



Too fast, Too furious? Une réflexion historique et contemporaine sur l'emballlement des marchés financiers

Nathalie Oriol¹ et Sébastien Duchêne²

Tantôt fers de lance des révolutions industrielles et autres Trente Glorieuses, tantôt coupables désignés des crises, krachs et autres marasmes économiques, les marchés financiers déchaînent passions et polémiques depuis leur création institutionnelle. Pour autant, sortir de l'abstraction de ce que l'expression « marché financier » induit mène inexorablement à en décrire ses composantes organiques. Les marchés financiers des 18^e et 19^e siècles étaient majoritairement composés de chairs et d'os tant dans les procédures (une négociation directe sur le parquet entre humains triés sur le volet), que dans la transmission de l'information qui y circulait (pigeons voyageurs et autres coursiers à pied ou à cheval). Le 20^e siècle a profondément révolutionné leur physionomie, en mettant progressivement l'humain de côté, afin de favoriser une os-sature bionique. Cela a permis la mise en place de procédures inévitablement plus efficaces, accessibles et véloces, mais également indubitablement plus instables, versatiles et aux conséquences imprévisibles. De quelques échanges par jour au rythme des cigares jetés dans la corbeille, les transactions financières sont progressivement tombées entre les mains de robots aux capacités calculatoires permettant d'automatiser les signaux d'achat et de vente à partir des années 80. La démocratisation du World Wide Web au début du 21^e siècle a donné un souffle inédit à l'intelligence artificielle de *trading*, en permettant d'automatiser jusqu'à la décision d'exécution

1. Maître de conférences en sciences de gestion, Université Côte d'Azur, CNRS, GREDEG, nathalie.oriol@gredeg.cnrs.fr.

2. Chercheur postdoctoral pour le projet « *Behavioral and Experimental Analyses in Macro-finance* », Université Côte d'Azur, CNRS, GREDEG.

des transactions, dernier rare privilège dans le feu de l'action laissé jusqu'alors au trader. En quelques millisecondes, un titre passe aujourd'hui de compte à compte, venant enrichir la masse astronomique des *Big Data* boursières à stocker et à traiter. Cette course aux armements technologiques fait débat et nécessite inévitablement un dialogue transdisciplinaire, particulièrement entre SHS et sciences de l'ingénieur. En effet, les nouvelles technologies, *hardware* et *software* (incluant les algorithmes) façonnent aujourd'hui le maillage interactionnel et donc la socio-économie des marchés financiers. Elles ne sont plus de simples outils facilitateurs de transactions boursières. Elles articulent et modèlent intégralement les propriétés des marchés qu'elles composent, les transformant ainsi en véritables systèmes sociotechniques. Cet article propose de décrire cette évolution historique, et de faire un état des lieux sur les capacités mais aussi les besoins des sciences économiques et des sciences de gestion dans l'analyse des marchés financiers contemporains.

Les SI et les transformations contemporaines des marchés financiers

La recherche en systèmes d'information est un sous-domaine de plus en plus éprouvé en sciences de gestion et en sciences économiques³. L'informatique décisionnelle a en effet investi à la fois l'organisation interne des entreprises et des institutions, mais également l'architecture externe des marchés où ont lieu les transactions. Les marchés financiers ne font pas exception et font apparaître deux formes de systèmes d'information qui concourent à l'articulation entre nouvelles stratégies de *trading* et dynamique des prix des titres. D'une part, les systèmes opérationnels, qualifiés ici de « systèmes de traitement transactionnel » (STT), participent à l'architecture opérationnelle des transactions au niveau macroscopique et donc à l'appariement des marchés. D'autre part, le recours à des systèmes d'information d'aide à la décision (SAD) se multiplie comme aide externe aux décisions de *trading*. Dans les deux cas, nous sommes face à deux formes de changement technologique distinctes qui méritent d'être décrites ici : des marchés en réorganisation sur la base de marchés virtuels avec des carnets d'ordres devenus électroniques (STT) et des investisseurs utilisant des systèmes algorithmiques d'aide à la décision pour automatiser leurs pratiques de *trading* (SAD) (Jain, 2005). Ces deux formes de SI ont évolué de manière parfois concomitante et souvent séquentielle au cours notamment du 20^e siècle, transformant en profondeur les interactions et les caractéristiques des dynamiques de prix.

3. En France, l'AIM (Association information et management) regroupe les chercheurs spécialisés dans les systèmes d'information, à majorité gestionnaires. L'AFREN (Association française de recherche en économie du numérique) regroupe les chercheurs spécialisés dans le numérique, à majorité économistes.

Transformation de l'architecture des marchés financiers

Les premières formes officielles d'organisation d'échanges d'actifs financiers ont vu le jour au 17^e siècle au sein des Provinces-Unies (Pays-Bas actuels). L'agencement d'origine, dont le schéma a ensuite été dupliqué en Europe et outre-Atlantique, s'est voulu conduit par la nécessité de centralisation physique des échanges. Les achats et ventes sur titres devenant rapidement une activité quotidienne et continue, il fut nécessaire d'établir des lieux dédiés de cotation et de négociation – les bourses de valeurs, appelées parquets –, où se retrouvaient des professionnels dédiés, qualifiés alors d'agents de change et dont le statut s'est rapidement institutionnalisé. Les traders historiques étaient alors caractérisés par leur appartenance à une caste d'exception, dont le roulement très réglementé sur la base d'un *numerus clausus* strict, s'effectuait par cooptation ou par héritage familial (Godechot, Hassoun, Muniesa, 2000). Les transactions étaient donc éminemment humaines et conversationnelles (Preda, 2006) et les feuilles de papier permettaient la mémorisation et le suivi des échanges. Les événements politiques et économiques des sociétés dont les titres s'échangeaient étaient le principal vecteur de ces échanges conversationnels.

(i) Décloisonnement géographique

L'un des principaux changements a été déclenché par une innovation adoptée à la fin du 19^e siècle par les bourses américaines, puis européennes : le *ticker*, système de transmission par télégraphe des cotations boursières, automatisant donc la retranscription des échanges et des prix. Cette invention a non seulement modifié l'architecture des échanges en permettant la décentralisation (les bureaux de courtiers, extérieurs aux murs de la Bourse, devenant eux-mêmes des centres de communications où les traders surveillaient les cours), mais également en initiant la possibilité d'observer l'historique de la dynamique des prix. Cette dernière est devenue ainsi une information utilisée et retraitée par les traders, au même titre que les nouvelles politiques ou macroéconomiques, à des fins de passage d'ordre, induisant de fait une forme de réflexivité sur les dynamiques de prix. Cette étape a également marqué une accélération de la connexion (et donc de la contagion) entre les différentes places boursières⁴. Dans les années 20, le *ticker* sur bande papier a laissé la place au *ticker* « animé » sur la Bourse de New York, permettant la projection sur écran en temps réel de la bande du *ticker*. Dans les années 70, la société Bloomberg a été pionnière dans le domaine de l'innovation des systèmes d'information fondés sur les écrans, en permettant l'interconnectivité entre les ordinateurs individuels qui commençaient à se développer au sein des *desks* et des terminaux d'informations boursières. Les cours sont devenus accessibles sans contrainte géographique et avec une actualisation en temps réel à une minute d'intervalle. La première bourse totalement électronique a vu le jour en 1971 avec le Nasdaq, marquant le déclin du parquet.

4. « Les délais pour répercuter les cours de céréales entre la place de marché de Buffalo au Texas et celle de New York passent de quatre jours en 1846 à quelques minutes en 1910 » (Bouron, 2017).

(ii) *Démultiplication des volumes traités*

Les systèmes d'automatisation des transactions et de diffusion de l'information composant les infrastructures de marché se sont progressivement étendus à l'Europe au cours des années 80 (SEAQ – *Stock Exchange Automated Quotation* – sur le London Stock Exchange ou le système CAC – Cotation assistée en continu – sur la bourse de Paris). Grâce à cette automatisation, les institutions ont évolué avec la fin progressive des bourses mutualistes, des monopoles sur *trading* (comme celui des agents de change parisiens). L'organisation au sein des *desks* a également été profondément impactée avec l'avènement du *program trading* (logiciels d'achats/ventes automatiques de titres), particulièrement facilité sur le NYSE par l'implémentation du système transactionnel DOT (*Designated Order Turnaround*) autorisant la transmission de larges volumes d'ordres.

(iii) *Débridage de la vitesse des transactions*

Les années 2000 ont marqué un véritable tournant, notamment sur le plan des marchés européens et américains avec l'introduction d'un nouveau cadre réglementaire (*National Market System Regulation* aux États-Unis et directive Marchés d'instruments financiers – MIF – en Europe, toutes deux opérationnelles en 2007) favorisant notamment la concurrence entre les plateformes d'appariement des ordres. Dans ce contexte, les pratiques se sont modifiées : impossible pour un être humain de gérer un portefeuille sur des places démultipliées, fragmentées et interconnectées tout en analysant toute l'information disponible en continu. Parmi les facteurs de différenciation, la vitesse a donc été une arme concurrentielle de taille, surtout lorsque l'on sait que les plus-values appartiennent toujours à ceux qui ont détecté les futures tendances les premiers. La réduction des pas de cotation (nombre de décimales maximum caractérisant le prix d'un titre) chez certains opérateurs est allée de pair avec un gain de parts de marché, forçant toute concurrence à un alignement et permettant ainsi aux traders de réaliser des transactions sur la base de mouvements de prix de plus en plus fins. D'autres opérateurs – y compris les opérateurs historiques comme le Nasdaq ou le NYSE – ont développé des services d'« ordres flashs⁵ » (service premium payant, autorisant leur souscripteur à voir les ordres en provenance d'autres participants une fraction de seconde avant que ceux-ci ne deviennent publics). Certains courtiers, bénéficiant d'accès directs au marché (par exemple le carnet d'ordres d'Euronext) du fait de leur statut de membre, ont proposé à leurs propres clients de leur faire bénéficier de cet accès (qualifié de DMA, *Direct Market Access*) afin de gagner en vitesse. Enfin, le développement du phénomène de « colocation »⁶, c'est-à-dire le déménagement des serveurs des principales sociétés d'investissement juste

5. http://www.lemonde.fr/economie/infographie/2010/06/18/le-flash-order-un-delit-d-initie-legal_1371452_3234.html

6. <http://www.agefi.fr/articles/nyse-euronext-se-lance-dans-la-colocation-de-centre-de-donnees-1132036.html>

à côté des serveurs des bourses, s'est développé parmi les sociétés d'investissement afin de réduire au maximum les délais de transmission.

Évolution des systèmes d'aide aux décisions de trading

Cette évolution vers une finance institutionnelle hyperconnectée et fondée sur la vitesse ne s'est pas faite sans modifier considérablement les pratiques des utilisateurs directs de ces services, et en particulier celles des traders. L'adoption de nouveaux outils d'informatique décisionnelle a non seulement profondément changé l'organisation opérationnelle de l'activité de *trading*, mais également les « croyances ⁷ » des traders. Sur le plan opérationnel, l'activité du trader consiste à prendre des positions d'achats ou de ventes sur le marché. Il doit réaliser des transactions en optimisant un portefeuille de titres financiers – celui de son employeur ou celui de son client. Il détermine en continu le couple rendement-risque lié aux titres détenus. Plus sa position induit une exposition au risque de perte en capital importante, plus les possibilités de performance en cas de réussite sont élevées afin de rémunérer le risque pris. Formellement et historiquement, le *trading* a toujours reposé sur quatre phases : (1) la collecte de l'information financière (*scanning*), (2) son analyse, (3) la décision de prise de position en découlant (passage d'ordre), puis (4) la phase de *feedback* où l'on obtient les résultats de sa transaction (Arena, Oriol, Pastorelli, 2013). À l'origine des marchés financiers, l'intervention humaine était exclusive sur chacune de ces tâches. Sur la base des quotidiens économiques, des rumeurs et de quelques graphiques griffonnés sur un bout de papier (puis enrichis de quelques tendances avec le développement des calculatrices), les traders passaient leurs ordres sur le parquet (ou corbeille), salle emblématique où tout se déroulait de manière physique et dans laquelle les émotions, frayeurs et emballements, étaient palpables et non retenus. La numérisation des échanges a permis de routiniser le traitement de volumes d'ordres et de données de plus en plus importants au sein des *desks*. L'adoption globale de la messagerie standardisée SWIFT ou le protocole FIX ⁸ et les partenariats avec des diffuseurs de données de marchés comme Reuters, ont conduit à automatiser le traitement des phases routinières pré- (envoi des ordres aux *brokers*) et post-transaction (*feedback* et règlement/livraison de l'opération) ⁹. En 1979, le premier

7. La croyance, en finance de marché, est un terme éminemment psychologique – sans pour autant y attribuer un certain mysticisme. Ce concept consiste à désigner ce que la masse des investisseurs va considérer comme étant à l'avenir l'ensemble des signaux qu'il faut prendre en compte pour pouvoir réaliser des gains sur le marché. Il s'agit donc d'anticiper aujourd'hui ce qui fera la tendance de demain.

8. La messagerie SWIFT permet d'automatiser la relation des gestionnaires de portefeuille avec les organismes chargés de procéder au paiement et à la livraison (enregistrement comptable) des titres. Cette société appartient à un consortium d'institutions financières. Le protocole FIX a pour but d'automatiser les échanges d'informations entre les traders et les *brokers* qui assurent la connexion aux plateformes d'exécution. Il est en *open source*.

9. Pour une vision plus détaillée de l'historique des marchés financiers, cf. Arena, Oriol, Pastorelli (2013).

logiciel de programmation de *trading*, CompuTrac, développé à partir des capacités calculatoires et de stockage d'un des tout premiers micro-ordinateurs Apple II, fut lancé, marquant le début de l'ère du *trading* algorithmique (*i.e.* achat/vente automatisé d'actifs en bourse par le biais de programmes codés). Les années 80, puis 90, ont démocratisé ce business d'un nouveau genre avec la commercialisation de *program trading* toujours plus innovants, autorisant l'industrialisation de stratégies statistiques de plus en plus évoluées.

La démultiplication de l'information, des instruments et des transactions financières a rapidement rendu la première et la dernière phase humainement ingérables. L'intégration progressive des automates de *trading* a été en premier lieu destinée à couvrir les tâches routinières de *scanning* et de *feedback*, permettant ainsi au trader de se concentrer sur son cœur de métier : l'analyse de l'information et la prise de position (phases 2 et 3). Mais le développement des capacités calculatoires des micro-ordinateurs et des potentialités des logiciels de programmation, permettant de sophistication au maximum des stratégies de *trading* sur la base d'une analyse économétrique élaborée, ont rendu possible le pilotage automatique des deux dernières phases à intervention humaine. Ainsi, formellement, les systèmes d'aide à la décision représentent une partie substantielle du processus de meilleure exécution des ordres. Ces outils sont regroupés sous différentes applications qui constituent l'OMS (*Order Management System*), qui a pour but d'aider le trader à allouer ses ordres de manière optimale. Les outils de *trading* algorithmique avec leur possibilité de paramétrage automatique, ainsi que les systèmes d'alerte, sont des composantes de l'OMS. Leur fonction principale est de supporter les activités routinières du trader. Ces systèmes d'aide à la décision regroupent l'ensemble des technologies de connectivité entre les services. Les systèmes d'information de gestion sont largement utilisés pendant la période post-exécution dans la phase de *feedback* (TCA – *Transaction Cost Analysis*). L'évaluation des coûts implicites et explicites de la transaction passe par le recours à un logiciel de gestion qui génère des résultats quotidiens en identifiant, mesurant et analysant ces coûts *a posteriori*. Des rapports peuvent ensuite être produits et mis à disposition des clients.

Jusqu'à la dernière décennie, le trader avait alors le choix entre le *trading* totalement automatique ou semi-automatique. L'avantage était souvent donné à la version semi-automatique (l'algorithme produisant alertes et points d'entrée utilisés comme dispositifs de suggestion, mais laissant toujours le soin au trader d'appuyer sur le bouton). La complémentarité était alors à son apogée entre l'humain et le robot : l'humain gardant la main, mais laissant le robot canaliser ses émotions (risquant de lui faire perdre le fil rouge de la stratégie élaborée à froid) en le guidant, l'avertissant et lui permettant de « *backtester* » sa stratégie (*i.e.* faire des essais virtuels pour en éprouver la réussite). Mais l'explosion du *trading* haute fréquence, imposant un temps de réaction de très faible latence et humainement inatteignable, a

conduit/contraint à passer d'un usage-support à un usage-substitut. Le trader haute-fréquence se situe aujourd'hui en dehors du processus de *trading*, programmant seulement en amont l'intégralité des paramètres de l'algorithme qui deviendra alors autonome sur la base des instructions qu'on lui aura données. Ces stratégies de *trading* sont aujourd'hui estimées à près de 60 à 70 % des volumes de transactions aux États-Unis, et en Europe¹⁰.

Les enjeux de recherche

Dans ce contexte de transformation profonde des échanges financiers, la dynamique de prix des titres (donc à l'échelle macroscopique) a également connu de grands bouleversements. De nouvelles formes d'instabilité sont apparues, laissant supposer un lien avec ces innovations. Toutefois, pour en établir la démonstration rigoureuse, il faut nous intéresser à l'utilité et la portée des outils classiques en économie et en gestion.

Nouvelles formes d'instabilité

Jusqu'à la première moitié du 20^e siècle, la technologie était faiblement intégrée au sein des activités boursières. Les différents épisodes historiques de krachs (Tulipomanie, bulle des mers du Sud, krach de 1847 ou krach de 1929 pour les plus connus) étaient issus exclusivement de défaut d'évaluation des acteurs sur une période d'ajustement des prévisions assez longue. La période d'après-guerre est celle de la globalisation et de la désintermédiation financière. Les krachs reposent sur des mécanismes de propagation beaucoup plus importants, mais fondent toujours leurs origines sur des éléments géopolitiques ou d'évaluation. Le profil des krachs commence à se modifier à partir des années 80, lorsque la technologie s'implante plus massivement. Le krach d'octobre 1987 et celui de 1994 sur les marchés américains, bien que portant sur une mécanique et un produit différent, ont tous deux fait émerger de nouveaux responsables s'ajoutant aux problématiques historiques des bulles et de l'évaluation erronée évoquées précédemment : les programmes de *trading* automatique. Ces derniers n'auraient certes pas provoqué, mais contribué à largement amplifier le phénomène de rupture en réagissant automatiquement à une situation non prévue par leur paramétrage.

Avec l'avènement du *trading* haute fréquence, des stratégies de latence et de haut-débit, de nouvelles situations extrêmes sont apparues, certes de courtes durées, mais à la fréquence bien plus élevée. Le plus connu à ce jour est le *flash crash* du 6 mai 2010 aux États-Unis qui s'est concrétisé par une baisse de près de 10 % du marché d'actions new-yorkais en l'espace de dix minutes, retrouvant peu à peu son niveau avant la clôture de la séance. Plus tard, en août 2012, le courtier américain Knight Capital perd 440 millions de dollars et provoque dans la foulée un *flash crash* à la bourse de

10. Security and Exchange Commission, Aite Group, Autorité des marchés financiers.

New York. Un bug, lors de la mise en place d'un nouvel algorithme, avait provoqué l'envoi d'ordres par centaines avant d'être maîtrisé au bout de 40 minutes¹¹. Si ces deux krachs sont les plus emblématiques, ces cas sont loin d'être isolés selon l'étude menée par Nanex (société spécialisée dans la fourniture des données de marché) sur le nombre d'incidents enregistrés depuis 2007¹² (2576 en 2007 contre 254 en 2006 sur le NYSE).

Dans cette nouvelle mécanique de formation des prix, les régulateurs jouent une place centrale et délicate, étant à la fois juges assumés et moteurs involontaires de ces transformations. En favorisant l'ouverture et la décentralisation des marchés, ainsi que la décimalisation des prix¹³, les anciens chantiers réglementaires ont ouvert la porte, pendant les années 2000, à l'expansion massive de ces stratégies (McGowan, 2010). Alors qu'il est aujourd'hui question de réguler ces comportements et de juguler l'instabilité qui semble en découler, la difficulté de la tâche repose à la fois sur le fait de choisir la règle adaptée, mais également sur la faculté à en appréhender l'effet papillon. Les marchés financiers peuvent être, en effet, définis comme des systèmes sociotechniques à la fois complexes et adaptatifs (Sommerville *et al.*, 2012, Cliff & Northrop, 2011), où les dynamiques de prix sont induites par la combinaison des composantes humaines, technologiques et architecturales. Les politiques publiques et les autorités de régulation comme l'Autorité des marchés financiers (AMF) se fondent sur un objectif de marché financier de qualité. Mais cette notion propre aux recherches en finance de marché n'est pas simple à définir, ni à atteindre. En premier lieu car les *proxies* de la qualité d'un marché sont fondés sur des arbitrages entre liquidité, stabilité et efficacité qui sont parfois reliés à des curseurs orthogonaux. En second lieu, il reste difficile de considérer l'optimalité de mécanismes de marchés, dès lors que les parties prenantes ont des stratégies et des influences hétérogènes sur la stabilité des systèmes.

Les outils de recherche en économie et gestion : portées et limites

Les contributions, dans le sous-domaine de l'économie et de la gestion qualifiée de finance de marché, se sont donc surtout traduites par des approches standards fondées sur l'évaluation du prix des actifs et les comportements des investisseurs (Beaufils *et al.*, 2009). Récemment, les travaux émergents en sociologie de la finance (« *social studies of finance* ») ont commencé à s'intéresser aux pratiques professionnelles des traders au-delà de leurs techniques de *trading*; l'esprit de ces contributions étant de développer une approche plus « culturelle » des marchés financiers. En

11. http://www.lemonde.fr/economie/article/2012/08/07/les-deboires-de-knight-capital-specialiste-du-trading-haute-frequence_1743230_3234.html

12. Un incident est enregistré selon les critères suivants : dix prix baissiers en moins de 1.5 secondes avec une variation de prix supérieure à 0.8 %.

13. Régulation consistant à augmenter le nombre de chiffres après la virgule dans le cadre de cotations boursières.

l'état actuel des choses, ces travaux sont encore assez cloisonnés de ceux élaborés par les chercheurs en finance de la section 37 du CNRS. Il existe, bien entendu, des chercheurs de cette section qui travaillent selon des méthodes qualitatives fondées notamment sur les techniques d'entretien. Les résultats sont extrêmement riches en termes d'usages et pratiques des traders¹⁴. Toutefois, l'aspect déclaratif et non lié à des observations *in situ* ne permet pas de construire une démarche permettant de relier les observations microscopiques aux dynamiques macroscopiques telles que l'instabilité des cours.

Les approches quantitatives de la section s'intéressant aux liens micro/macro sur les marchés financiers peuvent se subdiviser en quatre types d'approche : la modélisation centrée-groupe, les études empiriques, la simulation multi-agents ou modélisation centrée-individu) et l'expérimentation en laboratoire. Chacune de ces approches apporte une pierre à l'édifice de la compréhension de la complexité des marchés financiers actuels. Mais chacune présente également des limites et des besoins de complémentarité naturellement associés à leurs démarches scientifiques.

(i) *La modélisation centrée-groupe*

Les approches d'optimisation centrées-groupe sont des modèles théoriques où les agents sont homogènes et obéissent aux mêmes règles, et où chacun d'entre eux va chercher à optimiser une fonction d'utilité individuelle (par exemple le couple rendement/risque d'un portefeuille), sous contrainte (degré d'aversion au risque et dotation monétaire initiale). C'est sur ce type d'approche que repose principalement l'école classique de la finance de marché. Les dynamiques de prix sont étudiées comme la résultante de comportements agrégés d'opérateurs rationnels et maximisateurs (Brandouy *et al.*, 2013). Le principal avantage de cette approche est la capacité de ces modèles à formaliser simplement les dynamiques macroscopiques en identifiant l'ensemble des curseurs agrégés influençant l'offre et la demande sur un marché. La méthode offre également la possibilité d'étudier certaines variables d'ajustement en déplaçant lesdits curseurs, les coefficients des équations étant déterminés par calibrage. Les résultats proposés par ces modèles sont essentiellement normatifs : ils permettent d'évaluer des situations d'optimalité et de bien-être théoriques comparativement aux distorsions observées dans la réalité sur un marché. La modélisation des marchés financiers et de leur efficacité proposée par Eugène Fama (1970) en est une illustration capitale. Au sein de ce modèle, les agents connaissent la valeur fondamentale des titres et ont les capacités cognitives suffisantes leur permettant de traiter toute information nouvelle qui en modifierait le niveau. Ce modèle ne tient compte d'aucune incomplétude de ladite information – qui est ici supposée être observable, circuler sans délai et sans disparités entre les investisseurs – ni aucune différenciation de capacité de traitement en termes de temps et de compétences des agents. Ainsi,

14. L'un des numéros de la revue *Economy and Society* en est une illustration majeure (Vol. 45, n° 2, 2016 : *Cultures of High-Frequency Trading*).

les prix des titres suivent une marche aléatoire, corrélée avec l'arrivée d'informations nouvelles et reflètent à tout moment les fondamentaux de l'économie réelle. S'inspirant de l'approche classique, cette hypothèse d'homogénéité absolue entre les agents sera progressivement relaxée dans de nouveaux modèles laissant place à l'émergence de la modélisation de comportements hétérogènes.

Sur la base des travaux fondateurs de Kahneman et Tversky (1979), un axe de recherche qualifié de « Finance comportementale » s'est notamment développé avec pour objectif de mettre en évidence les comportements réels et non rationnels qui permettent de décrire l'apparition d'inefficiences sur les marchés (Aftalion, 2005). Cependant, même en tenant compte d'une certaine forme d'hétérogénéité, son degré doit forcément être restreint pour permettre la résolution mathématique du modèle théorique. À l'heure actuelle, les modèles contemporains s'essayant à l'intégration d'heuristiques dans les modèles classiques d'évaluation des actifs financiers ne sont pas non plus parvenus à la formulation de modèles stabilisés et consensuels. En effet, l'hétérogénéité des investisseurs présente en réalité de multiples dimensions qu'il faudrait pouvoir représenter, au sein d'un seul et même tableau : accès à l'information, capacité de traitement, vitesse de réaction, accès aux différents marchés, dotation financière, aversion pour le risque, phénomènes d'apprentissage... autant de dimensions qui rendent ces modèles centrés-groupe et donc fondés sur des populations moyennes trop simplificateurs lorsqu'il s'agit de faire état de la complexité des marchés financiers. Ce constat est encore plus prégnant à l'heure actuelle, puisqu'aux côtés des traders humains viennent interagir en masse des automates de *trading* dotés chacun d'une stratégie spécifique et à la latence d'action/réaction de plus en plus faible. Par ailleurs, si les approches centrées-groupe permettent de définir les points de convergence des équilibres d'un marché, ils sont par contre impuissants pour en étudier les logiques interactionnistes, sans faire appel à d'autres outils comme la simulation numérique (cf. *iii*). En effet, ces dernières ne sont pas étudiées avec la granularité suffisante pour permettre d'établir un lien entre la dynamique des prix et les relations microscopiques des composantes du marché. Le besoin de simplification permet toutefois de mettre en évidence des mécaniques d'influence isolées entre deux ou plusieurs composantes. Une récente revue de littérature menée par Menkveld (2016) fait notamment le point sur les différents apports de la littérature théorique sur certains *proxies* (paramètre de qualité comme la stabilité ou la liquidité) du marché via l'intégration aux modèles classiques préexistants des paramètres de vitesse concernant certains groupes d'agents. Les résultats, conformément aux portées et limites méthodologiques décrites, ne permettent pas de reconstituer un tableau d'ensemble et d'étudier notamment les logiques interactionnistes. Mais ils permettent par contre d'étudier l'impact d'une caractéristique stratégique d'une population plus rapide que les autres sur un paramètre d'efficacité et de qualité du marché. Leur validité ne peut être, bien sûr, justifiée sans que leur prédiction ne soit adossée à une étude empirique aux résultats convergents. Ce qui conduit ces travaux

et cette méthodologie à entretenir des liens étroits avec les méthodes empiriques décrites ci-après.

(ii) *Les études empiriques*

Aux côtés des théoriciens classiques, nombre de chercheurs en finance de marché sont investis dans les études empiriques reposant sur l'utilisation des méthodes économétriques. L'économétrie financière sur séries chronologiques est composée d'un ensemble d'outils mathématiques, probabilistes et statistiques permettant de modéliser l'évolution dynamique et discrète de phénomènes aléatoires. Comme nous l'avons vu précédemment, la complémentarité principale avec la méthode centrée-groupe est la possibilité de validation empirique des hypothèses et résultats théoriques. Mais l'économétrie n'est pas seulement un outil de validation : c'est également un outil d'investigation autonome dans une démarche positiviste. Son utilisation permet notamment de mettre en évidence des relations non intuitives entre certaines variables et d'établir un ensemble prédictif (donc descriptif) utile aux régulateurs. Cependant, les approches les plus empiriques qui considèrent la vitesse associée aux nouvelles technologies de *trading* sont très contrastées dans leurs résultats et éminemment focalisées sur une variable à expliquer, elle-même tributaire du contexte d'échantillonnage. Par exemple, certains auteurs se sont intéressés à l'impact de stratégies de colocation sur la qualité des marchés financiers. Alors que certaines études ont mis en évidence des effets positifs sur la liquidité (Boehmer, Fong, Wu, 2015) ; d'autres travaux empiriques y associent des effets négatifs (Hendershott, Moulton, 2011 ; Yao, Ye, Gai, 2013). À ce titre, Foucault (2016) nous invite à la « prudence » quant à l'interprétation de résultats empiriques concernant le *trading* haute-fréquence, soulignant qu'« *il est rare que des chercheurs aient accès à des séries de données dans lesquelles les ordres placés par les tables de négociation de trading haute-fréquence portent une marque qui les distingue des ordres des autres acteurs du marché* », les conduisant à « *recourir à des méthodes indirectes afin de repérer ces ordres* ». De manière plus pragmatique, les études empiriques appliquées aux données financières à très haute fréquence sont confrontées à trois types de contraintes : en premier lieu, la difficulté de traiter la masse actuelle des informations disponibles ; en second lieu, le caractère elliptique de ces données (absence de marquage précis des traders par type stratégique, ou incomplétude des transactions réalisées du fait d'un *reporting* réglementaire partiel) ; et enfin, l'objet de l'étude lui-même (l'étude de phénomènes financiers à haute-fréquence) générant des données par nature fortement bruitées, corrélées, non gaussiennes et de grande dimension. Si les liens entre composantes microscopiques, leurs interactions et les dynamiques de prix observées sont investigués via ces méthodes empiriques, il reste difficile d'en extraire des lois généralistes et récurrentes au regard des limitations qui viennent d'être évoquées.

(iii) *La simulation multi-agents (SMA)*

La complexité du marché financier et le *trading* haute fréquence requièrent un outil permettant de prendre en compte les caractéristiques individuelles des agents avec une granularité fine. En outre, si l'on souhaite établir un lien entre ces caractéristiques individuelles et les dynamiques de prix, il faut également pouvoir étudier la logique interactionnelle qui lie des individus/automates. À ce titre, la modélisation centrée-individu (où chaque agent dispose de ses propres caractéristiques) présente de nombreux avantages. La simulation est un outil de modélisation, qui dépasse la fonction de prédiction d'un modèle standard, et qui est assimilable à une « expérience virtuelle » (Carley, 2001), à une « carte » de la réalité qui permet de faire apparaître des éléments non-observables *a priori* (Cartier, 2003) ou encore à une « caricature » de la réalité qui donne une meilleure représentation au chercheur qu'une photographie (Roy, 2002). La simulation se distingue des modèles mathématiques plus traditionnels qui sont souvent associés à une démarche réductionniste, qui impose un ensemble d'hypothèses restrictives et irréalistes (exemples : linéarité des équations de comportement, hypothèse réductrice de rationalité parfaite des agents, ou encore homogénéité des comportements humains). Il existe un certain nombre de langages informatiques permettant la reproduction de marchés financiers artificiels (MATLAB, NetLogo, Fortran pour les plus connus). À titre d'illustration, le logiciel **ArTificial Open Market (ATOM¹⁵)** (Brandouy *et al.* 2013) a été utilisé, par l'un des auteurs, au sein de plusieurs collaborations scientifiques¹⁶. Ce logiciel offre une grande souplesse dans l'individualisation des procédures, aussi bien au niveau de la microstructure qu'au niveau des pratiques de *trading*. La plateforme est alimentée par trois univers (cf., Beaufils *et al.*, 2009) :

- Le monde extérieur (évolution des agrégats macroéconomiques et de la valeur intrinsèque des titres échangés) ;
- Les agents – ici, les traders – dont le profil hétérogène intégrant le recours à des systèmes d'aide à la décision plus ou moins automatisés génère différentes pratiques de *trading* ;
- La microstructure du marché, c'est-à-dire le choix des mécanismes permettant l'exécution des ordres (ici, une double enchère continue).

Comme les autres approches, cet outil connaît quelques limites. En premier lieu, il n'existe pas de modèles théoriques suffisamment puissants pour établir les fondements de l'hétérogénéité des agents représentée au sein des simulations. En second lieu et de manière liée, la validation des modèles centrés-individu par leur capacité à reproduire certains faits stylisés (notamment les statistiques descriptives de certaines dynamiques de prix observées dans le réel), n'est pas complètement satisfaisante. En effet, une multiplicité d'états différents des composantes individuelles peut générer

15. <http://atom.univ-lille1.fr/>

16. Veryzhenko *et al.* (2017a), Veryzhenko *et al.* (2017b), Veryzhenko (2016a), Veryzhenko (2016b).

les mêmes propriétés statistiques, c'est-à-dire le même état du macro-modèle (Boulangier et Bréchet 2003). Il est donc difficile de justifier une simulation comme une représentation correcte d'une réalité complexe simplement parce qu'elle reproduit des faits stylisés. Il faudrait alors déterminer empiriquement avec un certain degré de précision et de complétude quelles sont les différentes populations de traders interagissant à un moment donné et sur une place donnée (comme par exemple le *flash crash* du 6 mai 2010). Par ailleurs, la simulation se heurte à des questions d'ordre strictement méthodologique : la complexité des codes et l'utilisation de différents logiciels posent la question de leur évaluation. Aujourd'hui, il est facile pour la communauté de la section 37 d'évaluer un modèle théorique, mais compliqué d'évaluer un code dont le rapporteur ne connaît souvent pas le langage.

Pendant, outre la possibilité qu'offre cette méthodologie d'étudier avec une granularité fine les liens entre les composantes d'un système, leurs interactions et les dynamiques macroscopiques émergentes, la simulation multi-agents est un puissant outil pour le régulateur. En effet, il permet également, en modifiant certaines règles des simulations effectuées, de réaliser tests et expériences réglementaires afin d'en apprécier les effets sous les mêmes conditions initiales. Il représente alors un terrain idéal pour réaliser des études d'impact des politiques publiques via la méthode des doubles différences.

(iv) *L'expérimentation*

Lorsque la SMA permet d'étudier l'interaction entre des agents « fictifs » ayant des règles de décisions simples puis d'analyser les dynamiques qui en résultent, l'expérimentation en laboratoire permet d'observer des individus « réels » dans un environnement contrôlé (valeur fondamentale des actifs déterminée à l'avance, information disponible pour tous, ou non selon les questions de recherche, règles d'échanges connue de tous). Plus particulièrement, la finance expérimentale consiste majoritairement à répliquer dans un laboratoire un marché financier artificiel dans lequel la présence d'incitations monétaires, réelles et saillantes respecte le domaine d'application de toute théorie économique (Smith, 1976). Les sujets, souvent étudiants à l'université, parfois professionnels, sont invités à échanger un ou des actifs de marché, tels que des actions, obligations ou produits dérivés, pendant une durée limitée. Le laboratoire offre également l'opportunité de mesurer des variables « cachées » et pertinentes dans le processus de décision, telles que les préférences des individus vis-à-vis du risque, leurs croyances (sur les prix futurs, sur le comportement des autres acteurs, etc.) ou leurs capacités cognitives (tests de mémoire, de calcul, de logique, de gestion émotionnelle, etc.).

En contrôlant parfaitement l'environnement dans lequel opèrent les sujets et en assignant de manière indépendante et aléatoire ces sujets à une variation de certains paramètres (traitement), il est possible d'identifier précisément l'impact de ces variables sur les comportements individuels (décisions de ventes et d'achats, prévisions de prix) et sur les dynamiques collectives (variations des prix, volatilité...). Cette

démarche a fait ses preuves car elle permet (i) d'observer et de quantifier l'hétérogénéité des individus dans leurs prises de décisions individuelles, (ii) d'appréhender certaines formes de décisions qualifiées d'irrationnelles et jusqu'alors non anticipées par les modèles théoriques et (iii) d'examiner les interactions entre agents « réels », à partir de l'étude de variables agrégées. Cette méthodologie, qui s'inspire des démarches expérimentales en physique et en biologie, est une étape nécessaire à la compréhension du vivant à l'origine des processus spéculatifs boursiers.

Cette démarche expérimentale, portée par les prix Nobel Daniel Kahneman et Vernon Smith (2002) ainsi que Richard Thaler (2017), n'a de sens que lorsqu'elle s'inscrit dans une approche multi-méthodologique beaucoup plus globale. Tout d'abord, la simulation multi-agents offre une complémentarité particulièrement forte. En effet, lors de la conception d'une expérience, la SMA permet de tester certaines interactions, différents niveaux d'hétérogénéité, d'anticiper quelles pourraient être les variables susceptibles d'influencer tel ou tel phénomène à l'étude. Elle est donc un point d'entrée permettant de paramétrer l'expérience et de tester la validité des hypothèses à étudier (pour un exemple, voir Haruvy *et al.*, 2014). Par ailleurs, à l'issue de l'expérience, la SMA permet de répliquer les résultats expérimentaux et ainsi de les valider. C'est la démarche adoptée par Haruvy et Noussair (2006). En effet, la reproductibilité des résultats d'une expérience est une nécessité scientifique que la démarche computationnelle permet d'offrir aisément. Ce faisant, la SMA permet de faire le lien entre les résultats d'une expérience en laboratoire et l'émergence de faits stylisés simulés par ordinateur et souvent observés sur les marchés financiers. De façon symétrique, l'expérience en laboratoire permet également de valider la qualité et la robustesse des modèles multi-agents en question. Par ailleurs, la finance expérimentale est une démarche permettant de tester simplement des modèles théoriques proposés en finance. Son objectif est double. Offrir des données de meilleure qualité (car de nombreux paramètres sont contrôlés puis mesurés) permettant de confronter différents modèles analytiques et computationnels, validant ou infirmant certaines théories, puis proposer de nouvelles modélisations souvent complexes à l'aide de modèles multi-agents ou évolutionnistes. Enfin, le lien entre études empiriques et expériences en laboratoire est particulièrement fort. En effet, chacune des deux méthodes permet d'identifier de façon complémentaire des relations entre plusieurs variables, sous forme de corrélation ou de causalité. Il est d'ailleurs intéressant de noter que la complexité des analyses statistiques et économétriques sur les variables observées en laboratoire se rapproche progressivement de celle présente sur les marchés financiers. Si la démarche expérimentale est prometteuse, en particulier lorsqu'elle est complétée par la SMA, qu'elle permet de tester par ailleurs des modèles théoriques et qu'elle s'appuie également sur des études empiriques, elle est cependant confrontée à de nombreuses limites.

Tout d'abord, la majorité des travaux en finance expérimentale est réalisée sur

des étudiants. Or il est probable que les réactions de cette population à des événements de marché soient très différentes de celles observées sur des professionnels du monde de la finance. Peut-on comparer un trader avec un étudiant de 19 ans ? Les recherches actuelles tendent à développer des études sur des traders directement. Cependant, la mise en œuvre est beaucoup plus difficile et coûteuse. Deuxièmement, l'environnement en laboratoire, très simplifié et n'obéissant pas aux mêmes incitations monétaires que dans la réalité, est très éloigné des conditions réelles. En effet, le sujet étudié en laboratoire peut gagner de l'argent mais ne peut en perdre, ce qui est radicalement différent de ce qui se passe sur les marchés financiers. Cette asymétrie génère inévitablement des réactions et des émotions divergentes. Par ailleurs, cette simplicité se traduit également par la construction de marchés financiers fictifs obéissant à quelques règles souvent très simples. Cette simplicité ne permet pas de capturer la complexité des marchés financiers dans leur globalité et constitue donc une première approximation qui reste à améliorer. Cependant, de nombreux travaux en cours sont en train de relever ces défis et les premiers résultats sont très prometteurs.

Ouvertures et complémentarités avec la recherche en sciences computationnelles

Dans un environnement de *Big Data*, les outils d'analyse classiques strictement fondés sur des approches en économie et en management (économétrie et statistiques) ne sont pas suffisamment puissants pour identifier par classe les différents comportements stratégiques et quantifier l'influence des différentes populations de traders sur les caractéristiques des dynamiques de prix. Si elles sont déjà largement étudiées par les sciences computationnelles, les méthodes de *machine learning* ont été récemment identifiées par les SHS comme adaptées au traitement des données à très haute fréquence (Mankad *et al.*, 2013). L'avenir de la recherche publique en finance de marché et au service de l'économie ne peut qu'être le fruit d'une collaboration de long terme avec des chercheurs issus de ces domaines pour développer des outils aptes, sur la base de données financières réelles, à procéder à une identification et classification stratégique des traders à des fins de régulation. Le rôle majeur des interactions inter-équipes reposerait ainsi sur l'idée de faire évoluer la régulation financière – jusqu'alors appréhendée de manière normative et mono-disciplinaire – vers un nouveau paradigme. Sous l'angle de la transdisciplinarité, la régulation financière serait appréhendée comme un bien public, fondée sur l'émergence de normes au sein d'un processus impliquant toutes les parties prenantes (concepteurs d'algorithmes, traders, institutions financières, opérateurs de marché, régulateurs et objectifs de politiques publiques). Intégrer les connaissances et expériences de ces parties prenantes, dans leur histoire et leurs usages, au sein d'un design scientifique unifié, pourrait être la clé pour faire émerger une régulation adaptée à ces transformations. Tout comme la théorie financière s'est intéressée à la psychologie de l'investisseur, les collaborations transdisciplinaires permettraient aux SHS de mieux connaître

la psychologie du concepteur/programmeur des systèmes de *trading*. Sa formation et son expérience (financière ou non) ont-elles une influence sur sa conception des SAD ? Comment conçoit-il le risque alors même qu'il est distancié temporellement et donc émotionnellement de la décision ? La non-neutralité des concepteurs d'algorithmes financiers est un axe de recherche essentiel dans la compréhension des marchés financiers contemporains.

Conclusion

Les marchés financiers contemporains sont devenus des systèmes complexes sociotechniques où l'essentiel des interactions est le fruit d'une intense activité algorithmique. Les dynamiques de prix présentent des caractéristiques inédites, comme l'apparition des phénomènes de *flash crash*. Dans ce contexte fortement induit par les innovations en outils computationnels, les outils et analyses en finance de marché ont besoin de s'enrichir des connaissances et méthodes issues des sciences de l'ingénieur. Au sein de la section 37 du CNRS, les outils et *softwares* mobilisés se heurtent naturellement au phénomène de *Big Data* qui caractérise les données financières actuelles (évolution du prix des titres en volume, sens de l'ordre et horodatage). Toute tentative de reproduire les dynamiques de prix par modélisation théorique centrée-groupe induit inévitablement la simplification. La démarche empirique, quant à elle, consistant à extraire les récurrences ou l'identification des stratégies et interactions qui en sont les sources, reste forcément contrainte par la densité des données à traiter. La simulation multi-agents semble être un compromis intéressant dans ce contexte, favorisant une modélisation centrée-individu forcément plus adaptée à la complexité actuelle. Elle permet également d'étudier les effets potentiels de changements réglementaires. Mais elle pêche à fonder de manière robuste les hypothèses de comportements des agents impliqués dans les interactions, ce que peut au contraire apporter l'expérimentation en laboratoire. C'est pourquoi expérimentation et SMA peuvent être particulièrement complémentaires. À ces limites quantitatives s'ajoutent des limites également disciplinaires en termes d'objet : les sciences de gestion et économiques se concentrent sur les comportements ou failles de *l'homo economicus*. Le concept de rationalité est au cœur des préoccupations de la section. Qu'elle soit complète, limitée ou absente, c'est de cette rationalité dans les prises de décisions que sont déduits les usages, les stratégies et les comportements microscopiques, ainsi que leur impact sur les phénomènes macroscopiques. Or, sur les marchés financiers contemporains, la proportion de robots qui traitent les passages d'ordres peut s'élever jusqu'à 80 % des volumes boursiers générés. La prise de décision ne se situe donc plus au niveau de la décision mais au niveau de l'innovation, de sa conception et de sa programmation *ex ante*. Ainsi, la transdisciplinarité avec les sciences computationnelles n'est pas seulement un moyen de dépasser nos limites méthodologiques via les méthodes de *machine learning*. Au-delà, elle pourrait permettre de

comprendre l'émergence d'un nouveau genre d'agent économique, dont la proximité et la substituabilité avec son système d'information va de pair avec la distanciation de son émotion et de son appréhension du risque de marché : l'*homo numericus* (Cohen, 2012).

Bibliographie

Aftalion, F. (2005), « Le MEDAF et la finance comportementale », *Revue française de gestion*, Vol. 4, n° 157, pp. 203–214.

Arena L., Oriol N. et Pastorelli I., (2013), « Systèmes d'information et gestion du couple performance/sécurité : Trajectoires comparées de trois situations extrêmes », *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 18, n° 1, pp. 87–123.

Bouron, T., (2017), *Innovation, 50 success stories - Ruptures, héritages et coups de génie*, Éditions Dunod, 255 pages.

Beaufils B., Brandouy O., Ma L. et Matthieu P., (2009), « Simuler pour comprendre : un éclairage sur les dynamiques de marchés financiers à l'aide des systèmes multi-agents », *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 14, n° 4, pp. 51–70.

Boehmer E., Fong K. Y. L., Wu, J., (2015), « International Evidence on Algorithmic Trading », AFA San Diego Meetings Paper. Disponible sur SSRN : [<https://ssrn.com/abstract=2022034>].

Brandouy O., Mathieu P. et Veryzhenko I., (2013), « On the Design of Agent-Based Artificial Stock Markets », *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 271, pp. 350–364.

Boulanger, P. M., & Bréchet, T. (2003). « Une analyse comparative des classes de modèles », *Modélisation et aide à la décision pour un développement durable, Action de support PADD I, SSTC*.

Carley, K.M. (2001), *Computational approaches to sociological theorizing*. In J. Turner (Ed.), *Handbook of sociological theory*, New York : Kluwer Academic/Plenum, pp. 69–84.

Cartier M., (2003), *La dynamique de l'adaptation d'industries : Simulation par algorithme génétique*, Thèse de Doctorat en Sciences de Gestion, Université Paris-Dauphine.

Cliff D., Northrop L. (2011), *The Global Financial Markets : An Ultra-Large-Scale Systems Perspective*, UK Government Office for Science, 2011. 47 p.

Cohen, D., (2012), *Homo Economicus, prophète égaré des temps nouveaux*, Éditions Albin Michel.

Fama, E. (1970). « Efficient Capital Markets : A Review of Theory and Empirical Work », *The Journal of Finance*, Vol. 25, n° 2, pp. 383–417.

Foucault T., (2016), « Quels sont les risques du trading haute-fréquence ? », *Revue de la stabilité financière*, n° 20, pp. 63–78.

Godechot O., Hassoun, J-P., Muniesa, F., (2000), « La volatilité des postes. Professionnels des marchés et informatisation », *Actes de la recherche en Sciences Sociales*, Vol. 134, pp. 45–55.

- Haruvy, E., Noussair, C., (2006), « The Effect of Short Selling on Bubbles and Crashes in Experimental Spot Asset Markets », *The Journal of Finance*, Vol. 61, n° 3, pp. 1119–1157.
- Haruvy, E., Noussair, C., Powell, O., (2014), « The impact of Asset Repurchases and Issues in an Experimental Market », *Review of Finance*, Vol. 18, n° 2, pp. 681–713.
- Hendershott, T., Moulton P.C., (2011), « Automation, speed, and stock market quality : The NYSE's Hybrid », *Journal of Financial Markets*, Vol. 14, n° 4, pp. 568–604.
- Jain, P., (2005), « Financial Market Design and the Equity Premium : Electronic versus Floor Trading », *Journal of Finance*, Vol.60, pp. 2955–2985.
- Kahneman D., Tversky A., (1979), « Prospect Theory : An Analysis of Decisions Under Risk », *Econometrica*, Vol. 47, pp. 263–291.
- Mankad, S., Michailidis, G., Kirilenko, A., (2013) « Discovering the Ecosystem of an Electronic Financial Market with a Dynamic Machine-Learning Method », AFA 2012 Chicago Meetings Paper; *Algorithmic Finance*, Vol.2, n° 2, pp. 151–165.
- McGowan M. J., (2010), « The Rise of Computerized High Frequency Trading : Use and Controversy », *Duke Law and Technology Review*, n° 16, pp. 1–24.
- Menkveld, A.J., (2016), « The Economics of High-Frequency Trading : Taking Stock », *Annual Review of Financial Economics*, Vol. 8, Forthcoming.
- Preda A., (2006), « Socio-Technical Agency in Financial Markets », *Social Studies of Science*, Vol. 36, n° 5, pp. 753–782.
- Roy B., (2002), « L'aide à la décision aujourd'hui : que devrait-on attendre ? », in David, Hatchuel, Laufer, *Les nouvelles fondations des sciences de gestion*, pp. 141–174.
- Smith, V., (1976), « Experimental economics : Induced value theory. » *The American Economic Review*, Vol. 66, n° 2, pp. 274–279.
- Sommerville I., Cliff D., Calinescu R., Keen J., Kelly T., Kwiatkowska M., McDermid J., Paige R., (2012), « Large-scale complex IT Systems », *Communications of the ACM*, Vol. 55, n° 7, pp. 71–77.
- Veryzhenko, I., Arena, L. and Oriol, N., (2017a), « Time to slow down for high-frequency trading? Lessons from artificial markets », *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, In Press.
- Veryzhenko I., Arena L., Harb E., Oriol N., and Louichi, W., (2017b), « The impact of the French financial transaction tax on HFT activities and market quality », *Economic Modelling*, In Press.
- Veryzhenko I., Arena L., Harb E., Oriol N., (2016a), « A Reexamination of High Frequency Trading Regulation Effectiveness in an Artificial Market Framework » in Trends in Practical Applications of Scalable Multi-Agent Systems, the PAAMS Collection, F. de la Prieta, M.J. Escalona, R. Corchuelo, P. Mathieu, Z. Vale, A.T. Campbell, S. Rossi, E. Adam, M.D. Jiménez-Lopez, E.M. Navarro, M.N. Moreno (Eds), *Advances in Intelligent Systems and Computing Series*, Springer, Vol. 473, pp. 15–25.
- Veryzhenko I., Arena L., Harb E., Oriol, N., (2016b), « Post Flash Crash Recovery : An Agent-based Analysis », *Proceedings for the 8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, Vol.17, pp. 190–197.

Ye M., Yao C., Gai, J., (2013), « The Externalities of High Frequency Trading », Disponible sur SSRN : [<https://ssrn.com/abstract=2066839>].