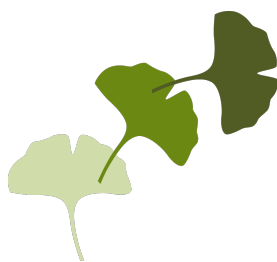


[mis à jour Mars 2022]



La Chaire Finance et Développement Durable Bilan et perspectives

La Chaire Finance et Développement Durable – Approches Quantitatives, qui bénéficie du mécénat de Crédit Agricole CIB et EDF, a été créée en 2006 sous l'égide de la Fondation Institut Europlace de Finance. Elle a pour partenaires académiques l'Université Paris-Dauphine et l'Ecole Polytechnique. En 2022, Après quinze années d'un développement exemplaire, de par la qualité des échanges scientifiques et des travaux réalisés, les différents partenaires ont décidé de prolonger ce projet pour cinq années supplémentaires.

Les pages qui suivent contiennent une présentation de la chaire et de son programme scientifique pour la période 2022-2026.

- I. INTRODUCTION
- II. AXES DE RECHERCHE
- III. EQUIPE 2022



I. Introduction

Une gouvernance innovante

Première chaire de recherche créée au sein de la fondation Institut Europlace de Finance, la Chaire Finance et Développement Durable avait inauguré un mode de gouvernance reposant sur trois instances :

1. Un Comité d'Orientation, présidé par Didier Valet, rassemblant les mécènes et les parties prenantes académiques et validant le budget et les orientations scientifiques,
2. Un Conseil Scientifique, présidé par Pierre-Louis Lions, qui vérifie la qualité des travaux produits chaque année et valide les propositions nouvelles arrivant en cours de projet.
3. Un Comité de Pilotage, présidé par Jean-Michel Lasry, qui gère au quotidien les activités de recherche (choix des missions, organisations des événements, choix des financements des sujets précis...)

De la recherche fondamentale à la recherche appliquée : de découvertes au retentissement mondial au développement des *Initiatives de recherche*

Les premiers travaux réalisés dans le cadre de la Chaire avaient pour caractéristiques, premièrement, de relever de la recherche fondamentale et, deuxièmement, d'avoir été réalisés par des chercheurs seniors qui ont donné une impulsion décisive à ce projet scientifique. Après que les premières percées eurent été réalisées, les recherches plus appliquées ont vu le jour. Deux champs de recherche illustrent parfaitement cette évolution : les recherches sur les jeux à champ moyen et les recherches sur les taux écologiques.

Les *jeux à champ moyen* sont une nouvelle approche de modélisation en sciences sociales, développée par Pierre-Louis Lions et Jean-Michel Lasry, inspirée des outils de la mécanique statistique et de la physique quantique. Cette approche est particulièrement efficace pour appréhender les phénomènes d'externalités dans des contextes qui font intervenir un grand nombre d'agents. Alors que les premiers travaux ont consisté en l'étude de la structure et des propriétés mathématiques de cette nouvelle gamme de modèles, un certain nombre d'applications à l'économie ont vu le jour depuis. Les *taux d'intérêt écologiques* sont une nouvelle manière d'aborder la question centrale du taux d'actualisation utilisé pour des projets à long terme engageant une dimension de développement durable. Les premières avancées théoriques réalisées par Roger Guesnerie et Ivar Ekeland se situaient à un niveau très fondamental et général. Ces réflexions nourrissent aujourd'hui des travaux plus appliqués comme la gestion du risque climatique pour une banque de financement et d'investissement.

En 2008, les responsables de la chaire ont développé un mode de contractualisation souple pour la réalisation de programmes de recherche fléchés : les ***Initiatives de Recherche***. Ces dernières permettent à un partenaire industriel de faire réaliser un programme de recherche sur une durée plus courte que dans le cas d'une chaire et sur



un thème plus précis. Ainsi, les sponsors financent aujourd'hui des *Initiatives de Recherche* sur des thématiques fléchées :

- EDF sur le thème de la finance des marchés de l'énergie (IdR FiME);
- Pacifica et Airbus Defence & Space, sur le thème « Risque et assurance de l'agriculture » ;
- SAIPOL sur la modélisation des marchés des oléagineux (IdR MiMO)

Deux facteurs furent déterminants pour le développement des Initiatives de recherche. Tout d'abord, elles ont pu s'appuyer sur le conseil scientifique de la chaire Finance et Développement Durable qui examine et contrôle les travaux des Initiatives de recherche. Précisons que les Initiatives de recherche possèdent un comité d'orientation et un comité de pilotage qui leur sont propres. Les Initiatives de recherche ont également bénéficié des percées réalisées au sein de la Chaire dans le champ de la recherche fondamentale.



II. LES AXES DE RECHERCHE

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.

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 a 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 récursive 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).

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.

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.



III. CHERCHEURS ET INTERVENANTS 2022

	Affiliation	Projet de recherche
Yves Achdou	Professeur à L'université Paris-Diderot	Chaire FDD
René Aïd	Professeur à l'Université Paris Dauphine, Membre du Comité de Pilotage de la Chaire	IdR FiME
Clémence Alasseur	Ingénieure chercheuse EDF R&D	IdR FiME
Mateo Basei	Ingénieur chercheur EDF R&D	IdR FiME
David Benatia	Assistant professor HEC Montreal & ENSAE Paris tech	IdR FiME
Charles Bertucci	CR CNRS, CMAP	Chaire FDD
Frédéric Bonnans	Directeur de recherches, INRIA	IdR FiME
Pierre Cardaliaguet	Professeur à l'Université Paris Dauphine	Chaire FDD / IdR FiME
René Carmona	Professeur à l'Université de Princeton	Chaire FDD / IdR FiME
Corinne Chaton	Ingénieure chercheuse EDF R&D	IdR FiME
Thomas Deschatre	Ingénieur chercheur EDF R&D	IdR FiME
Olivier Féron	Ingénieur chercheur EDF R&D, Membre du Comité de Pilotage de la Chaire, Directeur de l'IdR Finance des marchés de l'énergie	IdR FiME
Damien Fessler	Docteur en sciences économiques, secrétaire général de la chaire FDD	Chaire FDD / IdR FiME
Pierre-Noël Giraud	professeur à l'ENSMP	Chaire FDD
Pierre Gruet	Ingénieur chercheur EDF R&D	IdR FiME
Roger Guesnerie	Membre du conseil scientifique, Professeur émérite au Collège de France	Chaire FDD
Marc Hoffman	Professeur à l'Université Paris Dauphine	IdR FiME
Jean-Michel Lasry	Président du Comité de Pilotage de la Chaire, Professeur émérite à l'Université Paris- Dauphine	Chaire FDD / IdR FiME
Delphine Lautier	Membre du Comité de pilotage et du Conseil scientifique, Professeur à l'Université Paris- Dauphine	Chaire FDD / IdR FiME
Pierre-Louis Lions	Président du Conseil Scientifique de la Chaire, Professeur au Collège de France	Chaire FDD
Joseph Mikael	Ingénieur chercheur EDF R&D	IdR FiME
Benjamin Moll	Professor of Economics, London School of Economics	Chaire FDD
Nadia Oudjane	Ingénieure chercheuse EDF R&D	IdR FiME
Huyên Pham	Professeur à l'Université Paris-Diderot	IdR FiME
Zhenjie Ren	Maitre de conférences, Université Paris- Dauphine	IdR FiME
José Scheinkman	Professeur à l'Université de Columbia	Chaire FDD
Denis Talay	Directeur de recherches INRIA	Chaire FDD
Laura Tinsi	Ingénieure chercheuse EDF R&D	IdR FiME
Nizar Touzi	Membre du Comité de Pilotage, Vice-président du Conseil Scientifique de la Chaire, Professeur à l'Ecole Polytechnique	Chaire FDD / IdR FiME
Bertrand Villeneuve	Professeur à l'Université Paris Dauphine	IdR FiME
Cheng Wan	Ingénieure chercheuse EDF R&D	IdR FiME
Xavier WARIN	Ingénieur chercheur EDF R&D	IdR FiME

