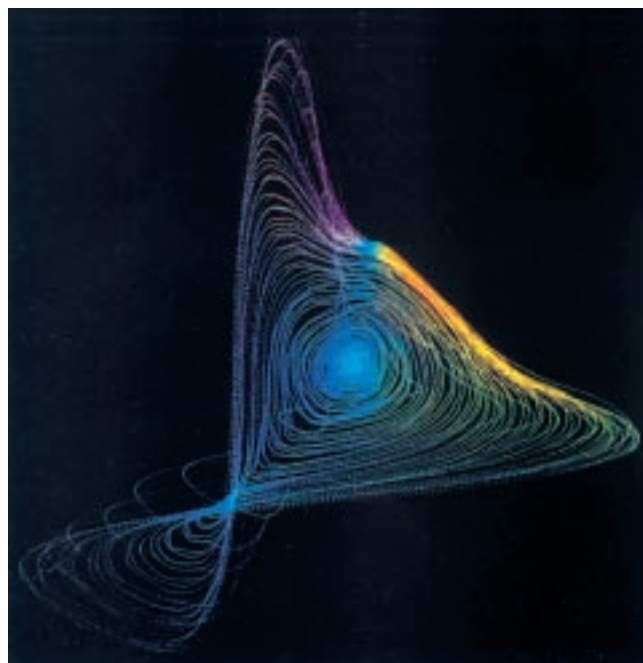
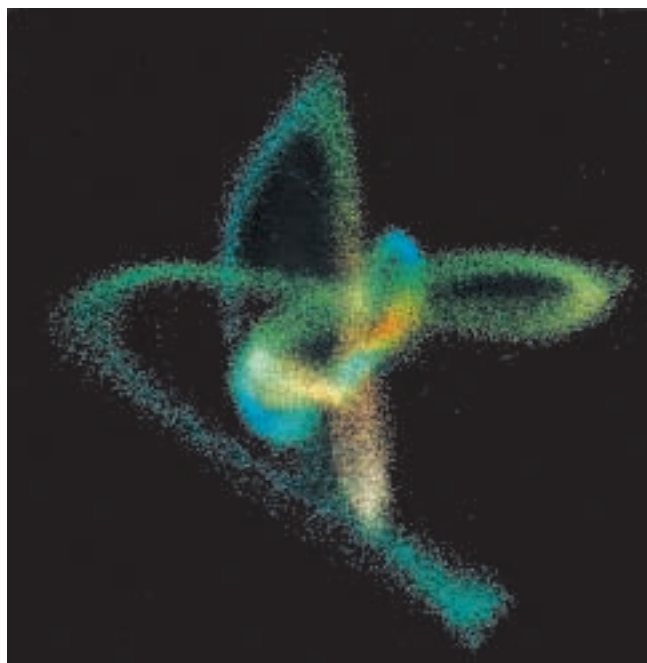


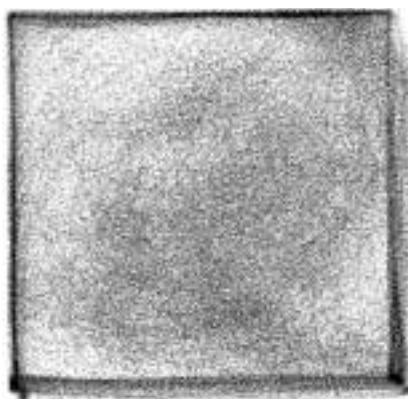


2. Images d'autocorrélation tridimensionnelle d'une note grave de flûte (à gauche) et d'un court morceau de trompette (à droite). La troisième dimension est représentée par la couleur.

mique auquel elle est associée est discontinu, car le temps s'écoule par pas successifs, comme s'il était compté par une montre dont les aiguilles avancent par crans. Quand on porte les couples de valeurs (s_j, s_{j+1}) d'un tel système dynamique dans un système de coordonnées, on obtient une courbe ayant une forme bien définie. Quand on choisit un écart entre les indices, lors de la représentations des points, on obtient encore une courbe, généralement un peu plus compliquée : les points (s_j, s_{j+k}) appartiennent à la courbe de la fonction g , qui est la répétition k fois de la fonction f .

Si un son engendre une courbe, une courbe peut-elle engendrer un son ? En principe non, parce que les sons sont continus, et non discrets. Toutefois les images d'autocorrélation confirment que des suites numériques, telle celle des valeurs d'un son sinusoïdal, se comportent comme si elles étaient issues d'une simple fonction d'itération ; elles aident également à distinguer le hasard pur du chaos déterministe. Dans le premier cas, on obtient un champ gris plus ou moins sans structure ; dans le second, on obtient la courbe associée à une fonction d'itération ou quelque chose d'un peu plus compliqué.

La situation où chaque valeur ne dépend que de celle qui la précède immédiatement est le cas le plus simple d'un système dynamique discret. Dans d'autres cas, la valeur de la fonction dépend des deux dernières valeurs, et l'itération prend la forme $s_{j+1} = f(s_j, s_{j-1})$. Plus généralement, chaque valeur peut dépendre des trois, quatre, cinq... dernières valeurs. On dit alors que le système est de dimen-



3. Image d'une note de flûte très forte avec un écart de temps d'environ un quart de période du son fondamental.

sion 2, 3, 4, 5, etc. La dimension désigne ici, comme dans le langage mathématique courant, le nombre de nombres nécessaires pour décrire intégralement l'état du système considéré. Pour un système bidimensionnel, la définition complète du système impose en outre de disposer la donnée des deux premières valeurs initiales.

ENTRE HASARD ET CHAOS

Pour des fonctions d'itération de dimensions élevées, la représentation des fonctions d'itération est plus difficile qu'à une dimension : une fonction à deux variables nécessite déjà, pour sa représentation graphique, trois coordonnées (et se présente alors comme un paysage vallonné au-dessus d'une surface plane). Pour ne négliger aucune des trois coor-

données, on doit porter les points (s_j, s_{j+1}, s_{j+2}) ou (s_j, s_{j+k}, s_{j+2k}) dans une représentation tridimensionnelle. Les deux dimensions d'une feuille de papier étant un peu justes, G. Monro et J. Pressing représentent la troisième dimension par des couleurs (voir la figure 2).

Ils obtiennent ainsi un résultat surprenant. Même en négligeant la couleur (correspondant à la troisième dimension), l'image n'est pas une surface entière : elle est réduite à une courbe un peu floue ou à un ensemble de courbes séparées par des espaces : la dimension de cet objet semble être supérieure à un, mais inférieure à deux.

Cette première impression s'exprime mathématiquement par un concept de dimension généralisée. À l'Université de Groningen, Floris Takens a montré que ce type d'analyse est applicable à des systèmes dynamiques de toutes sortes. Même quand on ignore combien il faut de variables pour décrire entièrement l'état d'un système, on peut déterminer, par le calcul, la dimension d'un processus quand elle est finie (le chaos est autorisé, mais pas le hasard pur) ; on obtient un nombre qui n'est généralement pas entier et que l'on nomme la «dimension fractale».

Ainsi, en théorie du chaos, les théorèmes abstraits sont complexes, mais les phénomènes fondamentaux deviennent visibles dès que l'on représente une série de mesures d'une façon habile.

Christoph PÖPPE est mathématicien et journaliste à la revue *Spektrum der Wissenschaft*.



Promenade en voiture

ROLAND LEHOUCQ

La physique aide à devenir un meilleur conducteur : nous comprenons mieux les conseils de la sécurité routière, ce qui nous incite à les appliquer.

Durant les vacances d'été, la sécurité routière incite les conducteurs à la prudence et leur prodigue ses habituels conseils de conduite. Parmi ceux-ci, nous en retiendrons trois : rouler en douceur en ayant correctement équilibré le chargement de son véhicule et en tenant compte de l'état de la route. Ces excellents conseils sont compris avec la loupe du physicien.

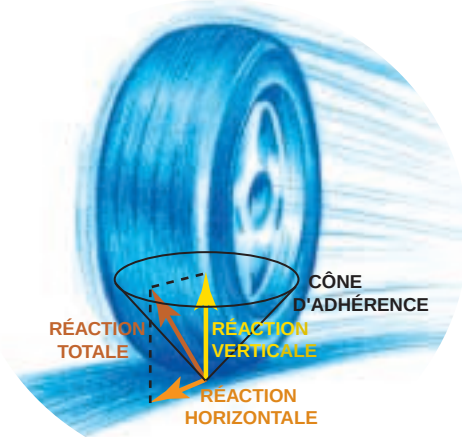
À l'arrêt, la résultante des forces qui s'appliquent à une voiture est nulle, car celle-ci est en équilibre. Ces forces sont le poids, dirigé vers le sol et appliqué au centre de gravité du véhicule, et la réaction de la route, dirigée vers le haut et appliquée aux points de contacts entre les pneus et le sol. Lorsque le poids est uniformément réparti, la réaction subie par le train avant, égale à celle qui est subie par le train arrière, est la moitié du poids total du véhicule. Les voitures de tourisme ne sont pas équilibrées de manière symétrique : la position du moteur fait que le train avant supporte 60 pour cent de la masse du véhicule. Cette asymétrie influence la tenue de route du véhicule en mouvement.

Démarrons. La réaction de la route sur les roues va-t-elle rester verticale ? Non, car les roues en rotation exercent une force horizontale sur la route qui, en vertu du principe de l'action et de la réaction, doit se traduire par une réaction horizontale du sol sur les roues. Cette réaction horizontale est bien sûr dirigée vers l'avant quand la voiture avance. La

réaction horizontale est toujours inférieure au produit de la réaction verticale, qui compense le poids du véhicule, par un coefficient d'adhérence, qui quantifie la qualité du contact entre les roues et le sol. Si l'égalité est vérifiée, le véhicule glisse sur la route. Autrement dit, pour éviter le glissement, la direction de la réaction totale doit rester à l'intérieur d'un cône d'adhérence (voir la figure ci-contre).

Pour estimer ce coefficient d'adhérence, poussons une voiture dont les roues sont bloquées. Tant que la poussée est insuffisante, il ne se passe rien ; puis, au-delà d'un seuil de poussée, la voiture commence à glisser. Ce glissement s'amorce dès que les forces de contact horizontales entre les pneus et le sol ne compensent plus la poussée. Le quotient entre la force nécessaire à l'amorçage du glissement et le poids de la voiture est le coefficient d'adhérence des pneus sur le sol. Sur sol sec, il vaut environ 0,9 pour des pneus courants et dépend de nombreux paramètres comme la composition et l'usure du pneu, la qualité du sol, la température, l'état des suspensions ou la pression de gonflage.

Ainsi, il faut exercer une poussée horizontale supérieure à 810 kilogrammes pour faire glisser sur un sol sec une voiture de 900 kilogrammes (que nous prendrons comme référence dans la suite). Sur un revêtement très glissant, comme la glace, le coefficient d'adhérence est inférieur et la force minimale à exercer est plus faible, presque nulle. Quand on

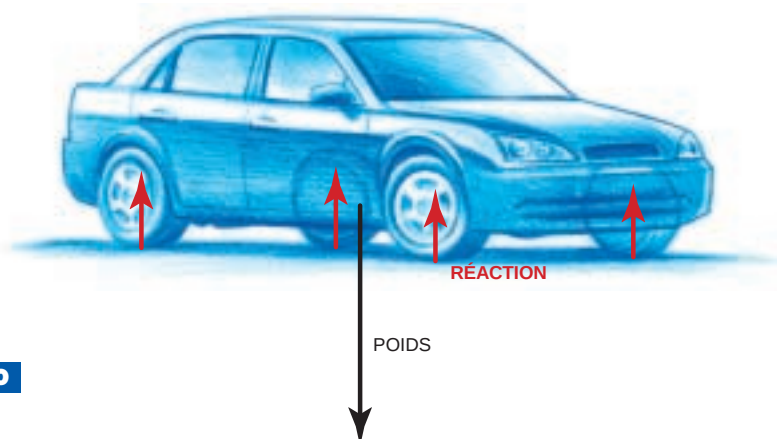


pousse une voiture libre de rouler (freins desserrés et désembrayée), la poussée nécessaire pour la mouvoir est plus faible, car il n'est plus nécessaire d'atteindre un seuil de glissement.

DÉMARRAGE EN DOUCEUR

Le conducteur engage la première vitesse et, en embrayant, transmet la rotation du moteur aux roues. Comme celles-ci ne tournent pas à la même fréquence que le moteur, laquelle est de quelques milliers de tours par minute en vitesse de croisière, on interpose entre l'arbre moteur et l'axe des roues un système de pignons réducteurs (boîte de vitesse, dispositif de transmission, etc.). En première, la réduction totale varie entre 0,06 et 0,08 pour une voiture courante. Ainsi, les roues effectuent de 60 à 80 tours par minute quand le régime du moteur est de 1 000 tours par minute. Pour des roues de 60 centimètres de diamètre, cela représente une vitesse, en première, comprise entre 6,8 et 9 kilomètres par heure.

La puissance fournie par le moteur est essentiellement utilisée pour propulser le véhicule, mais une fraction est dissipée par les frottements mécaniques et aérodynamiques. Le moteur exerce un couple de rotation proportionnel au quotient de la puissance fournie et du régime du moteur (sa



fréquence). La fréquence de rotation des roues étant toujours inférieure à celle du moteur (même en cinquième), le couple exercé sur l'axe des roues à puissance donnée est supérieur au couple produit par le moteur. Ainsi, le système de transmission démultiplie le couple du moteur, et le couple exercé sur l'axe des roues motrices se calcule en le multipliant (entre 80 et 200 newtons mètre selon les voitures) par la démultiplication (le «rapport de boîte»). Par exemple, le couple exercé sur l'axe des roues vaut environ 1 100 newtons mètre pour une petite voiture roulant en première.

Au démarrage, pour des roues de 60 centimètres de diamètre, la réaction horizontale exercée par la route sur les roues du train avant est équivalente à 370 kilogrammes. Si la force de réaction exercée sur le pneu est supérieure au seuil de glissement imposée par les frottements, la voiture patine. Pour éviter ce patinage qui engendre peu de mouvement et beaucoup de chaleur, il est judicieux de choisir le régime moteur tel que la force exercée sur les roues motrices soit juste inférieure au seuil de glissement. Cela correspond à une accélération maximale de 0,5 fois l'accélération de la pesanteur, indépendante de la masse du véhicule. Conseil : n'accélérez pas trop vite au démarrage.

ACCÉLÉRATION ET FREINAGE

Lors de l'accélération, les passagers du véhicule sont plaqués sur leur siège. Les roues motrices subissent alors de la part du sol une réaction horizontale dirigée vers l'avant. Cette force a tendance à faire tourner la voiture autour de son centre de gravité, l'avant se soulevant. Il se passe la même chose quand on débarrasse une table en tirant sur la nappe : les objets posés à sa surface se renversent d'autant plus facilement qu'ils sont hauts et que l'on tire fort.

Ainsi, l'accélération crée un couple de rotation qui est contrebalancée par une augmentation de la réaction verticale du sol sur le train arrière du véhicule. Comme la résultante des réactions

verticales doit toujours être égale au poids du véhicule, la réaction qui s'exerce sur le train avant diminue. Tout se passe comme si la voiture devenait subitement plus lourde à l'arrière et plus légère à l'avant. Pour une accélération de 0,5 fois l'accélération de la pesanteur, ce phénomène de transfert de charge peut dépasser 100 kilogrammes.

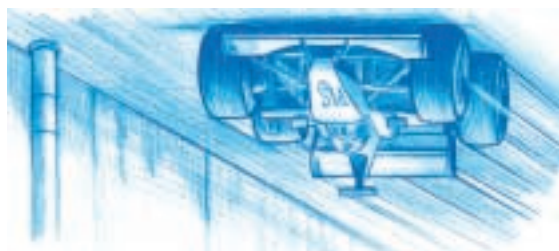
Lors du freinage, le transfert de charge est inversé : c'est l'avant qui est surchargé par rapport à l'arrière. De même, une voiture qui vire subit une force centrifuge dont le couple surcharge les roues extérieures et allège les roues intérieures.

Au final, en démarrant, une voiture allège son train avant et surcharge son train arrière. Si les roues arrière sont motrices, cette surcharge augmente leur seuil de glissement ce qui permet de leur faire subir un couple élevé et de poursuivre l'accélération. Si, à l'inverse, les roues avant sont motrices, l'allègement de l'avant limite le couple que l'on peut exercer sur les roues sans les faire glisser. On comprend ainsi le danger d'une mauvaise répartition de la charge d'une voiture. Un coffre trop plein charge excessivement le train arrière au détriment du train avant, d'où un plus grand risque de glissement du train avant.

LES APPUIS AÉRODYNAMIQUES

Comment améliorer la tenue de route ? En utilisant les mêmes principes physiques que ceux qui régissent le vol des avions. Dans un fluide qui s'écoule autour d'un objet, la pression est d'autant plus grande que la vitesse est faible. L'objet subit donc une force qui le pousse vers les zones de fluide rapide. Une aile d'avion est dessinée de sorte que l'air circule plus rapidement au-dessus qu'en dessous, d'où une force, la portance, dirigée vers le haut et qui maintient l'avion en l'air.

Pour une voiture de course, la géométrie inverse cette caractéristique : l'air qui circule sous la voiture est le plus rapide. La force engendrée, proportionnelle au



carré de la vitesse, plaque la voiture au sol et augmente ainsi la force de réaction verticale du sol sur les pneus. La tenue de route est meilleure, car le seuil de glissement est supérieur. L'adjonction d'ailerons améliore encore les performances du dispositif : elle autorise des accélérations et des freinages inconcevables avec des voitures de tourisme. Pour une *Formule 1*, cette force est supérieure au poids de la voiture dès que sa vitesse dépasse 200 kilomètres par heure : une telle voiture pourrait rouler à l'envers sur le plafond d'un tunnel !

Toutefois, afin de maintenir sa vitesse, il faut vaincre les frottements aérodynamiques, ou force de traînée, qui ralentissent le véhicule. Or, cette force est elle aussi proportionnelle au carré de la vitesse. La puissance à dépenser pour maintenir une vitesse constante, égale au produit de la force de traînée par la vitesse, est proportionnelle au cube de la vitesse. Il est donc très coûteux en énergie de rouler rapidement, ce qui explique la puissante motorisation des *F1* : huit fois plus puissantes que les voitures de tourisme, elles ne vont que deux fois plus vite.

La force de traînée est aussi proportionnelle à un coefficient, le C_x , qui dépend de la géométrie du véhicule. Les voitures de tourisme ont un C_x qui varie de 0,3 à 0,5 alors que les *F1* ont un C_x «de cathédrale», voisin de 1, notamment par la présence des ailerons. Ainsi, le simple fait de lâcher l'accélérateur sur une *F1* donne une décélération aérodynamique de 0,7 fois l'accélération de la pesanteur, aussi brusque qu'un freinage d'urgence sur une voiture de tourisme. On comprend mieux l'inconvénient d'un chargement sur le toit de son véhicule : il augmente considérablement les frottements aérodynamiques et, par suite, la consommation d'essence du véhicule.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

Merci à David FIGLARSKI, moniteur à l'école Sécurité Conduire Juste J.-P. Beltoise et à l'école Pilotage Passion.

B. BECKMAN, *The physics of racing*, <http://members.home.net/rck/phor/>

