



**HAL**  
open science

## Des embouteillages à toutes les échelles

Cécile Appert-Rolland

► **To cite this version:**

Cécile Appert-Rolland. Des embouteillages à toutes les échelles. L'Archicube , 2018, 25, pp.22-27.  
hal-02337768

**HAL Id: hal-02337768**

**<https://hal.science/hal-02337768>**

Submitted on 8 Nov 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Des embouteillages à toutes les échelles

Cécile Appert-Rolland

*Directrice de recherche au CNRS en Physique Théorique, Cécile Appert-Rolland s'intéresse à la modélisation des systèmes de transports, qu'il s'agisse de fluides, de véhicules, de piétons, ou encore de transport intracellulaire, avec un goût prononcé pour le travail interdisciplinaire.*

## Une expérience universelle

Nous avons tous fait l'expérience des embouteillages, que ce soit au volant de notre voiture, ou aux heures de pointe sur les quais du métro. Expérience souvent agaçante ou tragique selon l'urgence du rendez-vous qui va suivre. On peut se demander pourquoi nos réseaux de transport n'ont toujours pas convergé vers une configuration qui nous assurerait un écoulement fluide en toutes circonstances. Est-il au moins possible de comprendre pourquoi les embouteillages sont notre lot quotidien ? Il s'agit d'un phénomène qui se retrouve à toutes les échelles, et nous verrons dans cet article qu'il existe dans chacune de nos cellules des marcheurs moléculaires qui eux aussi, en cas de maladies neurodégénératives, peuvent se retrouver coincés dans des embouteillages qui compromettent la vie de nos neurones. Réciproquement, nous pouvons nous émerveiller de ce que la cellule saine sache réguler un transport autrement plus complexe que celui auquel nous sommes confrontés en tant que piétons ou conducteurs.



et nous verrons dans cet article qu'il existe dans chacune de nos cellules des marcheurs moléculaires qui eux aussi, en cas de maladies neurodégénératives, peuvent se retrouver coincés dans des embouteillages qui compromettent la vie de nos neurones. Réciproquement, nous pouvons nous émerveiller de ce que la cellule saine sache réguler un transport autrement plus complexe que celui auquel nous sommes confrontés en tant que piétons ou conducteurs.

## Condamnés à interagir

En tant qu'êtres humains, nous nous déplaçons à la surface du globe, dans un espace essentiellement à deux dimensions. Se mouvoir dans la direction verticale nous coûte beaucoup d'énergie. Cela a des conséquences importantes en terme de transport, liées à cette observation géométrique : dans un plan, deux droites qui ne sont pas parallèles ont obligatoirement une intersection. Nos routes, inévitablement, se croisent en un certain nombre de points. Des piétons qui se croisent sur une place ont une bien plus grande probabilité de devoir interagir que des oiseaux dans le ciel. Sur une route, nous sommes dans un espace d'encore plus basse dimensionnalité, et chaque voiture est fortement contrainte par la vitesse de celle qui la précède, à moins de pouvoir la doubler. Dès que nous sommes un peu nombreux, il nous faut nous partager l'espace disponible. Chacun de nous s'y efforce en interagissant avec ses voisins. Ces interactions ne sont pas toujours simples à résoudre, car contrairement à des molécules dans un gaz, nous avons chacun un but individuel que nous voulons atteindre, et nous n'acceptons qu'avec réticence de faire un détour. Ces interactions peuvent être contrôlées de l'extérieur, par exemple par des feux tricolores ou des règles de priorité à une intersection. Mais dans beaucoup de cas ce sont les décisions individuelles qui vont construire l'écoulement final, sans qu'un esprit supérieur organise globalement nos déplacements.

## Des stratégies d'évitement

Pour éviter les collisions avec nos semblables, nous sommes pourtant capables de beaucoup d'ingéniosité, parfois à notre insu. Par exemple, quand des groupes de piétons se croisent, il se forme spontanément des bandes obliques rassemblant les piétons qui vont dans la même direction. Ces bandes glissent en quelque sorte les unes sur les autres, et limitent les conflits de trajectoire. Cette structure émerge spontanément, sans que les piétons eux-mêmes en aient conscience. Il suffit pour cela que chaque piéton se place instinctivement dans le sillage de celui qui le précède. Dans d'autres circonstances, qui en général impliquent des passages de portes, des rétrécissements de couloirs ou des écoulements convergents, il peut arriver que des densités extrêmement élevées soient atteintes, au point de mettre en

danger les personnes qui s'y trouvent. Des accidents se produisent régulièrement lorsque des foules convergent vers un même point. Les comportements individuels ne parviennent plus à s'adapter à la situation. Il y a un débat pour savoir quel est le rôle joué par la panique et si en de telles circonstances les personnes en viendraient ou non à adopter un comportement moins altruiste. Mais même sans cela, le principal problème posé par ces situations est le manque d'information. Les personnes qui sont coincées dans les zones à haute densité ne peuvent plus agir, tandis que celles qui contribuent à la formation de ces hautes densités en continuant à affluer n'ont pas forcément l'information de ce qui se passe en aval. Éventuellement incitées par un danger à aller de l'avant, ces personnes peuvent pousser légèrement leurs prédécesseurs, sans se douter que ces forces peuvent former en aval des arches comme dans les écoulements granulaires, qui bloquent complètement l'écoulement.

### Mais qu'est-ce au juste qu'un embouteillage ?

Peut-on caractériser la présence d'un embouteillage ou s'agit-il d'une notion subjective ? En fait il existe une transition assez nette entre un écoulement fluide et un embouteillage. Voyons par exemple ce qui se passe sur une autoroute. Des boucles magnétiques enterrées dans la chaussée permettent de détecter les passages des véhicules et de mesurer leur vitesse. Typiquement ces mesures sont moyennées sur des intervalles de quelques minutes. Cela permet de tracer ce qu'en trafic routier on appelle le diagramme fondamental, à savoir le flux de véhicules en fonction du taux d'occupation. Ce dernier est défini comme le pourcentage de temps pendant lequel une boucle magnétique se trouve en dessous d'un véhicule, ce qui peut être pris en première approximation comme une mesure de la densité de véhicules. La figure 1a en donne un exemple. Lorsque les densités sont basses, les véhicules roulent librement et le flux est simplement proportionnel à la densité. Mais au-delà d'un certain seuil de densité, le flux se met à diminuer avec l'augmentation de la densité. C'est la signature d'un écoulement congestionné, ou autrement dit, d'un embouteillage. Le flux maximal qui peut être atteint correspond à la capacité de la route.

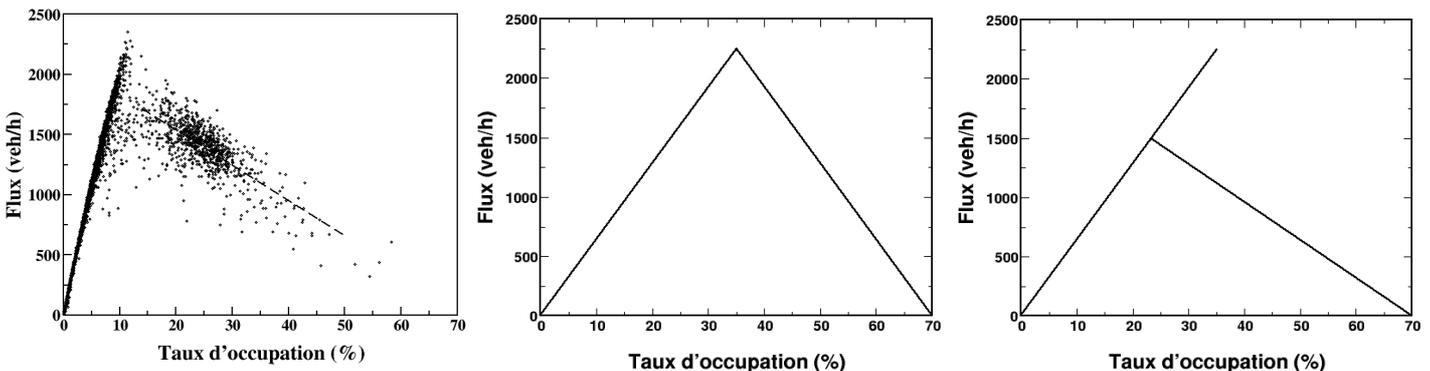


Figure 1 : Flux (= nombre de véhicules passant en un point donné en une heure) en fonction du taux d'occupation ( $\approx$  densité). En écoulement libre, les véhicules roulent toujours à la même vitesse, et donc le flux est proportionnel à la densité, ce qui correspond à la branche rectiligne à gauche des figures. Dans ce régime, le flux augmente avec la densité. Par contre, à droite des figures, le flux se met à décroître quand la densité de véhicules augmente. Cela ne peut s'expliquer que par une décroissance de la vitesse quand la densité augmente, et correspond donc à un état embouteillé. Les différentes figures sont issues (a) de données réelles sur l'autoroute A10, voie de gauche – la ligne en tirets est un fit des données pour un taux d'occupation supérieur à 14 %; (b) et (c) de simulations pour un modèle simplifié de trafic sur une route découpée en cases, sur laquelle des particules sautent de gauche à droite sauf si la case cible est déjà occupée. Après s'être arrêtées, les particules redémarrent soit immédiatement (b), soit avec un retard (c).

Certains embouteillages sont en quelque sorte inévitables. Si le flux de véhicules qui arrive sur le réseau est supérieur à la capacité du réseau, un embouteillage se formera. Dans ce cas, il s'agit d'une conséquence directe de la conservation de la masse. Si le flux entrant est supérieur au flux sortant, il faut 'stocker' quelque part les véhicules dont la sortie sera différée.

Mais il arrive aussi que se forment des embouteillages sans cause évidente, et qui sont pour cette raison parfois appelés 'embouteillages fantômes'. Plusieurs explications sont possibles, mais l'une d'elle réside dans le fait que les conducteurs ont un temps de réaction. Il est possible de l'illustrer par un modèle très simplifié de route. Imaginons une route découpée en cases, parcourue par des particules (les voitures) qui sautent de case en case de la gauche vers la droite. La seule contrainte est qu'une particule ne peut pas sauter à la case suivante si celle-ci est déjà occupée. Ce modèle ultra simple présente déjà une transition de congestion, comme on le voit sur la figure 1b : au-delà d'une certaine densité, le flux diminue (Remarquons que la taille des cellules et la durée du pas de temps dans notre modèle ont été dimensionnés de façon à pouvoir exprimer les grandeurs flux et taux d'occupation dans les mêmes unités que pour les données réelles). Maintenant, rajoutons la règle qu'une fois qu'une voiture s'est arrêtée, elle a tendance à redémarrer avec retard. Cette simple modification va changer très profondément la nature de l'écoulement. D'une part l'ajout d'un temps de réaction modifie la forme du diagramme fondamental : il existe des densités pour lesquelles

deux régimes d'écoulement sont possibles (Figure 1c). Il est possible de continuer à avoir un flux important en montant sur la branche qui correspond à l'écoulement libre. Mais cela correspond à un état métastable : à l'occasion d'une perturbation, le flux peut chuter brutalement sur la branche qui correspond à la congestion, et il sera nécessaire ensuite de diminuer la densité pour pouvoir remonter sur la branche supérieure (hystérésis). D'autre part, des embouteillages peuvent se former en aval et remonter l'écoulement. Plus ils remontent l'écoulement, plus ils grossissent. C'est un phénomène qui peut être observé sur des autoroutes réelles en amont d'une perturbation (e.g. bretelle d'accès). Les véhicules qui se retrouvent pris dans un embouteillage bien en amont ne peuvent pas comprendre d'où vient celui-ci.

Cette observation donne deux pistes pour éviter les embouteillages de cette nature. La première consiste à limiter les fluctuations, par exemple en affichant une vitesse conseillée sur des panneaux à affichage variable. La seconde serait de nous inciter à accélérer rapidement lorsque nous sortons d'un embouteillage.

## **Les congestions ne sont pas une spécificité humaine**

L'article d'Etienne Guyon illustre comment les granulaires peuvent être sujet à des phénomènes d'obstruction, et de fait de nombreuses similarités ont été recherchées entre granulaires et humains. Le plus populaire est sans doute l'effet dit « faster is slower », autrement dit plus les piétons vont chercher à sortir vite, et se pousser les uns les autres pour passer une porte, moins l'évacuation se fera vite. Bien que l'effet soit beaucoup moins fort que pour les granulaires, en raison de la grande capacité des piétons à se contorsionner et à continuer à avancer même en milieu très dense, il a cependant pu être mis récemment en évidence dans certaines expériences, en particulier celles de [Pastor et al, 2015]. Dans ce même article, des expériences d'évacuation ont été menées avec des moutons. En jouant sur leur hâte accrue à rentrer dans la bergerie en hiver, les chercheurs ont pu mettre en évidence le même effet « Faster is Slower ». Il existe cependant des systèmes qui ne rentrent pas dans cette classe. Les fourmis, qui interagissent via le dépôt de phéromones, voient leur vitesse croître quand la densité augmente et réagissent de ce fait très différemment des humains. De fait, à ce jour, les expériences n'ont mis en évidence aucun effet « faster is slower » dans le cas des fourmis.

Mais nous allons voir à présent comment la congestion peut être présente à des échelles beaucoup plus petites que celles de tous les systèmes évoqués jusqu'ici.

## **Des embouteillages dans nos cellules**

Toutes nos cellules ont besoin pour leur survie d'un système interne de logistique pour transporter nutriments, déchets, protéines, vésicules diverses, d'un endroit à l'autre de la cellule. L'intérieur de la cellule étant très encombré, il faut pour cela du transport actif. Ce transport s'effectue le long d'un réseau de polymères rigides (les microtubules) et il est assuré par des molécules dont la structure rappelle celle d'un piéton en cela qu'elles ont des « jambes », qui peuvent s'accrocher sur la surface des microtubules. Ces molécules sont appelées moteurs moléculaires car elles sont capables de convertir de l'énergie chimique en énergie mécanique. Plus précisément, à chaque fois qu'elles hydrolysent une petite molécule d'ATP, cela entraîne un changement de conformation qu'on pourrait appeler un « pas » dans le cadre de notre analogie avec les piétons humains. Ces piétons moléculaires sont tout petits (quelques dizaines de nanomètres), mais ils marchent très vite : si nous marchions avec la même fréquence, notre vitesse serait de l'ordre de 200 ou 300 km/h ! Et ils sont capables de tirer divers objets à travers la cellule.

Or lors de diverses maladies neurodégénérative se produisent des embouteillages dans la cellule : le transport de vésicules est défectueux. On ne sait pas toujours si c'est une cause ou une conséquence de la maladie, plus probablement il s'agit d'un des maillons d'une chaîne complexe de faits liés entre eux. Toujours est-il que cette observation a motivé de très nombreuses études pour comprendre comment le transport intracellulaire est régulé. Car le plus étonnant n'est sans doute pas que le transport soit interrompu dans certaines maladies, mais qu'il fonctionne dans une cellule saine ! Il s'agit d'un véritable challenge encore mal compris.

L'un des facteurs qui rend ce transport complexe est qu'il a lieu dans les deux sens. Imaginez que nous devions partager notre voie d'autoroute avec des véhicules allant dans le sens opposé au nôtre ; même si ces voies étaient nombreuses, cela nous obligerait à réduire fortement notre vitesse et mènerait très facilement à la congestion. L'une des hypothèses que nous avons faites est que la dynamique du réseau de microtubule lui-même joue un rôle pour empêcher dynamiquement la formation des embouteillages. Autrement dit, supprimer de temps à autre la route permet de renvoyer les moteurs moléculaires dans l'espace environnant, où ils peuvent se rattacher à une autre voie. Mais pour les plus gros objets, cela ne peut pas être la seule explication. L'intérieur de la cellule est tellement encombré qu'on se demande comment une mitochondrie par exemple peut se frayer un chemin dans l'entrelacs de filaments et autres organelles qui peuplent la cellule.

Parfois, ce ne sont pas les embouteillages mais au contraire la transition vers un état non congestionné qui met en danger notre santé. Des études ont montré que les cellules composant nos tissus peuvent présenter des dynamiques collectives vitreuses : solides aux temps courts mais fluides aux temps longs. Une hypothèse avancée serait que dans

les métastases cancéreuses, l'augmentation des contraintes dûe à la prolifération cellulaire pourrait faire basculer le tissu vers la phase fluide, et favoriser la dissémination des cellules cancéreuses.

Finalement, ce petit tour d'horizon nous confirme que dans le monde physique qui est le nôtre, la création d'embouteillages ou de congestions est un phénomène quasi-universel, qui se retrouve à toutes les échelles. Il est possible de réguler le transport pour tenter de se situer autant que possible en dessous des seuils de blocage, mais souvent des intérêts contradictoires rendent vain ces efforts. Il est par exemple bien connu que lorsque le trafic routier se fluidifie, davantage de personnes prennent leur voiture... et les embouteillages sont de retour. Certaines municipalités peuvent sciemment restreindre la capacité du réseau routier afin de faire des embouteillages un levier d'incitation à utiliser les transports en commun. Ainsi les embouteillages nous invitent à la mesure. Ils nous confrontent à nos limites et nous poussent à inventer de nouvelles façons d'être et de vivre ensemble.

### **Références :**

C. Appert-Rolland et al, ``Transport in Physical Space: the Example of Pedestrians, Cars, and Molecular Motors'', JPS Conf. Proc. **16** (2017) 011001.

J.M. Pastor et al, ``Experimental proof of faster-is-slower in systems of frictional particles flowing through constrictions'', Phys. Rep. E **92** (2015) 062817.

K.J. De Vos et al, ``Role of Axonal Transport in Neurodegenerative Diseases'', Annual Rev. of Neuroscience **31** (2008) 151.

L. Oswald et al, ``Jamming transitions in cancer'', J. Phys. D: Applied Physics, **48** (2017) 483001.