

Comme les degrés de liberté sont des caractéristiques de l'horizon, on peut dire en un sens qu'ils résident au « bord » de l'espace à deux dimensions. Ils constituent donc une réalisation d'un des principes les plus subtils de la gravitation quantique, le principe holographique. Tout comme un hologramme enregistre une image tridimensionnelle sur une pellicule à deux dimensions, ce principe énonce que la physique d'un univers à n dimensions peut être entièrement décrite par une théorie plus simple à $(n-1)$ dimensions. Dans la théorie des cordes – la théorie la plus aboutie pour unifier la relativité générale et la physique quantique –, cette idée a conduit à une approche novatrice pour créer une théorie quantique de la gravitation.

La gravitation en deux dimensions est un scénario simplifié sur lequel on pourrait tester cette approche. Mais il y a quatre ans, E. Witten et Alexander Maloney, aujourd'hui à l'Université McGill, ont créé la surprise en suggérant que les prédictions de la théorie holographique

pourraient échouer dans le cadre bidimensionnel. Les trous noirs auraient des propriétés thermiques incohérentes.

Un modèle bien fécond

Si ces théoriciens ont raison, alors la gravitation en deux dimensions est un phénomène encore plus subtil que nous ne l'avons suspecté jusqu'à présent. Peut-être n'a-t-elle pas de sens en elle-même et doit-elle être couplée avec d'autres types d'interactions et de particules. Peut-être le principe holographique n'est-il pas toujours valable. Peut-être l'espace, comme le temps, n'est-il pas un ingrédient fondamental de l'univers. Ou encore peut-être faut-il trouver un moyen de réintroduire des degrés de liberté au niveau local. Dans tous les cas, la gravitation en deux dimensions a indiqué une voie d'exploration que nous n'aurions sans doute pas empruntée autrement.

Même s'il nous est impossible de fabriquer un véritable trou noir en deux dimensions, nous pourrions réussir à tester

expérimentalement certaines des prédictions de la théorie quantique de la gravitation en deux dimensions. Plusieurs équipes travaillent sur des analogues bidimensionnels des trous noirs. Un fluide s'écoulant plus vite que la vitesse du son produit par exemple un horizon des événements duquel les ondes sonores quantifiées (les phonons) ne peuvent pas s'échapper. Les expérimentateurs ont également construit des trous noirs bidimensionnels à l'aide de plasmons, des ondes électromagnétiques confinées sur des surfaces (voir l'encadré page 78). De tels dispositifs devraient présenter un analogue du rayonnement quantique des trous noirs.

La gravitation quantique en deux dimensions était au départ un simple cadre destiné à explorer des idées sur la gravitation quantique dans le monde réel. Mais ce modèle nous a surpris par sa richesse : le rôle important de la topologie, ses trous noirs remarquables, ses étranges propriétés holographiques. Abbott n'aurait sans doute pas cru que *Flatland* se révélerait si fécond ! ■



france culture

VOYAGER DANS LE TEMPS

La marche des sciences
Aurélie Luneau
14h/15h - jeudi
En partenariat avec *Pour la Science*

franceculture.fr

Photo : Mark Bourke © Philippe Bévère / Courtesy galaxie images - 402457 - Paris 2011

HISTOIRE DES SCIENCES

Halley, Mairan et les aurores boréales

Quelle est l'origine des aurores boréales ? Le magnétisme terrestre proposé par le Britannique Halley en 1716 ou l'atmosphère solaire invoquée par le Français Dortous de Mairan en 1733 ? La question ne fut résolue qu'au début du XX^e siècle.

Stéphane LE GARS

C'étoit une maniere d'aurore boréale, ou plutôt australe. [...] Un chevron couleur de feu, dont les jambes s'appuyoient l'une à peu près sur l'Orient, & l'autre sur l'Occident.

Au début du XVIII^e siècle, une recrudescence d'aurores boréales en Europe, telle celle décrite ici en février 1730 par un observateur à Montpellier (et rapportée par Mairan), conduit la Société royale de Londres et l'Académie des sciences de Paris à demander des explications rationnelles du phénomène. Celui-ci, en effet, inquiète et effraie la population, qui y voit un événement surnaturel : les aurores boréales, de même que les comètes, les éclipses ou les tremblements de terre, sont accompagnées d'un imaginaire symbolique fort, présageant des

désastres. En Écosse, par exemple, les aurores sont souvent prises pour des batailles ayant lieu dans le ciel, les couleurs rouges représentant des bains de sang. C'est dans ce contexte que les deux sociétés savantes invitent respectivement Edmond Halley et Jean-Jacques Dortous de Mairan, deux astronomes, à proposer une théorie explicative de ces apparitions colorées, fondée sur les lois de la nature.

Alors que Halley invoque des fluides magnétiques émanant des pôles, Mairan, de son côté, refuse de faire intervenir l'électricité ou le magnétisme, pour privilégier le rôle de l'atmosphère solaire. Deux théories s'affrontent alors. Laquelle vainquit ? Les deux, direz-vous : nous savons aujourd'hui que chacune possède une part de vérité, les aurores boréales étant le fruit de l'ionisation

de particules de la haute atmosphère par des particules chargées éjectées du Soleil et piégées dans le champ magnétique terrestre. Pourtant, les choses n'ont pas été aussi simples. Tandis que l'idée de Halley s'imposait dans les milieux savants, confortée au début du XIX^e siècle par les découvertes sur l'électricité et le magnétisme, celle de Mairan fut critiquée, discréditée, et mit plus d'un siècle à faire son chemin, au gré d'arguments scientifiques, mais aussi politiques et économiques.

Un fluide magnétique aimanté par la Terre

C'est à la suite de l'aurore spectaculaire du 6 mars 1716 que Halley propose sa théorie rationnelle du phénomène. Son étude tente de dégager l'aurore tout à la fois d'un imaginaire populaire et d'une explication aristotélicienne qui l'attribue à un phénomène météorologique. Avec Halley, l'aurore reste un phénomène atmosphérique, comme dans la physique d'Aristote, mais dû à des vapeurs brillantes issues de la Terre. En 1714, il penchait pour de la vapeur d'eau brillant dans l'air, car dilatée par un feu souterrain, et teintée de vapeurs soufrées provenant de l'intérieur de la Terre. En 1716, après l'observation de l'aurore du 6 mars, Halley modifie sa théorie : il suppose que les vapeurs ne sont pas aqueuses, mais magnétiques. Il imagine la Terre comme un immense aimant, autour duquel les effluves magnétiques, à l'origine de la lumière observée, se comporteraient comme de la limaille de fer. Sa théorie non seulement explique l'apparition fréquente des aurores près des pôles, mais est renforcée



Archives départementales des Hauts-de-Seine, bibliothèque André-Desguine, cote D1232, photo: Gilles Vannat

1. AURORE BORÉALE VUE À BREUILLÉPONT, dans l'Eure, le 26 septembre 1731 à 9 heures, par Jean-Jacques Dortous de Mairan et rapportée dans son *Traité physique et historique de l'aurore boréale* (2^{nde} édition, 1754).



© Arnd Heilmann/Stocktrek Images/Corbis

par l'indépendance du mouvement des étoiles et de celui des aurores : tout semble se passer dans l'atmosphère et non dans le cosmos.

Mairan, quant à lui, est sollicité après l'aurore boréale du 19 octobre 1726, observée en France et qui suscita une grande panique. Son *Traité physique et historique de l'aurore boréale*, publié en 1733, apparaît par plusieurs aspects dans la continuité des travaux de Halley. Comme son prédécesseur britannique, il a collecté nombre de données historiques. Il a cependant étendu son étude à un champ beaucoup plus vaste de données : 1 441 observations d'aurores depuis l'année 502, qu'il a organisées dans une table afin de repérer les régularités dans l'apparition du phénomène et saisir son origine. Mairan mène par ailleurs son investigation dans le même style que Halley : il décrit de façon détaillée et précise les formes, couleurs et changements de l'aurore. Son objectif, cependant, diffère de celui de Halley : il cherche non des singularités, mais des éléments permanents dans l'espoir d'en dégager une loi physique.

Sa théorie, quant à elle, rompt radicalement avec celle de Halley. Il propose une théorie cosmique où la cause de l'aurore est attribuée à la lumière zodiacale, une faible lueur triangulaire observée la nuit dans la zone où le Soleil s'est couché, et découverte par Jean Cassini en 1685 (voir la figure 4). Mairan l'identifie à l'atmosphère solaire, un fluide rare et ténu, très faiblement lumineux

et donc peu visible, hormis durant les éclipses solaires et par le biais de cette lumière zodiacale. Il élabore une théorie éloignée de tout système de pensée, la voulant uniquement induite d'observations : « Nous tâcherons, autant qu'il nous sera possible, de conserver à nos recherches l'avantage de se soutenir avec tous les systèmes, en n'y admettant que des observations et des faits qui puissent être avoués de part & d'autre. »

Lumière zodiacale et pesanteur

À cette époque en effet, deux systèmes de pensée s'affrontent, fondés respectivement sur les idées de Newton et de Descartes. Si les calculs sur le mouvement des planètes donnent à Newton un avantage certain sur Descartes, les thèses cartésiennes ne sont pas abandonnées pour autant, car elles expliquent elles aussi certains phénomènes physiques. Mairan met donc un point d'honneur à n'en privilégier aucune.

De Newton, il accepte l'idée d'une pesanteur universelle, avec laquelle il explique comment l'atmosphère du Soleil se retrouve piégée dans l'atmosphère terrestre : « Il est certain, comme on le démontrera d'après un grand nombre d'observations qui ne sont pas équivoques, que l'atmosphère du Soleil, vue en qualité de lumière zodiacale, atteint quelquefois jusqu'à l'orbite terrestre et au-delà. C'est alors que la matière qui compose

2. UNE AURORE BORÉALE photographiée en Norvège. On sait aujourd'hui que les aurores sont produites par l'ionisation de particules de la haute atmosphère par des particules chargées éjectées du Soleil et piégées dans le champ magnétique terrestre. Lorsque leur cortège électronique se réarrange, les particules ionisées émettent des photons de couleurs variées qui, ensemble, créent l'aurore boréale.

L'AUTEUR



Stéphane LE GARS est historien de l'astronomie associé au Centre François Viète, à l'Université de Nantes.

BIBLIOGRAPHIE

S. Le Gars, *Dortous de Mairan et la théorie des aurores polaires : Trajectoire et circulation d'une idée, de 1733 à 1933*, dans O. Bruneau et I. Passeron (dir.), *Colloque Dortous de Mairan « physicien philosophe » (1678-1771)*, *Revue d'histoire des sciences*, Armand Colin, à paraître en 2012.

J. M. Briggs, *Aurora and enlightenment eighteenth-Century explanations of the Aurora Borealis*, *Isis*, vol. 58, pp. 491-503, 1967.

cette atmosphère venant à rencontrer les parties supérieures de notre air, en deçà des limites où la pesanteur universelle commence à agir avec plus de force vers le centre de la Terre que vers le Soleil, tombe dans l'atmosphère terrestre à plus ou moins de profondeur, selon que la pesanteur spécifique est plus ou moins grande, eu égard aux couches d'air qu'elle traverse, ou sur lesquelles elle se soutient. »

Toutefois, Mairan précise qu'il ne prend pas position sur les causes de cette pesanteur : seul lui importe le fait que l'expérience (le mouvement des planètes) justifie l'existence de cette loi.

De Descartes, Mairan s'inspire de la représentation du monde – une infinité de systèmes solaires, chacun étant un tourbillon de matière centré sur un Soleil – pour décrire la nature de l'atmosphère solaire, assimilée à la lumière zodiacale. Comme Cassini, il

pense que cette lumière résulte d'un amas prodigieux de matière qui environne le corps du Soleil. Là encore, cependant, il se défend de rechercher la raison de cet amas : « Nous n'examinerons point si la matière qui compose cette atmosphère, est une émanation du corps du Soleil, une espèce d'effervescence ou de dépuración de ses parties les plus grossières, comme il semble que Descartes l'a pensé, ou si ce n'est qu'un amas de parties hétérogènes répandues dans l'éther, qui se rassemblent de toutes parts, & qui tombent vers le Soleil, comme on pourroit le recueillir des écrits de M. Newton. Cet examen ne seroit pas moins inutile que supérieur à nos connoissances : il ne s'agit ici que de chercher la nature de cette matière d'après les effets les plus immédiats. »

La première critique tombe dès 1746, dans un article du mathématicien suisse

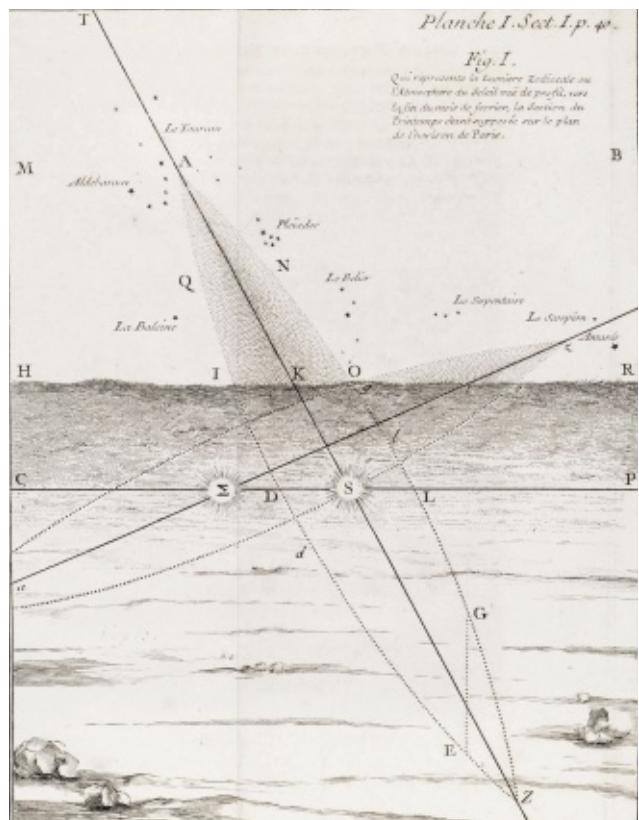
DE L'AURORÉ BORÉALE. Sect. IV. Ch. IV. 213

TABLE abrégée, ou Réduction du Dénombrement précédent.

AUROSORES BORÉALES qui ont paru.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.	SOMMES pour les Années.
De 1500 à 1550		3	1				1	2	3	7	3	27
De 1550 à 1600	2	7	2	2		1		1	3	6	4	28
De 1600 à 1707	2						***					4
De 1707 à 1716		1	2					1	1			7
En 1716			2	3							2	7
En 1717	4								1			5
En 1718			1						4	1	1	8
En 1719		1	2	1						3	1	8
En 1720	1	3	1					1	2	1	1	10
En 1721	2	2	1					2	1			8
En 1722	4	1						4	4	1	1	15
En 1723	1	1	3	1				1	1	1	1	10
En 1724			1						1			2
En 1725	1								3			4
En 1726								1	3	3		7
En 1727	3		3						2			8
En 1728		4	3	3		1	3	3	4	6	3	30
En 1729	1				1	2		2	1	1		8
En 1730	1	2	2	2	1			2	4	3		16
En 1731								5	10		2	17
SOMMES pour la Mois.	31	27	22	12	1	3	7	24	30	26	15	229

D d 11

3. LES AUROSORES BORÉALES ENTRE 500 ET 1731 recensées et rassemblées par Mairan dans son *Traité* (1733). En réunissant ainsi tous ces événements, l'astronome espérait repérer une régularité qui le conduirait à la compréhension du phénomène.



4. LA LUMIÈRE ZODIACALE ou l'atmosphère du Soleil vue de profil, vers la fin février 1683, le soir (zone pointillée IKOA) et au petit matin (zone gtez), et les positions associées du Soleil (respectivement S et Σ), derrière l'horizon HR, sur une planche du *Traité* de Mairan (2^{de} édition, 1754).

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