

**SECRETARIAT GENERAL**

**DE NOUVEAUX OUTILS ET TECHNIQUES D'ANALYSE POUR MIEUX COMPRENDRE LES SYSTÈMES**

17-18 septembre 2019, Centre de conférences de l'OCDE

La présente note est consacrée à l'élaboration, à l'expérimentation et à la diffusion de nouveaux modèles et méthodes d'analyse devant permettre d'appréhender les systèmes complexes qui caractérisent l'économie, la société et l'environnement, ainsi que les relations tissées entre ces différentes sphères. On y présente, dans leurs grandes lignes, les contributions à la définition de l'action publique que peuvent apporter la modélisation multi-agents (et l'éconophysique), l'apprentissage automatique et la neuroéconomie. Dans sa dernière partie, on trouvera des détails sur les expériences étudiées au sein du Laboratoire d'innovation NAEC (NAEC Innovation LAB), initiative conjointe du NAEC, du Département des affaires économiques et de la Direction des statistiques et des données.

Gabriela Ramos – [gabriela.ramos@oecd.org](mailto:gabriela.ramos@oecd.org)

William Hynes – [william.hynes@oecd.org](mailto:william.hynes@oecd.org)

**JT03451966**

## DE NOUVEAUX OUTILS ET TECHNIQUES D'ANALYSE POUR MIEUX COMPRENDRE LES SYSTÈMES

William Hynes, Alan Kirman et Karl Naumann – Unité NAEC, OCDE

### 1. Pourquoi de nouveaux outils et de nouvelles techniques sont indispensables

L'économie mondiale est un système dans lequel des réseaux de production hétérogènes et d'envergure planétaire (50 millions d'entreprises représentant des milliards de liens physiques) entrent en interaction avec d'autres réseaux composés de ménages (2 milliards de foyers, 3.3 milliards de travailleurs et des milliers de milliards de liens vers les produits consommés), un maillage de contrats (se comptant par milliers de milliards) et des modes de propriété où quelques entreprises et individus détiennent la quasi-totalité des biens. Le système économique est, par essence, tissé d'un enchevêtrement de liens et d'interconnexions, et il est le théâtre d'interactions complexes qui, à partir du niveau individuel, débouchent sur l'émergence de différentes propriétés au niveau macroéconomique. Les responsables de l'action publique ont besoin d'outils nouveaux pour comprendre ce système ; or, si les recherches portant sur les outils et techniques traditionnels ont pu déjà mobiliser 50 000 personnes-années, seules environ 500 personnes-années ont été consacrées à l'étude des modèles multi-agents.

La compréhension des problématiques économiques telles que la croissance, les crises financières, le risque systémique, l'innovation ou encore la durabilité peuvent bénéficier de la révolution en cours dans les mathématiques et les sciences naturelles et sociales. Cette révolution est mue par l'interaction entre les avancées technologiques dans le secteur de l'informatique d'une part, et l'augmentation des quantités de données disponibles d'autre part. Les techniques issues de sciences comme les mathématiques et l'informatique permettent potentiellement de procéder à une analyse approfondie des interactions qui se produisent entre différents réseaux et systèmes, et à l'intérieur de ceux-ci. Parmi ces techniques, on peut citer la modélisation multi-agents, les modèles de réseaux ou encore l'analyse des données massives, qui peuvent servir à mettre au jour la manière dont des comportements et des propriétés émergent des interactions inter- et intra-systèmes, y compris des chocs affectant les systèmes financiers, économiques, sociaux et environnementaux. Grâce à ces nouveaux modèles, les responsables de l'action publique vont pouvoir améliorer la définition des politiques et en évaluer non seulement les effets directs, mais aussi la multitude d'effets indirects potentiels.

Les économistes ont souvent soutenu que leur discipline avait fait des progrès considérables ces dernières années, cependant, il est clair que de nombreux responsables de l'action publique ressentent de la frustration face à ce qu'ils considèrent comme des efforts déployés pour améliorer des modèles abstraits qui ne leur sont pas d'une grande utilité sur le plan pratique. En 2006, avant même la crise de 2008, Greg Mankiw qui venait de quitter son poste de président du Conseil des conseillers économiques, a ainsi déclaré : « Le fait que la recherche macroéconomique moderne ne soit pas largement exploitée aux fins de la définition pratique des politiques publiques constitue un commencement de preuve qu'elle n'a que peu d'utilité de ce point de vue. La recherche parvient peut-être à d'excellents résultats en tant que science, mais elle n'apporte aucune contribution significative à l'ingénierie macroéconomique. »

Ce qu'il entendait par là, c'est que l'on pourrait fort bien concevoir la science comme une discipline permettant de jeter des fondations à partir desquelles il est possible de définir des instruments, lesquels seront ensuite utilisés par des « praticiens ». Pour Mankiw, la science économique est devenue trop centrée sur elle-même et du fait de cette introversion, elle n'est pas en mesure d'aider ceux qui en auraient besoin dans leur pratique à tirer profit des avancées techniques et théoriques qu'elle produit. Il y a

beaucoup de raisons à cela, la plupart d'entre elles étant liées à la sociologie des économistes universitaires. Malheureusement, c'est dans le domaine de la macroéconomie que le fossé est le plus important. Or, l'OCDE s'intéresse précisément, par nécessité, aux politiques macroéconomiques.

L'initiative relative à de Nouvelles approches face aux défis économiques (NAEC) a permis de mettre en lumière l'impératif de mieux comprendre des enjeux tout à la fois complexes, dynamiques et interconnectés. L'équipe NAEC travaille en collaboration étroite avec nombre de grandes institutions pour développer ces nouvelles approches. On peut citer en particulier, parmi d'autres institutions, le Santa Fe Institute (États-Unis), l'Institut Fields (Canada), l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) (Autriche) et l'Institute of New Economic Thinking (INET) d'Oxford (Royaume-Uni). En avril 2018, une conférence consacrée à de [nouveaux outils et techniques d'analyse pour l'élaboration de la politique économique](#) a été organisée sous l'égide du projet NAEC, offrant ainsi à point nommé à des décideurs publics, des universitaires et des chercheurs en économie la possibilité d'examiner ensemble les applications les plus avancées issues des nouveaux outils et techniques d'analyse. Récemment, le laboratoire ABM (*Agent-based Modelling* ou modélisation multi-agents) de l'Université de New York et Google sont également convenus de collaborer avec le NAEC sur ces questions. Le projet NAEC facilite ainsi la mise au point, l'expérimentation et l'échange sur ces techniques afin de constituer un socle à partir duquel élaborer des conseils plus éclairés sur les politiques à suivre. Par ailleurs, en novembre 2019, le NAEC va organiser à Londres avec le réseau Rebuilding Macroeconomics une conférence conjointe pendant laquelle les participants se pencheront de manière plus approfondie sur les applications de la science de la complexité en macroéconomie.

Le groupe NAEC n'a pas la prétention de laisser entendre qu'il pourrait infléchir le mode de fonctionnement des économistes, mais il joue indéniablement un rôle important pour donner aux « praticiens » l'accès à des idées et techniques nouvelles qui sont en cours d'élaboration, souvent en dehors des cercles universitaires (par exemple au sein de banques centrales ou de départements ministériels). Les liens tissés dans le cadre du NAEC se sont transformés en un réseau d'expertise qui peut accompagner les directions de l'OCDE désireuses de rester toujours à la pointe de la réflexion et d'élaborer des recommandations pour l'action publique qui soient à la fois scientifiquement valables et possibles à mettre en œuvre dans la pratique.

On trouvera dans la présente note une synthèse des contributions potentielles de deux approches prometteuses auxquelles le NAEC s'est intéressé de près, à savoir la modélisation multi-agents et l'apprentissage automatique. La modélisation multi-agents est une approche de compréhension du système économique qui repose sur une démarche procédant de bas en haut (*bottom-up*). Avec cette méthode, on procède à une simulation à grande échelle dans laquelle des agents sont dotés de certains traits comportementaux, et les phénomènes macroéconomiques correspondent aux propriétés qui émergent des interactions entre ces agents. De son côté, l'apprentissage automatique a le potentiel d'étoffer l'analyse économique, parce qu'il permet de procéder à des analyses moins restrictives des données et de faire apparaître des relations et interactions non linéaires plus riches entre différents effets. Cette méthode peut être utile pour faire des prévisions, mettre au jour les interconnexions existant entre différentes données et comprendre les interactions entre différentes politiques publiques. Enfin, on trouvera en conclusion de la note des informations actualisées sur l'évolution du Laboratoire d'innovation NAEC (NAEC Innovation LAB).

## 2. La modélisation multi-agents

La modélisation multi-agents permet de modéliser des systèmes économiques en utilisant une approche qui procède de la base vers le sommet (*ground-up*). L'idée de recourir à la modélisation multi-agents remonte à la machine de von Neumann et au jeu de la vie de Conway. Depuis lors, le cadre de la modélisation a progressé en subtilité et en ressemblance avec les phénomènes observés empiriquement.

L'une des raisons de cette croissance augmentée tient aux améliorations de la puissance de calcul des ordinateurs qui permettent de procéder à des simulations à une aussi grande échelle. À la base, il s'agit pour le chercheur de modéliser des agents individuels et de simuler leurs interactions à l'échelle pour en retirer des éclairages. Les avantages d'une telle modélisation tiennent à sa capacité à représenter des systèmes complexes, des phénomènes émergents, des chocs endogènes ou encore des dynamiques non linéaires. La présente section contient une brève description, dans ses grandes lignes, d'un exemple classique de modélisation multi-agents, ainsi qu'un examen des avantages d'une telle méthode. On trouvera ensuite quelques exemples de modélisations multi-agents ainsi que des pistes de développement ultérieur dans ce domaine.

Les modèles établis selon une approche à agents multiples sont construits autour de catégories individuelles d'agents. On attribue à ces agents une heuristique comportementale qui régit leurs interactions avec les autres agents. L'heuristique comportementale peut être établie à partir d'une grande variété d'éclairages tirés de la psychologie et de l'économie comportementale, et la complexité du modèle comportemental dépend de son objet. Par exemple, les travaux de Kahneman, Tversky et Thaler peuvent servir de base à la constitution de modèles de comportement des agents. Plus important encore, l'approche de la base vers le sommet donne aux économistes la possibilité de faire appel à d'autres disciplines comme la psychologie, la sociologie ou l'anthropologie de manière à donner une représentation exacte de la complexité du comportement humain.

L'un des chercheurs les plus éminents dans ce domaine est Joshua Epstein, partenaire du NAEC, dont les travaux sur « l'agent zéro » constituent la base à partir de laquelle des modules comportementaux distincts peuvent être attribués à des agents. Il faut souligner ici que l'approche de la base vers le sommet évite d'avoir à poser l'hypothèse d'un agent pleinement rationnel ou ayant accès à la totalité des informations, laquelle est fréquemment utilisée dans les modèles économiques traditionnels pour qu'il soit possible de les résoudre mathématiquement. Ces agents vont ensuite interagir dans un environnement spécifié par l'auteur du modèle. Il peut s'agir d'un réseau fixe d'interactions ou d'un processus aléatoire, et des règles d'apprentissage ou d'adaptation peuvent y être incluses. La complexité du système économique constitué par ces agents émerge ensuite à mesure que la simulation est conduite. De ce point de vue, le modèle n'est soumis à aucun contrôle central, au contraire, le processus économique et ses propriétés macroéconomiques naissent des interactions entre les différents agents individuels. Le modèle Sugarscape créé à l'origine par Epstein et Axtell constitue un exemple simple de modélisation multi-agents. Dans ce modèle, les propriétés émergentes correspondent à l'évolution de la distribution de richesses. Dans les versions plus modernes de la modélisation de l'économie, on peut dégager une multitude de propriétés émergentes, notamment voir apparaître des crises endogènes ou des cycles conjoncturels créés de manière endogène.

Le modèle Sugarscape repose sur vaste grille de cellules qui constituent un paysage ressemblant à deux montagnes de sucre. Dans cette simulation, les agents ont pour seul objectif de maximiser leur collecte de sucre (laquelle est supérieure à leurs besoins métaboliques). À chaque itération, ils scrutent les alentours et se déplacent vers la cellule la plus proche qui contient le plus de sucre. Bien que partant d'une configuration simple, un tel modèle permet déjà de montrer comment la distribution de la richesse passe d'un état égalitaire au départ (peu de riches et de pauvres et beaucoup de membres de la classe moyenne) à une distribution inégalitaire dans laquelle on observe une large bande d'agents très riches et d'agents très pauvres, avec juste une petite frange de membres de la classe moyenne. Cette distribution inégalitaire constitue une propriété émergente du système, une macro-propriété qui se dégage à partir des micro-comportements des agents pris collectivement.

Les modèles d'équilibre général dynamique stochastique (dits modèles DSGE pour *dynamic stochastic general equilibrium*) et les modèles d'équilibre général calculable (MEGC), qui sont nés du développement de l'économie néoclassique, constituent la contrepartie la plus courante des modélisations multi-agents à grande échelle. Les modélisations multi-agents présentent plusieurs avantages par rapport à ces autres cadres d'évaluation intégrés.

- Le premier avantage tient à leur modularité. Du fait de l'approche de la base vers le sommet utilisée pour modéliser uniquement une heuristique comportementale et des interactions, il est plus facile d'intégrer dans les modélisations multi-agents des éléments issus de la science économique mais aussi d'autres disciplines, par exemple l'étude de catégories particulières d'interactions ou de choix de produits sur des marchés de produits. Cette modularité tient au fait qu'une modélisation multi-agents est une simulation et ne doit donc pas forcément être mathématiquement résolvable.
- Les modélisations multi-agents permettent beaucoup mieux de saisir les dynamiques non linéaires. Par exemple, la diffusion de la technologie ou celle de l'information sont des exemples-types de processus non linéaires. Du fait de la nature en réseau des interactions simulées dans une modélisation multi-agents, la diffusion non linéaire de l'information peut être plus facilement appréhendée, et pourrait même peut-être constituer un phénomène émergeant des interactions au sein du modèle.
- Les incertitudes inhérentes constituent un autre aspect dans lequel les modélisations multi-agents peuvent être considérées comme supérieures. En effet, de nombreux phénomènes économiques proviennent de distributions à queue épaisse où la probabilité d'événements extrêmes peut être plus grande. Dans un cadre DSGE classique, une anticipation est appliquée à l'ensemble de la distribution. Or, ce faisant, on risque souvent de perdre des informations sur la configuration à queue épaisse des distributions sous-jacentes. Avec la modalisation multi-agents en revanche, il n'est souvent pas nécessaire de formuler de telles anticipations. Au contraire, grâce à des itérations répétées de la simulation, on peut arriver à faire ressortir les effets des distributions à queue épaisse.
- Enfin, dans les modélisations multi-agents, il n'est pas obligatoire de revenir à un résultat d'équilibre. L'une des idées répandues dans la science économique néoclassique est que l'économie est un équilibre qui peut, à l'occasion, être mis à mal par un choc. Cependant, une fois le choc absorbé, l'économie va retourner à son état d'équilibre. Dans la modélisation multi-agents, l'état d'équilibre peut être un résultat, mais ce n'est en aucune manière le seul. Les modélisations multi-agents permettent l'émergence de scénarios très divers, par exemple un état de flux constant, des crises prolongées ou des équilibres intermittents. Des passages entre ces différents états peuvent aussi se produire de manière endogène à partir du modèle de l'économie lui-même, et non être limités à des éléments exogènes comme ce pourrait être le cas avec les modèles d'équilibre.

Si l'utilisation de la modélisation multi-agents présente de nombreux avantages, elle n'a pas suscité le même intérêt que les modèles économiques traditionnels. Cela étant, le développement de ces approches est important et des modèles actualisés continuent d'être élaborés, dans le champ des sciences économiques comme dans d'autres disciplines. Les applications notables concernent notamment la biologie (diffusion des épidémies, dynamique démographique, évolution, modélisation cognitive), le monde des affaires et la technologie (comportement organisationnel, optimisation de la chaîne d'approvisionnement, comportement des consommateurs, réseaux sociaux) et l'économie (modèles macroéconomiques intégrés et marchés de capitaux pour l'essentiel). Parmi les grands modèles macroéconomiques développés, on peut citer le modèle EURACE, issu d'un projet de la Commission européenne et qui a été repris par l'Université de Bielefeld.

On pourrait aussi citer les modèles de type « Keynes-meets-Schumpeter » et Lagom RegiO. Une description détaillée de chacun des modèles n'entre pas dans le champ de la présente note, mais il convient de signaler qu'ils ont tous été utilisés dans le cadre de l'évaluation des politiques publiques. Par exemple, dans le domaine de la politique budgétaire, on a constaté que le seul moyen que les pays avaient d'opérer un rattrapage en termes de PIB était de mettre en œuvre une politique budgétaire axée sur la technologie, et non de stimuler la demande. De la même façon, la réglementation financière et la résolution

des crises ont fait l'objet de recherches, parmi d'autres sujets. On trouvera dans la note de Dawid et Delli Gatti intitulée « Macroeconomic Agent-Based Models » une présentation plus détaillée du potentiel de ces différents modèles en termes d'appréciation des politiques publiques. Dans le domaine de la finance, les méthodes de modélisation multi-agents et les structures en réseaux ont été principalement utilisés pour analyser les réseaux de risques financiers ainsi que la formation et la résolution des crises. On en trouve une application intéressante avec la création de marchés boursiers artificiels, l'exemple le plus notable étant celui du Santa Fe Institute qui, grâce aux travaux de LeBaron, Brian Arthur, Holland et Palmer, s'intéresse à cette question depuis le début des années 90.

Il faut continuer de développer le recours à la modélisation multi-agents. Malgré l'augmentation de la puissance de calcul dont on dispose aujourd'hui, mettre en œuvre des modélisations multi-agents à l'échelle réelle d'un pays reste une gageure, pour ne rien dire d'une modélisation à l'échelle du monde. Il faudrait pour cela procéder à des simulations portant sur des dizaines de millions d'agents et des millions d'entreprises. Les avancées de l'apprentissage automatique, par exemple l'utilisation de processeurs graphiques pour effectuer des traitements en parallèle et l'architecture computationnelle, doivent être poursuivies pour que les modélisations multi-agents puissent générer un nombre plus important de phénomènes émergents parmi ceux auxquels on assiste dans l'économie.

L'une des critiques fréquemment adressées aux modélisations multi-agents est qu'elles sont sensibles aux valeurs de départ et comportements spécifiques attribués aux agents lors de la programmation. Cela est vrai, mais cet inconvénient peut être neutralisé si l'on effectue des simulations plus nombreuses afin de générer des distributions couvrant tout l'éventail des options d'initialisation possibles. Plus important est le fait que les propriétés émergentes, ou macropropriétés, sont souvent le résultat de chaînes causales extrêmement complexes dans le temps et l'espace. De ce fait, il est difficile d'identifier aussi bien les dynamiques non linéaires que les mécanismes d'agrégation qui sous-tendent les résultats importants. Cela étant, il existe, sur le plan des résultats en matière de distribution, une large palette de données entrantes et de scénarios consécutifs qui peuvent être utilisés pour évaluer l'efficacité avec laquelle une politique publique pourra orienter le système économique vers un résultat souhaité. Consacrer des ressources à la compréhension des chaînes causales peut déboucher sur un ensemble très riche de connaissances en vue de la mise en œuvre de politiques meilleures pour une vie meilleure.

Avec le soutien de la société d'investissement Baillie Gifford, l'Unité NAEC, en collaboration avec le Département des affaires économiques, mène un projet-phare qui porte sur la mise au point de nouvelles approches de la macromodélisation. L'OCDE, forte des données qu'elle possède et de l'expérience qui est la sienne, peut : 1) aider à calibrer les modèles en question et à définir des questions en lien avec les politiques publiques, 2) mobiliser les gouvernements, les ministères des Finances et les banques centrales de ses pays Membres dans l'élaboration et la mise en œuvre de ces approches, et 3) établir la pertinence et l'utilité de ces approches pour la définition de l'action publique avec une légitimité que des universitaires seuls ne seraient pas en mesure de fournir.

De tels modèles pourraient ensuite servir de points de départ pour travailler avec d'autres modèles issus de domaines comme le changement climatique, l'énergie, les marchés du travail, le système financier, etc. L'initiative conjointe entre le NAEC et INET Oxford (et plus largement l'Oxford Martin School) recèle un formidable potentiel. Les directions de l'OCDE concernées pourraient travailler de concert et l'Organisation pourrait mettre sur pied, en tant que de besoin, des organes consultatifs pour associer les pays Membres et les comités afin de s'assurer que ces méthodologies se diffusent, par le biais des réseaux et structures de l'OCDE, jusque dans les administrations des pays Membres et irriguent la pratique de l'analyse de l'économie et de la définition des politiques économiques.

### 3. L'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle dominent la recherche dans toutes les disciplines universitaires depuis quelques années. L'idée d'appliquer l'apprentissage automatique aux domaines de l'économie et de l'action publique est très prometteuse. Dans la mesure où l'apprentissage automatique couvre un large éventail d'applications et de mises en œuvre de modèles qui sortent du cadre de la présente note, nous mettrons ici uniquement l'accent sur ses applications possibles à la compréhension du système économique et sur les avantages qu'il peut apporter à cet égard.

L'apprentissage automatique a été défini par Mitchell comme suit : « On considère qu'un programme informatique tire les enseignements d'une expérience E vis-à-vis d'une certaine catégorie de tâches T et de mesures de performance P si sa performance dans l'accomplissement des tâches T telle que mesurée par P est améliorée par l'expérience E ». Il s'agit là d'une définition opérationnelle, mais l'apprentissage automatique peut être plus largement perçu comme la mise au point d'algorithmes utilisés pour prévoir, classer et/ou grouper des données. De ce point de vue, on distingue deux catégories : l'apprentissage supervisé, dans lequel les données comportent des entrées et des sorties souhaitées, et l'apprentissage non supervisé, où les seules données sont des entrées. La distinction entre ces deux modèles est importante, car l'apprentissage non supervisé était auparavant possible uniquement dans des contextes limités (analyse en composantes principales par exemple). La possibilité de disposer d'outils de ce type va démultiplier nos capacités à comprendre comment sont générées les données que nous observons, ce qui pourra déboucher ensuite sur de nouveaux éclairages. Au sein de ces deux catégories, il existe une multitude de modèles et d'approches, dont certaines sont intéressantes du point de vue de la compréhension des phénomènes économiques.

Les avantages de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle et les problèmes qu'ils soulèvent dans la société font l'objet d'un très vif débat. En ce qui concerne la science économique, l'apprentissage automatique offre des avantages considérables :

- **Amélioration de la capacité prédictive.** Dans les analyses économiques et statistiques traditionnelles, on a couramment recours à des approximations linéaires des problèmes. Lorsqu'on est en présence de données non linéaires, on leur applique des transformations pour les rendre linéaires avant d'estimer les relations qui les unissent. Or, de telles approches sont par essence limitées du point de vue des fonctions qu'elles peuvent représenter, qui sont uniquement linéaires. Avant l'avènement de l'apprentissage profond, les relations non linéaires devaient être dérivées à la main. L'apprentissage profond permet à la machine d'apprendre, grâce à des données, le détail de la dynamique non linéaire des processus sous-jacents, et donc d'en prédire les résultats avec davantage de précision. En effet, les réseaux neuronaux sont des approximations universelles de fonctions. Les progrès de ces techniques ont permis d'améliorer la précision, dans les scénarios prédictifs comme dans les problèmes de classification. Les applications à la prédiction de séries temporelles financières ont aussi fait l'objet d'études très poussées. Parmi certains domaines importants méritant d'être explorés, on peut citer les modèles longue mémoire à court terme (*long short-term memory* ou LSTM), les réseaux de neurones récurrents ou le *reservoir computing* (séries temporelles chaotiques) pour leur capacité d'analyse de séries temporelles. Il s'agit là d'outils particulièrement remarquables, car il est possible d'y intégrer des données à des fréquences différentes dans le temps.
- **Exploitation de volumes de données considérablement plus larges.** Un autre domaine dans lequel les progrès de l'apprentissage automatique peuvent faire avancer la compréhension des systèmes économiques concerne la capacité des outils d'apprentissage profond à exploiter des volumes de données plus importants. Grâce aux avancées réalisées dans des domaines comme la reconnaissance d'images, la traduction automatique ou la

reconnaissance vocale, les chercheurs en science économique ont accès à des données en plus grand nombre. Par exemple, l'évaluation de la confiance chez les opérateurs des marchés de capitaux et les consommateurs a pu progresser grâce aux techniques de traitement des langues naturelles qui permettent d'analyser les sources d'informations. De plus, les données disponibles en grand nombre sur les réseaux sociaux et une grande variété de textes qui n'étaient auparavant pas exploitables de manière quantitative sont devenus accessibles grâce aux méthodes de traitement relevant de l'apprentissage profond. Ces évolutions peuvent favoriser une compréhension plus fine des interactions entre des agents économiques extrêmement divers et de leurs caractéristiques et, partant, améliorer la compréhension du système économique et des risques auxquels il est confronté.

- **Meilleure compréhension des représentations de données.** Les modèles fonctionnant en apprentissage non supervisé favorisent une meilleure compréhension des représentations des données existantes. Par exemple, les auto-encodeurs sont une catégorie de réseaux neuronaux artificiels qui apprennent à représenter un jeu de données de façon à le débruiter et à en réduire la dimensionnalité. Dans ce cas, l'utilisation de l'apprentissage profond permet l'extraction de diverses relations cachées dans les données.

Bien que l'apprentissage automatique offre un large éventail d'avantages, il est souvent difficile à mettre en œuvre sans expertise domaine. De ce point de vue, le NAEC peut faciliter les connexions entre experts de premier plan. L'interprétabilité constitue une autre difficulté dans la mise au point d'outils d'apprentissage automatique aux fins de la définition de l'action publique. De fait, compte tenu de la complexité des processus générateurs de données que peut représenter un réseau neuronal appartenant à l'une des catégories existantes, ainsi que du nombre considérable de données entrantes, il est souvent difficile de parvenir à une compréhension intuitive de la chaîne causale représentée. En tout état de cause, le fait d'accumuler, dans un domaine comme celui-ci, une expertise qui viendra se conjuguer au savoir-faire de l'OCDE en matière d'action publique, permettra sans doute d'avoir une vue beaucoup plus précise du système économique ainsi que des prévisions relatives à son évolution.

#### 4. Neuroéconomie

L'utilisation, en économie, des connaissances issues des neurosciences est un domaine qui connaît une expansion rapide. Il pourrait sembler paradoxal que le programme NAEC, qui accorde tant d'importance aux interactions entre les agents et laisse entendre que nous nous sommes peut-être trop attachés à disséquer et à rationaliser les comportements individuels, doive aussi s'employer à ouvrir la « boîte noire » du cerveau humain. Pourtant, comme l'ont montré Camerer et ses co-auteurs, l'hypothèse de la rationalité et de la cohérence que nous attribuons aux agents individuels imprègne l'ensemble de la théorie économique et a été adoptée avec enthousiasme par les spécialistes de la macroéconomie qui y voient un ensemble de « micro-fondations valables ».

Pourquoi, alors, devrions-nous consacrer du temps et de l'énergie à une telle approche ? Il y a plusieurs raisons à cela. Premièrement, l'hypothèse de rationalité posée par les économistes a été régulièrement battue en brèche par l'expérience, et depuis, disons au moins Pareto, les axiomes qui la sous-tendent sont remis en question. Une première réaction, consistant à modifier la théorie standard pour tenir compte de ce problème, serait de suggérer que les êtres humains sont soumis à des biais qui les empêchent de se comporter de manière complètement rationnelle. Ces biais pourraient être repérés, voire corrigés, et ainsi, on pourrait donc renouer avec la théorie de départ. Cependant, si une telle approche s'inspire en partie des neurosciences et a été popularisée par le biais de l'approche de l'incitation douce, ou « nudge », elle ne rompt pas avec l'opinion standard concernant la manière qu'a le cerveau humain de fonctionner.



Il existe une approche plus radicale, qui consiste à soutenir que le comportement humain est bien plus complexe que de simples opérations d'optimisation et de calcul ne pourraient le laisser supposer. Les comportements que nous observons sont le fruit de combinaisons entre, d'une part, les mécanismes profondément enracinés et développés au fil de l'évolution qui régissent nombre de nos réponses à différentes situations, et, d'autre part, des calculs raisonnés émanant du cortex préfrontal. Si l'on ajoute à ce constat celui de l'importance de l'influence que les émotions exercent sur le comportement, on voit qu'il n'est pas raisonnable de réduire les comportements humains à de simples problèmes d'optimisation.

Cela nous amène à penser qu'il y a un problème fondamental dans le fait de considérer l'activité économique, au niveau macro aussi bien que micro, comme le résultat d'un processus de calcul rigoureux et complexe. De ce fait, le modèle de base que nous utilisons pour justifier notre analyse des comportements économiques et sociaux pourrait bien être irrémédiablement entaché d'erreur. Comprendre la manière dont les êtres humains réagissent à leur environnement, qu'il soit économique ou social, nécessite donc de revoir nos axiomes de base. Si nous voulons pouvoir construire des modélisations multi-agents raisonnables, par exemple, nous devrions fonder les règles que nous attribuons aux individus sur des bases conformes à notre connaissance, aussi imparfaite soit-elle, des mécanismes neuronaux qui régissent l'activité consistant à opérer des choix.

Cela étant, il existe un autre motif fondamental de s'intéresser au cerveau. En effet, sa structure même et la manière dont l'interaction entre les neurones commande les décisions qu'il nous amène à prendre pourraient peut-être apporter des informations plus éclairantes sur la manière dont l'économie fonctionne. Car ainsi que l'a déclaré Bob Shiller, lauréat du prix Nobel et invité du programme NAEC :

*« Une économie est une structure remarquablement complexe. L'analogie entre le cerveau et l'ordinateur est bien connue, mais on pourrait faire la même entre le cerveau et l'économie, qui n'est rien d'autre qu'un réseau d'individus communiquant entre eux à l'aide de connexions, électroniques et autres. En mobilisant les connaissances plus grandes que nous avons du cerveau et des ordinateurs, on pourrait peut-être mieux comprendre l'économie. »*

S'appuyant sur ces évolutions, le NAEC a organisé une conférence à laquelle ont contribué certaines des plus grandes sommités de la neuroéconomie, de même qu'une autre conférence avec le consortium de recherche européen NEUREX, et il entend poursuivre ses échanges avec des neuroscientifiques appartenant à ce consortium ainsi qu'au groupe de l'Université de Strasbourg et au laboratoire Neurospin de Paris Saclay.

## 5. Le Laboratoire d'innovation NAEC

Le Laboratoire d'innovation NAEC (le LAB) a été créé pour offrir aux chercheurs de l'OCDE un espace où ils peuvent travailler ensemble sur des projets spécifiques permettant d'appliquer et d'expérimenter de nouveaux outils et techniques d'analyse. Grâce à lui, l'OCDE va pouvoir renforcer et diversifier ses grilles d'analyse et ses connaissances en la matière. Certaines directions ont déjà commencé à mener des projets à petite échelle pour étudier de nouveaux outils et techniques. Ces projets comportent peut-être un élément de risque plus important que si l'on s'en tenait aux techniques existantes, mais ils pourraient bien donner des résultats très supérieurs. En effet, les investigations et expérimentations menées à petite échelle et dans un environnement sécurisé peuvent inciter à passer à la phase d'expérimentation requise, et le fait de travailler avec d'autres permet de diffuser les enseignements tirés des expériences menées. En tant que plateforme propice à la collaboration avec des communautés élargies, le LAB peut aussi favoriser la création de liens qui permettront d'utiliser des savoir-faire et des données provenant de sources extérieures à l'OCDE.

Les projets en cours s'articulent autour de quatre grands domaines : apprentissage automatique, données massives, modélisation multi-agents et autres approches expérimentales. Dans le champ de la modélisation multi-agents, un projet consistant à étudier les interactions financières et les effets de réseau

dans l'économie mondiale est actuellement mené. Après la crise financière de 2008, il est en effet important de comprendre ce que sont les réseaux financiers et la résilience du système financier.

Des techniques d'apprentissage automatique sont actuellement en cours de mise au point pour améliorer la prévision macroéconomique à court terme et comprendre les interactions non linéaires pouvant exister entre des politiques visant à stimuler la croissance d'une part et des résultats sur le plan de la croissance inclusive d'autre part. Ces recherches peuvent ouvrir de nouvelles pistes sur les moyens de présenter aux pays des conseils sur les politiques à suivre obtenus par modélisation qui soient mieux adaptés à leur situation propre. Parallèlement, on utilise des approches faisant appel aux données massives pour comprendre l'effet des évolutions technologiques, des échanges et des chaînes de valeur mondiale sur les prix, et les implications qui en découlent en termes de bien-être.

Venant s'ajouter aux initiatives déjà lancées au sein de l'OCDE, le LAB a commencé à organiser des manifestations, par exemple des ateliers consacrés à la modélisation multi-agents pour les marchés du travail et les marchés de capitaux, l'apprentissage automatique et la prévision, ou des introductions à l'apprentissage automatique. Un espace physique ouvrira en novembre 2019 dans le bâtiment Boulogne de l'OCDE, et le NAEC a récemment publié une vacance d'emploi pour un poste de chargé de recherche qui aura pour mission de mener plus avant les approches pluridisciplinaires de la science économique.

Parmi les projets actuellement menés au sein du Laboratoire d'innovation NAEC, on peut citer :

- L'utilisation de la modélisation multi-agents aux fins de l'analyse des interactions financières et des effets de réseau dans l'économie mondiale, à partir d'une représentation stylisée du système financier et du comportement d'agents clés. Ces recherches visent à mettre en lumière les retombées des politiques publiques et à montrer comment l'action publique et les institutions affectent la résilience.
- L'utilisation des techniques d'apprentissage automatique pour améliorer la prospective/prévision en temps réel dans le domaine macroéconomique, et comprendre les interactions linéaires entre les politiques publiques visant à stimuler la croissance et les résultats en termes de croissance inclusive, de façon à permettre de dégager des interactions significatives entre les politiques publiques, et avec les contextes nationaux spécifiques. Ces travaux ouvrent la voie à la définition de conseils à l'intention des pouvoirs publics établis à partir de modélisations et mieux ciblés sur les circonstances propres aux pays considérés.
- L'utilisation d'approches fondées sur les données massives pour comprendre comment les prix sont affectés par l'évolution technologique et l'exposition aux échanges et aux chaînes de valeur mondiales, avec les conséquences que cela implique en termes de bien-être et de définition de l'action publique.