Quand on mouille le tissu, on introduit entre les longues chaînes des molécules d'eau, constituées d'un atome d'oxygène et deux d'hydrogène. Ces molécules perturbent l'organisation et défont les anciennes liaisons, ce qui a pour conséquence un rétrécissement des fibres pour les cotons ou la perte de la frisure pour les laines. Devenues moins solidaires, comme lubrifiées par l'eau, les chaînes sont plus libres de répondre à une sollicitation mécanique et de perdre l'organisation responsable du pli disgracieux : le tissu se défroisse.

Une température élevée facilite ces réorganisations. Animés de mouvements erratiques plus rapides, les atomes s'échappent plus facilement de l'attraction de leurs voisins. Par ailleurs, certains travaux suggèrent qu'avec une température plus élevée, les chaînes moléculaires perdent leur rigidité. Ainsi, à la chaleur d'un sèche-linge ou sous le fer, le tissu serait souple et aucun pli ne pourrait subsister. En refroidissant, le tissu retrouverait sa rigidité, avec des fibres conservant la forme qui leur a été imposée par le fer ; un pli permanent se créerait, comme ceux des mouchoirs repassés.

Ce que nous avons expliqué jusqu'ici ne porte que sur l'intérieur d'une même fibre. Lydéric Bocquet et son équipe, du CNRS et de l'Université Lyon 1, viennent de montrer qu'il faut aussi prendre en compte l'effet de l'humidité sur les contacts entre fibres. Ces physiciens ont comparé deux matériaux



Dessins de Bruno Vacaro

1. LE REPASSAGE AVEC UN FER À VAPEUR est beaucoup plus facile qu'avec un fer à l'ancienne. La température élevée et la pression exercée par le fer permettent de briser les liaisons faibles (en bleu) entre les chaînes moléculaires et ainsi de réorganiser ces dernières dans les fibres. Le jet de vapeur facilite ce processus, notamment parce que les molécules d'eau introduites dans les fibres perturbent elles aussi les liaisons entre les chaînes moléculaires.