

Le statut épistémologique de l'heuristique de la robustesse

Jean-Frédéric de Pasquale¹

Résumé: Levins, dans « La stratégie de la construction des modèles » (1966), soutient que le nécessaire arbitrage entre les buts de la modélisation impose l'utilisation d'hypothèses opportunes mais peu plausibles. Pour s'assurer que les conclusions du modèle ne dépendent pas de ces simplifications, il faut selon lui varier ces dernières systématiquement (les conclusions qui résistent à ce test sont des « théorèmes robustes »). Depuis la critique d'Orzack et Sober en 1993, ces idées ont fait couler beaucoup d'encre. Nous soutiendrons, à l'aide de notions de la théorie des modèles (au sens logique), que, malgré certaines zones d'ombres, cette heuristique demeure un outil épistémologiquement respectable pour contrer les effets des simplifications dans le processus de modélisation.

Introduction

Dans son texte sur « La stratégie de la construction des modèles en biologie des populations », Levins (1966) présente l'heuristique de la recherche de « théorèmes robustes ». Il y soutient qu'à cause du nécessaire arbitrage entre les buts variés de la modélisation (précision, réalisme, généralité, entre autres), il est nécessaire d'utiliser des hypothèses opportunes mais peu plausibles (ci-après « simplifications »).

Selon Levins, pour s'assurer que les conclusions du modèle ne dépendent pas de ces simplifications, il faut les varier systématiquement. Un « théorème robuste » est une conclusion qui résiste à cette variation, et qui ne dépend donc que des thèses centrales (ci-après « noyau ») du modèle.

Bien que proposée dans le cadre de l'épistémologie de la biologie, cette approche ne s'y limite nullement et est peut être invoquée dans le cadre plus général de la méthodologie de la modélisation (voir par exemple l'introduction à la modélisation de Bender (1978)). Malgré la popularité de l'approche, chacune des deux thèses centrales de l'article de Levins, soit la nécessité d'un arbitrage entre vertus cognitives et la fiabilité de l'heuristique, est problématique. Selon Orzack et Sober (1993), la première est fausse et nous n'avons aucune raison de penser que la seconde est vraie. Nous pouvons à la fois augmenter la précision et le réalisme, ou le réalisme et la généralité, dans ce dernier cas par exemple en ajoutant des termes à une équation. Et nous n'avons aucune raison de penser que les théorèmes de plusieurs modèles faux sont vrais; par exemple, si on a un ensemble de modèles faisant tous l'hypothèse que la sélection est la seule force agissante dans une certaine population, alors nous aurons comme théorème robuste que la population est infinie, ce qui est évidemment absurde.

Dans ce texte, je défendrai rapidement la thèse de Levins selon laquelle il y a des arbitrages cognitifs; ce ne sera pas le centre de mon texte et je me contenterai de présenter les arguments de Levins et de ses partisans, en précisant les notions utilisées dans ces défenses de la thèse des arbitrages. Je passerai ensuite à l'élément central de ce texte, à savoir la proposition d'une reconstruction rationnelle de l'heuristique de la robustesse grâce à

¹ Stagiaire post-doctoral, Institut des Sciences Cognitives, Université du Québec à Montréal. Ce texte a été présenté à la SOPHA 2009, à Genève.

la théorie des modèles qui donne une raison de penser que la procédure est fiable et peut être décrite rigoureusement, malgré les doutes d'Orzack et Sober. Après avoir exposé la reconstruction rationnelle, je présenterai le problème principal de cette reconstruction, à savoir la présence d'un échantillonnage non-aléatoire. Je montrerai que ce problème est largement partagé par les pratiques les plus solides des sciences humaines et biologiques et, même si l'on juge que ce n'est pas un gage suffisant de validité, l'usage d'échantillonnages non-représentatifs peut recevoir un certain nombre de justifications. Finalement, j'examinerai le cas des modèles finis, dont je justifierai l'importance dans le contexte des raisonnements appliqués aux sciences empiriques. Pour ce cas des modèles finis, je présenterai un certain nombre de pistes pour rendre l'heuristique rigoureuse et indépendante de ce problème, certaines plus assurées mais de moindre portée, d'autres plus risquées mais ayant une portée plus grande.

Motivation de l'heuristique

L'*heuristique de la robustesse* consiste à varier systématiquement les nécessaires simplifications² autour d'une hypothèse théorique centrale (le « noyau ») pour vérifier si une conséquence (qui est le candidat au titre de « théorème robuste ») tient peu importe ces simplifications. Certains voudront peut-être avoir une définition plus spécifique, mais je vais me limiter à cette définition minimale.

L'importance de l'heuristique est à la fois sociologique et épistémologique. Sociologiquement, comme l'ont bien vu Orzack et Sober, cette heuristique est fréquemment citée dans la littérature. Je ne m'attarderai pas sur cette question. Épistémologiquement, l'heuristique de la robustesse pourrait être utile si elle permettait réellement de contrôler le rôle des simplifications. Que ces simplifications soient nécessaires a été mis en doute, et il s'impose donc de faire une pause pour montrer que l'argument de Levins et de ses partisans quant à cette nécessité est assez solide – sans quoi il semblerait inutile de tenter de clarifier la nature d'une heuristique pour les contrôler.

Pourquoi les modèles théoriques³ comporteraient-ils, de manière presque nécessaire, des simplifications ? Qu'ils en contiennent parfois n'est pas en doute. Mais on peut se demander si c'est une nécessité ou pas. La justification de Levins est qu'il n'est pas possible d'optimiser simultanément les vertus cognitives, par exemple, la précision, la généralité et le réalisme. Sober et Orzack proposent que l'idée d'arbitrage n'est pas supportée par les faits, car il est possible d'augmenter le niveau de ces vertus cognitives simultanément. Mais de nombreux auteurs (Levins 1993, Oldenbaugh 2003, Matthewson et Weisberg 2008) ont montré que Sober et Orzack ont confondu l'augmentation et l'optimisation.

Pour comprendre ce débat, les concepts adéquats sont ceux d'optimum de Pareto et de courbe de frontière des possibilités. Dans ce qui suit, je vais décrire, comme le fait par exemple Levins (1993) dans sa réponse, les variables décrivant ces vertus cognitives réalisées par un modèle comme des vecteurs dont les valeurs numériques dans chaque dimension sont prises dans un intervalle entre zéro et un nombre positif. On va supposer de plus qu'il y a un ensemble, possiblement vide, de contraintes qui pèsent sur les vertus

² Une *simplification* ici réfère à ces deux types de fictions utiles que Suppe (1989) nous a appris à distinguer: les *abstractions* qui diminuent le nombre de variables, et les *idéalisations*, qui font l'hypothèse de situations impossibles, comme une population infinie.

³ Un *modèle théorique*, dans ce qui suit, est un ensemble de propositions. Ceci pour le distinguer d'un *modèle sémantique*, qui est un système relationnel qui forme une interprétation pour un modèle théorique.

possibles. Un optimum de Pareto est, dans un ensemble de vecteurs de plusieurs valeurs, un vecteur tel que tout autre vecteur dont la valeur dans une dimension (ici, une vertu cognitive) est plus élevée aura une valeur plus basse dans une autre dimension (ici, une autre vertu cognitive). Une courbe-frontière des possibilités décrit l'ensemble des vecteurs qui sont des optima de Pareto. L'ensemble des vecteurs formant un optimum de Pareto pour un ensemble de dimensions est toujours inclus dans l'ensemble des vecteurs formant un optimum de Pareto pour un ensemble plus restreint de ces dimensions. Dire qu'il n'y a pas d'arbitrage reviendrait à dire que l'inclusion est une égalité ou que la courbe-frontière des possibilités est un hyper-rectangle. Dans l'image, tirée de la réponse de Levins (1993, p. 550), b décrit cette situation; l'optimum de la vertu cognitive 1 et celui de la vertu cognitive 2 coïncident. Dans la première situation par contre, on peut augmenter simultanément la valeur de deux vertus cognitives à l'intérieur de la courbe-frontière, mais il est impossible de les optimiser simultanément; la valeur maximum possible de l'une est aussi la valeur minimum de l'autre, et dès qu'on augmente la valeur de l'une tout en restant sur la courbe frontière, on diminue la valeur de l'autre.

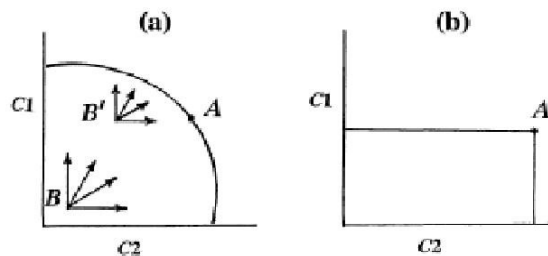


FIG. 1. A MODEL FOR MODEL BUILDING
 Figure 1: Optimisation: Avec arbitrages (a) et sans arbitrages (b). Source: Levins 1993, p.550

En ce qui concerne l'arbitrage entre les vertus cognitives des modèles théoriques, est-on dans le cas de la figure a ou dans le cas de la figure b ? On peut avancer des raisons basées sur trois groupes de données pour considérer qu'il y a en effet des arbitrages à faire. Ces raisons ont trait à nos appareils cognitifs, nos ressources, et finalement nos meilleures théories sur le monde.

Les limites de nos appareils cognitifs sont illustrées dans le cadre des équations différentielles, qui sont souvent simplifiées pour nos besoins. Les physiciens, dans différents domaines, utilisent des idéalizations de symétrie, par exemple pour les problèmes d'électromagnétisme, et utilisent fréquemment l'abstraction consistant à linéariser les systèmes non-linéaires. Cela arrive également dans d'autres sciences, comme par exemple les neurosciences théoriques où de très grands ensembles de neurones sont considérés. Quant ces simplifications ne sont pas utilisées, il arrive que des résultats soient obtenus numériquement mais que le système soit si difficile à comprendre qu'on en est réduit à supposer que de travailler avec les simulateurs permet le développement d'une intuition dont

la nature est mal définie. L'argument cognitif a particulièrement été développé par Oldenbaugh (2003), mais était déjà en germe dans le texte original de Levins.

Les ressources sont une autre raison de croire que les arbitrages sont répandus. Je vais encore procéder en donnant des exemples. Dans les sondages, la taille de l'échantillon doit être calibrée en fonction à la fois du gain d'information fourni d'un individu additionnel et du coût du sondage d'un individu additionnel. De même, l'usage des ordinateurs pour résoudre les systèmes complexes et non-linéaires a pour limite la capacité de nos ordinateurs, même les plus puissants. Il faut donc parfois, par exemple, choisir une discrétisation moins fine pour pouvoir opérer la simulation.

Finalement, le monde lui-même dicte des arbitrages entre vertus cognitives. Un exemple important d'arbitrage est le résultat élémentaire de théorie quantique, que tout le monde connaît, selon lequel on ne peut à la fois maximiser la précision de la position et de la vitesse. La pertinence de ce fait pour ce débat a été remarquée par Mathewson et Weisberg (2008) qui ont développé un cadre formel qui s'applique aussi à des arbitrages d'une espèce plus générale que ceux considérés ici.

Reconstruction rationnelle de l'heuristique

Je vais maintenant présenter mon argument pour la thèse centrale, c'est à dire que l'heuristique de la robustesse peut recevoir une interprétation cohérente grâce à la théorie des modèles⁴. Un modèle théorique, dans ce contexte, est constitué d'une hypothèse théorique centrale N et d'un ensemble de simplifications S . Une interprétation est une fonction qui associe aux symboles non-logiques du langage du modèle théorique des individus (pour les noms, des ensembles (pour les prédicats d'arité 1) ou des relations (pour les prédicats d'arité supérieure à 1). Un modèle sémantique⁵ d'un ensemble de formules est une structure relationnelle qui, sous une interprétation donnée, rend vraies toutes les formules de l'ensemble. Un modèle sémantique d'un modèle théorique au sens utilisé ici sera donc un modèle du noyau N et de l'ensemble des simplifications S .

L'idée ici est de voir l'heuristique de robustesse comme un test empirique d'une implication. L'ensemble des modèles de $N+S$ ⁶ est un sous ensemble des modèles de N . Un modèle de S (S étant l'ensemble des simplifications) n'étant pas nécessairement un modèle de S' (un autre ensemble de simplifications) différents modèles théoriques sélectionnent différents ensembles de modèles dans l'espace des modèles sémantiques possibles.

Or, si le soi-disant théorème robuste R est vrai dans tous les modèles de $N+S$ pour tous les S envisagés, ceci constitue une confirmation de l'implication $N \rightarrow R$; inversement, si R est faux pour un S , ceci constitue une falsification de l'implication $N \rightarrow R$. En effet, les différents

⁴ Tout d'abord une note sur la priorité et la simultanéité. Johnson-Laird a exploré le rôle du raisonnement par modèle dans la cognition, mais je n'ai pas connaissance d'une application à l'épistémologie. Par contre, lors du colloque Models and Simulations 1 à Paris en 2006, à deux jours d'intervalle, moi-même et le professeur Schlimm avons présenté – indépendamment et dans un contexte différent - la thèse selon laquelle une simulation peut être utilisée comme une preuve de consistance (la présentation du Pr. Schlimm a été publiée: voir (Schlimm 2009)). Il est donc important de comprendre que cette communication n'est pas la seule à utiliser les modèles comme outil de raisonnement intrathéorique dans les sciences empiriques.

⁵ Encore une fois, il ne faut pas confondre « modèle théorique » et « modèle sémantique ». Voir note 2 ci-dessus. Lorsque j'utiliserai tout simplement « modèle », le sens devrait être clarifié par le contexte.

⁶ Ici, pour faciliter la lecture, l'expression ' $N+S$ ' dénotera l'union du singleton $\{N\}$ et de l'ensemble de simplifications S .

ensembles de modèles qui correspondent aux différents S sont des échantillons de l'ensemble des modèles de N . Si $N \rightarrow R$, R est vrai dans tous les modèles de N . Si N n'implique pas R , $N \& \neg R$ est vrai dans au moins un modèle de N . Donc si pour tous les différents S , R est vérifié, ceci équivaut à une confirmation de $N \rightarrow R$. Si au contraire pour un S , R n'est pas vérifié, on a falsifié $N \rightarrow R$. Il faut cependant préciser que ceci n'est vrai que si on inclut les modèles infinis; il est possible qu'une implication $N \rightarrow R$ soit vraie dans tous les modèles finis mais que sa négation ait un modèle infini (qui ne pourra donc en aucun cas être une simulation).

Limites

Cette interprétation de l'heuristique présente une faiblesse. Un échantillon est représentatif au sens strict quand il est sélectionné selon une méthode aléatoire. Or l'échantillon sélectionné par un S donné est loin d'être aléatoire; au contraire, les simplifications sont choisies par les chercheurs, qui peuvent avoir des biais. Mais pour qu'on puisse faire un test au sens de la théorie des tests statistiques, il nous faudrait des échantillons représentatifs au sens strict. Donc on peut se poser la question: est-ce que la procédure décrite plus haut est vraiment un test de l'implication ?

Tout d'abord, il faut voir que ce problème est largement partagé par les pratiques les plus solides des sciences humaines et biologiques.

En effet, rares sont les échantillons aléatoires en sciences humaines et biologiques, du moins dans ce sens strict. Il y a même eu des études sur ce sujet et une littérature assez abondante. Guo et Hussey (2004) ont recensé un grand nombre d'études sans échantillons aléatoires. Stanovich admet dans son introduction à la psychologie (Stanovich 2001) que la plupart des échantillons utilisés dans ce domaine ne sont pas représentatifs. Que ce soit en psychologie ou en neurosciences, ils sont recrutés d'une manière non-aléatoire, sur une base volontaire, par des annonces ou parce qu'ils sont disponibles, car ce sont des étudiants d'un cours, des patients épileptiques en attente d'opération, etc. Dans certains cas, un seul individu mène à des généralisations; pensons au cas célèbre du patient H.M. De Brenda Milner, qui a mené à la postulation de l'existence de systèmes de mémoires distincts (voir par exemple Squire et Kandel (2005) pour une description de ce cas et de son impact sur la conception moderne des systèmes de mémoire multiples). De même, en biologie, les expériences avec les jumeaux pour les mesures d'hérédité sont faites avec un sous-ensemble de la population globale et de plus seulement lorsque ceux-ci sont disponibles.

Comme seul un échantillon sélectionné au hasard dans la population globale peut être représentatif au sens strict, la théorie des tests statistiques classiques ne devrait pas pouvoir s'appliquer. Malgré ce fait, on continue à l'appliquer. Guo et Hussey (2004), cités plus haut, recensent un grand nombre d'études en sociologie utilisant de tels tests dans ces conditions; et malgré les caractéristiques des échantillons mentionnés plus haut en biologie, en psychologie et en neurosciences, on peut être certain que la plupart des expériences reportent de tels tests.

Solutions possibles

Après ce détour, une première réaction serait donc de dire que cette faiblesse de l'interprétation de l'heuristique ne doit pas être aussi grave que l'on pourrait penser. En effet, si on insiste sur l'usage d'échantillons aléatoires pour l'usage de tests statistiques, l'essentiel

de la science basée sur de tels tests s'effondre. Puisqu'un tel scepticisme peut être considéré comme extrême dans ces domaines, il l'est probablement dans le domaine considéré ici.

Mais pour ceux qui ne sont pas satisfaits par un tel argument et qui sont prêts à faire de mon *modus tollens* un *modus ponens*, il existe quand même certaines options pouvant justifier malgré tout l'usage de ces tests. Ce sont les statistiques robustes pour les justifications formelles, et les assertions théoriques de représentativité, l'utilisation de la notion d'indépendance logique et l'utilisation de la notion d'indépendance par approches pour des justifications plus informelles. Les deux premières fournissent une compréhension alternative de la validité de l'inférence statistique, les deux dernières des raisons plausibles de penser que notre échantillon n'est pas aussi biaisé qu'on pourrait le croire.

Statistiques robustes.- Dans les statistiques robustes, on tente de perturber la distribution avec une distribution choisie au hasard pour voir dans quelle mesure le test est robuste si la distribution est biaisée. De manière générale, s'agit de vérifier dans quelle mesure on peut satisfaire les conditions d'un test seulement approximativement et se fier tout de même au test. Pour une étude de ces conditions dans le cas des échantillons non-aléatoires, voir (Smith 1983).

Assertion théorique.- En ce qui concerne l'assertion théorique de représentativité, une pratique souvent citée en psychologie consiste à déterminer si la méthode de sélection d'un échantillon a pu être biaisée par une source connue de biais; dans un cas célèbre, la maison Gallup a connu son premier succès sur les sondages des journaux car les lecteurs de ceux-ci étaient plus riches, donc plus conservateurs que la population générale. Si aucun biais connu ne semble être à l'oeuvre, il est raisonnable de penser que les autres facteurs jouent de façon aléatoire. On pourrait chercher à découvrir quel genre de biais ont les chercheurs lorsqu'ils simplifient leurs modèles.

Indépendance.- Si on accepte l'idée de Levins selon laquelle les simplifications doivent être indépendantes, ceci peut nous donner un échantillon plus représentatif, dans la mesure où l'idée d'indépendance peut recevoir un sens rigoureux. Orzack et Sober (1993) ont soutenu que les modèles ne pouvaient être logiquement indépendants, car tous avaient une hypothèse centrale commune (à savoir le 'noyau') et donc des conséquences non-triviales communes. Mais il est possible de définir une notion d'indépendance logique plus faible. Soit S_i les simplifications associées au modèle i . On peut définir un ensemble de simplifications $\{S_i \mid M_i \text{ est un des modèles considéré}\}$ comme indépendant si et seulement si, pour toute simplification S_j d'un modèle, il existe S_i dans l'ensemble tel que S_i est logiquement indépendant de S_j . Ceci permet de s'assurer que les portions de l'espace des modèles couvertes par les conjonctions $N+S_i$ seront plus dispersées que dans le cas contraire.

Indépendance par approche.- On peut aussi utiliser une conception d'indépendance en termes d'approches. Les modèles qu'examine Levins dans son article de 1966 utilisent des approches différentes: il y a un modèle d'optimisation, un modèle de sélection global, un modèle de sélection génique. Si différentes approches donnent des résultats similaires tout en ayant une ontologie et une méthodologie différente, il est plausible que l'espace des modèles sera échantillonné de manière plus représentative.

Cas des modèles finis

Je conclurai avec quelques remarques sur les modèles finis. Le cas des modèles finis

est important pour plusieurs raisons. Premièrement, supposer que les modèles sont finis nous permet de laisser de côté les simplifications pour examiner directement les modèles du noyau N . Deuxièmement, le cas des modèles finis est le seul important pour les finitistes stricts, qui ne considèrent que des objets mathématiques finis, et supposent par exemple une borne absolue sur les nombres entiers. Troisièmement, les modèles finis sont les seuls qui sont accessibles par des moyens de computation et complètement testables en termes d'expérimentation. En ce qui concerne la computation, tout programme fonctionnant sur un ordinateur digital est équivalent à un automate à état fini. Et il ne suffit pas d'inclure des calculateurs analogiques: tout calculateur analogique est nécessairement à précision finie. Il est impossible de confirmer expérimentalement qu'un phénomène est isomorphe à un modèle infini. En ce qui concerne la testabilité, nos données sont nécessairement finies en précision et en nombre; il existera donc toujours un modèle fini capable de les accommoder, c'est à dire, dont les conséquences empiriques sont un sous-ensemble de l'ensemble des vecteurs des données expérimentales possibles de précision finie. Finalement, dans certains cas seuls les modèles finis, pour au moins certaines variables, ont un sens physique; par exemple une population infinie ou exagérément grande n'est pas physiquement plausible.

Le premier cas où il est possible de donner une forme rigoureuse à l'heuristique est si on accepte, pour différentes raisons, une borne absolue sur les modèles *et* qu'on a les ressources pour les tester de manière systématique ou du moins de faire un échantillonnage aléatoire de l'ensemble des modèles. Alors on peut définir un pseudo-code: Générer aléatoirement des éléments de l'ensemble des modèles avec des relations d'arité appropriée; et le programme répond OUI si tous les modèles testés vérifient l'implication et NON sinon, avec les valeurs p ou bornes de confiances appropriées (pour ces deux dernières notions on pourra consulter, une introduction aux statistiques, par exemple Lejeune 2005).

Un autre cas est celui où on ne peut tester tous les modèles mais qu'on considère, pour des raisons diverses qui peuvent être de possibilité physique, qu'il y a une borne sur la taille maximale du système ciblé (par exemple, une population biologique d'une taille plus grande que le nombre d'atome dans l'univers est physiquement impossible). Alors, sous certaines conditions, il est possible de définir la taille minimale du modèle qui satisfait un énoncé falsificateur d'une implication utilisant la quantification universelle (voir Rossmann 2006). Ces conditions sont cependant très limitatives. La négation de l'implication testée doit être un énoncé existentiel positif; or ceci implique que la négation de l'énoncé à tester a toujours un modèle, et donc, que, même dans le fini, l'énoncé à tester est toujours invalide. Mais si la taille minimale est plus grande que la taille physiquement maximale du système ciblé, on peut dire qu'on a validé l'implication pour tous les cas empiriquement pertinents.

Une autre manière de justifier l'heuristique en considérant les modèles finis est de se baser sur le théorème de la loi un-zéro de Fagin (1976). Ce théorème énonce que la fraction de l'ensemble des modèles appropriés d'un ensemble d'énoncé, modulo une relation d'isomorphie définie dans la démonstration, tend vers 1 ou 0 lorsque la cardinalité du modèle tend vers l'infini, et ceci très rapidement. En montrant par une estimation de Monte-Carlo que la proportion des modèles satisfaisant N satisfait R avec une fréquence donnée, alors on a rendu l'heuristique rigoureuse avec des contraintes moins strictes. Mais ceci suppose l'usage de la notion logique de probabilité développée par Carnap. Bien que toutes les interprétations des probabilités aient des problèmes(Hájek 2007), il n'en reste pas moins qu'il est risqué de dépendre d'une interprétation particulière pour la justification d'une méthode scientifique.

Conclusion

J'ai donc rappelé la raison de la présence des simplifications en modélisation selon Levins, soit l'existence d'arbitrages entre vertus cognitives, et les arguments en faveur de la thèse des arbitrages. Levins proposant d'utiliser l'heuristique de la robustesse pour réduire l'impact de ces simplifications, j'ai ensuite offert une reconstruction rationnelle de l'heuristique de la robustesse grâce à la théorie des modèles qui clarifie la nature de la procédure et permet de penser que celle-ci est fiable. Le problème central de cette reconstruction est la présence d'un échantillonnage non-aléatoire, mais comme nous l'avons vu ensuite, ce problème est largement partagé par les sciences humaines ou biologiques et l'usage d'échantillonnages non-aléatoires peut recevoir un certain nombre de justifications. Finalement, dans le cas des modèles finis, j'ai présenté quelques pistes pour rendre l'heuristique rigoureuse et indépendante de ce problème.

En conclusion, malgré certaines zones d'ombres, l'heuristique de la robustesse semble être un outil épistémologiquement respectable pour contrer les effets des simplifications dans le processus de modélisation. Il est même permis d'espérer sa transformation en une procédure rigoureuse⁷.

⁷ Je remercie Pierre Poirier pour ses commentaires sur cette version du texte.

Références:

- Bender, E.A. (1978) *An Introduction to Mathematical Modeling*. Wiley.
- Guo, S. et Hussey, D. L.(2004) « Nonprobability Sampling in Social Work Research », *Journal of Social Service Research*,30:3,1 — 18
- Fagin, R. (1976) Probabilities on Finite Models, *The Journal of Symbolic Logic*, Vol. 41, No. 1 (Mar., 1976), pp. 50-58.
- Hájek, A. (2007), « Interpretations of Probabilities », in Zalta, E.N. éd., *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/archives/fall2007/entries/probability-interpret/>
- Haykin, S. (1994). « *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*, 2nd edition ». Macmillan College Publishing, New York.
- Levins, R. (1966) « The strategy of model building in population biology ». *American Scientist* 54, 421-431.
- Levins, R. (1993) « A Response to Orzack and Sober: Formal Analysis and the Fluidity of Science ». *Quarterly Review of Biology* 68(4), 547–555.
- Lejeune, M. (2005) *Statistique: La théorie et ses applications*, Springer-Verlag.
- Lucas, J. W. (2003) « Theory-Testing, Generalization, and the Problem of External Validity », *Sociological Theory*, Vol. 21, No. 3, pp. 236-253.
- Matthewson, J. et Weisberg, M. (2008) « The structure of tradeoffs in model building », *Synthese*, Mercredi 16 Juillet 2008.
- Odenbaugh, J. (2003) « Complex systems, trade-offs, and theoretical population biology: Richard Levins' "Strategy of model building in population biology" revisited ». *Philosophy of Science* 70, 1496-1507.
- Orzack, S. H. et Sober, E. (1993) « A Critical Assessment of Levins's The Strategy of Model Building in Population Biology (1966) », *The Quarterly Review of Biology*, Vol. 68, No. 4. (1993), pp. 533-546.
- Rossmann, B. (2008), « Homomorphism Preservation Theorems », *Journal of the ACM*, Vol. V, No. N, Juillet 2008, Pages 1–54.
- Schlimm, D. (2009). *Learning From the Existence of Models: On Psychic Machines, Tortoises, and Computer Simulations*. *Synthese* 169 (3).
- Smith, T. M. F. (1983) "On the Validity of Inferences from Non-random Sample", *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, Vol. 146, No. 4, pp.394-403.
- Squire, L. et Kandel, E. (2005) *La mémoire: de l'esprit aux molécules*, Flammarion.
- Suppe, F. (1989) *The semantic conception of theories and the problem of realism*, University of Illinois Press.
- Stanovich, K.E. (2001). « *How to think straight about psychology* » (6ème édition). Boston: Allyn & Bacon.
- Wimsatt, William C. (2007) « *Re-Engineering Philosophy for Limited Beings: Piecewise Approximations to Reality* », Harvard University Press