

# Energy derivative markets and systemic risk

## Sommaire exécutif

Delphine Lautier - Franck Raynaud

L'objectif de ce projet de recherche est d'étudier le risque systémique dans les marchés dérivés énergétiques. Les préoccupations concernant le risque systémique ont fortement augmenté dans les marchés financiers, en particulier pour les marchés énergétiques. Ces derniers semblent de plus en plus intégrés, aussi bien entre eux qu'avec les autres marchés financiers. Depuis quelques années, la hausse du prix des matières premières énergétiques a souvent été évoquée pour expliquer la hausse de matières premières agricoles telles que le blé, le maïs ou encore la canne à sucre. De plus, l'utilisation des matières premières en tant que nouvelle classe d'actifs par les investisseurs, peut être à l'origine de mouvements de prix causés par des facteurs extérieurs tels que des fluctuations de prix d'actions ou de taux de change.

Dans la littérature financière, nous trouvons différentes approches pour aborder le risque systémique : comportement moutonnier, co-intégration, intégration spatiale ou temporelle, etc. Ces méthodes ne prennent en compte qu'une ou deux dimensions de l'intégration sur les trois possibles, c'est à dire, l'intégration spatiale, qui permet d'analyser les relations pour une même matière première négociée en deux places différentes, l'intégration temporelle, qui permet d'étudier l'évolution temporelle d'une matière au cours du temps, et enfin, l'intégration associée à l'étude de la structure par terme des prix des matières premières. Alors que, visiblement, l'intégration et le risque systémique augmentent dans les marchés dérivés énergétiques, aucune étude traitant des trois dimensions simultanément n'a encore été proposée. On peut alors s'interroger sur l'absence d'une analyse en trois dimensions de l'intégration et du risque systémique. Une partie de la réponse est liée à l'acquisition d'une quantité massive de donnée et à la difficulté de leur retraitement. Par ailleurs, la complexité d'un système regroupant les trois dimensions requiert l'utilisation de nouveaux outils.

Ce rapport présente les résultats de nos recherches sur l'étude de l'intégra-

tion tridimensionnelle et du risque systémique. Il contient sept chapitres. Le premier est une introduction, où nous présentons nos principaux objectifs ainsi que les intérêts scientifiques de notre projet, en premier lieu pour le Conseil Français de l'Énergie, en deuxième lieu d'un point de vue académique. Dans le second chapitre nous présentons la base de données utilisée ainsi que ses principales caractéristiques. Le troisième regroupe la méthodologie et les outils utilisés pour mesurer l'intégration. Dans le quatrième chapitre, nous exposons la première partie de nos résultats empiriques, qui portent sur l'intégration des marchés énergétiques. Dans le cinquième chapitre, nous étendons notre analyse dans les dimensions spatiale, maturité et tridimensionnelle pour tous les marchés de notre base données. Le sixième chapitre offre une présentation du modèle d'Ising et de certains concepts de la physique statistique. Nous profitons de ce dernier chapitre pour familiariser le lecteur avec la notion de modèles minimaux et la compréhension des comportements collectifs par les physiciens. Enfin, nous exposons nos conclusions et expliquons les implications de notre étude.

Dans le premier chapitre de ce rapport, nous présentons l'objectif principal de notre recherche, l'étude tridimensionnelle du risque systémique dans les marchés dérivés énergétiques. Notre recherche vise à renforcer la compréhension des mécanismes de fonctionnement de ces marchés. Dans ce but, nous recourons à des méthodes de la physique. Celles-ci nous permettent d'extraire l'information contenue dans notre système complexe et tridimensionnel (temps, espace et maturité). Nous expliquons ensuite pourquoi le risque systémique est un champ d'investigation riche pour la physique statistique. Le risque systémique peut être brièvement décrit comme la manifestation soudaine d'un dysfonctionnement se produisant à une échelle globale et qui résulte d'interactions complexes entre les marchés. À une échelle microscopique, les liens entre les opérateurs dessinent un réseau complexe d'interactions dont peuvent résulter de larges mouvements de prix ou phénomènes de contagion. Autrement dit, des interactions locales peuvent émerger, de manière auto organisée, des mouvements coopératifs à grande échelle. De tels phénomènes sont connus en physique. Ils se produisent au cours de transition de phase, lorsqu'un système change d'état, par exemple lorsque l'eau (une phase liquide) se vaporise (un état gazeux). Par conséquent, l'association de la finance et de la physique nous semble offrir un champ d'étude ayant un potentiel riche, en particulier parce que les physiciens ont développé dans les deux dernières décennies de nombreux outils théoriques et numériques pour l'étude des systèmes complexes.

Nous trouvons également important de souligner l'enjeu d'un tel projet pour une organisation telle que le Conseil Français de l'Énergie. Il est en effet cru-

cial de comprendre aujourd'hui comment les marchés dérivés énergétiques sont intégrés entre eux et/ou avec d'autres marchés et de quelle façon ils peuvent être affectés ou impliqués dans la propagation du risque systémique. Par ailleurs, il est essentiel de quantifier un tel risque.

Enfin, nous donnons notre point de vue sur l'importance académique et scientifique de notre projet. Du point de vue académique il s'agit de réunir deux champs d'investigation, la finance et la physique. Depuis une vingtaine d'années, de nombreux physiciens ont porté leur attention sur la modélisation de phénomènes économiques. Plus précisément, ils ont développé des modèles minimaux, c'est à dire basés sur des hypothèses les plus simples possibles et un nombre réduit de paramètres, afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents mis en jeu dans l'apparition de motifs complexes ou dans le transfert d'information. Au terme de ce projet, situé dix mois après la remise de ce premier rapport, nous espérons, comme cela a été le cas en biologie, dans celui des systèmes dynamiques et de l'économie, mettre en place un nouveau modèle qui, tout en conservant son minimalisme, nous permettra de comprendre les principales caractéristiques des mouvements coopératifs de prix sur les marchés dérivés énergétiques. Avant d'atteindre un tel but, nous avons eu besoin d'étudier, de façon empirique et à l'aide de nouvelles techniques, les liens entre les différents marchés dérivés.

Dans le second chapitre, nous présentons les marchés sélectionnés pour notre étude empirique et les données extraites. Au sein de trois grands secteurs d'activité regroupant les produits énergétiques, les produits agricoles et les actifs financiers, nous avons retenu les marchés caractérisés par les volumes de transactions les plus importants (source : Futures Industry Association, rapport mensuel). Le choix de ces trois secteurs a été motivé par les récents changements intervenus sur les marchés financiers mentionnés au début de ce sommaire exécutif. Au cours de ce projet, nous avons réalisé un important travail d'extraction, de retraitement ainsi que d'analyse de ces données. Nous avons collecté près de deux millions de données (prix à terme de compensation, volumes de transaction et positions ouvertes) et analysé plus de six cent cinquante mille prix. Nous laissons l'information sur les volumes de transaction et les positions ouvertes, ainsi qu'une possible extension de notre base de données pour des travaux ultérieurs. Dans ce deuxième chapitre, nous exposons ensuite les caractéristiques de la base de données et donnons un aperçu du comportement des prix sur notre période d'étude (1998-2008). Finalement, nous proposons une discussion sur la saisonnalité des prix des matières premières que nous étudions. Dans le cadre de notre étude, nous avons étudié les propriétés spectrales des séries temporelles par Transformées de Fourier Discrètes sans pouvoir mettre en évidence d'effet de saisonnalité

dans les données.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une méthodologie inspirée de la physique, à même de nous permettre de mesurer empiriquement l'intégration des marchés. Parmi les différents outils de la physique moderne, il en existe un particulièrement performant pour aborder la question de l'intégration tridimensionnelle des marchés dérivés : la théorie des graphes. Un graphe est une représentation des relations de paires entre différentes entités. Or, un marché financier est composé d'un grand nombre d'actifs, qui peuvent être reliés entre eux par des grandeurs telles que les coefficients de corrélation. Une représentation sous la forme d'un graphe peut s'avérer riche d'enseignements car l'information économique se retrouve dans la forme, ou topologie, du graphe. Parmi les différents types de graphes existants, nous avons porté notre choix sur les arbres de recouvrement minimum (Minimum Spanning Trees, appelés MST), qui permettent de rejoindre tous les points du graphe de façon unique par le chemin le plus court. Ces graphes offrent une représentation en terme géométrique des corrélations entre les différentes entités.

Puisque les marchés évoluent au cours du temps, il est nécessaires d'étudier la dynamique des corrélations et des MST. Pour cela, nous suivons au cours du temps la corrélation moyenne entre marchés ainsi que la *force* des noeuds, qui donnent une information sur la façon dont un marché est corrélé avec les autres. Nous caractérisons aussi la complexité des arbres de parcours minimum. Cette information est donnée par *l'exposant allométrique*, qui indique la nature du chemin que peut prendre un choc pour atteindre tous les marchés. Enfin, nous nous intéressons à la robustesse des arbres au cours du temps et quantifions les reconfigurations des arbres en mesurant le *ratio de survie* qui est la fraction de liens inchangés entre deux dates successives.

Dans le quatrième chapitre, nous appliquons cette méthode à nos données et la testons empiriquement sur les marchés énergétiques. La dimension maturité est étudiée pour deux marchés : le *crude oil* américain et le *heating oil*. Nous nous attendions à retrouver dans nos résultats la présence de l'effet *Samuelson*. Dans un cas idéal, l'arbre de parcours moyen dans la dimension maturité doit être ordonné et les maturités, qui représentent les noeuds du graphe, doivent être hiérarchisées, depuis la première jusqu'à la dernière date de livraison. En d'autres termes, nous nous attendions à ce que l'arbre de parcours minimum soit linéaire. Nous avons observé cet effet sur le marché du *heating oil* pour lequel les 36 premier mois de livraison sont parfaitement ordonnés. Concernant le *crude oil*, la linéarité du graphe est moins parfaite. Dans la dimension spatiale, les résultats paraissent également intéressants.

Afin d'approfondir notre compréhension des résultats empiriques dans la dimension spatiale, nous avons effectué différents tests pour différentes dates de livraison : 1, 2, 3, 6 et 12 mois. Entre 1 et 3 mois, la topologie des arbres reste inchangée. En revanche, elle est différente pour les maturités 6 et 12 mois. Dans chaque cas nous pouvons donner une interprétation économique à la topologie des graphes. Nous considérons ces résultats comme un test de validité positif de notre méthode et son application aux marchés dérivés. En comparant les résultats pour différentes maturités, nous observons que l'intégration des marchés augmente avec la maturité. Ce dernier résultat est original car jusqu'à présent, les différentes études utilisant des arbres de parcours moyen ont omis la dimension maturité de la question de l'intégration.

Dans le cinquième chapitre, nous réalisons une étude systématique pour tous les marchés sélectionnés dans les dimensions spatiale et maturité ainsi qu'en trois dimensions. À notre connaissance, la dimension maturité et par conséquent les trois dimensions n'ont jamais été étudiées auparavant.

La première partie de cette étude est dédiée à la visualisation des graphes pour les trois secteurs simultanément. La visualisation des arbres montre une organisation en étoile dans la dimension spatiale alors que la dimension maturité est caractérisée par une organisation linéaire. Ces deux topologies caractéristiques se réunissent dans l'analyse tridimensionnelle. Un arbre typique est présenté sur la Figure 1. Pour simplifier la visualisation de plus de 400 noeuds, nous avons représenté les différentes maturités d'un même marché par un même symbole. L'organisation par secteur est respectée dans cette approche tridimensionnelle et au sein de chaque secteur, nous retrouvons une organisation linéaire par maturité des différents marchés.

Les deux *crude oils*, américain et européen, se retrouvent simultanément au centre du graphe assurant le lien avec les secteurs agricole et financier. Notre première conclusion majeure est que le *crude oil* est le meilleur candidat pour la propagation de chocs. En effet, un choc prenant naissance à la périphérie du graphe devra nécessairement passer par le *crude*, s'il n'est pas auparavant amorti, pour atteindre les autres secteurs. D'autre part, un choc se propagera d'autant plus rapidement que son origine se trouve proche du centre de l'arbre.

Dans la troisième section de ce chapitre, nous étudions les propriétés dynamiques du système. Nous avons observé que le niveau d'intégration est plus important dans la dimension maturité que dans la dimension spatiale. Ce résultat s'explique par le fait que les opérations d'arbitrage sont plus facilement réalisables pour des contrats futures standardisés portant sur le même actif que pour des produits de différente nature. L'analyse temporelle montre que l'intégration augmente dans la dimension spatiale aussi bien que dans

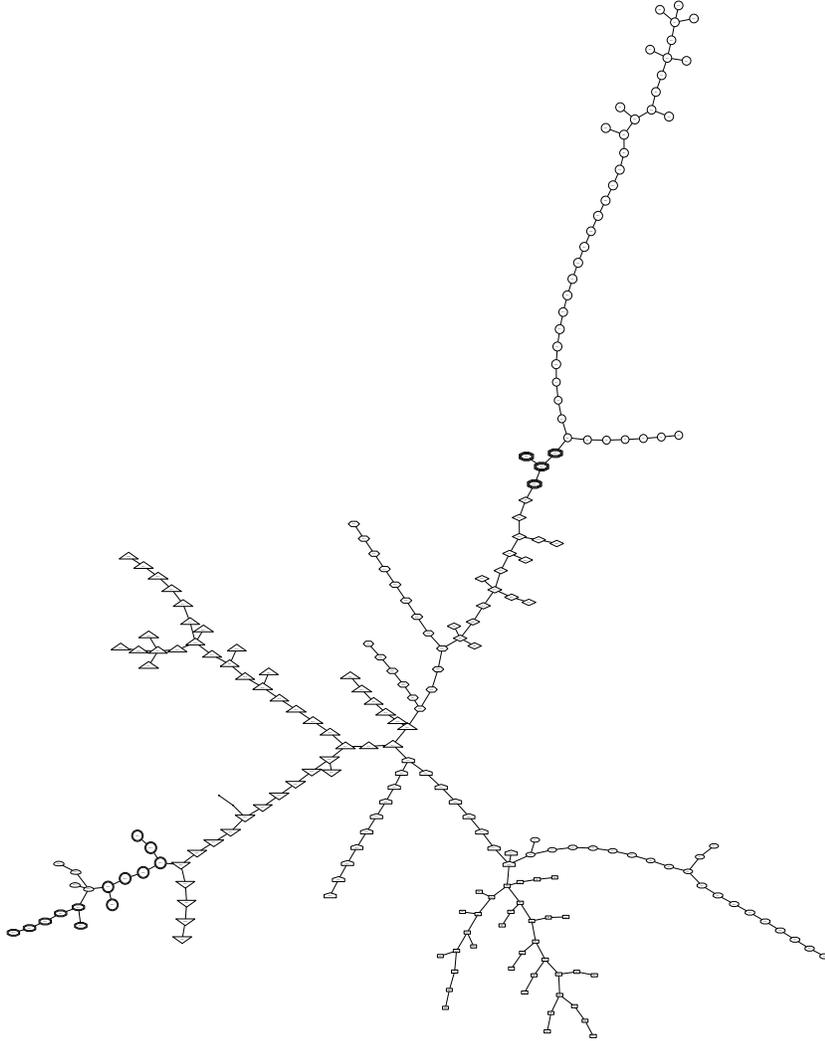


FIG. 1 – MST for the three-dimensional analysis, 06/27/2000-08/12/2009. The different futures contracts are represented by the following symbols : empty circle : *IED*, point : *ISM*, octagon : *LNG*, ellipse : *LLE*, box : *NNG*, hexagon : *LLC*, triangle : *NCL*, house : *NHO*, diamond : *NGC*, inverted triangle : *CBO*, triple octagon : *CEU*, double circle : *CS*, double octagon : *phCW*, egg : *CC*. For a given futures contract, all maturities are represented with the same symbol. The distance between the nodes is set to unity.

la dimension maturité. Une telle augmentation s'observe aussi sur l'ensemble des prix des marchés étudiés. Cette observation est particulièrement évidente sur le secteur énergétique, exception faite des gaz naturels, ainsi que sur le secteur agricole, ce dernier étant fortement intégré à la fin de notre période d'observation. Enfin, concernant le secteur financier, aucune tendance particulière ne peut être avancée.

Le sixième chapitre de ce rapport est dédié à une présentation de l'approche théorique que nous envisageons pour l'élaboration d'un modèle minimal. Naturellement, il faut voir en ce chapitre un exposé du cadre scientifique dans lequel nous nous placerons pour construire un modèle et non une présentation du modèle lui-même.

Nous proposons de nous inspirer de méthodes issues de la physique statistique, en espérant que la transposition d'outils et concepts développés dans le cadre des systèmes complexes se révèle pertinente pour l'étude des marchés financiers. Nous pouvons motiver ce choix méthodologique en reformulant la question du risque systémique et de la propagation de chocs du point de vue d'un physicien : « De quelle(s) façon(s) un comportement collectif globale peut-il apparaître dans un système où les interactions sont strictement locales ? ». Sans avoir utilisé de termes propres à la physique, nous avons pourtant posé le problème du point de vue de la physique. En effet, de nombreux champs d'investigations de cette discipline (transition de phase, phénomènes critiques, auto organisation) tentent de répondre à une question posée en ces termes. Bien que les marchés financiers ne soient pas pilotés par les lois de la nature, ils ne peuvent échapper à la fascinante ubiquité des comportements collectifs. Tout comme la physique statistique, l'économie tente de décrire les relations d'équilibres et de dynamiques d'un grand nombre d'entités, des agents économiques par exemple, en interaction. Dans la nature comme en économie, ces interactions sont à l'origine de comportement collectifs.

Nous présentons ensuite la notion de comportements collectifs pour un physicien et quels sont les outils existant pour les détecter et les étudier. Le modèle le plus représentatif est appelé le modèle d'Ising. Il décrit la magnétisation spontanée de matériaux magnétiques. La magnétisation, ou champ magnétique, est la manifestation à une échelle macroscopique du comportement collectif d'entités microscopiques, appelés *spin*, interagissant localement. Ces *spins* sont la modélisation des électrons qui composent les matériaux magnétiques. Lorsque les *spins* ont plus ou moins la même valeur, le matériau devient magnétique et la manifestation d'un effet collectif se traduit par l'apparition d'un champ magnétique. Le modèle d'Ising est une représentation des interactions entre *spins* qui les amènent à prendre une valeur identique et permet de décrire aussi bien l'apparition du champ magnétique que ses

caractéristiques. Nous présentons en détail ce modèle dans un espace unidimensionnel. Pour des espaces en dimensions supérieures, la complexité augmente et il est nécessaire de recourir à des approximations pour résoudre le modèle. Nous profitons de ce chapitre théorique pour présenter une méthode d'approximation, dite approximation de champ moyen où l'influence des voisins est remplacée par une influence moyenne de toute la population, qui est aujourd'hui une méthode employée fréquemment dans le cadre de la modélisation de marchés financiers.

À la fin de ce rapport, nous présentons les directions futures de nos travaux. En premier lieu il s'agit d'approfondir l'analyse dans la dimension maturité. Il semble en effet apparaître dans cette dimension des motifs de corrélations récurrents qui pourraient refléter l'existence de mécanismes universels. Ce dernier résultat s'avère être d'intérêt pour la communauté de la finance comme de la physique dans la mesure où cette dimension a été omise dans les travaux précédents.

Nous envisageons également d'étendre notre étude aux volumes de transactions ainsi qu'aux positions ouvertes des opérateurs sur le marché. Tout d'abord en appliquant directement le formalisme des arbres de parcours minimum, afin d'étudier les corrélations des transactions et des positions ouvertes. Nous pourrions ensuite essayer d'enrichir l'étude des corrélations de rendements par une pondération des fluctuations de prix par l'une et/ou l'autre de ces deux grandeurs. Nous pourrions tenter de confirmer la centralité du *crude oil* dans un système plus riche en informations économiques. Nous envisageons également un volet empirique supplémentaire dédié à l'étude des chocs sur les marchés. En particulier, nous pourrions déterminer les changements topologiques lors d'évènements importants ainsi que les temps nécessaires pour que le système retourne à une configuration stable.

Enfin, une grande partie de notre prochaine étude sera la modélisation du comportement collectif des marchés dérivés énergétiques et du risque systémique. Nous envisageons de recourir aux méthodes de modélisation de la physique statistique. Les résultats que nous avons obtenu au cours de cette année serviront à la fois à établir les hypothèses fondamentales de notre modèle et à valider nos résultats futurs. En particulier, nous voulons pouvoir déterminer à partir d'un même modèle les mécanismes qui entrent en jeu dans l'apparition des différentes topologies observées, linéaires ou en étoiles. Une fois ces deux formes typiques obtenues, nous pourrions faire la lumière sur les processus impliqués dans les liens entre marchés dans le cas tridimensionnel. Une contribution majeure de cette partie de la modélisation sera de comprendre comment et où se créent les liens entre marchés. Dans un second temps, nous pourrions aborder une étude de chocs afin de déterminer s'il existe

des topologies particulières qui peuvent amortir ou faciliter la propagation de chocs dans le système, le nombre de marchés qui doivent être touchés par un choc, ou s'il existe une amplitude seuil qui caractérise l'apparition du risque systémique.