

Biologie, transport, complexité

Biology, transportation, complexity

R. Brémond

Reçu le 28 novembre 2011 ; accepté le 30 avril 2012
© IFSTTAR et Springer-Verlag France 2012

Résumé Partant de quelques analogies entre biologie et transports, notamment avec les notions d'évolution et de sélection, on se demande si certains concepts et méthodes utilisés en biologie ne peuvent pas fournir des pistes de recherche dans le domaine des transports. Nous nous intéressons à la notion de complexité qui nous paraît commune aux deux domaines scientifiques, mais qui n'est pas abordée de la même manière selon les disciplines. En observant la manière dont la biologie systémique s'est développée, à partir d'une approche massivement *data-driven* de recherche guidée par les données, nous nous demandons si une telle orientation est possible dans le domaine des transports. Cette exploration nous amène également à poser la question des « modules » ou des frontières des sous-systèmes étudiés dans le domaine des transports en observant que la biologie moléculaire définit ces frontières en référence à la fonction des sous-systèmes. Pour conclure, nous exprimons l'espoir que ces comparaisons suscitent de nouvelles pistes de recherches dans le domaine des transports.

Mots clés Biologie · Transport · Complexité · Évolution

Abstract As a result of some of the analogies between biology and transport, including the concepts of evolution and selection, we are wondering whether some ideas and methods used in biology may not be used to provide research avenues within the field of transportation. We are interested in the idea of complexity, which is common to the two scientific fields, but not treated in the same way by either of the two disciplines. By observing the way in which systemic biology has developed, from a largely “data-driven” approach to research guided by data, we are questioning whether such a direction would be possible in the field of transportation. This investigation also leads us to ask questions about “modules”, or the boundaries of the subsystems studied in the field of transportation, through the observation

that molecular biology defines these boundaries in terms of the function of the subsystems. In conclusion, we are expressing the notion that these comparisons will lead to new research avenues in the field of transportation.

Keywords Biology · Transportation · Complexity · Evolution

Introduction

La conduite automobile est une activité complexe, au sens où elle dépend d'un grand nombre de facteurs, dont certains interagissent fortement. Par exemple, sur autoroute, le comportement du conducteur dépend de son expérience de la conduite, du tracé routier, du trafic, de la météo, du motif du trajet, des capacités du véhicule, de l'adhérence de la chaussée ; ces facteurs interagissant les uns sur les autres. Et ce n'est là qu'un échantillon des facteurs a priori explicatifs du comportement. En ville, l'usage de l'espace est plus variable (circulation, stationnement, livraisons, voies dédiées, travaux, transgressions, etc.), et les interactions deviennent un aspect essentiel du comportement.

On peut étudier les déplacements à différentes échelles, spatiales et temporelles : vitesse, trajectoire, comportement (au niveau individuel), trafic, congestion, efficacité du système de transport (au niveau collectif). On peut s'intéresser à différentes composantes de ce système : l'usager de la route, ses représentations mentales, ses actions sur le véhicule (volant, pédales, etc.), sa trajectoire, le trafic routier, la conception routière. On a ainsi un système comportant de nombreuses variables explicatives (pas toutes bien définies), de nombreuses variables à expliquer (pas toutes bien définies) et de nombreuses interactions.

Pour aborder ces problèmes, l'approche réductionniste est dominante [1]. Il semble en effet raisonnable d'aborder un objet aussi complexe en le découpant en sous-problèmes plus simples à étudier. La séparation des disciplines académiques (psychologie, robotique, génie civil, etc.) encourage

R. Brémond (✉)
Université Paris-Est, IFSTTAR, IM, LEPSiS,
58, boulevard Lefebvre, F-75015 Paris, France
e-mail : roland.bremond@ifsttar.fr

ce découpage. Or, cette approche réductionniste et disciplinaire montre ses limites dans le cas des systèmes complexes [2], notamment en négligeant des interactions qui peuvent se révéler dominantes (par rapport aux effets directs) dans le fonctionnement du système.

La biologie est confrontée à des processus et des mécanismes d'une complexité probablement supérieure à celle du système de transport, et elle affronte cette complexité de manière frontale avec un certain succès. Partant de ce constat, on se propose de voir si certains concepts et méthodes utilisés par les biologistes ne peuvent pas fournir des pistes de recherche dans le domaine des transports à travers une analogie liée notamment à la complexité des systèmes étudiés. La biologie systémique est allée très loin dans cette direction et peut donner quelques idées sur la manière d'aborder nos problèmes, et suggérer des questions pertinentes pour l'étude des déplacements.

On explore ci-après quelques analogies qui permettent de penser les déplacements individuels et le système de transport selon des paradigmes inspirés de la biologie. Comparaison n'est pas raison, et ces correspondances peuvent parfois paraître naïves, d'autant que je ne suis spécialiste ni de biologie ni de transport. Mais parfois, le fait de décentrer le regard permet de renouveler la vision que les « autochtones » (ici, les chercheurs dans le champ des transports) peuvent avoir de leur propre pratique.

Biologie, analogies

Observer la nature, imiter la nature pour changer les modes de transport remonte au moins à Icare. D'emblée, la comparaison du vocabulaire dans les deux domaines montre que certains termes sont partagés, ce qui peut inciter à se demander si ces correspondances sont anecdotiques ou si elles ont une signification plus profonde. Pour commencer par le plus évident, le *transport* est un concept important en biologie. Par exemple, le contrôle génétique du transport des morphogènes au cours du développement a donné lieu à un prix Nobel en 1995.

On peut unifier les différents niveaux du transport dans une description hiérarchique reliant le transport au niveau moléculaire (e.g. transport des protéines à l'intérieur des cellules), au niveau cellulaire (transport des cellules dans le réseau sanguin ou lymphatique), et au niveau des organismes (déplacement, locomotion). On peut ajouter un quatrième niveau, qui est celui de l'organisation collective des déplacements, niveau pertinent pour les animaux sociaux comme les fourmis, les harengs, les gnous et les *sapiens*, et qui pose par exemple des problèmes communs de métrologie des déplacements et de modélisation des trajectoires [3]. Dans certains cas, la question des routes et de leur signalisation est posée (par exemple dans les migrations), et même pour certaines espèces (les fourmis), la production d'un

réseau « routier ». Le problème du changement d'échelle, entre ces différents niveaux de description du système de transport, se pose également (quoiqu'en des termes différents) aux deux communautés.

De même, lorsqu'on s'intéresse à la *signalisation* routière, on ne peut qu'être frappé par la notion, en biologie cellulaire, de *signalling pathways*. Elle permet de décrire la transduction d'un signal (biochimique) reçu par une cellule par différents mécanismes (récepteur membranaire ou cytoplasmique) avec une cascade d'activations ou d'inhibitions de mécanismes internes à la cellule [4]. Le mot « signalisation » n'est pas choisi au hasard, puisqu'on retrouve les notions clés de la théorie de l'information [5] : source, récepteur, message, information, transmission, mais aussi bruit, entropie, robustesse. Il semble donc qu'il y ait plus qu'une coïncidence, et que les fonctions de signalisation en biologie et en transport partagent à la fois des contraintes et des fonctions communes. Outre le fait que cela peut inciter à rechercher dans les systèmes de signalisation biologique des sources d'inspiration pour la signalisation routière, cela suggère surtout que les modèles de communication (de l'infrastructure vers l'utilisateur, d'utilisateur à utilisateur, avec différentes médiations, transformations et dégradation de l'information) peuvent être en partie partagés.

On peut également noter qu'une des caractéristiques principales des systèmes biologiques est leur *robustesse*. Le développement de l'embryon est un processus extraordinairement complexe, qui implique des interactions multiples et qui est soumis à de nombreux aléas (température, chocs, alimentation, etc.) qui sont en partie imprévisibles. Pourtant, d'un œuf de mouche, il sort une mouche qui ressemble fort à la précédente. L'évolution a donc sélectionné un mécanisme de reproduction particulièrement robuste. De même, un grand nombre de mécanismes de contrôle et de régulation sont mis en œuvre par l'automobiliste pour assurer sa survie. Le résultat est assez robuste (au moins au niveau de l'espèce), c'est-à-dire que la plupart des gens survivent à un trajet en voiture.

Le modèle de l'homéostasie du risque [6], qui a été appliqué à la conduite automobile, s'inspire d'ailleurs d'une notion élaborée en biologie par Claude Bernard pour décrire l'équilibre dynamique d'un système vivant. Au niveau plus global du système de transport, on trouve également un écho de cette notion de robustesse dans certaines stratégies développées par les autorités publiques pour améliorer la sécurité routière, notamment l'idée de « route qui pardonne », qui est une manière d'exprimer le fait que le système routier doit être robuste vis-à-vis des erreurs individuelles de ses constituants (en l'occurrence, les automobilistes). On trouve également sous-jacente l'idée que les actions de sécurité routière organisent les « défenses » du système, ce qui fait ici écho au système immunitaire.

La limite d'un système trop robuste est la difficulté de s'adapter à de nouvelles situations, c'est-à-dire à évoluer.

La dualité classique en biologie entre robustesse et plasticité montre la nécessité du compromis : un organisme/système trop robuste est incapable d'évoluer, et donc fragile vis-à-vis de certains types d'agression. Réciproquement, un système trop adaptatif manque de fiabilité. L'évolution des espèces (ou, dans un système, la coévolution) est rendue possible par cet équilibre entre robustesse (qui permet la reproduction) et plasticité (qui permet l'adaptation).

En biologie comme en sécurité routière, les mécanismes de correction d'erreur ont été identifiés comme des éléments majeurs de la robustesse du système. En biologie, par exemple, il s'agit de corriger des erreurs dans la réplication de l'ADN ou dans la transcription d'une protéine. En ergonomie, on s'est rendu compte que le facteur central de la sécurité d'un système complexe dépend plus des mécanismes de récupération des erreurs (systèmes tolérant les erreurs) que des mécanismes permettant de les supprimer (systèmes parfaits). Dans les organisations complexes, on décrit deux approches, individuelle vs organisationnelle, du management de l'erreur [7], la première débouchant sur de moins bonnes performances au niveau de l'organisation. Dans une analogie, Reason fait un lien entre erreur et pathologie : il parle de « pathogènes résidents » pour décrire les conditions latentes de l'erreur humaine, cachées dans les facteurs organisationnels. Les pathogènes sont ici des défauts de conception du système, qui menacent l'opérateur (par exemple dans une centrale nucléaire) : ils deviennent patents dans les situations critiques, ce qui conduit à la catastrophe.

Théorie de l'évolution

La perspective évolutionniste permet-elle de poser des questions au système de transports ? Si on ne peut pas parler d'évolution des espèces au sens strict, certains concepts suscitent tout de même un écho. Tout d'abord, on peut considérer le développement historique des transports comme une évolution de la locomotion humaine, après différentes solutions historiques comme la domestication du cheval, l'invention de la roue, du moteur à explosion, du GPS et bien d'autres. Par exemple, le lieu commun de « l'arbre évolutif » est implicite dans le concept de *route de cinquième génération* (R5G), qui fait référence à une évolution historique depuis le chemin (première génération), avec la route romaine (deuxième génération), le macadam (troisième génération) et l'autoroute (quatrième génération) [8].

Mais la théorie de l'évolution ne se limite pas à la notion d'arbre phylogénétique, c'est surtout l'idée de sélection naturelle qui s'est imposée depuis Darwin [9]. Ainsi, un aspect inattendu de la comparaison avec la biologie est que si on considère que le système de transport est soumis à une pression sélective, les usagers représentent un facteur de pression évolutive de la route. Autrement dit, les automobi-

listes font évoluer le système routier comme les pathogènes font évoluer l'organisme vers des formes permettant une meilleure adaptation à leur environnement (ici aux « agressions » des usagers). Plutôt que des pathogènes, on peut également comparer les usagers à des micro-organismes commensaux¹, on parlera alors de symbiose entre la route et ses usagers.

On objectera peut-être que la route, le système routier ne sont pas des organismes au sens biologique, ils ne se reproduisent pas comme nous le faisons. Et en effet, le système de reproduction de la route n'est pas codé dans un « génome routier », il est externalisé, puisque ce sont des hommes (et des femmes) qui conçoivent, construisent et réparent le réseau. Mais déléguant à une autre espèce le soin de sa propre (re)production, la route n'imitte-t-elle pas la nature, et une symbiose bien connue, qui est celle des mitochondries, dont l'essentiel du génome est directement hébergé par le noyau cellulaire ?

Quoi qu'il en soit, la question des facteurs de sélection qui orientent l'évolution du système routier est posée (coût financier, efficacité, service rendu, etc.). Ce type de réflexion peut également se faire à un niveau de granularité plus fin, au niveau des évolutions techniques (quelles innovations, dans l'industrie automobile, ont un avantage sélectif ?), comme au niveau de la compétition entre les modes de transport (marche, transports en commun, voiture, etc.).

Il ne s'agit pas, bien entendu, de réactualiser le darwinisme social qui est une option politique, mais d'examiner si les mécanismes biologiques de la sélection naturelle ne peuvent pas nous informer sur certains mécanismes à l'œuvre dans les déplacements humains. On remarquera par exemple que la diversité des comportements (phénotypes) des usagers des transports est une source majeure de la plasticité qui permet l'évolution du système.

Pour Piaget, l'accommodation d'un organisme à son environnement est un processus de transformation de soi, visant à un état d'équilibre prenant en compte de nouvelles données [10], l'autre mode d'adaptation étant l'assimilation. La notion d'adaptation, centrale dans la perspective évolutionniste, est abordée au niveau du conducteur automobile à travers l'apprentissage de la conduite. Par exemple, des mécanismes d'adaptation du conducteur à un nouvel environnement ont été mis en évidence, avec le développement des aides à la conduite embarquées dans les véhicules [11]. Toutefois, il y a une différence majeure entre deux manières d'évoluer. Pour une cellule, le mécanisme qui conduit à améliorer ses performances est la sélection naturelle (phylogénétique). Pour un organisme, l'adaptation passe également par l'apprentissage qui permet (au niveau épigénétique) de s'adapter à une situation nouvelle et d'acquérir de nouvelles compétences.

¹ Commensaux : ceux qui mangent à la même table, comme les bactéries de notre flore intestinale mangent à la même « table » que nous.

Il ne s'agit pas de forcer à tout prix des correspondances, et il est difficile par exemple de trouver une analogie convaincante, dans le système de transport, avec les notions biologiques de prédateur, de proie ou d'agent infectieux. En effet, les interactions entre usagers des transports visent plutôt à minimiser les contacts directs, ce qui correspondrait à des mécanismes de régulation que l'on trouve dans les troupeaux en déplacement ou les bancs de poissons [12]. On peut par contre remarquer que différents vecteurs (mode, influence sociale, etc.) peuvent propager des comportements, et les modèles de diffusion épidémiques peuvent peut-être décrire ces mécanismes.

Enfin, la théorie de l'évolution attire l'attention sur la notion de niche écologique, par exemple sur le fait que certains organismes (en particulier, les plantes) se débrouillent très bien sans avoir développé de système de locomotion. Sans aller jusque-là, le développement des transports est-il la seule option que nous ayons, et pour nous adapter à un environnement dans lequel l'énergie est une ressource rare, ne peut-on pas imaginer une organisation sociale dans laquelle les déplacements seraient moins nécessaires ?

Complexité

La principale raison qui nous a poussés à explorer ces analogies entre systèmes biologiques et systèmes de transport est leur complexité à tous les deux. Ce terme ne correspond pas ici à un constat d'impuissance (« c'est trop compliqué ! »), mais à la structure de ces systèmes.

Morin a explicité la notion de complexité [2,13], en particulier en opposition avec les approches disciplinaires et réductionnistes de la science. Dans le domaine de la perception, on peut donner un exemple de l'approche réductionniste en conduite automobile avec un article de Land et Lee [14]. Les auteurs cherchaient à comprendre, à l'aide d'un oculomètre embarqué dans un véhicule, ce que regardent les conducteurs automobiles pour mieux comprendre comment la perception régule l'action. Pour cela, une expérimentation a été menée sur une route unidirectionnelle, *tortuous*, en Écosse. Les résultats montrent principalement une préférence, dans les courbes, pour le point de corde (*tangent point*). Les auteurs expliquent ce comportement par le fait que ce point fournit une information particulièrement utile pour l'anticipation de la courbure du virage. C'est donc un résultat important (d'où sa publication dans *Nature*), mais qui concerne une situation (une route en sens unique, sans trafic, toute en virages) inadéquate pour décrire la conduite automobile « normale ».

Les limites de l'approche réductionniste en sciences cognitives ont également été mises en évidence par Kingstone et al. [15], qui proposent une approche éthologique des sciences cognitives afin de dépasser les limites méthodo-

logiques des études de laboratoire qui ont historiquement conduit à l'échec du behaviorisme.

Théorie de l'information

Morin décrit la complexité à partir de trois cadres théoriques antérieurs, la théorie de l'information, la cybernétique et l'analyse systémique.

La théorie de l'information, développée par Shannon dans les années 1940, cherchait à décrire la communication entre deux entités d'une manière indépendante à la fois du récepteur, de l'émetteur, du média et du contenu [5]. La motivation principale de Shannon était de proposer un cadre théorique pour la transmission de l'information dans les meilleures conditions d'efficacité et de robustesse (Shannon travaillait pour la compagnie des téléphones Bell). La description de l'information à partir de notions statistiques permettait de rechercher des méthodes de codage de cette information en cherchant un compromis entre la probabilité d'erreur dans la transmission et la vitesse de transmission. On a vu que la problématique de la communication est commune aux systèmes de signalisation routiers et biologiques.

L'idée centrale, qui intéresse Morin, est que l'information est liée à l'incertitude : ce qui est prévisible n'est pas une information, c'est une redondance. La redondance n'apporte en principe aucune information, mais elle améliore la robustesse vis-à-vis des sources de « bruit » (perturbations aléatoires du signal). Les systèmes biologiques sont également soumis à du bruit (dégradation de l'information lors de la réplication de l'ADN, surcharge d'informations visuelles à un carrefour) et doivent développer des stratégies permettant la détection et la correction des erreurs.

Cybernétique

La cybernétique consiste à décrire le fonctionnement d'un système à partir du modèle de la boîte noire, avec des entrées, des sorties et des rétroactions (*feedback*). Elle s'est développée, dans les années 1940 également, à partir de notions pluridisciplinaires, comme celle de *feedback*. Wiener définit la cybernétique comme l'étude des communications et de leurs régulations dans les systèmes naturels et artificiels [16]. L'étude des systèmes organisés et de leur organisation constituait le point d'intérêt commun à des chercheurs de disciplines aussi éloignées que les mathématiques, l'anthropologie, la psychologie et l'économie. Cette approche « boîte noire » connaît un regain de popularité lié justement à la complexité des systèmes étudiés par la science à travers la notion de réactivité qui intègre des aspects dynamiques à l'ancienne cybernétique [17].

Dans le domaine de la conduite automobile, le modèle de Donges [18] est un bon exemple de modèle cybernétique d'un système auto-organisé un peu particulier : un

conducteur automobile qui négocie un virage. Donges décrit ce conducteur comme un système paramétrique avec des variables d'entrée (informations d'origine visuelle) et des variables de sortie (vitesse et angle au volant). Il propose un modèle à deux niveaux, l'un pour anticiper (*guidance level*), l'autre pour contrôler la position sur la voie (*stabilization level*). Les deux systèmes opèrent en parallèle. La prise d'information est double : une première source d'information, prise à distance, permet d'estimer la courbure du virage à venir. Cette information vient alimenter le *guidance level* qui fonctionne en boucle ouverte (comme disent les automaticiens), c'est-à-dire que le résultat du modèle (vitesse, angle au volant) n'est pas réintroduit dans le modèle pour le réguler. La deuxième source d'information est une régulation, et prend en compte les écarts à la trajectoire désirée, à partir d'informations locales (position dans la voie, angle par rapport à la trajectoire cible). On peut également appeler cybernétiques des modèles plus récents, comme ceux de Bellet et Tattelain-Veste [19] et de Salvucci [20], qui décrivent le conducteur à l'aide d'une boucle perception (input)/action (output), le déplacement étant le résultat de cette machine cybernétique autorégulée qu'est le conducteur, réagissant à un ensemble de stimuli.

Théorie systémique

La théorie systémique, dans la lignée de la cybernétique, prend une position opposée au réductionnisme et considère les systèmes complexes comme objets d'étude, sans chercher à y déceler nécessairement un enchaînement de causalités [21]. Les notions de *boîte noire* et de régulation sont reprises de la cybernétique, et la méthodologie s'oppose à la démarche analytique puisqu'elle cherche, progressivement, à comprendre le fonctionnement de cette boîte noire à partir de l'analyse de son comportement. L'analyse systémique regarde donc le système comme un tout, sans préjuger des interactions entre ses composantes.

Cette approche a depuis longtemps attiré l'attention dans le domaine des transports. Toutefois, c'est plus les aspects pluridisciplinaires et la description des systèmes à partir d'une boîte noire et d'un ensemble de rétroactions qui sont envisagés que l'aspect *data-driven* (recherche guidée par les données), qui semble dominer la biologie systémique (cf. plus loin, section *Biologie systémique*).

À partir de ces trois théories : théorie de l'information, cybernétique et théorie systémique, Morin s'intéresse à la complexité², notamment à partir du principe d'auto-organisation, qui est la capacité d'un système à être auto-

nome et à interagir avec son environnement. Ce principe d'auto-organisation est central en biologie, puisque c'est lui qui permet au vivant d'échapper au second principe de la thermodynamique (dégradation de l'énergie et irréversibilité). Un aspect important pour comprendre l'auto-organisation est que les systèmes réels sont des systèmes ouverts, faisant des échanges avec leur environnement. Un organisme se nourrit, interagit avec son environnement et expulse des déchets ; un conducteur interagit avec la route et avec les autres usagers, tout en rejetant des polluants.

Dans le domaine de la conduite automobile, certains aspects de l'auto-organisation sont très présents dans la régulation des comportements (concurrence pour des ressources rares, coopération, confrontation, etc.). Ces notions ont été développées sur le plan théorique en intelligence artificielle, et de ce fait, la simulation du trafic par des modèles d'intelligence distribuée paraît pertinente [22,23].

Morin observe que l'approche disciplinaire, analytique est contrainte de négliger de nombreux aspects d'un phénomène. Le réductionnisme, qui manipule une variable *toutes choses égales par ailleurs* peut conduire, certes, à des résultats, mais à des résultats qui n'aident pas forcément à comprendre le système étudié. Par exemple, si les propriétés du système émergent de l'interaction des différentes variables (les interactions entre protéines dans une cellule, les interactions entre usagers dans un carrefour), plutôt que des propriétés d'une variable particulière (la formule chimique de telle molécule, le comportement d'un conducteur isolé), on peut penser que l'étude *in vitro* des propriétés d'une molécule est peu informative sur ses propriétés dans l'organisme et que les progrès principaux pour la compréhension du système viendront des études *in vivo*. Dans le domaine des transports, cette approche *in vivo* est marginale, mais le développement des études dites *naturalistic driving* (inspirées de l'éthologie) va dans ce sens. Dans certaines de ces études, on mesure systématiquement, a priori, de grandes quantités de données (pour des variables de la conduite automobile que l'on sait mesurer de manière continue) dans des conditions réelles, et on recherche a posteriori des relations entre les variables [24,25]. Cette approche a été conduite de manière beaucoup plus intensive en biologie.

Biologie systémique

Le développement récent de la biologie systémique comme une discipline autonome est principalement lié au développement de moyens techniques permettant d'acquérir massivement des données (e.g. génome, protéome, immunome, etc.), ce qui se concrétise par l'apparition d'une communauté scientifique, avec ses revues, ses débats, ses outils, ses applications, ses industriels biotech [26,27].

² Le terme « complexité » vient de *complexus*, ce qui est tissé ensemble. L'étymologie met l'accent sur le fait que la structure d'un système complexe est plus liée aux interactions qu'aux propriétés des éléments du système.

Du fait de ces développements technologiques, les biologistes se trouvent devant un problème nouveau pour digérer des quantités énormes de données, ce qui les conduit à utiliser de plus en plus la modélisation. Le centre de gravité des laboratoires se déplace actuellement des labos humides (paillasses) vers les labos secs (in silico). Certains considèrent que l'accumulation actuelle de données, non structurées, n'améliore pas la compréhension des phénomènes, et que l'enjeu du XXI^e siècle est le développement de modèles permettant de structurer ces données³. Cette évolution n'est pas limitée à la biologie [28,29], et nous proposons ici de réfléchir à sa pertinence dans le domaine des transports.

Démarche

La démarche de la biologie systémique est de chercher une compréhension a posteriori du système qu'elle étudie à partir des données, plutôt que de produire des données en fonction des hypothèses que l'on cherche à valider. On est donc, comme dans le *naturalistic driving* cité plus haut, à l'opposé de la démarche scientifique classique, analytique, qui est à la fois celle des ingénieurs et celle de la psychologie expérimentale.

Il faut convenir que l'approche systémique en biologie comporte des avantages non négligeables, et produit effectivement des résultats [30,31]. Tout d'abord, le principe de la mesure généralisée d'un ensemble de variables et de leurs covariations peut amener, par l'analyse des données (cf. le développement du *data mining*), à des découvertes inattendues, ce qui est plus difficile lorsque le chercheur ne teste que sa propre hypothèse. Par ailleurs, les idées de système, de complexité, d'interactions dynamiques ainsi que le développement de moyens d'observation conduisent à étudier des systèmes de plus en plus proches des systèmes réels [32]. C'est le cas lorsqu'on passe de l'observation des tissus morts au microscope à l'observation de la biologie de ces tissus in vivo, par exemple chez le poisson-zèbre qui a le bon goût d'être transparent et de laisser le chercheur voir les molécules fluorescentes qui l'habitent. C'est le cas également lorsqu'on utilise la réalité virtuelle, voire l'observation en situation naturelle, pour étudier certains aspects du comportement du conducteur [33–35].

Modules et sous-systèmes

Une des questions que pose l'approche systémique est celle de la définition pertinente des systèmes. Morin propose des

critères pour isoler les systèmes, comme l'auto-organisation, mais il observe également, avec l'idée de système ouvert, que la frontière exacte du système n'est pas unique, et qu'elle n'est pas capitale : parlant de concepts difficiles à définir de manière précise, comme l'amour, l'amitié, il défend l'idée que c'est le noyau du concept qui est important pour définir un objet complexe, plutôt que sa frontière.

Concrètement, dans le domaine des transports, on observe que les systèmes étudiés ont des temporalités différentes, des échelles spatiales différentes, mais surtout qu'ils ne se définissent pas, le plus souvent, explicitement comme des sous-systèmes, probablement parce qu'ils semblent naturels à partir d'un certain point de vue, académique ou de praticien. Par exemple, les psychologues définissent comme système pertinent le conducteur qui réalise un trajet, alors que le traficien travaille à l'échelle d'un quartier ou d'une ville, sur une échelle de temps plus longue ; le constructeur ou l'équipementier s'intéresse au « système véhicule », interfacé avec le conducteur, la route et les autres usagers ; le concepteur routier raisonne avec une échelle de temps sur plusieurs années, avec des sous-systèmes qui sont les différents types de réseaux.

Le système de transport est-il lui-même un système, un module autonome dans la vie sociale ? Ce n'est pas évident. Par exemple, les contraintes financières et les choix individuels déterminent en partie le lieu d'habitation, dont la distribution a un impact fort sur la demande de transport. Ces mécanismes font des déplacements une facette de l'étude de la société dans son ensemble. De même, les motivations des choix individuels sont liées aux performances des différentes solutions de transport, en lien avec la locomotion, mais aussi à des bénéfices associés (par exemple symboliques, e.g. grosse moto, Vélib) qui correspondent à d'autres fonctions sociales que le déplacement.

Pour Hartwell et al. [36], ce qui distingue la biologie des autres sciences est le fait que l'on puisse poser la question de la *fonction* du système qu'on étudie. Par exemple, la fonction du système respiratoire est d'apporter de l'oxygène à l'organisme afin de produire l'énergie nécessaire à son activité. Cette idée de fonction n'est pas finaliste, elle ne suppose pas une intention divine : c'est simplement l'observation que les systèmes biologiques ont dû, pour survivre, développer des stratégies de reproduction, de gestion de l'énergie, de défense face aux agressions (pathogènes, prédateurs), etc. Ces contraintes peuvent s'interpréter a posteriori comme des fonctions de l'organisme (respiration, digestion, filtration, perception, etc.). Il faut peut-être entendre ici le système biologique au sens large, en incluant les organismes sociaux comme *sapiens*, et leurs productions culturelles [37]. Pour juger de la pertinence de cette proposition dans le domaine des transports, on peut se demander par exemple quelle est la « fonction » d'artefacts comme un panneau, une voiture ou le code de la route.

³ “We now have unprecedented ability to collect data but there is now a crisis developing in biology, in that completely unstructured information does not enhance understanding. We need frameworks and models to put all of this knowledge and data into. That is the problem in biology. Driving toward these models is really the big challenge of 21st century”. Sidney Brenner, prix Nobel 2002.

Mais on doit pour cela distinguer deux niveaux, descriptif comme en biologie ou intentionnel, ce qui est propre aux constructions culturelles. L'adéquation de la fonction « intentionnelle » d'un élément (par exemple, la fonction de la signalisation routière) et de sa fonction objective (les comportements induits) n'est pas automatique. C'est même un des enjeux de la conception routière que de rechercher des mécanismes permettant que les éléments du système aient effectivement la fonction qui leur est assignée. L'ergonomie d'un système passe par le fait que son usage doit être conforme aux intentions du concepteur ; et un problème classique du développement de nouveaux systèmes techniques (aides à la conduite, signalisation innovante, etc.) porte sur le risque d'usages pervers de ces systèmes (e.g. rouler plus vite pour déclencher l'affichage de sa plaque minéralogique).

L'article de Hartwell et al. [36] est important à la fois pour les questions qu'il pose à la biologie et pour celles qu'il pourrait poser à d'autres disciplines moins avancées sur le chemin d'une approche systémique. Le contexte biologique est le passage de la biologie moléculaire (qui s'intéresse aux mécanismes biochimiques dans les cellules) à la biologie modulaire, qui cherche à définir des modules cohérents et autonomes de l'organisation cellulaire. La question, qui est également posée au système de transport, est de savoir comment fixer les frontières de ces modules, qui sont supposés avoir un fonctionnement suffisamment autonome pour être étudiés comme objets de recherche, même si on se réfère, avec Morin, à des systèmes ouverts. Les fonctions d'un module ne peuvent pas facilement être prédites à partir de l'analyse de ses composantes, et c'est ce qui justifie l'analyse systémique.

Le problème sous-jacent est que la complexité du système (l'organisme, de la biochimie au comportement social) rend impraticable la prise en compte simultanée de tous les niveaux d'organisation, de toutes les échelles (spatiales, temporelles). Des choix sont donc nécessaires pour isoler des sous-problèmes (les modules) accessibles à l'investigation. On a besoin de découper, mais comment découper un système complexe (le fonctionnement d'une cellule, d'un réseau routier) en blocs indépendants les uns des autres de manière à pouvoir traiter ces modules comme des sous-systèmes organisés et autonomes ? Par exemple, le conducteur et le trafic sont-ils des modules distincts ?

Pour Hartwell et al., une des tâches de la biologie (on pourrait en dire autant pour le système de transports) est justement l'identification de modules qui correspondent au niveau critique d'organisation. L'analyse des fonctions du système nous aide à réaliser son découpage en modules. Quelles sont les fonctions (outre la locomotion) réalisées par le système de transport ? Par exemple, doit-on séparer le transport des personnes du transport de l'information, de celui des marchandises ? La biologie nous montre que plusieurs systèmes concurrents peuvent remplir une même fonction (poumons vs branchies, scooter vs vélo) selon le type

de contraintes rencontrées, mais on ne revient pas facilement en arrière sur l'arbre évolutif (par exemple, on ne se débarrasse pas facilement des claviers AZERTY, même si leur raison d'être initiale a disparu). Pour *sapiens* comme pour les fourmis, la route n'assure pas exclusivement une fonction de déplacement, elle peut aussi assurer une fonction de cohésion, d'organisation sociale, de protection, etc. De même en biologie, on découvre de plus en plus de molécules dont la fonction n'est pas unique, cf. par exemple le rôle du complexe majeur d'histocompatibilité, traditionnellement associé au système immunitaire, dans les préférences sexuelles [38].

Réseaux

Une des approches possibles des systèmes complexes consiste à les décrire sous forme de réseaux (Web, réseaux sociaux, distribution d'électricité, acteurs de cinéma, citations entre scientifiques, réseau de transports, etc.). L'analyse des réseaux a justement développé des concepts qui sont liés à la théorie de l'information. Les propriétés de certains réseaux ont attiré l'attention, comme la propriété des « petits mondes » [39], où l'aspect *scale free* de certains réseaux [40]. Un type de réseau classique est caractérisé par un petit nombre de nœuds très connectés (les *hubs*) et un grand nombre de nœuds peu connectés, ce qui a des résonances à la fois en biologie et avec les réseaux routiers. Localement, on peut aussi examiner la nature des boucles (par exemple, ouverte vs fermée), tandis qu'à l'échelle du réseau, on peut s'intéresser à ses propriétés dynamiques, à sa sensibilité aux perturbations. Une classification des réseaux peut se faire selon la fréquence de *patterns* rencontrés, c'est-à-dire en décrivant les propriétés statistiques des connexions qui ont une incidence sur sa robustesse [41]. De fait, le besoin émerge de modéliser la structure des réseaux observés [42]. En particulier, la robustesse apparaît comme une caractéristique majeure des systèmes complexes, qu'ils soient biologiques [43] ou d'origine humaine (le Web, le réseau routier). De ce point de vue, les *hubs* sont les points faibles d'un réseau : c'était déjà l'analyse de Trotski, décrite par Malaparte [44].

Conclusion

Au terme de ce survol, et même si de bons auteurs ont mis en garde contre l'usage abusif de l'analogie par les scientifiques eux-mêmes [45], il nous semble que les analogies entre biologie et transport font ressortir un certain nombre de parallèles qui ne sont pas des coïncidences. Nous avons abordé en particulier les notions de complexité, de système, d'information, mais également de module, de fonction, d'évolution, de sélection, d'adaptation, de réseau, de robustesse, de signalisation, toutes ces notions étant pertinentes dans les deux disciplines. L'autre résultat de cette

comparaison, c'est ce qui apparaît comme une différence d'approche entre les deux disciplines face à la complexité des systèmes étudiés, notamment sur le développement de moyens de mesure, de moyens de stockage et de moyens de traitement à grande échelle. Et il me semble que l'approche *data driven*, qui est massivement mise en œuvre en biologie cellulaire, doit susciter un intérêt dans notre communauté.

Mon espoir est donc que les rapprochements qui ont été discutés, et d'autres qui sont peut-être venus à l'esprit du lecteur soient quelquefois fructueux, c'est-à-dire source d'inspiration, d'hypothèses, pour les chercheurs qui s'intéressent à la sécurité routière, à la gestion du trafic, à la conception routière, et plus généralement aux différents aspects du système de transports, à leur évolution et à leurs interactions.

Remerciements : Merci à Jean-Michel Auberlet, Nicolas Hautière, Lara Désiré et Jean-Louis Mergny pour leurs encouragements, et à Pierre-Yves Texier, dont l'état d'esprit complexe a probablement contribué, sans qu'il s'en doute, à cet article.

Références

- Descartes R (1637) Discours de la méthode pour bien conduire la raison et chercher la vérité dans les sciences. Ian Maire, Leyde
- Morin E (1990) Introduction à la pensée complexe. Éditions du Seuil, Points Essais
- Cramer VA, Hobbs RJ, Standish RJ (2008) What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. *Trends Ecol Evol* 23:104–12
- Artavanis-Tsakonas S, Muskavitch M (2010) Notch: the past, the present, and the future. *Curr Top Dev Biol* 92:1–29
- Shannon CE (1948) The mathematical theory of communication. *Bell System Technical J* 27:379–423
- Wilde GJS (1982) The theory of risk homeostasis: implications for safety and health. *Risk Analysis* 2:209–25
- Reason J (2000) Human error: models and management. *BMJ* 320:768–770
- Lamb MJ, Collis R, Deix S, et al (2011) The forever open road. Defining the next generation road. AIPCR World Congress, Mexico
- Darwin C (1859) On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. John Murray, London
- Piaget J (1936) La naissance de l'intelligence chez l'enfant. Delachaux et Niestlé
- Saad F (2006) Some critical issues when studying behavioural adaptations to new driver support systems. *Cognition, Technology & Work* 8:175–81
- Reynolds CW (1987) Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model. *Computer Graphics* 21:25–34
- Morin E (1986) La méthode III : la connaissance de la connaissance. Éditions du Seuil, Points Essais
- Land MF, Lee DN (1994) Where we look when we steer. *Nature* 369:742–4
- Kingstone A, Smilek D, Eastwood JD (2008) Cognitive ethology: a new approach for studying human cognition. *Br J Psychol* 99:317–40
- Wiener N (1948) *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. Hermann, Paris
- Fisher J, Harel D, Henzinger TA (2011) Biology as reactivity. *Communications of the ACM* 54:72–82
- Donges E (1978) A two-level model of driver steering behavior. *Hum Factors* 20:691–707
- Bellet T, Tattégren-Veste H (1999) A framework for representing driving knowledge. *Inter J Cogn Ergonomics* 3:37–49
- Salvucci DD (2006) Modeling driver behavior in a cognitive architecture. *Hum Factors* 48:362–80
- Von Bertalanffy L (1968) *General System theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller, New York
- Burmeister B, Haddadi A, Matylis G (1997) Application of multi-agent systems in traffic and transportation. In: Proc. of IEE Software Engineering 144:51–60
- Cetin N, Nagel K, Raney B, Voellmy A (2002). Large-scale multi-agent transportation simulations. *Comput Phys Commun* 147:559–64
- McLaughlin SB, Hankey JM, Dingus TA (2008) A method for evaluating collision avoidance systems using naturalistic driving data. *Accid Anal Prev* 40:8–16
- Sullivan JM, Tsimhoni O, Bogard S (2008) Warning reliability and driver performance in naturalistic driving. *Hum Factors* 50:845–52
- Aderem A (2005) Systems biology: its practice and challenges. *Cell* 121:511–3
- Kourilski P (2007) Naissance de l'immunologie systémique. Collège de France, résumé de cours
- Bell G, Hey T, Szalay A (2009) Beyond the data deluge. *Science* 323:1297–8
- Hey T, Tansley S, Tolle K (eds) (2009) *The fourth paradigm*. Microsoft Research
- Workman CT, Mak C, McCuine S, et al (2006). A systems approach to mapping DNA damage response pathways. *Science* 312:1054–9
- Pierce BL, Friedrichsen-Karyadi DM, McIntosh L, et al (2007). Genomic scan of 12 hereditary prostate cancer families having an occurrence of pancreas cancer. *Prostate* 67:410–5
- Hoc JM (2001) Towards ecological validity of research in cognitive ergonomics. *Theor Adv Cogn Ergonomics* 2:278–88
- Kemeny A, Panerai F (2003) Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends Cogn Sci* 7:31–7
- Auberlet JM, Rosey F, Anceaux F, et al (2012) The impact of perceptual treatments on driver's behavior: from driving simulator studies to field tests. First results. *Accid Anal Prev* 45:91–8
- Brémond R, Bodard V, Dumont E, Nouailles-Mayeur A (2012) Target visibility level and detection distance on a driving simulator. *Lighting Res Technol* (in press)
- Hartwell LH, Hopfield JH, Leibler S, Murray AW (1999) From molecular to modular cell biology. *Nature* 402(Suppl):C47–C52
- Lestel D (2001) Les origines animales de la culture. Flammarion
- Yamazaki K, Beauchamp GK (2007) Genetic basis for MHC-dependent mate choice. *Adv Genet* 59:129–45
- Watts DJ, Strogatz SH (1998) Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature* 393:440–2
- Barabasi AL, Albert R (1999) Emergence of scaling in random networks. *Science* 286:509–12
- Aldana M, Cluzel PA (2003) Natural class of robust networks. *PNAS* 100:8710–4
- Grimm V, Revilla E, Berger U, et al (2005) Pattern oriented modelling of agent-based complex systems: lessons from ecology. *Science* 310:987–91
- Wagner A (2005) *Robustness and evolvability in Living systems*. Princeton University Press
- Malaparte K (1931) *Technique du coup d'État*. Grasset, Paris
- Bouveresse J (1999) Prodiges et vertiges de l'analogie : de l'abus des belles-lettres dans la pensée. *Raisons d'Agir*