

PROJET SCIENTIFIQUE 2022-2026 CHAIRE FDD

Préambule

Le programme scientifique de la Chaire pour la période 2022-2026 s'inscrit dans la continuité des objectifs qui furent définis lors de la création de ce projet en 2006 : développer des modélisations scientifiques et des méthodes quantitatives pour la recherche au service d'une économie durable et pour une finance responsable. Ce programme et les résultats obtenus sont le ciment d'une équipe scientifique de haut niveau et d'une relation étroite avec les sponsors.

Sur le plan méthodologique, on poursuivra le développement et l'application des méthodes quantitatives très innovantes, pertinentes et performantes qui constituent la marque de la Chaire : jeux à champ moyen, modèles d'agence, théorie des graphes, méthodes numériques. A ce socle de départ s'ajoutent de nouvelles méthodes, issues des développements récents dans le domaine de l'IA. Ces méthodes quantitatives constituent le socle méthodologique des travaux conduits autour des thèmes exposés ci-dessous, et permettent d'obtenir des percées impossibles sans elles.

Sur le plan thématique, les axes de recherche de la période future ont été conçus pour mettre au cœur des travaux l'analyse des situations de crises, écologique ou sanitaire, ainsi que les moyens d'opérer les transitions (écologique, énergétique, agricole) qui s'annoncent plus brutales et rapides que prévu. Un troisième axe porte plus spécifiquement sur la modélisation des objets connectés, compte tenu de leur rôle central dans les transitions.

- Axe 1. Gestion des risques dans un contexte de dérèglement climatique et de transitions (écologique, énergétique, agricole).
- Axe 2. Risque et acteurs systémiques
- Axe 3. Modélisation des réseaux de machines et autres objets connectés

Les deux premiers axes sont dans la continuité des axes actuels de la Chaire, les thèmes du risque systémique et de la gestion des risques dans un contexte de transitions faisant déjà partie du champ des questions traitées. Ces thèmes ont récemment acquis une importance cruciale du fait de la multiplication de crises de plusieurs natures. Concernant le troisième axe, le développement très rapide des réseaux d'objets connectés, leur diversité, leur rôle croissant dans l'économie, l'industrie, la vie quotidienne, l'optimisation énergétique, les flux toujours croissants de communications entre objets, la multiplicité et la diversité des données, des calculs, des algorithmes, nous a semblé également appeler un effort de modélisation pour comprendre ce phénomène et son impact sur les sujets de finance et développement durable qui sont au cœur du projet de la Chaire.

Concernant le programme scientifique, les trois thématiques présentées ci-après constituent un point de départ. Elles se situent dans le prolongement des recherches en cours, tout en proposant de nouvelles orientations. Ces thématiques pourront évoluer, si le Conseil scientifique le juge nécessaire. Il est en effet de la responsabilité du Conseil Scientifique de tenir compte de l'évolution et de l'arrivée à maturité de certains travaux, de tenir compte également de l'apparition de nouveaux sujets pour actualiser progressivement, sous le contrôle du Comité d'Orientation, ces thématiques. Cette exigence permet de rester fidèle à l'esprit d'innovation, comme à l'évolution du contexte scientifique et économique et des enjeux de société. Les nouveaux sujets pourront concerner en particulier l'application d'outils développés dans le cadre de la Chaire à des nouveaux objets.

La Chaire continuera également de promouvoir des activités de diffusion et de valorisation de la connaissance. Cet effort de vulgarisation prendra notamment la forme de l'organisation de cours, de séminaires, de conférences et la publication de supports écrits.

Sont présentés ci-après le « socle méthodologique » des recherches à venir, ainsi que le détail des 3 axes proposés pour la période

Le **socle méthodologique** inclut les approches suivantes :

Les jeux à champ moyen

La création de la Chaire FDD en 2006 a joué un rôle déterminant dans l'émergence de la théorie des jeux à champ moyen (MFG). Cette théorie a en effet été originellement développée par Jean-Michel Lasry et Pierre-Louis Lions pour fournir des méthodes mathématiques adaptées à la modélisation des externalités en économie, problématique centrale pour les questions de développement durable, et plus généralement pour permettre de construire des modèles d'équilibre qui doivent devenir l'outil fondamental de la décision collective dans tous les domaines, et pas seulement en économie.

La recherche sur les MFG a connu une croissance extrêmement rapide ces dernières années, en réponse au fort intérêt manifesté par les mathématiciens et les spécialistes des sciences sociales. D'une part, les MFG ont soulevé de nombreuses questions mathématiques extrêmement intéressantes autour d'un nouveau type d'équations différentielles partielles non linéaires (EDP). D'autre part, l'utilisation des MFG dans les sciences sociales (sous-tendue par la nécessité de construire dans tous les domaines des modèles d'équilibre comme outils fondamentaux de la décision collective) s'est avérée pertinente dans un large éventail de sujets (modélisation de la distribution des richesses, de l'analyse des transitions technologiques, de l'utilisation optimale de ressources épuisables...).

Alors que les premières études sur les MFG se sont concentrées sur les « systèmes forward-backward » survenant lorsque les risques de tous les agents sont idiosyncrasiques (c'est-à-dire liés à des événements ne touchant pas toute la collectivité concernée), la théorie MFG a ensuite été développée pour des situations avec tous les types de risques : c'est-à-dire que les agents doivent faire face à des risques idiosyncrasiques, mais sont également vulnérables à des événements affectant l'ensemble de la population (risques systémiques, ou variables aléatoires affectant tout le monde, comme le prix des matières premières, la météo, etc.). Dans ce dernier cas, l'équilibre MFG conduit à une « Master Equation » (ME) qui est une EDP non linéaire de dimension infinie.

L'étude de la ME était, il y dix ans, un objectif mathématiquement ambitieux. Les théorèmes mathématiques fondamentaux concernant la ME sont désormais démontrés et publiés.

Un progrès fondamental est désormais en cours : la résolution numérique de la ME. Cette résolution numérique est obtenue par un étroit mélange de méthodologies classiques d'analyse numérique et de simulation stochastique (Monte-Carlo) et d'une architecture récurrente de réseaux de neurones. Cette percée va ouvrir un champ d'application extrêmement vaste, à des problèmes de R&D et à des problèmes industriels, et dans des registres aussi distants que l'aide à la décision collective d'une part, et d'autre part l'optimisation des protocoles pour des foules d'objets connectés.

EDP dépendant de la trajectoire, jeux différentiels stochastiques et théorie des contrats

Ces approches trouvent leur origine dans les travaux de Nizar Touzi sur les équations aux dérivées partielles dépendant du chemin. L'objectif premier de ces travaux est d'étendre les méthodes de caractérisation des problèmes de contrôle stochastique par l'équation de Hamilton-Jacobi-Bellman au cadre des problèmes dont la dépendance trajectorielle apparaît de manière essentielle. Ceci a conduit à de nombreux travaux sur les équations différentielles stochastiques du second ordre et sur les solutions de viscosités. Ces travaux se sont révélés cruciaux pour une nouvelle méthode de résolution simple du problème de Principal-Agent en temps continu. Ces modèles sont très utilisés en théorie des contrats dans la littérature économique. Il s'agit d'un jeu différentiel stochastique à somme non nulle mettant en évidence le phénomène de hasard moral dans la relation de contractualisation. Plusieurs applications ont été développées ou sont en cours d'élaboration (conception optimale des contrats d'énergie, de contrats d'assurance contre la précarité énergétique, analyse du mécanisme de rémunération des capacités...)

Autres méthodes:

Le socle de méthode quantitatives inclut également la modélisation des processus stochastiques, des modèles d'équilibre, la théorie des graphes mais également des méthodologies de modélisation statistique et d'approximation numérique, notamment par les puissantes méthodes d'apprentissage dont on dispose actuellement (réseaux de neurones).

Les **trois axes thématiques** sont les suivants :

Axe thématique 1. Gestion des risques dans un contexte de dérèglement climatique et de transitions (écologique, énergétique, agricole).

Il s'agit plus spécifiquement d'évaluer, dans une perspective de gestion des risques, l'impact du dérèglement climatique sur les systèmes énergétiques et les systèmes agricoles. L'objectif est également de comprendre comment les évolutions en cours dans le domaine de la finance (finance durable) peuvent contribuer à faire évoluer les systèmes physiques réels.

Si l'on pense que les crises à gérer seront à l'avenir plus fréquentes, il faut se doter d'outils d'analyse de cette « vulnérabilité permanente » des systèmes. On pourrait par exemple se demander s'il faut faire évoluer les critères pris en compte pour le dimensionnement du système électrique pour faire face à des événements climatiques extrêmes. Dans cette même perspective de gestion des risques, la question se pose de l'allocation optimale d'une ressource rare ayant plusieurs usages (typiquement l'eau, nécessaire à la fois pour l'agriculture, la production d'électricité dans les centrales hydroélectriques et le tourisme, ou l'ensoleillement, nécessaire pour l'agriculture et la production d'électricité avec des panneaux photovoltaïques).

Travaux en cours :

- Rôle de l'information et de l'apprentissage dans la finance environnementale

Un travail récent initié par Peter Tankov porte sur le rôle de l'information sur la performance environnementale des acteurs. Dans ce modèle d'apprentissage bayésien, les agents apprennent progressivement dans quel scénario environnemental ils se trouvent et ajustent leurs comportements en conséquence.

- Optimisation des flux de consommation et de production d'énergie

Dans le cas des systèmes électriques, ce thème renvoie à la nécessité d'adapter la consommation à la production, en encourageant les consommateurs à moduler leur consommation pour réduire les tensions induites par des variations de production ou d'acheminement. Or, cette gestion diffuse de la demande est très coûteuse, au sens où elle implique de petits décalages dans les consommations individuelles, dont le pilotage peut être délicat (notamment d'un point de vue de l'intrusion dans la vie des particuliers). Plusieurs types de travaux répondent à ces problématiques :

- dans les modèles de type Principal-Agent développés par René Aïd et Nizar Touzi sur le *demand response*, on cherche à imaginer des contrats de fourniture d'électricité incitatifs, qui permettent de tarifier la volatilité de la consommation des clients.

- la gestion décentralisée des flexibilités prend aussi la forme de modèles de contrôle optimal d'équipements décentralisés régulés de façon thermostatique (ballons d'eau chaude, pompe à chaleur...).

- Arrêt optimal en champ moyen

Citons les travaux de Nizar Touzi sur les problèmes d'arrêt optimal en champ moyen, dans le cadre de la thèse de Mehdi Talbi. Dans ces modèles, on considère non pas une décision unique (par exemple le passage, pour un individu, au véhicule électrique) mais une série de décisions d'un grand nombre d'agents en interaction. Ce problème peut se ramener à un problème de planification optimale.

- Régulation dynamique des émissions de GES

René Aïd et Sara Biagini ont récemment proposé un modèle d'allocation des permis d'émissions, dans lequel le régulateur alloue les permis de façon dynamique, en anticipant les comportements des agents, avec pour objectif de minimiser la volatilité des prix sur le marché des permis. Ce problème de théorie des jeux à n joueurs (de type Stackelberg) est inspiré par l'introduction d'un mécanisme de stabilisation sur les marchés EU-ETS.

- Transport optimal

Un certain nombre de problématiques liées aux *transitions* peuvent être modélisées comme des problèmes de transport optimal, où l'on cherche à minimiser le coût de passage d'une distribution à une autre (côté production, on peut penser à l'évolution du mix énergétique ; côté consommation, on peut penser à l'évolution du profil de consommation des agents, si l'on souhaite « aplatir » les courbes de charge des particuliers)

Axe thématique 2 . Risque et acteurs systémiques

De façon schématique, la question du risque systémique peut se poser de deux manières.

Il y a d'abord la question de la propagation des chocs dans l'économie, pouvant conduire à des réactions en chaîne. La chaire est bien placée sur cette première question, avec le développement de travaux originaux sur les plans empirique et théorique. Nous décrivons ci-dessous les travaux sur la propagation des chocs sur les marchés développés par Delphine Lautier et ses co-auteurs sur l'analyse empirique des risques de marché. Sur le plan théorique, les travaux de Nizar Touzi sur la couverture mutuelle optimale

envisagent le risque de faillites en chaîne lié aux participations mutuelles « croisées » des acteurs financiers, sous la forme d'un problème d'optimisation (cf. *infra*).

Une autre manière d'envisager le risque systémique serait de prendre en compte, dans nos modèles, le rôle particulier de gros acteurs, qui jouent un rôle systémique au sens où ils fournissent des services essentiels pour le fonctionnement de l'économie. A cet égard, les situations d'un énergéticien fournisseur « systémique » d'électricité et celui d'un établissement bancaire lui aussi « systémique », fournisseur notamment de liquidité apparaissent similaires.

Nos futurs travaux devraient nous permettre de déterminer au mieux :

- comment rémunérer la fourniture de ces services essentiels, lorsque les mécanismes de marché apparaissent insuffisants ?
- de façon plus générale, comment inciter (financièrement) des acteurs privés à répondre à des objectifs de bien commun comme, par exemple, la préservation de la biodiversité ?

De façon générale, la modélisation de situations d'« économies systémiques » devrait nous aider à mieux définir et analyser la vulnérabilité des *systèmes*, notamment des réseaux, ainsi que la vulnérabilité des *acteurs* particuliers. Il conviendra de prendre en compte pour ces questions les tailles des acteurs : la défaillance d'un gros acteur et celles, nombreuses, d'une foule de petits acteurs n'est à cet égard pas équivalente. Les règles de marchés et donc leur efficacité peuvent également être influencées par les acteurs avec un résultat dépendant de leur taille ou de leur nombre et il convient d'étudier ces aspects.

Travaux en cours / à développer

- Analyse de la financiarisation des marchés de matières premières

L'augmentation du risque systémique au sein des marchés de matières premières est l'une des conséquences de la financiarisation, qui, en créant de nouveaux liens entre les marchés, a créé un monde où la propagation des chocs de prix pouvait être plus facile et plus forte.

Au cours des années précédentes, la question de la financiarisation a été abordée de deux façons : à travers des modèles d'équilibre (travaux de Ivar Ekeland, Delphine Lautier et Bertrand Villeneuve), et à travers des analyses empiriques en grande dimension.

Ekeland et al réfléchissent, sur la base de modèles d'équilibre, à la spéculation sur les marchés à terme de matières premières et à la façon dont cette dernière pourrait influencer le marché physique. Après avoir développé un modèle statique, ils travaillent actuellement sur un modèle en temps infini.

Du point de vue empirique, la financiarisation a été abordée à l'aide de techniques permettant de traiter des données en grande dimension. Delphine Lautier et Franck Raynaud ont développé des travaux s'appuyant sur la théorie des graphes. Cette méthodologie reste très adaptée pour analyser à grande échelle les liens entre marchés énergétiques et marchés agricoles, et la manière dont les chocs se propagent entre ces marchés.

D'autres travaux dans le domaine de la financiarisation et du risque systémique sont en cours. Ils s'intéressent à une nouvelle catégorie d'instruments financiers : les Exchange Traded Funds (ETF). En donnant à des investisseurs particuliers la possibilité d'investir de faibles montants dans ces marchés, les ETF ouvrent la voie à une nouvelle vague de

financiarisation, susceptible de devenir très importante compte tenu de la croissance très forte enregistrée sur ces instruments au cours des dernières années (les régulateurs financiers s'interrogent aujourd'hui, par exemple, sur la responsabilité d'un ETF pétrole dans la survenance de prix du pétrole négatifs en mars 2020). Delphine Lautier, Bertrand Villeneuve, Julien Ling et Rémy Lambinet proposent un modèle d'équilibre à trois marchés : le marché physique des matières premières, le marché à terme, et le marché des ETF. Ils montrent comment mesurer la propagation des chocs, dans ce contexte, à travers la notion de découverte des prix. Ils appliquent leurs travaux aux marchés de métaux précieux, qui ont assisté, les premiers, au développement des ETF et qui sont aujourd'hui encore les plus développés.

- Optimal mutual hedging

Des travaux récents initiés par Nizar Touzi traitent du risque systémique en finance, et plus spécifiquement du risque lié aux participations croisées entre acteurs financiers. Le risque considéré étant celui d'un risque de faillites en cascades de ces acteurs. On considère un problème d'optimisation (*optimal mutual hedging*), dans lequel chaque acteur a sa stratégie optimale (il décide quelle part d'actifs des autres acteurs il détient). Ce problème peut être traité comme un problème de jeu à champ moyen, où le champ moyen serait constitué du pourcentage de possession mutuelle des actifs des acteurs.

Axe thématique 3. Modélisation des réseaux de machines et autres objets connectés

Il nous apparaît important de prendre en compte dans nos travaux le développement extrêmement rapide des réseaux de machines et autres objets connectés (avec en particulier l'explosion, liée aux déploiements de la 5G, des communications dans ces réseaux d'objets). En effet, nous atteindrons très rapidement dans les zones urbaines le million d'objets (machines, robots, caméras et objets divers) connectés au km². Dans dix ans, ce nombre sera probablement cent fois plus élevé. Ces objets vont communiquer entre eux à haute fréquence et haut débit, localement et globalement.

On ne peut pas rejeter l'hypothèse que les échanges entre ces foules de robots (mille fois plus nombreux que les humains) donnent naissance à une économie d'échange d'un genre nouveau. En effet, ces objets (robots, machines) vont échanger des ressources : de l'information, de la bande passante, et – indirectement – de l'énergie électrique. Ils le feront, d'une part, parce qu'ils s'organiseront entre eux pour réduire et limiter la croissance de leur consommation d'électricité et, d'autre part, parce qu'ils mettront en œuvre des protocoles pour aider les humains (et les usines,..) à limiter la consommation énergétique générale.

Pour que cette économie d'échange fonctionne bien, elle aura besoin d'outils monétaires adaptés, c.-à-d. capables de fonctionner de façon sécurisée, traçable, authentifiée, et en même temps hautement décentralisée, et pour des flux très importants (des milliards de micro ou nano transactions par seconde ?). Le tout connecté avec l'économie humaine, notamment ces nano transactions se traduiront par des mouvements sur les comptes en banque ordinaires des personnes physiques ou morales.

La compréhension de cette nouvelle économie constitue un thème de recherche très riche, au croisement des mathématiques, de la modélisation, de l'algorithmique, de l'IA mais également de l'économie et de la finance. A cet égard, la Chaire et ses IdR nous semblent très bien placées pour l'aborder au plus haut niveau.

Précisons que la multiplication des objets connectés oblige à les laisser indépendants. Ils ne peuvent être pilotés par personne et surtout pas de façon centralisée. Leur organisation, leur fonctionnement régi par des protocoles peuvent toutefois donner lieu à des questions d'optimisation. Les protocoles peuvent être plus ou moins coûteux, plus ou moins économiques. Leur conception a un impact sur le dimensionnement des infrastructures.

Enfin, il est remarquable que le fonctionnement des objets connectés fasse apparaître des problématiques que l'on rencontre traditionnellement en économie : des problèmes d'inefficience, des situations de crises ou d'engorgement. On pourrait aussi imaginer des designs de ces réseaux qui les rendent plus efficaces. Par exemple des protocoles qui permettent de gérer des échanges ou des transactions "futurs" dans le but de stabiliser le fonctionnement courant.