

Sociobiologie macroscopique

Hugues GENVRIN, Jacques SENEGAS

1 Introduction

On appelle système un ensemble d'entités en interaction. L'objectif complexe signifie qu'on va aborder des systèmes tirés du vivant, aux comportements compliqués. Mais avant tout, revenons sur l'origine et les sens des termes : systèmes et complexes. L'étude des systèmes dynamiques sont apparus en physique et en mathématique à la fin du XIX^e siècle, sous l'idée d'Henri Poincaré, qui étudiait alors le problème des trois corps. Ce problème était lié à un prix du Roi de Suède, pour qui démontrerait la stabilité du système solaire. Mais, c'est surtout à la fin du XX^e siècle qu'ont émergé une profusion d'idées. Elles étaient dues à une approche physique, mathématique, ou par l'informatique.

Un résultat bien connu tiré de l'informatique, est l'effet papillon, découvert par le météorologue Edward Lorentz, qui démontrait la sensibilité extrême d'un système aux conditions initiales. Les théories du chaos qui se sont développées avaient toutefois une approche déterministe, dans l'esprit laplacien du terme.

Parallèlement à cette approche, des mathématiciens ont montré qu'on pouvait modéliser des systèmes très simples (au sens des variables en jeu et des relations entre celles-ci), et démontrer qu'ils possédaient une très grande complexité. On a la transformation du boulanger.

Le troisième axe de développement dans l'informatique associe la complexité d'un objet à la longueur du plus petit programme capable de le décrire. On doit cette notion à Kolmogorov.

Depuis les années 1990, la complexité, les systèmes dynamiques envahissent peu à peu la biologie. Ainsi, certaines leucémies seraient elles causées par un ordre trop régulier des cellules. Cependant n'oublions pas les précurseurs des systèmes dynamiques biologiques : Volterra (équation proie-prédateur), ou encore Gause et Turing.

On va s'intéresser ici à l'étude de systèmes complexes

biologiques, macroscopiques, où les acteurs seront des individus. En premier lieu, nous allons présenter ces systèmes, puis nous évoquerons les fonctions d'utilité et de valeur. Pour la valeur, qui est une variable subjective, nous discernons entre autres :

1. la douleur.
2. la qualité de vie,
3. le bien-être.
4. le bonheur ...

Pour l'utilité, qui est une variable objective, nous distinguerons entre autres :

1. un périmètre de marche.
2. un indice de masse corporelle (le BMI par exemple),
3. la déficience.
4. une incapacité.
5. un handicap ...

Dans un second temps, on abordera les effets probabilistes qu'ils mettent en jeu, et enfin nous proposerons d'optimiser l'évaluation de tels systèmes.

2 Description des systèmes étudiés

2.1 Spécificités

Tout d'abord, les systèmes qu'on étudie ne sont pas linéaires. C'est à dire qu'ils ne vérifient pas l'application ci-dessous :

$$F : R \longrightarrow R \\ x \longrightarrow y = ax + b$$

Autrement dit, les effets ne sont pas proportionnels aux causes. Certains processus peuvent être fulgurants et irréversibles. On citera comme exemple les extinctions d'espèces qui sont généralement massives pour des cycles de 26 millions d'années [1]. Ou bien en psychiatrie les virages maniaques chez une personne bipolaire. Ce sont des systèmes compliqués, les variables en jeu, et les rela-

tions entre ces variables sont très nombreuses. On obtient une structure en réseau qui facilite des mécanismes de résonances. Si chaque système a tendance à battre sur une fréquence propre, ils sont capables de se caler sur une même fréquence par l'interaction avec d'autres systèmes. On décrit alors des mécanismes de résonances. On mentionnera le cas des lucioles qui émettent de la lumière de manière collective [2]. Il existe une différence essentielle avec les systèmes physiques où la conservation de l'énergie est de mise. Les systèmes biologiques peuvent évoluer loin de leur état d'équilibre : marge de sécurité ou bien dépassement de soi. Ils se nourrissent ou produisent de l'énergie dissipative. On peut citer un exemple tiré du monde végétal : la photosynthèse, qui a pour origine la lumière dissipée par le soleil. Comme production d'énergie dissipative, on trouve le cas de la cellule qui libère 2871 kJ/mol.

Un facteur important à prendre en compte dans l'évolution de ces systèmes est la résilience. C'est l'aptitude d'un système à ne pas être déstabilisé par des modifications qui l'atteignent. À titre d'exemple d'entités résilientes, on mentionnera la tardigrade. Certains systèmes biologiques se caractérisent également par la recherche de niches écologiques. Ainsi, les pandas se nourrissent quasi-exclusivement de pousses de bambous. Au niveau humain un nichage peut impliquer l'aversion à la critique. Cela nous entraîne à la prise en compte des niveaux de structure qui peuvent être associés au nichage. On les retrouve aussi au niveau des gènes et de l'être humain, pour poursuivre le fil de l'évolution. La notion de niveau se retrouve au niveau du couple également. Akerlof a montré que pour les populations d'hommes mariés et célibataires, présentaient des caractéristiques différentes d'un point de vue comportemental, des inégalités face à la maladie [3]. Un niveau différent de structure serait la meute ou la masse telles que les a décrites Canetti [4]. Bien entendu, on retrouve plusieurs échelons à l'échelle microscopique, avec les quatre niveaux de structure d'une protéine, où bien au niveau d'une cellule. On mentionnera la néguentropie de composition apportée par les niveaux de structure.

On abordera plus loin la notion de risque, néanmoins on peut avancer que le rapport au risque est une caractéristique essentielle des systèmes humains. On distingue deux niveaux de comportements antinomiques : la conduite à risque et l'aversion au risque. Dans l'aversion au risque, on a une sur-pondération des faibles probabilités.

Pourquoi prendre le cas de systèmes à acteurs centraux humains ? Les sciences humaines nous apprennent que dans tout groupe social émerge un chef, il a alors la gestion de la communauté qu'il gère. C'est sur ce mode d'organisation que se sont développées la santé, l'économie, et bien d'autres domaines. Par exemple, des médecins devront amener les patients en situation de déséquilibre (due à une maladie par exemple) à un état d'équilibre stable. L'équilibre peut être atteint directement, ou plus lentement par auto-adaptation, qui se caractérise par une zone

de stabilité dans laquelle peut évoluer à peu près normalement le système.

Bien entendu, les acteurs centraux auront à leur disposition en médecine, des médicaments ou des dispositifs médicaux. La question qui se pose est : doit-on limiter l'évolution des systèmes complexes biologiques au seul effet d'une technique ? Oui dans certains cas, comme s'il faut réguler un taux biologique. Dans d'autres cas, lorsque on comparera deux techniques, cela ne suffira pas. Il nous faut aborder les notions d'utilité et de valeur.

2.2 L'utilité

Les origines de la fonction d'utilité remontent aux travaux de Daniel Bernoulli (1738) [5], qui construisit la courbe de l'utilité sous une forme concave.

Cette fonction se caractérise par une dérivée seconde négative, les variations d'utilité devenant de plus en plus petites au fur et à mesure d'une augmentation constante d'unités d'utilité. Cette courbe a longtemps servi de modèle pour décrire l'utilité.

Il faudra attendre les travaux de Tversky et Kahneman (1979) [6] pour construire une fonction de valeurs (qui est une notion légèrement différente de l'utilité) pour mettre en évidence un trait essentiel de l'humain : on est plus sensible aux pertes qu'aux gains pour une même amplitude de variations d'unités de valeurs. La fonction est donc convexe pour les pertes (la dérivée seconde est positive), et concave pour les gains. Elle est également plus pentue pour les pertes que pour les gains, pour une même variation d'unités en abscisses.

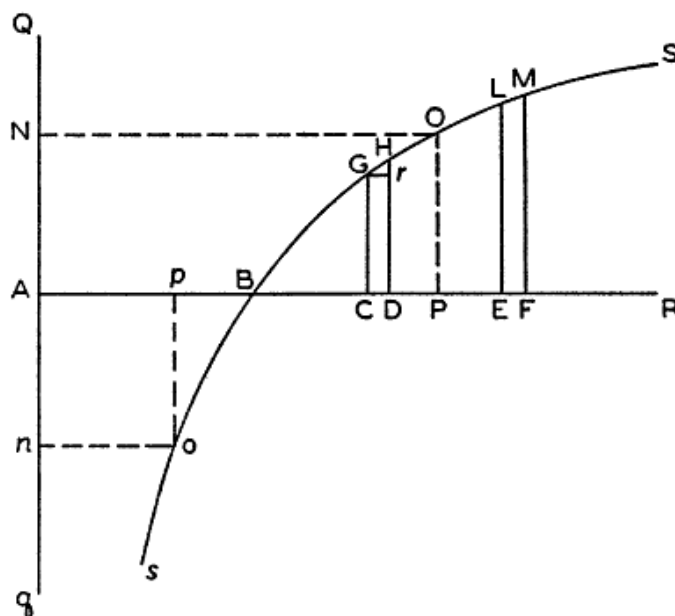


Fig. 1. Courbe de l'utilité (Bernoulli).

$(u'') < 0$ pour les valeurs positives, ce qui implique que $\forall x \leq 0, (\frac{\Delta u}{\Delta x})_{x_0} \geq (\frac{\Delta u}{\Delta x})_{x_0+h}$.

Notons que la conception d'une telle fonction va à l'opposé de l'idée d'une distribution normale pour une population dont on étudierait les variations de la fonction de valeurs (dans l'hypothèse où la répartition d'unités serait normale, et la variation constante pour l'ensemble de la population). On remarquera aussi la dépendance aux conditions initiales, le niveau de valeur dépend de la position de référence, située en l'origine du repère. Nous supposons par la suite la possibilité d'étendre ce résultat, en construisant une fonction de valeurs à partir d'une unité objective acquise ou perdue, et non pas seulement à partir d'unités monétaires. Dans ce cas, la position de l'origine est subjective, elle sera différente d'un individu à l'autre.

Les systèmes biologiques se caractérisent par des activations ou annihilations de variables, en fonction des variations partielles de la fonction d'utilité par rapport à certaines variables. Par exemple, la mobilité de la hanche peut permettre de compenser la perte de mobilité au niveau de la chaîne lombaire. Ainsi, il devient plus compliqué d'évaluer "l'effet pur" d'une variable. Puisqu'on ne peut évaluer cet effet pur d'une variable, on ne peut évaluer l'action des variables qui compensent le système mécanique.

La distinction principale entre l'utilité et la valeur, est que la première est objective, la seconde subjective. On retrouve dans l'évaluation médicale des critères de jugements qui deviennent qui peuvent être des critères objectifs. Ainsi, la mobilité angulaire d'une vertèbre, qui se mesure sur une radiographie, ou des critères subjectifs comme l'échelle visuelle analogique d'une douleur lombaire. Ou bien l'indice de satisfaction donné par un patient.

Dans la première moitié du XX^e siècle, Von Neumann, Morgenstern, Nash, Harsanyi ont popularisé la notion d'utilité au travers de la théorie de jeux. C'est semble-t-il

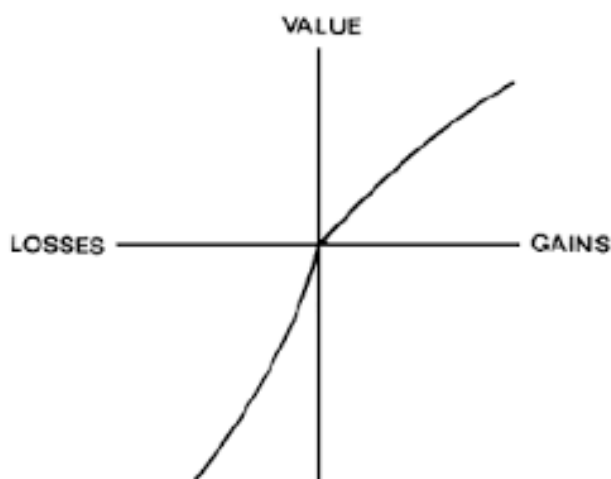


Fig. 2. Courbe de la valeur (Kahneman et Tversky).

$|\frac{\Delta u}{\Delta x}|_{-x_0} \geq |\frac{\Delta u}{\Delta x}|_{x_0}$. ($u'' \geq 0$ pour les valeurs négatives. ($u'' < 0$ pour les valeurs positives.

un aspect restrictif que supposer que la fonction d'utilité soit donnée automatiquement (qu'elle soit cachée ou révélée aux participants). Également, quand il s'agit de calculer la fonction de production en fonction de facteurs, c'est un problème qui peut être très simple. Mais en matière de santé, évaluer l'utilité apportée par une chirurgie peut s'avérer plus complexe. Ken Kox cite ainsi Daniel Kahneman : "Quand les enjeux sont moins forts (qu'un enjeu vital), il arrive que les facteurs humains pèsent plus que les probabilités". [7]. Il se pose dès lors le problème de la calculabilité de la fonction d'utilité.

3 Problème de la calculabilité des fonctions d'utilité ou de valeurs

D'un point de vue formel, on définira deux fonctions de valeurs : celle de l'acteur central ou celle des sujets qui bénéficient de l'utilité apportée. Elles conduisent à des écarts qui peuvent être importants. L'appréciation d'un résultat est différente entre celle perçue par un patient et celle perçue par un médecin [8]. La médecine se caractérise le plus souvent par un facteur dominant :

1. Un médicament.
2. Un dispositif matériel.

La variation du type "tout ou rien". va modifier considérablement le niveau d'utilité et de la valeur perçues par le patient. Au minimum, ils doivent apporter à court terme une augmentation de l'utilité de 30 % (cela correspond à un effet placebo).

Il est dans "l'idéologie". technicienne d'admettre que le facteur dominant d'origine technique maximise le niveau d'utilité, quel que soit le médecin, le chirurgien. On met l'angle humain, aussi performatif qu'il soit, de côté. Mais dans la réalité, tel n'est pas forcément le cas.

Revenons à calculable, cela signifie que si on entre tous les inputs dans une boîte noire idéale comme pourrait être un ordinateur, il en ressortirait un résultat de la fonction d'utilité pour le patient. La complexité de Kolmogorov relativement à l'utilité du système est alors le plus petit programme (en nombre de bits) capable de décrire la fonction d'utilité.

$$K_{f(u)} = \min\{\ell(p) : f(p) = n(u)\}.$$

Tout d'abord, distinguons deux types de complexité de Kolmogorov, suivant que la taille du programme informatique capable de modéliser le système, que l'information soit finie ou non (ou en tout cas très grande). On trouve aussi des cas où l'on a à faire à un algorithme probabiliste au lieu d'un algorithme déterministe. Les mêmes causes déclencheraient deux effets différents suivant une loi de probabilité.

Les décisions médicales doivent se prendre en un temps limité : la durée d'une consultation est de 3/4 d'heures. Il y a une impossibilité à résoudre exactement la fonction d'utilité par un ordinateur. Mais le médecin doit

pouvoir l'apprécier. Par ailleurs, en introduisant la notion d'irréversibilité, notion largement présente en biologie (Extinction d'espèces, résistance aux antibiotiques pour une bactérie, apoptose). Imaginons deux processus irréversibles de même probabilité, dont l'un peut conduire à la perte d'un patient, et l'autre au simple échec d'une diminution du niveau de douleur, ils ne peuvent pas être évalués sous le même angle. La notion de risque doit être prise en compte dans l'élaboration de la fonction d'utilité. Il nous faut distinguer le risque perçu, le risque avéré et le déni de risque. Sous un côté pragmatique, il nous faut considérer l'approche des systèmes à rationalité limitée.

4 Un système à rationalité limitée

Le terme de rationalité limitée peut prêter à confusion. Il ne signifie nullement qu'il n'y a pas assez de rationalité pour les acteurs participant au système. Le terme anglo-saxon de "bounded rationality" reste plus explicite. Il renvoie à l'idée d'une limite intrinsèque de la rationalité lorsqu'on la confronte à l'expérience. Bien entendu dans ce genre de contrainte, les médecins sont rationnels, auront tous les éléments pour maximiser la fonction d'utilité d'un patient. Cependant, la rationalité limitée concerne également les patients.

Le courant de la rationalité limitée s'est développé dans la seconde moitié du XX^e siècle, dans le domaine de l'économie, sous l'impulsion de Maurice Allais, Reinhard Selten, Amos Tversky et Daniel Kahneman notamment. Rappelons un exemple de Maurice Allais [9]. Soit le cas où l'on propose à un individu une somme de 1 000 € avec une probabilité de les obtenir de 80 %, ou bien 700 €, avec la probabilité de les obtenir de 100 %. Dans la théorie de Bernoulli, on choisirait le cas qui maximiserait l'espérance mathématique. Donc il privilégierait la première solution. Mais on constate que dans la réalité, les sujets préfèrent ce qui est sûr à ce qui est incertain et choisissent la deuxième solution. On retrouve des effets du même genre en médecine, pour des patients souffrant d'une tumeur à qui l'on propose une chirurgie ou une radiothérapie. La chirurgie présentant plus de risques à court terme, mais l'espérance de guérison restant plus importante à long terme. Amos Tversky indique qu'un stratagème pour renverser l'attitude d'un patient est de positiver les conséquences et non pas d'insister sur les aspects négatifs [10].

L'aversion pour la perte est un mécanisme classique chez tous les patients qui vont faire l'objet d'une chirurgie. D'ailleurs, certains pourront attendre un seuil de souffrance plus élevé, une incapacité plus grande avant d'accepter un traitement chirurgical. On peut aussi avoir une aversion pour la perte, pour des avantages secondaires liés à la maladie, cela peut biaiser une étude. Certaines aversions sont difficilement formalisables des critères d'exclusion d'un patient d'une étude clinique.

Il existe aussi le comportement antinomique de l'aversion au risque qui est la conduite à risque. Citons l'exemple d'un

maçon qui se fait opérer du dos, et qui après l'opération ne tient pas compte de l'avis du médecin, continuant à porter des sacs de sable de 50 Kg. Sa désadaptation physique, il n'en tient pas compte et adopte une conduite à risque qui peut minimiser le résultat apporté par l'opération. Pour la psychiatrie, prenons le cas d'un patient sous traitement neuroleptiques qui consommerait de la drogue ou de l'alcool. Il s'expose à des risques de rechute malgré le traitement.

À ce stade, la relation acteur central-sujet est très importante, un médecin doit dégager de l'empathie, et le patient doit être sensible à l'empathie du médecin pour que le patient adopte le meilleur comportement du point de vue du médecin. On appelle empathie l'aptitude à se mettre à la place d'autrui et à adopter le meilleur comportement de son point de vue.

Soit le cas d'un patient opéré du dos, l'observance stricte reste assez souple après l'intervention, il lui est demandé de pratiquer des séances de rééducation fonctionnelle. Mais l'individu qui se prendra en charge au niveau diététique, pratiquant de l'entretien physique, aura un comportement à risque limité. On maximisera l'utilité et la valeur perçue.

La rationalité limitée recouvre également toute une série de méthodes utilisées par le cerveau pour prendre des décisions rapidement et ainsi dépasser l'incapacité du cerveau à un calcul purement rationnel. C'est ce que l'on appelle les heuristiques, qui sont des raccourcis intellectuel pour prendre des décisions. Le médecin utilise des heuristiques pour attribuer telle ou telle pathologie au patient. En effet, il peut exister un flou entre deux pathologies voisines, et l'identification du vrai problème reflète une expertise très complexe. Ici, l'heuristique en jeu est la représentativité. Elle permet de répondre à la question quelle est la probabilité que A génère B, ou que C provienne de D. On s'intéressera à d'autres types d'heuristique : La validité, l'ajustement et l'ancrage

Il existe un outil probabiliste largement adapté à ce genre de calcul, c'est la probabilité bayésienne (ou inverse). Si l'on note C la cause, et E l'effet, la probabilité classique est $P(E|C)$ et la probabilité inverse est $P(C|E)$. On a alors $P(C|E) = P(E|C) \times P(C)$ (On précise qu'ici $P(E) = 1$). Paradoxalement, les probabilités bayésiennes sont complexes à calculer effectivement, mais le cerveau semble capable de faire rapidement un calcul à "grosse maille". Elles sont associées à un forage d'information à la consultation.

Toutes les heuristiques sont des mécanismes rapides, mais elles peuvent présenter des biais systématiques. Un exemple classique est la surconfiance. Si l'on demande à un échantillon de conducteurs, s'ils pensent être dans la moitié supérieure ou inférieure des bons conducteurs, 90 % répondent qu'ils se trouvent dans la moitié supérieure. Enfin, il existe un autre type d'argument qu'on peut inclure dans la rationalité limitée, c'est le côté affectif, qui est très difficilement modélisable.

5 REFERENCES

[1] D. Raupp (NRF essais Gallimard, Title = De l'extinction des espèces, Year = 1991), 1st ed.

[2] S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering* (CRC Press), 1st ed. (1990).

[3] G. Akerlof (Oxford, Title = Explorations in pragmatic economics, Year = 2005), 1st ed.

[4] E. Canetti (Tel quel, Title = Masse et puissance), 1st ed.

[5] D. Bernouilli, "Exposition of a new theory on measurement of risk," *Econometrica.*, vol. 30, no. 22, pp. 23–36 (1982).

[6] A. Tversky, "Analysis of Decision making under risk." presented at the *Preference, Belief and Similarity*. (1979).

[7] K. Kox, "Daniel's message to doctors," *The medical journal of Australia*. (2003).

[8] J. Jacquemin, "Mismatch between patient and provider treatment exceptionation." *The back letter* (2003).

[9] M. Allais, "Comportement de l'homme rationnel devant le risque," *Econometrica.*, vol. 21, no. 21, pp. 503–546 (1953).

[10] A. Tversky, "On the elicitation of preferences for alternative therapies." presented at the *Preference, Belief and Similarity*. (1982).