

Chaire Marchés en mutation, Ecole Polytechnique et Université d'Evry Val d'Essonne, 2015

1 Participants

- Ecole Polytechnique (EP) : E. Bacry, S. De Marco, J. Bion Nadal, N. El Karoui, E. Gobet, C. Hillairet (ENSAE depuis septembre 2015), S. Laruelle (Université de Créteil), I. Mastromatteo, J.-F. Muzy (Université de Corté), X. Tan, N. Touzi,
- University d'Evry (UEVE) : E. Chevalier, S. Crépey, A. Gloter, M. Jeanblanc, T. Lim, V. Ly Vath, S. Menozzi, S. Pulido, C. Profeta, A. Sagna, S. Song
- Post-doctorants : A. Agarwal (EP, financement hors Chaire), J. Claisse (financement hors Chaire), S. Kallblad (EP, financement hors Chaire), I. Mastromatteo (EP), T. Kruse (UEVE), C. Litterer (financement hors Chaire), S. Pagliarani (EP, financement hors Chaire), Z. Ren (financement hors Chaire), P. Turkedjiev (financement hors Chaire).
- Doctorants : Y. Armenti (UEVE), J. Boutté (UEVE), H. Demarch (EP), M. Gaigi (UEVE), G. Guo (EP), T. Jaisson (EP), G. Liu (EP), G. Matulevicz (EP), T. M. Nguyen (UEVE), F. Rasamoely (UEVE), Z. Ren (EP), R. Romo Romero (UEVE).

2 Thèmes de recherche

Les sujets de recherches abordés par nos équipes sont guidés par le projet de recherche approuvé par la FBF.

2.1 Risques et Régulation haute fréquence

2.1.1 Modélisation de la dynamique des flux et des prix (Gloter, Boutté, Bacry, Muzy, Jaisson)

Un premier travail a consisté à étudier des problèmes d'estimation statistique, par filtrage, de fréquence d'arrivées d'ordres sur un carnet d'ordres. En particulier nous avons considéré des modèles simples où les régimes d'arrivée d'ordres peuvent varier de manière Markovienne dans le temps. Pour l'instant, les premiers résultats sont obtenus sur des simulations et nous comptons étudier des données réelles par la suite.

Parallèlement, nous avons travaillé sur des modèles à base de processus de Hawkes. Ces modèles constituent une classe très simple de processus ponctuels qui permet de reproduire les phénomènes d'auto-excitation et de cross-excitation associés à divers types d'événements. Ils permettent ainsi, non seulement de quantifier le degré d'endogénéité d'un système dynamique multivarié d'événements mais aussi de qualifier la structure d'interaction ou de réseau de l'ensemble de ses composantes. C'est ainsi que depuis quelques années les processus de Hawkes font l'objet d'un intérêt croissant pour l'étude de la microstructure des marchés (à noter que nous avons écrit un article de revue sur ce sujet). Nous avons effectué récemment deux travaux dans ce cadre. Le premier a consisté à étudier les divers types d'événements du niveau I du carnet d'ordre (modèle en dimension 8) : ordre de marché, d'annulation ou limite. Le second se focalise sur la modélisation du volume de ces ordres (modèle en dimension 24). Dans les deux cas, les dynamiques micro-structurelles mises en jeu de le processus de formation du prix ont été caractérisées de façon très fine (jusqu'à une échelle de temps de $10\mu s$). Nous avons non seulement illustré et quantifié précisément des phénomènes relativement intuitifs et connus mais aussi identifié des dynamiques encore insoupçonnées à ce jour, notamment sur les mécanismes à la racine de l'impact (au coeur des problèmes liés au risque haute fréquence).

2.1.2 Estimation paramétrique ou non paramétrique des processus de Hawkes (Bacry, Jaisson, Mastromatteo, Muzy)

Comme indiqué précédemment, les processus de Hawkes connaissent un succès croissant dans de très nombreuses applications et tout particulièrement en finance haute fréquence où ils sont devenus, aujourd'hui, quasiment incontournables. Développer des méthodes efficaces d'estimation paramétrique ou non paramétrique est essentiel.

Nous avons réalisé plusieurs travaux dans ce sens. Un premier travail pose les bases rigoureuses d'une nouvelle technique d'estimation non-paramétrique. Avant le développement de cette méthode, il n'existait que deux méthodes d'estimation non-paramétriques aucune des deux n'étant adaptée aux données haute fréquence (dimension strictement supérieure à 1 et grande quantité de données). Nous avons fait une analyse statistique rigoureuse de cette technique et l'avons illustrée sur de très nombreux exemples. Elle s'est révélée particulièrement efficace.

Le deuxième travail affine cette technique d'estimation dans le cadre de noyaux de Hawkes en loi de puissance qui sont caractéristiques des phénomènes de corrélations longue portée que l'on observe en finance (c'est cette méthode qui a été utilisée pour l'analyse des dynamiques du carnet d'ordre mentionnée dans la section précédente).

Dans un cadre paramétrique, nous avons réalisé un troisième travail sur les martingales à valeurs matricielles qui interviennent notamment dans les processus de Hawkes. Nous avons en particulier établi une inégalité de concentration (inégalité de type Bernstein) sur la norme opérateur de la martingale. Ce type d'inégalité est très utile si l'on veut contrôler l'erreur d'estimation des paramètres d'un modèle de Hawkes par le biais de la maximisation d'une vraisemblance pénalisée (afin d'introduire une certaine parcimonie et/ou un faible rang dans la matrice des noyaux du processus de Hawkes).

Enfin nous avons élaboré sur une nouvelle méthode d'estimation paramétrique des processus de Hawkes qui est, sous certaines conditions, plus performante que les méthodes usuelles telles que la maximisation de la vraisemblance ou de la fonction de contraste (erreur quadratique). Nous avons ainsi introduit une méthode "de champ moyen" qui est basée sur une formulation Bayésienne du problème et qui donne une solution approchée au problème d'estimation. Nous avons montré que cette méthode est particulièrement pertinente dans le cas d'un système fortement endogène et en grande dimension, ce qui est le cas pour les applications en finance que nous envisageons.

2.1.3 Processus linéaire en grande dimension et risque systémique (Bacry, Mastromatteo, Muzy)

Nous avons effectué un travail relativement générale qui a permis de montrer que l'instabilité d'un système d'agents en interaction peut "simplement" provenir du grand nombre d'agents en présence sans qu'aucun agent ait un comportement "critique" anormal.

Ainsi, la question essentielle qui a été étudiée est de savoir si une instabilité dans les marchés peut découler non pas du fait de l'intervention irresponsable d'un acteur en particulier mais simplement de la très grande dimension du réseau en interaction que constituent les différents intervenants sur un marché.

Nous avons étudié les propriétés génériques d'un processus stochastique linéaire dans le régime des grandes dimensions. Nous avons mis en évidence une zone critique au delà de laquelle ces systèmes linéaires de grande dimension conduisent à de fortes instabilités dues essentiellement à l'interaction en un nombre très important d'agents.

2.1.4 Modèles de liquidité intra-journalière - Régulation (Bacry, Laruelle, Mastromatteo)

Nous avons mené une étude empirique systématique sur la liquidité intra-journalière des différents marchés actions (CAC, SP, Nasdaq, ...). Nous avons commencé par analyser les volumes échangés au sein de la journée. L'objectif est double : étudier la dynamique du volume intraday en vue de le modéliser et regarder par place la "répartition" des volumes journaliers des différents actifs pour dégager des clusters. Des tests d'indépendance entre les volumes et le nombre de transactions et d'autocorrélation sur les volumes ont été effectués en vue de vérifier l'hypothèse de modélisation par un processus de Hawkes marqué. Une étude de stabilité des ratios de branchement a complété cette analyse pour trouver un meilleur modèle pour décrire les volumes. Concernant le clustering, on a débuté par des méthodes simples de type analyse en composantes principales (ACP) puis analyse en composantes indépendantes (ICA) pour les courbes de volumes intraday sur différentes places à travers le monde. Il en ressort un effet de convergence vers un mode "marché" pour toutes mais à des vitesses différentes. Pour compléter cet examen, des méthodes de classification non supervisée seront à utiliser pour prendre en compte l'aspect dynamique des courbes de volume intraday au long de l'année.

Nous avons ensuite procédé à une étude de l'évolution de la microstructure du marché des actions sur 10 ans (de 2002 à 2010) sur 6 places à travers le monde (NYSE, Nasdaq, Paris, LSE, HKEx et TSE). On a commencé par regarder les changements dans des relations entre différents indicateurs de marché (comme entre les volumes et le nombre de transactions ou la volatilité et le spread). Avec l'électronisation du trading et la fragmentation des marchés, on observe les mêmes effets sur les différentes places mais à des vitesses différentes compte tenu des régulations et des évolutions technologiques mises en place à des moments différents. On a poursuivi en étudiant l'évolution de la répartition au sein de la journée de ces mêmes indicateurs. Il en résulte une grande stabilité pour les différentes places, avec quelques modifications essentiellement dues à l'augmentation de la vitesse de trading (électronisation).

2.1.5 Impact de marché (Bacry, Mastromatteo)

Nous avons utilisé une base de données de plus de 400.000 meta-ordres envoyés par un broker sur les marchés européen en 2010 afin d'étudier l'impact de marché de ces ordres à différentes échelles de temps. L'étude de cet impact aux différentes échelles de temps est tout à fait primordiale pour la compréhension des problèmes liés au risque haute fréquence et à la stabilité des marchés. Il n'existe que très peu (nettement moins d'une dizaine) d'études empiriques de ce type du fait de la difficulté d'obtenir une base de données de meta-ordres. Nous avons mis en évidence de nombreuses propriétés de l'impact de marchés, certaines confirmant des résultats obtenus par des travaux précédents, d'autres au contraire les infirmants. Notamment, nous avons montré que l'invariance de la fameuse "square-root law" par rapport au temps d'exécution n'est pas vérifiée sur notre jeu de données.

Parallèlement a été développé un modèle théorique d'impact de marché permettant de comprendre que la concavité de cet impact (considéré comme une fonction du temps) est liée à des caractéristiques universelles du processus du prix. Notamment, ce modèle permet montrer analytiquement comment la liquidité disparaît autour du prix comme conséquence du "market clearing", et comment des séquences d'ordres successifs rencontrent progressivement plus de volume loin du prix initial, ce qui explique la concavité observée empiriquement dans la fonction d'impact.

Finalement, nous avons étudié un effet de biais qui contamine l'estimation de l'impact pour les contrats à gros tick, et qui se produit lorsqu'un acteur décide d'exécuter un ordre en conditionnant sur les conditions de liquidité. Nous avons déterminé exactement cet effet dans le cadre d'un modèle spécifique, et exploré ses propriétés dans un cas plus général.

2.1.6 Estimation des modèles à sauts (Gloter)

Une autre thématique de travaux actuels est celle de l'estimation paramétrique dans des modèles de diffusions à saut. Gloter et Emmanuelle Clément (UPEM) s'intéressent à l'estimation de paramètres de dérive pour des équations différentielles stochastiques dirigées par des processus de Lévy. Dans un travail publié en 2015 ils considèrent le cas d'EDS dirigée par des processus stables, observés en haute fréquence et déterminent l'information de Fisher du modèle. Ce travail continue actuellement avec une étudiante en thèse, Huong Nguyen, financée par l'UPEM (directeurs : Gloter et E. Clément). Gloter, Dasha Loukianova (UEVE) et Hilmar Mai (ENSAE) terminent un travail sur l'estimation de dérive pour des EDS dirigées par un processus de Lévy de type Brownien plus processus de saut et obtiennent des estimateurs optimaux pour le paramètre de dérive.

2.2 Risque de contrepartie

2.2.1 Chambres de compensation (Armenti, Crépey)

Sous la pression du G20, la tendance actuelle de la régulation (Dodd-Frank Act aux Etats-Unis et EMIR en Europe) est de pousser les banques à négocier entre elles de manière centralisée (par opposition à bilatérale), via des chambres de compensation assurant les défauts des membres au travers de mécanismes d'appels de marge et d'un fonds de garantie. Avec à l'heure actuelle trois chambres de compensation (LCH.Clearnet, ICE et Eurex Clearing) se partageant l'essentiel du marché de la compensation (incluant notamment les bonds, repos, CDS et swaps de taux), une question cruciale est celle du transfert du risque de contrepartie des banques individuelles aux chambres de compensation, ainsi que de la transformation d'un risque de contrepartie en un risque systémique, ainsi que de liquidité. En effet, l'évolution actuelle fait également peser une très lourde contrainte de liquidité sur les acteurs des marchés, pour abonder les appels de marges qui deviennent des flux extrêmement significatifs et volatiles pour les banques. Les enjeux sont la conception de solutions de type réglementaire et/ou d'ingénierie financière permettant de faire face aux nouveaux risques qui émergent ainsi sur les marchés.

Un premier travail a consisté à étudier le coût du trading centralisé, dans une logique analogue à celle développée ces dernières années pour le trading bilatéral, afin de permettre à une chambre de compensation d’optimiser ces coûts et d’aider ses membres à les gérer. La partie empirique de l’étude fait notamment ressortir le bénéfice de *netting* multilatéral du trading centralisé, ainsi que le poids des marges initiales. Un second travail (Y. Armenti, S. Crépey, Samuel Drapeau, Shanghai Advanced Institute for Finance et Antonis Papapanoleon, Technische Universität Berlin) a consisté en l’étude d’outils de type mesures de risques multivariées propres à prendre en compte de manière à la fois pratique et théoriquement satisfaisante le risque systémique dans le niveau des appels de marges (marges initiales et fond de défaut) et leur allocation. L’outil retenu a été celui de mesures étendant à un cadre multivarié la notion d’*expected shortfall*. Les perspectives applicatives de ce travail sont l’allocation par trade des marges initiales d’un membre donné, dans le cadre de la liquidation de son portefeuille, ou encore l’allocation du fonds de défaut entre les différents membres d’une chambre de compensation, qui devraient faire l’objet d’un second article.

2.2.2 Risque de contrepartie et funding (Crépey, Nguyen, Song)

Depuis la crise, les ajustements de valorisation (*credit valuation adjustment* CVA et *debit valuation adjustment* DVA) pour tenir compte du risque de défaut des deux contreparties d’un contrat financier, ainsi que du coût de son financement (FVA), figurent parmi les principaux enjeux des banques. Une problématique connexe est celle des courbes multiples, avec l’émergence depuis 2007 d’écarts significatifs entre différentes notions de taux interbancaires équivalents auparavant. Un effort important a porté sur l’étude mathématique des structures de dépendance sous-jacentes à ces nouvelles réalités des marchés financiers. On a ainsi introduit une approche par équations différentielles stochastiques rétrogrades (EDSRs), sous une hypothèse d’immersion d’une filtration de référence dans la filtration progressivement grossie par les temps de défaut des deux parties. Dans le cas, de fort *wrong way risk* (dépendance adverse entre exposition sous-jacente et risque de crédit des parties), du risque de contrepartie sur produits dérivés de crédit, l’hypothèse d’immersion est inadéquate et nous avons développé des modèles de copules dynamiques, obtenus par l’ajout d’une filtration aux modèles de crédit portefeuille statiques usuels, un modèle dynamique étant indispensable pour traiter du risque de contrepartie (S. Crépey, S. Song). Le modèle dit de chocs communs est notamment le seul dans la littérature existante à offrir l’ensemble de la tractabilité requise, à savoir une calibrabilité conjointe efficace aux CDS et aux CDO assortie d’une structure dynamique. Du point de vue mathématique, un enjeu encore largement ouvert est la détermination d’une méthode de valorisation des risques concernés qui soit cohérente d’une part à travers diverses mesures de probabilité (risque-neutre pour le pricing et actuarielle pour les aspects réglementaires), et d’autre part au niveau portefeuille à travers diverses classes d’actifs. Nous avons étudié l’apport possible à cette fin de la théorie des *pricing kernels* (particulièrement « dirigés par l’information »), en lien également avec la *benchmark approach* de E. Platen, dans le cas de produits de taux d’intérêts multi-courbes (S. Crépey, Andrea Macrina, University College London, Nguyen, David Skovmand, University of Copenhagen).

Les travaux relatifs à l’analyse des surcoûts de trading (XVAs) associés aux imperfections de marché révélées par la crise financière mondiale de 2008 ont donné lieu à une nouvelle étude centrée sur la notion de KVA, ou coût du capital requis par les banques pour faire face aux incomplétudes de marché (Claudio Albanese, Global Valuation Ltd and London CASS School of Business, Simone Caenazzo, Global Valuation Ltd, et Crépey). Un premier article est à paraître dans *Risk Magazine*, une version plus détaillée pour une revue académique de mathématiques financières est en cours d’écriture.

Par ailleurs, une analogie entre la *Credit Valuation Adjustment* de la banque d’investissement et l’*Expected Credit Loss* (ECL) de la banque de détail a été développée et est acceptée à paraître dans *Banks, Markets & Investors* (S. Crépey, M. Jeanblanc et Vivien Brunel, Société Générale).

2.2.3 Calcul numérique de CVA-FVA (Crépey, De Marco, Gobet, Menozzi, Pagliarani, Touzi, Turkedjev)

Un premier axe de travail, impliquant plusieurs membres de nos équipes, concerne l’approximation numérique de problèmes liés à la CVA-FVA. Dans les modèles considérés, il s’agit de discrétiser des EDSR en grandes dimensions et pour une dynamique assez générale de l’actif sous-jacent (diffusions, saut pur, modèle tenant compte de défauts). Les méthodes usuelles, probabilistes ou déterministes, se révèlent dans ce cadre inapplicables.

Des approches par développement asymptotique en petite non-linéarité à la Fujii et Takahashi ont été étudiées au plan théorique et prolongées par E. Gobet et S. Pagliarani, leur permettant d’obtenir des formules semi-explicites qui s’adaptent très bien à la dimension grande. En pratique l’hypothèse de petite non-linéarité est raisonnable car elle est par exemple associée au spread de défaut exprimé en % par

rapport à 1 (en général de l'ordre de 1% à 5% \ll 1). Les tests sur la CVA-FVA sont probants. Alors que les résultats heuristiques de Fujii et Takahashi suggèrent qu'un développement à tout ordre est possible, Gobet et Pagliarani établissent que pour la FVA (avec des générateurs faisant apparaître des parties positives), le développement à l'ordre 3 peut ne pas exister, montrant une limitation réelle de ce point de vue.

Par ailleurs, de nouveaux progrès ont été réalisés sur les techniques d'approximation numérique basées sur une représentation en termes de diffusion branchante. Cette méthode contourne complètement la complexité numérique des régressions répétées, permet d'aborder la grande dimension, et est adaptée à la dépendance de l'ensemble de la trajectoire (options exotiques). Cependant, elle requiert des conditions de non explosion qui induisent une limite de faible non linéarité pour son utilisation pratique. Dans les articles récents de P. Henry-Labordère (Société Générale), N. Touzi, X. Tan, cette méthode a été étendue des non linéarités plus générales, prenant en compte certains aspects pratiques de la gestion de la couverture des options, tels que les *repos*. L'idée est de superposer les algorithmes de diffusions branchantes et les techniques de différentiation automatique développées dans l'approximation numérique des grèges.

Enfin, S. Crépey et sa doctorante T. M. Nguyen ont procédé à une comparaison numérique entre les approches de types linéarisation, dans la lignée de celles proposées dans le cadre diffusif par Fujii et Takahashi, et les méthodes particulières à la P. Henry-Labordère.

2.3 Ingénierie financière

2.3.1 Risque de modèle et couverture robuste (Claisse, De Marco, Menozzi, Touzi, Guo, Kallblad)

L'évaluation et la couverture d'options exotiques nécessite la mise en place d'un modèle calibré sur l'information instantanée et consistant avec le principe de non arbitrage. Ces deux conditions laissent un large choix pour le modèle à utiliser. Les praticiens utilisent une large gamme de modèles qu'il choisissent en lien avec le problème de couverture de risque correspondant. Par exemple, pour un produit du type *gap option*, il est clair qu'un modèle pertinent doit contenir des sauts. De même, pour un produit de type *variance réalisée*, un modèle à volatilité stochastique est nécessaire.

L'outil de calibration usuel utilisé par la grande majorité des opérateurs de produits dérivés exotiques est la surface de volatilité implicite. Cette information est équivalente à la donnée de la distribution marginale pour certaines maturités de l'actif sous-jacent (sous la probabilité neutre au risque). Ceci a motivé l'intérêt pour les processus à marginales croissantes pour l'ordre convexe, appelés *peacocks* (PCOC = Processus Croissants pour l'Ordre Convexe), qui ont l'objet d'un livre récent de Roynette, Profeta et Yor.

Le problème d'une telle démarche est qu'elle laisse une large part à l'arbitraire, car on constate en pratique que deux modèles non arbitrables calibrés sur la même information de marché peuvent induire des évaluations significativement différentes pour un produit exotique donné. Nous sommes ainsi face à un risque de modèle qu'il convient de comprendre, de mesurer, et d'appréhender.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent plusieurs travaux récents initiés par P. Henry-Labordère (Société Générale) qui propose de mesurer le risque de modèle par l'amplitude de l'intervalle de tous les prix réalisables par un modèle non arbitrage et calibré à l'information du marché. Du point de vue mathématique, ce problème se réduit à une nouvelle classe de problèmes de transport optimal, appelés *transport optimal de martingales*. Le problème dual correspondant admet une interprétation financière naturelle d'importance cruciale : il s'agit de coût de sur-couverture robuste de l'option exotique, c'est à dire le plus petit coût nécessaire pour une stratégie de sur-couverture simultanément dans tous les modèles non arbitrables et calibrés au marché.

Ce nouveau problème a engendré plusieurs travaux par nos équipes, et conduisent à des PCOC extrémaux, dans le sens où ils sont optimaux pour le critère défini par la nature du produit dérivé. Le passage du temps discret au temps continu dans ces problèmes nécessite des développements mathématiques non triviaux, et surtout non abordés dans les développements connus en processus stochastiques.

2.3.2 Risque de liquidité (Chevalier, Gaigi, Kruse, Ly Vath)

Depuis la crise de liquidité constatée récemment sur les marchés financiers, plusieurs membres de l'équipe s'intéressent aux problèmes liés à la gestion de risques de liquidité. Du point de vue financier, le but est de tenir compte des contraintes imposées par la liquidité sur la gestion du risque. Cela nous amène à résoudre de nouveaux problèmes interconnectés : l'étude de modèles tenant compte de la liquidité du marché, la caractérisation de stratégies de liquidation ou d'allocation d'actifs et de *market making*, et finalement leur résolution numérique. La première tâche consiste à étudier l'impact de la liquidité sur

les marchés. Nous étudions en particulier la microstructure des marchés liée à la dynamique des *bid-ask spreads* et plus généralement des carnets d'ordre, l'impact des transactions sur les prix et les éventuels changements de régimes de liquidité. Dans le deuxième point, nous nous intéressons à des problèmes de liquidation d'actifs et d'allocation optimale dans des modèles tenant compte de frictions de marché. Un autre problème important consiste à étudier les problèmes de *market making* optimal sous contraintes d'inventaire et d'impact sur les prix des actifs. Cela nous amène à introduire et étudier des problèmes non standard de contrôle optimal. Nous nous intéressons également à la résolution numérique d'un problème d'optimisation de portefeuille dans un contexte de risque de liquidité. Enfin, un problème connexe consiste à étudier un problème de distribution de dividendes dans un contexte de risque de liquidité.

S. Kruse, avec Stefan Ankirchner (Université d'Iena) a étudié la liquidation optimale d'une position en présence de coûts quadratiques et dans le cas où les agents ont une critère de préférences dépendant des prix.

2.3.3 Assurance vie (Chevalier, Romero, Lim)

Apparues dans les années 70 aux Etats-Unis, les *variable annuities* sont des produits d'assurance vie indexés sur les marchés financiers. Depuis leurs créations, ils n'ont cessé d'évoluer et de se complexifier car les compagnies d'assurance proposent de plus en plus de garanties ou de possibilités de modifications dynamiques du contrat. Le succès commercial de ces produits rend crucial les problèmes de valorisation et de couverture pour les compagnies d'assurance. En plus de la complexité de ces produits, leurs maturités sont très longues (plus d'une trentaine d'année) et cela implique un effort important de modélisation des taux d'intérêts et de l'évolution des actifs sur lesquels sont adossés ces produits. En particulier, l'hypothèse de markovianité des processus peut être trop restrictive sur ces échelles de temps. Enfin, la multiplicité et la nature des risques associés à ces produits (risque de longévité, de marché, de comportement de l'assuré,..) empêchent toute couverture exacte. Nous avons ici affaire à des marchés structurellement incomplets. Notre équipe a donc choisi de développer une approche de *pricing* et *hedging* par prime d'indifférence, étendant la notion de prix d'indifférence souvent utilisée en marchés incomplets. La détermination de cette prime est basée sur la résolution de problèmes de contrôle stochastique réguliers dans un contexte non-markovien et avec des maturités aléatoires. Les outils mathématiques apparaissant naturellement sont des EDSR dans une filtration progressivement grossie. Nous avons ensuite introduit la possibilité d'effectuer des retraits anticipés par l'assuré et étudié la prime d'indifférence dans les cas où l'assuré suit la stratégie la plus désavantageuse pour l'assureur. Cela nous a conduit à la résolution un problème de contrôle plus complexe mêlant contrôle régulier et impulsif.

2.3.4 Modèles de pricing polynomiaux (Pulido)

La classe de processus affines constitue l'une des classes les plus adaptées pour modéliser les facteurs d'incertitude en finance. Récemment, afin de surmonter certains problèmes de modélisation des processus affines, une classe plus large de processus polynomiaux a été proposée. Les processus polynomiaux sont des diffusions à sauts dont le générateur infinitésimal laisse invariant l'espace vectoriel de polynômes à degré fixe. Les moments des lois de transition sont des polynômes par rapport à l'état initial. Les coefficients établissant cette relation sont solutions d'un système d'équations différentielles ordinaires. Les processus affines sont des processus polynomiaux avec fonction caractéristique exponentielle affine. S. Pulido et divers co-auteurs étudient les propriétés théoriques et statistiques des processus polynomiaux ainsi que leurs applications dans la modélisation de marchés financiers; par exemple dans les modèles à volatilité stochastique. Cette étude cherche à montrer l'utilité et la flexibilité des processus polynomiaux et l'étendue de leurs applications, déjà présente dans le cas des modèles de taux d'intérêt.

2.4 Finance d'entreprise, risque moral et aspects informationnels

2.4.1 Finance d'entreprise (Chevalier, Gaigi, Ly Vath)

L'évaluation d'une entreprise est non seulement un problème fondamental en finance d'entreprise mais également un des piliers fondateurs du marché financier. Plusieurs méthodes sont utilisées par les intervenants des marchés d'actions, en particulier les analystes financiers, dont les plus couramment utilisées sont le DCF et les différents multiples. Cependant, la valeur d'une entreprise provient théoriquement de sa capacité à générer du cash afin de le distribuer aux actionnaires. Cette valeur dépend d'un ensemble de paramètres soumis aux aléas du marché dans lequel elle opère. Mais elle dépend aussi et surtout de la capacité du *manager* à identifier et exécuter les meilleures politiques de gestion maximisant l'intérêt des actionnaires, dont les politiques de distribution de dividendes, d'investissement et de financement.

Dans notre travail, nous avons relâché un certain nombre d'hypothèses classiques en finance d'entreprise. Nous traitons en particulier le cas des actifs non-liquides et des problèmes liés à la structure du capital de l'entreprise. Cette dernière est particulièrement importante pour les banques, surtout si l'on prend en compte des contraintes réglementaires et de solvabilité. Mathématiquement, ces problèmes sont formulés comme des problèmes de contrôle stochastique sous contraintes.

2.4.2 Risque moral (Touzi)

Dans un travail en collaboration avec Jaksza Cvitanic (Caltech) et Dylan Possamaï (Dauphine), nous avons mis en évidence une méthode générale pour la résolution des problèmes de Principal-Agent avec hasard moral. Ces problèmes relèvent de la théorie des contrats qui est à la base de la finance d'entreprise. Le Principal cherche une politique de contractualisation qui incite l'Agent à révéler sa stratégie optimale et ainsi de fournir l'effort prévu par le Principal. Une application à la rémunération des gestionnaires de fonds montre l'efficacité de cette méthodologie. Dans cet exemple, l'Agent choisit l'allocation sur les différents actifs du marché. Le principal observe la performance du fonds ainsi que l'évolution de certains indices du marché. Le problème de hasard moral est dû au fait que le Principal n'a pas accès à la composition du portefeuille de l'Agent. Nous montrons qu'afin de responsabiliser l'Agent, le Principal doit proposer une rémunération indexée sur la performance du fonds ainsi que sur sa variance réalisée. Intuitivement, un tel contrat pénalise une prise de risque excessive de l'Agent dans sa stratégie de gestion de fonds. Dans des travaux en cours de réalisation, nous appliquons cette technique à des problèmes de transition énergétique motivés par les nouvelles régulations de ces marchés.

Du point de vue technique, ce travail utilise directement les dernières avancées en théorie du contrôle stochastique des systèmes non markoviens (i.e. dépendant de la trajectoire), qui passent par les équations différentielles stochastiques rétrogrades (BSDE) ainsi que les équations aux dérivées partielles dépendant de la trajectoire (path-dependent PDE).

2.4.3 Rôle de l'information (Aksamit, Crépey, Hillairet, Jeanblanc, Romo Romero, Song)

L'étude entreprise en 2014 se poursuit. La majorité des modèles stochastiques de marché financier sont représentés par une semimartingale (de dimension finie) dans une filtration donnée et les études faites basées sur le calcul stochastique. Dans la littérature, les propriétés de cette semimartingale sont les seuls éléments impliqués dans les conceptions et les applications des modèles (par exemple, des modèles Browniens, de Lévy, etc.). Avec la complexification des marchés est né le besoin de modèles qui prennent en compte différents facteurs d'influence (par exemple, des facteurs économiques, des risques exogènes, des informations particulières), ainsi que différents agents avec des informations différentes (information asymétrique, délit d'initié). Cela fait apparaître des modèles dans lesquels doivent être pris en compte non pas une seule filtration, mais deux ou plusieurs. L'apparition de ces modèles pose immédiatement un problème mathématique : la semimartingale dans la filtration de référence, qui représente les prix des actifs négociables dans un flot d'information déterminé, peut ne plus être une semimartingale dans une seconde filtration, ce qui rend l'utilisation du calcul stochastique inapplicable et pose des problèmes d'arbitrage. Lorsque la semimartingale reste semimartingale dans toutes les filtrations concernées, le lien entre le calcul stochastique lié à cette semimartingale dans les différentes filtrations constitue un élément essentiel pour l'applicabilité des modèles. C'est à partir de ce point qu'intervient la théorie du grossissement de filtrations. Nous nous intéressons aux problématiques suivantes

- Analyse des modèles de grossissement de filtrations utilisés dans l'étude des risques : étude des caractéristiques essentielles des filtrations dans ces modèles (problèmes de mesurabilité, propriétés de représentation prévisible, etc.) et développement de formules de calculs.
- Construction de modèles de grossissement de filtrations ayant des propriétés particulières. Ce sont, par exemple, des modèles ayant le même processus d'intensité, des modèles dont la dynamique est déterminée par une équation différentielle stochastique, des modèles sous l'hypothèse de densité conditionnelle avec un processus de densité Markovien, etc.
- Etude des arbitrages liés à la variation du flot d'informations. Notre problématique prend sa source dans la modélisation de temps de défaut dans les problématiques de risque de crédit : la connaissance de l'instant de défaut, ou la connaissance de la non occurrence de ce temps, ne doivent pas donner lieu à des arbitrages dans le marché financier. Une étude précise et complète a été effectuée : nous montrons qu'il n'y a pas d'arbitrage de première espèce avant τ (même si, dans certains cas, il y a des arbitrages, que nous explicitons), et nous donnons une condition pour que cette situation ait lieu après τ . Nous mettons en place une mesure de l'information à travers le drift d'information.
- Calcul de l'intensité de défaut : cette quantité dépend de l'information avec laquelle on travaille, et nous donnons les outils pour calculer cette intensité dans le cas de multi défauts, qu'il soient ordonnés ou non.

Dans ce cadre, M. Jeanblanc, Tomasz Bielecki (IIT, Chicago), Tao Chen (IIT), Igor Cialenco (IIT), Areski Cousin (ISFA, Lyon) ont entrepris au cours de l'année une étude de couverture robuste dans un cas d'incertitude de modèle due à une observation partielle des prix. Cette étude se place dans le récent courant de pensée de s'affranchir d'un modèle de prix unique et ce prendre en compte l'incertitude sur les paramètres du modèle.

Les problématiques liées aux modèles multidéfauts, et la dynamique des prix englobant l'information de tous les défauts et leurs interaction, sont toujours d'actualité. Jeanblanc, El Karoui et Ying Jiao (ISFA, Lyon) ont publié deux articles, reposant sur la méthode densité, pour étudier les impacts de défauts déjà survenus.

M. Jeanblanc, Devin Sezer (Metu, Ankara), Thomaz Bielecki (IIT, Chicago) ont étendu les résultats d'Assaf et d'Herbertsson pour donner un copule dynamique markovien de multidéfauts, présentant des défauts joints.

2.5 Simulation numérique (De Marco, Gobet, Liu, Menozzi, Sagna, Turkedjev)

2.5.1 Simulation d'événements rares et d'extrêmes.

L'analyse d'événements rares est un thème occupant une place de plus en plus importante dans la gestion des risques industriels, économiques et financiers : catastrophes météorologiques, défaillance d'unités de production, incidents sur le réseau électrique, krach boursier, faillites d'entreprises ou défaillance de contrepartie... mathématiquement les événements rares se modélisent via des configurations atypiques de processus stochastiques, évoluant dans des régimes peu probables. Estimer la probabilité de réalisation de tels événements et les simuler permet de quantifier la résilience des systèmes et éventuellement prendre des mesures de protection et d'amélioration. Alors que les travaux de la littérature proposaient des méthodes pour des modèles aléatoires plutôt statiques ou pour des chaînes de Markov avec peu de dates, Gobet et Liu ont développé un nouveau cadre méthodologique pour raisonner directement aux niveaux des trajectoires à temps continu (et s'affranchir des choix délicats des paramètres de discrétisation). De plus les modèles et fonctionnelles étudiés n'ont plus besoin d'être Markoviens. Ils ont proposé et analysé un schéma à base de méthodes particulières en interaction (moyennisation en espace) et un schéma à base de transformation ergodique (moyennisation en temps). Des extensions et applications en économie-finance sont développées par Agarwal, De Marco, Gobet et Liu pour le risque de crédit en grande dimension, ou les modèles non markoviens à base de brownien fractionnaire etc. Cela donne la possibilité de générer efficacement des scénarios de stress-tests.

2.5.2 Discrétisation et approximation de processus

De nombreux progrès ont été réalisés dans l'approximation des EDSR par méthodes probabilistes, notamment via les méthodes de régression. De nombreuses recherches originales sont actuellement en développement comme par exemple la parallélisation de ces méthodes et la mise en oeuvre sur cartes graphiques par E. Gobet, J. Salas (La Coruna Univ.), P. Turkedjev, C. Vasquez (La Coruna Univ.); ou la sélection adaptative des bases de régression pour obtenir la meilleure approximation possible pour un effort de calcul donné (techniques de sélection de modèle par pénalisation, E. Gobet et L. Zwald de l'Univ. Joseph Fourier), ou encore la mise en oeuvre de méthodes d'échantillonnage préférentiel pour prendre en compte les événements rares dans les problèmes de contrôle stochastique (E. Gobet, P. Turkedjev).

S. Menozzi s'intéresse avec V. Konakov (Higher School of Economics, Moscou) à la discrétisation et à l'erreur d'approximation associée pour le mouvement Brownien sur des variétés, qui apparaît naturellement dans le cadre de certains modèles de taux d'intérêts (voir par exemple la thèse de Caroline Pintoux). L'idée est d'adapter la construction de Pinsky (TAMS, 76) de sorte à obtenir des vitesses de convergences, voire dans certains cas des procédures exactes de simulation (Brownien hyperbolique). Avec G. Pagès et Igor Honoré (étudiant en thèse LPMA), il travaille sur des contrôles non asymptotiques d'approximation de mesures invariantes de diffusions.

A. Gloter et Emmanuelle Clément (UPEM) s'intéressent au contrôle de l'erreur faible du schéma d'Euler pour des fonctionnelles dépendant de toute la trajectoire d'une diffusion. Ce problème est naturellement relié au pricing d'options dont le payoff dépend de toute la trajectoire. (Ces résultats sont reliés à des travaux de A. Alfonsi, B. Jourdain, A. Kohatsu-Higa; ce qui est important du point de vue théorique, et pour les applications numériques, est que l'on cherche une erreur "faible", c'est à dire en loi)

2.5.3 Techniques de quantification

A. Sagna et S. Menozzi travaillent sur des approximations numériques pour des problèmes de contrôle provenant du filtrage. L'idée est de mettre à jour dynamiquement un contrôle agissant sur une diffusion qui n'est pas directement observée de sorte à maximiser la probabilité que cette diffusion reste au-dessus d'un certain seuil. Ce type de problème est motivé par la gestion de ressources naturelles : on souhaite par exemple établir un quota de poissons à pêcher en fonctions de ceux que l'on a pu observer sans toutefois trop puiser dans la population globale. L'approche retenue consiste à coupler des algorithmes d'optimisation stochastique à la *Kushner* à des techniques de quantification numérique.

A. Sagna étudie des méthodes de réduction de la variance par quantification optimale, avec application au pricing des options *path-dependent* par quantification et par Monte Carlo. Il travaille actuellement sur la quantification produit Markovienne d'un processus de diffusion avec des applications à la finance. Cette méthode permet de parler de quantification rapide (dans la mesure où on peut avoir toutes les grilles de quantification et les poids et probabilités de transition associées en quelques secondes) des (schema d'Euler de) processus de diffusion en dimension supérieure ou égale à 2 (en théorie). Une application à la résolution numérique des EDSR est en cours. Ceci mène à des formules fermées pour les quantités (quantifiées) qui interviennent dans la discrétisation des EDSR et permet d'avoir des résultats numériques en quelques secondes.

3 Activités régulières

3.1 Séminaire probabilités et mathématiques financières

Ce séminaire (hebdomadaire) touche un public plus large que celui des membres de l'équipe. Il permet de faciliter les échanges entre les deux communautés probabilistes et mathématiques financières. Les orateurs sont souvent des chercheurs non parisiens ; le support financier de la chaire permet facilement d'inviter des extérieurs, français ou étrangers, et facilite les échanges. La liste des séminaires liés à des thèmes de finance est ci-dessous.

- 10 décembre : Stefano Pagliarani (École Polytechnique) Analytical approximations of BSDEs with non-smooth driver
- 3 décembre : Thibaut Mastrolia (Paris Dauphine) Moral hazard under Ambiguity
- 26 novembre : Nicolas Baradel (ENSAE) Optimal Control of Trading Algorithms and Bayesian parameters adjustments
- 19 novembre : Martin Larsson (ETH) Conditional infimum and maxima of martingales
- 12 novembre : Ankush Agarwal (École Polytechnique) Rare event simulation related to financial risks : efficient estimation and sensitivity analysis
- 6 novembre : Anthony Réveillac (INSA de Toulouse) Sur une nouvelle caractérisation des espaces de Malliavin-Sobolev et application à l'étude des Equations Différentielles Stochastiques Rétrogrades
- 22 octobre : Abass Sagna (ENSIIE) Markovian and product quantization of an R^d -valued Euler scheme of a diffusion process with an application to Heston model
- 8 octobre : Umberto Cherubini (Università Di Bologna) Marking-to-market systemic credit risk : Application to the European banking system
- 1 octobre : Antonis Papapantaleon (TU Berlin) An equilibrium model for spot and forward prices of commodities
- 30 juin : Toby Dylan Hocking (McGill University, Montréal) PeakSegJoint : fast supervised peak detection via joint segmentation of multiple count data samples
- 18 juin : Olivier Feron (EDF-chaire FIME) Modeling spot, forward and option prices of several commodities in the energy market : an econometric approach
- 11 juin : Jiayu Cai (École Polytechnique) Asymptotic replication with modified volatility and proportional transaction costs
- 28 mai : Plamen Turkedjiev (École Polytechnique) Adaptive importance sampling in linear regression algorithms for BSDEs
- 7 mai : Philip Protter (Columbia University) The Empirical Distribution of the Lifetimes of Financial Bubbles
- 23 avril : Mihail Zervos (London School of Economics) Optimal execution with multiplicative price impact
- 2 avril : Sergio Pulido (ENSIIE/Evry) Financial Models with Defaultable Numéraires
- 26 mars : Roxana Dumitrescu (CEREMADE, Université Paris 9 Dauphine) Mixed Stochastic Control/Optimal Stopping Problems with f-expectations

- 19 mars : Areski Cousin (ISFA, Université Lyon 1) On Multivariate Extensions of Value-at-risk and Conditional-Tail-Expectation
- 29 janvier : Alexandre Boumezoued (Université Pierre et Marie Curie)

4 Organisation de conférences

4.1 Petit déjeuners FBF

- Vendredi 6 novembre 2015 de 9h30 à 11h30 « Comment gérer les coûts et les risques dans les chambres de compensation ? »
 - Bruno Biais, Directeur de Recherche au CNRS (Toulouse School of Economics - Chaire FBF IDEI) « Appels de marge, chambres de compensation et stabilité financière »
 - Stéphane Crepey, Professeur de Mathématiques à l'Université d'Evry (Chaire FBF Marchés en Mutation) « Coût de la compensation centralisée » [Travail conjoint avec Yannick Armenti, Université d'Evry / Chaire FBF Marchés en Mutation et LCH.Clearnet]
 - Table ronde : Bruno Biais, Stéphane Crepey, Vivien Levy-Garboua (Professeur associé, Sciences Po), Bill Stenning (MD - Clearing, Regulatory & Strategic Affairs, Société Générale Corporate & Investment Banking), Quentin Archer (Risk Manager Methodology and Modeling, LCH.Clearnet Paris) Julien Dosseur (Deputy Head of Methodology and Modelling, LCH.Clearnet (Paris))
- Mercredi 25 mars 2015 de 15h00 à 17h30 « Microstructure des marchés financiers »
 - Mathieu Rosenbaum, Professeur au Laboratoire de Probabilités et Modèles Aléatoires (LPMA) - Université Paris VI « Actifs à grand tick : spread implicite et taille de tick optimale »
 - Paul Besson, Head of Quantitative Research, Kepler-Cheuvreux « Comment mesurer la contribution des ordres agressifs et des ordres passifs dans les variations de prix ? Quels enseignements peut-on en tirer sur les dynamiques de prix des actifs »
- Mardi 2 décembre 2014 de 15h à 17h30 « Ajustements de valorisation »
 - Stéphane Crépey, Université d'Evry « A propos de CVA , DVA , FVA et autres ajustements de marché »
 - Table ronde avec Claudio Albanese (Global Valuation) Jean-Jacques Rabeyrin (Bnp Paribas) Chris Kenyon (Lloyds Bank) et Evelyne Guilly (Banque de France) Modérateur Ingrid Labuzan (Odénot)

4.2 Semestre thématique

Semestre thématique de l'ILB : role de l'information en finance et assurance. Ce semestre, cofinancé par la chaire et l'ILB a été organisé au cours de 2014-2015 (voir programme détaillé en annexe) par Caroline Hillairet et Monique Jeanblanc et a comporté 5 conférences sur des thèmes spécialisés et une conférence de cloture. Un cahier de l'ILB sera consacré à cet événement. Il sera suivi en 2016 par deux conférences sur le grossissement de filtration, co-organisées par A. Nighkebali (université de Zurich) et le Lamme UEVE.

5 Activités financées par la chaire en 2015

- Semestre thématique information
- Colloquium Bachelier, Janvier 2015, Métabief
- South east Asia conference in mathematical finance, Siem Reap, Cambodge, co-organisée par l'Univ. Evry, Paris Diderot et National University of Singapore.
- Cours Bachelier : F. Delarue
- Séminaire Bachelier : Conférences de Reveillac, Zervos, Larsson

6 Invitations

6.1 Ecole Polytechnique

- Invitation à l'X pour séjour de 4 mois (15/10/2014 → 15/02/2015) d'un doctorant (Marcello Ribaldi) de la Scuola Normale de Pise

- Sandeep Juneja est Professeur à Princeton University. Il est spécialiste de mesures de risque dynamique et de modèles de théorie de décision en temps continu. Ses travaux récents contribuent au problème de couverture robuste, i.e. sans modèle probabiliste de référence.
- Thibault Lux est doctorant à la Technical University de Berlin sous la direction de Antonis Papaantonoleon. Il travaille sur le risque de modèle dans un cadre multi-sous-jacents.
- Steve Kou est Professeur à National University of Singapore. Il est spécialiste d'ingénierie financière : modélisation des sauts sur les marchés de produits dérivés, mesures de risque, méthodes numériques probabilistes.
- Michael Monoyios est Professeur Oxford University. Il est spécialiste de méthodes de couverture en marchés incomplets.
- Marcel Nutz est Professeur Assistant à Columbia University. Il est spécialiste de couverture dans un cadre d'incertitude de volatilité et de mesure de sauts. Il est également très investi dans le problème de couverture robuste où il a développé des résultats importants sur la théorie d'arbitrage.
-
- Istvan Redl est doctorant à University of Bath sous la direction de Peter Morters. Il travaille sur la calibration et le risque de modèles.
- Mihai Sirbu est Professeur à University of Texas at Austin. Il est spécialiste de contrôle optimal avec application aux mathématiques financières.
- Hao Xin est Professeur la London School of Economics. Il est spécialiste de modèles d'équilibre en marchés incomplets.
- Jianfeng Zhang est Associate Professeur à *University of Southern California*. Il est reconnu comme l'un des meilleurs spécialistes des équations différentielles stochastiques rétrogrades et leurs applications en finance.

6.2 Invités à Evry en 2015

- Tahir Choulli, Alberta university, Canada, une semaine en Juin (reliquat chaire Risque de crédit), collaboration AA et MJ
- Anna Aksamit, Postdoctorante, université d'Oxford, collaboration avec M. Jeanblanc,
- Marta Leniec, étudiante en thèse, 15 jours, collaboration avec M. Jeanblanc,
- Nacira Agram, MC, Université de Biskra (algérie) collaboration avec T. Lim, M. Jeanblanc, R. Romo Romero
- Anthony Reveillac (Toulouse) séminaire Evry
- Alexander Roch, Collaboration avec Vathana Ly Vath et Etienne Chevalier
- Marek Rutkowski, Université de Sydney, Collaboration avec Stéphane Crépey et Monique Jeanblanc
- Thomas Bielecki IIT, Chicago, 2 semaines en juin. Collaboration avec Stéphane Crépey et Monique Jeanblanc
- Michel Zervos, LSE, séminaire Evry collaboration avec Vathana Ly Vath
- Michael Larsson (ETH Zurich) séminaire Evry

7 Encadrement de doctorants et post-doctorants 2015

7.1 Evry

Les doctorants de mathématiques financières présents au laboratoire sont les suivants. Deux étudiants ont soutenu en 2015, une soutenance est prévue en 2016.

- M'hamed Gaigi (11/2012, Crépey, Ly Vath, M. Mnif Tunis) Méthodes numériques et problèmes de risque de liquidité. La thèse a été soutenue le 6 mars 2015. Il est actuellement MCF à l'ENIT de Tunis.
- Tuyet Mai Nguyen (09/2011 Crépey, L. Denis, Université du Mans). Calcul de Malliavin avec sauts et application au risque de crédit/contrepartie. La thèse a été soutenue le 24 août 2015. Elle est actuellement consultante chez awalee consulting.
- Ricardo Romo Romero (11/2012 Chevallier, Lim, Jeanblanc) Contrôle stochastique appliqué à l'assurance. Soutenance prévue en 2016.
- JérémY Boutté (10/2012, CIFRE, Gloter, Ly Vath) Marché de matières premières : modélisation et gestion des risques. Problèmes d'estimation statistique par méthode de filtrage sur des processus stochastiques. Etude de l'estimation de la volatilité et de la présence de sauts dans des processus

de prix de matières premières. Problèmes estimations de changement de régimes d'arrivés d'ordres de marché.

- Yannick Armenti (03/2014, Crépey, N. El Karoui) Chambres de compensation. Co-financé LCH.Clearnet / Chaire MME
- Florian Rasamoely (1/10/2015, Crépey, LyVath, Song.) Modélisation des carnets d'ordre et gestion de risque de liquidité

7.2 Ecole Polytechnique

Les doctorants de mathématiques financières présents au laboratoire sont les suivants.

- T. Jaisson (2012–2015) Modèles de Hawkes en finance.
- G. Guo (2013–) : couverture de risque et robustesse.
- G. Liu (2013–) : Simulation d'événements rares.
- G. Matulewicz (2014–) : Exploration de graphes stochastiques.
- H. Demarch (Mars 2015–) Modèles de Hawkes en finance.

7.3 Postdoctorants

- Ankush Agarwal (EP, financement hors Chaire) : méthodes d'approximation numérique.
- S. Kallblad (EP, financement hors Chaire) : couverture de risque et robustesse.
- T. Kruse (LaMME, ILB et Chaire, Novembre 2013- avril 2015) : problèmes de liquidité.
- Iacopo Mastromatteo (CMAP, ILB et Chaire) : microstructure des marchés et données haute fréquence.
- Stefano Pagliarani (EP, financement hors Chaire) : méthodes asymptotiques pour l'approximation.
- Plamen Turkedjiev (financement hors Chaire) : méthodes d'approximation numérique.
- C. Litterer (financement hors Chaire) : méthodes d'approximation numérique.
- J. Claisse (financement hors Chaire) : couverture de risque et robustesse.
- Z. Ren (financement hors Chaire) : optimisation des systèmes non markoviens, méthodes d'approximation numérique.