

où il n'y aurait pas de projet d'aménagement ou de mesures de compensation.

Aux États-Unis, l'objectif d'absence de perte nette a été adopté en 1989 pour faire face à la disparition rapide des zones humides. Cela s'est traduit par le développement de méthodes d'évaluation de l'équivalence écologique entre les zones humides perturbées par des aménagements et celles restaurées en compensation, la clarification progressive des responsabilités dans la mise en œuvre des mesures, l'émergence de dispositifs de financement assurant la protection à long terme des zones humides restaurées, etc.

Aujourd'hui, les États-Unis privilégient des solutions intégrées de compensation où une grande zone humide est restaurée par un opérateur spécialisé, lequel vend ensuite la compensation à de multiples porteurs de projets, avant même que leurs impacts soient effectifs. Ce système est qualifié de « banque de compensation ».

La France expérimente cette solution depuis 2008, lorsqu'a débuté la re-création par CDC Biodiversité (une filiale de la Caisse des dépôts et consignations) de plus de 300 hectares d'habitat pour l'avifaune steppique sur le site de Cossure, dans les Bouches-du-Rhône.

En dehors de ce type d'expérimentation, il n'existe pas en France et dans de nombreux autres pays d'offre de compensation. Les aménageurs doivent alors définir leurs compensations au cas par cas et trouver les terrains et les partenaires nécessaires pour les mettre en œuvre. Or généraliser ce traitement dispersé des impacts au cas par cas conduit à multiplier les intervenants à l'échelle d'un même territoire et à diluer les responsabilités sur l'efficacité du dispositif ERC, tout en générant des coûts importants, notamment pour les services de l'État en charge du contrôle des mesures compensatoires. Dans ce contexte, il est urgent de trouver des solutions techniques et organisationnelles permettant d'appliquer effectivement et efficacement la séquence ERC.

La compensation est un outil de plus à notre disposition pour traiter nos impacts sur la biodiversité, mais que l'on doit manier avec précaution. Elle peut être utilisée à tort pour justifier des projets dont les impacts résiduels constituent un risque inacceptable pour la biodiversité. Mais une opposition de principe



L'EXPLOITATION D'UNE CARRIÈRE À CIEL OUVERT, comme ici dans le massif du Taunus, en Allemagne, a inévitablement des impacts environnementaux négatifs. Ces derniers doivent être compensés par des gains environnementaux au moins équivalents. La réglementation l'exige et les méthodologies existent, mais en a-t-on les moyens et la volonté ?

■ LES AUTEURS



Céline JACOB est doctorante au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, à Montpellier, et chez Créocéan, société de services et conseils en océanographie.

Fabien QUÉTIER est écologue et directeur d'études chez Biotope, à Mèze.

■ BIBLIOGRAPHIE

H. Levrel *et al.*, *Restaurer la nature pour atténuer les impacts du développement. Analyse des mesures compensatoires pour la biodiversité*, Quæ, 2015.

M. Maron *et al.*, *Stop misuse of biodiversity offsets*, *Nature*, vol. 523, pp. 401-403, 2015.

à la compensation pourrait aussi conduire à maintenir un *statu quo* tout aussi inacceptable : des projets d'aménagement qui ne compensent pas ou mal leurs impacts et contribuent à l'érosion du patrimoine naturel.

Quels que soient les systèmes mis en place, les pouvoirs publics ont un rôle clef à jouer en garantissant la bonne application de la séquence ERC. En particulier, ce sont eux qui déterminent si les impacts résiduels (avant compensation) sont acceptables ou non, fixent les règles de son application et contrôlent le respect des engagements des aménageurs. Malgré les ambitions affichées en 2012 dans la doctrine ERC du ministère de l'Écologie, les exigences concernant l'équivalence écologique (approche pertes-gains, additionnalité, etc.) et la pérennité des mesures (durées d'engagement, maîtrise foncière, garanties financières, etc.) restent très hétérogènes, peu lisibles et souvent mal appliquées. Ces choix reflètent nos priorités dans les arbitrages entre développement économique et conservation de la biodiversité, qu'on ne peut pas toujours concilier. Il faut de la volonté politique pour s'emparer de la séquence ERC et en faire un outil performant. ■



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Sciences économiques : « Il faut passer à des modèles de troisième génération »

Les spécialistes de l'économie et de la finance ne parviennent pas à prévoir les crises et ne s'entendent pas sur les moyens de les juguler. Selon l'éconophysicien Jean-Philippe Bouchaud, leurs modèles sont mal fondés.



Jean-Philippe BOUCHAUD est professeur de physique à l'École polytechnique et président de Capital Fund Management.

En écoutant des débats entre experts, tout un chacun peut constater la relative impuissance des sciences économiques à décrire et comprendre de façon indiscutable la réalité économique et financière, et notamment les crises. Comment progresser ? Physicien de formation, Jean-Philippe Bouchaud milite pour les « modèles fondés sur les agents », où le comportement réel des agents économiques est pris en compte.

POUR LA SCIENCE

Qu'est-ce qu'un modèle économique ou financier ? À quoi servent de tels modèles ?

JEAN-PHILIPPE BOUCHAUD : Comme dans d'autres domaines de la science, un modèle financier ou économique est un ensemble d'hypothèses et de relations censé décrire quantitativement le phénomène (financier ou économique) auquel on s'intéresse. Un modèle se présente alors sous la forme d'un ensemble d'équations que l'on analyse ou dont on détermine les solutions soit mathématiquement (on dit « analytiquement ») quand c'est possible, soit numériquement, à l'aide d'un ordinateur, sinon.

Les modèles financiers ou économiques servent à maintes choses : calculer des risques,

fixer le prix de produits financiers de plus en plus complexes, comprendre comment les transactions sur une matière première vont faire varier son prix, déterminer comment les banques centrales doivent réagir face à de l'inflation ou du chômage, etc. Ils sont au cœur de la gestion du monde économique et financier.

PLS

Existe-t-il des modèles universels, utilisés par tous, ou bien chacun a-t-il le sien ?

J.-P. B. : Dans les décennies 1980 et 1990, tous les modèles financiers utilisés, malgré de petites variantes, se fondaient sur des lois statistiques gaussiennes. C'était ainsi le règne du modèle de Black-Scholes-Merton, conçu vers 1973 et qui suppose que le prix d'un actif financier fluctue de la même façon que le mouvement brownien (mouvement erratique d'une particule microscopique dû aux collisions avec les molécules du milieu).

En macro-économie, tous les modèles sont fondés sur la théorie de l'équilibre général qui suppose notamment que les agents économiques (individus, entreprises, etc.) se comportent rationnellement de façon à maximiser leurs profits et que le marché est « efficace », c'est-à-dire que les prix reflètent fidèlement toute l'information disponible sur les actifs sous-jacents.

Tous ces modèles « de première génération » ont montré leurs limitations, notamment avec le grand krach boursier de 1987 et la crise de 2008. En particulier, les lois gaussiennes se sont révélées inadaptées : elles attribuent une probabilité quasi nulle aux fluctuations de forte amplitude, alors que dans la réalité cette probabilité n'est pas du tout négligeable. Depuis, la recherche s'est orientée vers des modèles de deuxième génération. Ils ont le défaut d'être fondés sur les mêmes principes que les premiers, mais ils intègrent des paramètres supplémentaires que l'on peut calibrer de façon à ce qu'ils s'ajustent au mieux aux données réelles disponibles.

PLS

En quoi ces modèles de deuxième génération sont-ils inadéquats ?

J.-P. B. : Comme ceux de première génération, ce sont des modèles conçus de façon *ad hoc*, choisis surtout parce qu'ils sont mathématiquement traitables et esthétiques, même quand on est conscient qu'ils reposent sur des hypothèses peu réalistes : le marché réel n'est pas efficace, les agents économiques sont loin d'être toujours rationnels, etc. Les modèles économiques ne prévoient pas de crises spontanées ; les crises

sont alors censées se produire uniquement sous l'effet d'événements externes suffisamment importants. Quant aux modèles financiers, ils laissent la place à un calibrage permettant de rendre compte d'une crise, mais ils ne présentent pas de mécanisme interne susceptible de faire émerger une telle situation : là encore, la crise est considérée comme exogène et non endogène, contrairement à ce que l'on constate dans la réalité.

Au mieux, certains de ces modèles sont capables de reproduire un nombre plus ou moins important de phénomènes observés. C'est le cas des modèles de type multifractal, dont Benoît Mandelbrot a été un précurseur. Mais ils ne fournissent qu'une description phénoménologique, pas une compréhension des mécanismes sous-jacents.

PLS

Que faudrait-il faire pour élaborer de meilleurs modèles ?

J.-P. B. : Il faut passer à des modèles de troisième génération, qui ne soient pas postulés *ex nihilo* mais où ce que les agents économiques font réellement est pris en compte à la plus petite échelle. Pour obtenir des modèles réalistes et offrant une compréhension des phénomènes économiques ou financiers, on doit partir de l'échelle microscopique et aller vers l'échelle macroscopique. Une telle démarche est très naturelle en physique où, par exemple, la transition brutale entre un état aimanté de la matière et un état non aimanté s'explique à partir du comportement statistique de chacun des aimants atomiques et de leurs interactions.

De tels modèles fondés sur les agents permettraient d'identifier les mécanismes en jeu, de comprendre qualitativement les valeurs des paramètres pertinents à l'échelle macro-économique ainsi que les façons dont une crise peut survenir.

PLS

Le fait que le comportement des agents économiques ne soit pas forcément rationnel a été souligné depuis longtemps. Pourquoi n'est-il toujours pas pris en compte ?

J.-P. B. : L'attitude des économistes vis-à-vis de cela et des autres lacunes de la modélisation est assez curieuse. Individuellement, chacun admet que la modélisation actuelle a de graves

défauts ; mais collectivement, la communauté des spécialistes reste très conservatrice et continue à suivre son approche traditionnelle, qui met plus l'accent sur de belles mathématiques que sur l'adéquation à la réalité.

PLS

Cela ne s'expliquerait-il pas par la difficulté technique à modéliser selon une approche micro-macro ?

J.-P. B. : Effectivement, c'est plus difficile. Quand on part de l'échelle microscopique, qui implique un grand nombre d'agents individuels en interaction, en vue de reproduire ou d'analyser un phénomène macroscopique, on ne sait généralement plus le faire de façon analytique, avec de jolies mathématiques. Mais

PLS

Et en économie ou en finance ?

J.-P. B. : Ce n'est pas du tout le cas. La pratique des simulations numériques y est encore très marginale. Dans ces domaines, il n'y a qu'une dizaine d'équipes dans le monde qui font de la simulation numérique avec des modèles fondés sur les agents. Comme l'ont souligné en 2009 J. Dooyne Farmer et Duncan Foley, économistes à Oxford et à l'institut Santa Fe aux États-Unis, les budgets correspondants sont de l'ordre de quelques millions d'euros, alors que ceux qui ont été mobilisés depuis les années 1950 pour simuler les conditions météorologiques se chiffrent en milliards ! On ne peut pourtant pas dire que l'économie est un domaine moins important que le temps qu'il fera demain...



LA STATISTIQUE DES FLUCTUATIONS DES COURS est en général décrite par des modèles qui sous-estiment la probabilité des événements rares, ou qui ne font que s'ajuster aux données sans pouvoir expliquer les mécanismes qui les produisent. Pour y remédier, les économophysiens élaborent des modèles fondés sur le comportement réel d'agents économiques en interaction.

il est possible de faire des simulations numériques. Elles constituent une sorte d'expérimentation très utile, permettant de travailler sur un grand nombre de données qui portent sur des échelles de temps très variées, allant de la milliseconde à l'année et plus. En effectuant des allers et retours entre simulations, analyse des données, calculs analytiques et modélisation, on arrive à avancer. En physique, on a l'habitude des « expériences numériques » depuis au moins les années 1980 (les premières simulations numériques datent de la Seconde Guerre mondiale).

Cela explique en partie pourquoi les travaux relatifs aux modèles fondés sur les agents sont très peu représentés dans les revues professionnelles d'économie les plus en vue. Une autre raison est que cette approche fondée sur les agents n'est pas dans la culture dominante du milieu des économistes, lesquels rechignent donc à publier des études qui en relèvent. Moi-même, par exemple, je n'ai jamais réussi à publier un article dans ces revues.

Mais les choses devraient changer dans le bon sens d'ici quelques années, notamment sous l'impulsion des jeunes étudiants en économie,

dont une partie pousse à la rénovation de leurs enseignements, en particulier pour y inclure la simulation numérique.

PLS

Des modèles plus réalistes empêcheraient-ils des crises financières ou économiques de survenir ?

J.-P. B. : D'une part, il faut avoir conscience que les réglementations comptables, par exemple celle sur la valorisation des portefeuilles, sont calées sur les modèles actuels, qui ne prennent pas en compte les effets de rétroaction. Ainsi, quand le prix des actifs baisse, la valeur du portefeuille diminue, ce qui incite à la vente des actifs, d'où une baisse supplémentaire des prix, et ainsi de suite. On a là un mécanisme d'instabilité qui explique en partie la crise de 2008 et contre lequel la réglementation ne prévoit pas de parades. Si les modèles étaient plus réalistes, les réglementations seraient mieux adaptées... D'autre part, les modèles actuels, en attribuant aux crises des causes exogènes et en supposant qu'il y a toujours retour spontané vers l'équilibre, sont tellement tranquilisants qu'ils font baisser la garde. Avec de meilleurs modèles, prenant en compte la possibilité de crises endogènes, le secteur économique et financier serait plus prudent. De toute façon, ça ne pourra pas être pire que maintenant.

PLS

Dans quelle mesure les modèles influent-ils sur le marché ?

J.-P. B. : Il est clair que les modèles influent sur le marché puisque, comme je l'ai expliqué, les réglementations (et, plus largement, la politique économique) en dépendent. Par exemple, les modèles classiques utilisés par les banques centrales pour déterminer leurs taux directeurs prédisent qu'une banque centrale doit réagir fortement à une fluctuation de l'inflation ou du taux de chômage. Or avec un modèle simplifié fondé sur les agents, nos simulations ont montré au contraire qu'une surréaction déstabilise l'économie ! Un autre exemple est le krach de 1987, pour lequel il est aujourd'hui clair qu'il a été provoqué par une rétroaction du modèle de Black-Scholes-Merton sur les cours. L'un des principaux objectifs de la recherche actuelle en économie et en finance est

de comprendre les rétroactions, qu'elles soient ou non dues aux modèles.

PLS

Quelle place ont les « économphysiciens » comme vous dans le monde financier et économique ?

J.-P. B. : Les physiciens qui font des recherches économiques ou financières sont encore peu nombreux, bien que ce soit difficile à quantifier. Mais surtout, leur place dans ces domaines est marginale. En partie pour des raisons institutionnelles, puisque ces chercheurs sont à la frontière entre deux disciplines bien établies, et que l'interdisciplinarité,

Le physicien accorde la primauté aux données, alors que l'économiste préfère souvent un modèle préconçu.

en théorie souhaitée par les institutions, est peu établie dans les faits. Et il y a des obstacles d'ordre psychologique, la démarche des physiciens étant très différente. Au lieu de calibrer des modèles sur les données disponibles, comme le font les économistes et ce qu'il est toujours possible de faire (« Avec suffisamment de paramètres, on peut modéliser un éléphant »), les physiciens sont bien entraînés à examiner des données et à les analyser sans *a priori* sur les outils requis. En d'autres termes, le physicien accorde la primauté aux données d'observation, alors que l'économiste préfère souvent un modèle préconçu. De plus, le physicien est habitué à essayer de comprendre un système macroscopique à partir d'une analyse de ses constituants microscopiques, ce qui n'est pas dans la culture de l'économiste.

PLS

Après la crise financière de 2008, certains, par exemple l'ancien Premier ministre Michel Rocard, ont publiquement pointé du doigt les mathématiques financières. Trouvez-vous cela justifié ?

J.-P. B. : Les spécialistes de mathématiques financières ont contribué à la crise, mais marginalement. De façon générale, on ne se préoccupait ni des données d'observation ni des impacts

des modèles. Vendre des produits financiers « toxiques » en croyant qu'ils sont peu risqués, c'était une conséquence des modèles rassurants qui constituaient la norme à cette époque. Il faut plus d'esprit critique vis-à-vis des modèles utilisés, et en cela les experts de mathématiques financières ont une responsabilité. Mais ils ne sont pas du tout les seuls, loin de là.

PLS

Il y a quelques années, les médias ont relayé de vives critiques contre le caractère trop mathématique de l'école française d'économie. Qu'en pensez-vous ?

J.-P. B. : De ce point de vue, l'école française d'économie n'est pas du tout la pire, comme l'illustrent des contre-exemples tels que Thomas Piketty ou Esther Dufo. En fait, c'est l'école mondiale d'économie qui est trop mathématisée et axiomatisée, la pire étant celle de Chicago, laquelle a tenu le haut du pavé depuis 50 ans. Par ailleurs, les critiques ne sont pas spécifiques à l'école française : ainsi, à l'université de Manchester, en Grande-Bretagne, un mouvement étudiant, « The Post-Crash Economics Society », tente d'y faire rénover l'enseignement des sciences économiques, accusé d'orthodoxie et de formalisme outrancier, sans lien avec les données du monde réel.

PLS

Le formalisme des sciences économiques n'occulte-t-il pas les présupposés politiques ou idéologiques des économistes eux-mêmes ?

J.-P. B. : Si, certainement. Il y a d'ailleurs une coïncidence très frappante entre la période de la guerre froide et celle où s'est développée la théorie des marchés efficients. L'école de Chicago s'est épanouie à cette époque et le contexte de guerre froide a probablement joué un rôle. L'antagonisme entre les pays occidentaux, à économie libérale, et les pays communistes, à économie dirigiste, a influencé, inconsciemment ou non, les économistes américains. Plus largement, les présupposés idéologiques font que les spécialistes conçoivent souvent leurs modèles en fonction de ce qu'ils veulent démontrer, et non à partir d'une analyse aussi impartiale que possible de la réalité. ■

Propos recueillis par Maurice MASHAAL