

LA VOLATILITE DES PRIX DES MATIERES PREMIERES

Delphine LAUTIER et Yves SIMON

Cahier de recherche du CEREG n°2003-15

Résumé. L'objet de cet article est d'exposer la problématique de la volatilité des prix des matières premières, de montrer quels sont les moyens pour s'en protéger et d'expliquer comment les instruments de couverture peuvent être employés. Ces derniers sont présentés en première section, en les distinguant selon le type de besoin auquel ils répondent et selon le mode d'organisation du marché sur lesquels ils sont échangés. Cette présentation permet de rappeler les principes fondamentaux de la couverture. La deuxième section est consacrée à la structure par terme des prix des matières premières – la relation unissant, à une date donnée, les prix à terme pour toutes les échéances de livraison – et à son comportement dynamique. L'objectif est ici de préciser et d'expliquer cette dynamique. A titre d'illustration, est introduite une réflexion fondée sur l'étude de l'évolution de la volatilité des prix à terme du pétrole brut entre 1989 et 2001. Enfin, la section trois met en évidence l'intérêt que peut avoir l'information apportée la coexistence de plusieurs prix à terme de maturités différentes, non seulement pour la couverture, mais également pour la gestion des stocks et l'investissement.

Mots clés : volatilité – matières premières – pétrole brut – contrats à terme – options – *swaps* – *caps* – *floors* – *collars* – *swaptions* – marchés dérivés – structure par terme – couverture – investissement – prix à terme – ratio de couverture

Introduction

L'histoire des marchés dérivés montre que leur création coïncide toujours avec des périodes de fortes fluctuations des cours. Ceci est vrai quel que soit l'actif support des contrats à terme considérés, qu'il s'agisse de matières premières, de taux d'intérêt, de taux de change, d'actions, d'indices boursiers.... En verrouillant les prix futurs, ces marchés ont en effet pour objectif premier de limiter les risques auxquels sont confrontés les opérateurs.

En réponse à l'instabilité « naturelle » due aux conditions climatiques, les céréales furent les premières matières premières à servir de sous-jacents aux contrats du Chicago Board of Trade, dès 1850. Vinrent ensuite les produits tropicaux (sucre, café et cacao), supports aux transactions sur les marchés de New York et de Londres. Les produits oléagineux furent introduits sur les marchés de Chicago quelques années avant la fin de la seconde guerre mondiale. L'émergence des premiers marchés à terme sur les produits pétroliers fut une réponse à l'instabilité qui s'est instaurée à la suite des deux chocs pétroliers. Les marchés ont été ouverts à New York entre novembre 1978 et mars 1983. Par la suite, de nouveaux contrats ont été introduits à Londres, à Singapour et à Tokyo, mais ceux de New York demeurent les plus actifs. La déréglementation a ensuite conduit les responsables du New York Mercantile Exchange à développer de nouveaux marchés dérivés de produits énergétiques. Ceci s'est concrétisé par l'ouverture en avril 1990 d'un marché sur le gaz naturel et en mars 1996 de marchés sur l'électricité.

Si les marchés à terme de matières premières existent depuis le milieu du XIX^e siècle, l'industrie des produits dérivés était cependant très peu développée jusqu'au début de la décennie 1960. Le véritable essor des marchés a coïncidé avec l'introduction des instruments assurant une protection contre le risque de fluctuation associé à des actifs financiers. Ce développement s'est appuyé sur les connaissances et les techniques acquises dans le domaine des matières premières. Il n'y a, en effet, pas la moindre différence de nature entre les marchés à terme financiers et les marchés à terme de matières premières.

Que sont devenus les marchés de matières premières dans le paysage actuel ? Ils sont certes beaucoup moins importants, en valeur relative, que les marchés dérivés sur instruments financiers. Cependant, ils sont loin d'être une quantité négligeable, et ils progressent de plus en plus en termes de volumes de transactions. Quelques chiffres illustrent cet argument¹ : en 2002, les transactions enregistrées sur l'ensemble des marchés de contrats à terme de matières premières représentaient 22% des échanges recensés sur les marchés à terme américains, la moitié étant assurée par les contrats sur produits énergétiques. Sur les marchés organisés situés en dehors du territoire américain, l'importance des matières premières reste très significative : en 2002, près de 18,5% des transactions de contrats à terme avaient en effet des matières premières pour sous-jacent. Sur les marchés de gré à gré en revanche, l'importance des dérivés sur matières premières est aujourd'hui marginale. Elle est cependant comparable, contrairement à une idée fréquemment admise, à celle des actions et des indices boursiers.

Pendant très longtemps et jusqu'à récemment, la volatilité des prix des matières premières a été appréhendée de manière extrêmement simple. Fondamentalement, on ne s'intéressait qu'à la volatilité des prix au comptant. Cette dernière ayant toujours été très élevée, des instruments de couverture ont été élaborés pour permettre aux différents opérateurs intervenant sur le marché des

¹ Y. Simon et D. Lautier (2003).

produits physiques (négociants, producteurs, industriels au sens large du terme) de se protéger contre les risques de prix.

Pendant plus d'un siècle, l'instrument privilégié fut le contrat à terme (*futures contract*) négocié au sein des bourses de commerce. L'hypothèse implicite sous-jacente aux opérations de couverture était que la volatilité des prix des contrats à terme était identique (ou très peu différente) de la volatilité des prix des matières premières négociées sur le marché au comptant. Progressivement, de nouveaux instruments de couverture furent développés au sein des bourses de commerce et sur les marchés de gré à gré. La première section présentera les instruments développés en vue de protéger les opérateurs contre le risque de prix.

Depuis quelques années, il est apparu que raisonner par rapport à un prix à terme était beaucoup trop restrictif. Sur un marché coexistent plusieurs prix relatifs à des contrats de maturité différente. Parfois l'horizon de ces contrats est très éloigné et peut atteindre, dans le cas du pétrole brut, une échéance de sept ans. Ces différents prix permettent d'élaborer une structure par terme des prix... et l'on constate que cette structure se déforme, que la volatilité de ces prix n'est pas stable, etc. Le concept de volatilité gagne alors en réalisme et en richesse ce qu'il perd en simplicité et en facilité d'utilisation. L'objet de la deuxième section est de préciser, d'expliquer et d'illustrer, à travers l'exemple du pétrole, la dynamique de la structure par terme des prix.

La troisième section est quant à elle consacrée à l'utilisation que l'on peut avoir de l'information apportée par les prix à terme. Ceux-ci s'avèrent en effet extrêmement utiles, non seulement dans le cadre d'opérations de couverture contre le risque de prix, mais également dans celui de la gestion des stocks, ou encore pour accompagner des décisions d'investissement.

Section 1. Les instruments de couverture développés en vue de protéger les opérateurs contre le risque de volatilité des prix des matières premières

Les instruments de couverture développés en vue de protéger les opérateurs contre le risque de volatilité des prix des matières premières sont nombreux et diversifiés. Ils peuvent offrir une protection contre un risque à court terme ou contre un risque à long terme. Ces instruments peuvent également être fermes ou de nature optionnelle. Ils peuvent, enfin, être négociés dans le cadre de marchés boursiers ou échangés au sein des marchés de gré à gré.

1.1. Les instruments fermes et la protection contre le risque de volatilité des prix à court terme

Le contrat *forward* et le contrat *futures* sont deux instruments permettant aux opérateurs de se protéger contre le risque de prix à court terme. Le premier est négocié sur le marché de gré à gré. Le second l'est au sein des marchés organisés.

1.1.1. Le contrat forward

Pour se protéger contre les risques de prix, les opérateurs intervenant sur le marché *spot* des matières premières peuvent recourir aux contrats *forward*, le vendeur s'engageant à livrer une certaine quantité de matière première à un prix ferme et définitif, l'acheteur s'engageant à prendre livraison de la même quantité.

Les transactions avec livraison différée se sont développées dans la quasi-totalité des marchés de matières premières. Elles ont toutefois connu un développement spécifique dans le secteur pétrolier, en particulier sur le marché du Brent. Par rapport aux contrats habituels prévoyant une livraison différée de la matière première, les transactions *forward* sur le Brent ont introduit une certaine négociabilité, en ce sens que l'acheteur (vendeur) d'une cargaison de pétrole peut revendre (racheter) cette cargaison avec un autre opérateur professionnel, ce qui lui évite ainsi d'avoir à livrer ou à prendre livraison du produit physique. Bien que présentant une certaine négociabilité, ce marché ne doit pas être assimilé pour autant à un marché organisé (*futures market*) du fait, entre autre, de l'absence de tout organisme de compensation.

Le marché *forward* sur le Brent est le plus célèbre de tous les marchés de contrats avec livraison différée, mais il en existe d'autres, moins connus et moins bien organisés, mais tout aussi importants, comme ceux portant sur le brut de Dubaï et l'essence raffinée sur le Golfe du Mexique. Ces marchés (et tous les autres, quelle que soit la matière première sous-jacente aux contrats) présentent de sérieux inconvénients :

- la transparence des prix n'est pas assurée,
- la confidentialité des transactions est impossible à réaliser,
- la liquidité du marché est très réduite, voire inexistante,
- en l'absence de chambre de compensation, la sécurité des co-contractants n'est pas assurée ; les contrats de livraison différée protègent les opérateurs contre le risque de prix, mais ils introduisent un risque de crédit, d'autant plus important que l'engagement pris est à long terme,
- le recours aux contrats *forward* fige et rigidifie les relations commerciales et financières entre les opérateurs,
- cette procédure interdit aux opérateurs de pouvoir tirer profit d'une évolution ultérieure favorable des cours qu'ils n'avaient pas prévue ou qui ne pouvait être anticipée lors de la transaction *forward*.

Pour limiter ces inconvénients, il faut recourir à des instruments de couverture qui dissocient la protection contre le risque de prix de la transaction commerciale proprement dite, qui évitent le risque de crédit, et qui permettent à l'opérateur de tirer profit d'une évolution favorable des prix qui ne pouvait être anticipée lors de la signature du contrat *forward*. Le contrat *futures* répond aux deux premières exigences.

1.1.2. Le contrat futures

Le contrat à terme *futures* est un engagement ferme et définitif prévoyant de livrer (pour celui qui le vend) ou de recevoir (pour celui qui l'achète) à une échéance spécifique, une certaine quantité de matière première, à un prix fixé lors de la négociation du contrat. Cet engagement détermine avec

beaucoup de précision la dénomination, la qualité, la quantité, la date et le lieu de livraison ou de réception des marchandises. Le contrat à terme est donc extrêmement standardisé. Seul le prix est librement négocié.

Tout contrat acheté ou vendu se dénoue au plus tard à son échéance. L'originalité des contrats *futures* est de prévoir deux dénouements possibles : la livraison effective ou la compensation.

La manière *a priori* la plus simple de dénouer le contrat est d'en remplir les obligations en livrant ou en prenant livraison de la marchandise sous-jacente. Cette méthode est en fait peu pratiquée. C'est une opération lourde, assez coûteuse et peu justifiée dans la plupart des cas. Elle est également contraignante car les marchandises livrées doivent être conformes aux caractéristiques de qualité (standardisées parfois à l'extrême) spécifiées par le contrat. En dépit des difficultés et des inconvénients qui lui sont associés, le dénouement des contrats par livraison effective de la marchandise est une méthode qui est indispensable au bon fonctionnement des marchés à terme, car elle établit une passerelle entre le marché au comptant qui est celui des produits physiques et le marché des contrats à terme qui est celui du papier. Moins de 1% des contrats se dénouent, en moyenne, par une livraison effective de marchandise, mais cette passerelle est essentielle. Elle permet, en effet, une évolution identique, dans leurs grandes tendances, des cours sur les deux marchés et elle facilite (elle rend possible, en fait) les opérations de couverture. Si les prix à terme et au comptant n'évoluaient pas de la même manière, des opérations d'arbitrage entre le prix du physique et celui des contrats (*cash and carry* et *reverse cash and carry*) seraient immédiatement entreprises et elles auraient pour conséquence de rétablir l'égalité entre les deux prix.

La possibilité de remplir les obligations du contrat par une livraison effective de produits physiques et les opérations d'arbitrage qui s'en déduisent ont pour conséquence de faire évoluer les prix des contrats *futures* sur le marché à terme parallèlement aux prix des matières premières sur le marché au comptant. Ce parallélisme est renforcé par la présence d'opérateurs intervenant simultanément sur le marché du papier et celui des matières premières.

Tous les professionnels qui produisent, stockent, transforment, négocient, achètent ou vendent des matières premières tirent parti de ce parallélisme pour réaliser des opérations de couverture. Trois raisons expliquent cependant que les variations des cours sur le marché des produits physiques et celui des contrats ne sont pas rigoureusement identiques.

- Les spéculateurs sur les marchés à terme (*futures markets*) anticipent les mouvements de prix, ce qui peut amplifier les fluctuations du marché au comptant et déstabiliser ponctuellement ou temporairement le marché des contrats.

- Les prix à terme (*futures prices*) peuvent être influencés par des éléments qui n'ont rien à voir avec le marché des produits physiques : évolution des taux de change, désaffection des investisseurs à l'égard des marchés de valeurs mobilières ou des marchés de dettes, disponibilité de capitaux susceptibles d'être investis sur les marchés de contrats, etc.

- La base, qui caractérise à tout instant la différence entre le prix à terme et le prix au comptant, et la convergence de cette base au fur et à mesure que s'approche l'échéance du contrat, interdisent un parfait parallélisme de l'évolution des prix.

Dans la quasi-totalité des cas, le dénouement d'un contrat à terme se fait par une compensation de l'opération initiale. Pour ce faire, l'opérateur qui détient une position vendeuse pour une certaine

échéance achète un nombre identique de contrats pour la même échéance. De la même façon, l'opérateur qui détient une position acheteuse vend pour la même échéance un nombre de contrats correspondant à sa position initiale. Cette manière d'exécuter les obligations initialement contractées est la grande originalité des marchés à terme. Elle permet à l'opérateur de déboursier ou d'encaisser, grâce à la présence d'une chambre de compensation, la différence entre les prix des deux transactions sans devoir intervenir sur le marché au comptant.

Pour quelles raisons des opérateurs interviennent-ils sur les marchés à terme ? Quelles motivations les poussent à acheter (vendre) des contrats qui sont compensés par une transaction inverse avant l'arrivée de l'échéance ? La réponse (faussement) naïve à ces questions suggère que les opérateurs sont des spéculateurs qui achètent et vendent des contrats sans posséder ou vouloir acquérir à l'échéance les produits physiques correspondant aux contrats négociés. Ils compensent en conséquence leurs engagements avant l'arrivée du terme et reçoivent ou versent une somme égale à la différence entre le prix d'achat et le prix de vente.

Qu'il y ait sur un marché à terme de nombreuses opérations de spéculation est une réalité, d'une part, une nécessité, d'autre part, mais toutes les études établissent que les transactions à terme n'ont pas eu la spéculation pour premier objectif. Ce sont les opérations de couverture, dont l'objectif est d'offrir une protection contre le risque de prix, qui sont à l'origine des marchés à terme.

L'évolution quasiment parallèle des prix sur le marché au comptant et celui des contrats est un facteur essentiel qui facilite la mise en place des opérations de couverture. Sachant, en effet, que les prix à terme ne peuvent s'éloigner durablement du prix au comptant, il suffit à l'opérateur qui veut se protéger contre le risque de prix de prendre sur le marché des contrats une position inverse à celle qu'il détient sur le marché des produits physiques. Toute évolution défavorable des prix sur le marché au comptant induisant une perte sera contrebalancée par un gain sensiblement égal sur le marché des contrats.

Se protéger contre le risque de hausse des prix implique que l'opérateur a vendu à découvert des matières premières qu'il ne possédait pas (il est en « position courte » sur le marché du physique). Pour se couvrir, il doit prendre une « position longue » sur le marché des contrats, c'est-à-dire acheter des contrats.

Si la position prise sur le marché des contrats est parfaitement symétrique à celle du marché des produits physiques (volume identique, matière première de même qualité, même échéance etc.), et si la volatilité des prix des contrats est identique à celle des prix au comptant (si l'évolution des prix au comptant est strictement parallèle à celle des prix des contrats) alors la protection sera parfaite. Toute perte sur le marché des produits physiques sera contrebalancée par un gain strictement identique sur le marché des contrats.

La réalité est bien différente. Il existe des rompus quant au montant de la couverture ; les différences de qualité entre le produit que l'on couvre et celui servant de couverture sont généralisées ; les différences entre l'échéance des contrats et celle de la transaction sur le marché au comptant sont fréquentes. Tous ces éléments sont autant de sources d'imperfections de la couverture. Elles sont renforcées par les anticipations de certains opérateurs dont les interventions peuvent faire dévier les prix à terme de leur prix théorique. Ces imperfections ne sont pas toutes négatives ; certaines d'entre elles peuvent même être parfois la source de gains. Par ailleurs, si elles sont nombreuses, ces

imperfections ne peuvent être très importantes. Leur montant est de toute façon très largement inférieur au risque que prendrait l'opérateur s'il ne se couvrirait pas.

Le principe et les mécanismes de la protection contre la baisse des prix sont identiques à ceux qui président à la protection contre la hausse. Il s'agit toujours pour l'opérateur de prendre sur le marché des contrats une position inverse à celle qu'il détient sur le marché des produits physiques. Se protéger contre un risque de baisse implique que l'on détienne des stocks (l'opérateur est en « position longue » sur le marché du physique). Pour se couvrir, il doit prendre une « position courte » sur le marché à terme, c'est-à-dire vendre des contrats.

Toutes les remarques précédemment formulées quant à l'imperfection des opérations de couverture contre la hausse des prix s'appliquent bien évidemment aux opérations de protection contre la baisse. Il n'est donc pas nécessaire d'insister sur ce point.

1.1.3. *Le ratio de couverture*

Dans le cadre des opérations de couverture qui viennent d'être présentées, il est supposé que les opérateurs couvrent la totalité de leur position exposée au risque de prix et prennent, pour ce faire, une position sur le marché à terme identique à celle qu'ils détiennent sur le marché physique. En termes plus techniques, le ratio de couverture (*hedge ratio*) est égal à 1.

En fait, l'application au marché physique des matières premières du comportement d'optimisation de la théorie du portefeuille montre qu'un opérateur ne doit pas couvrir toute la position qu'il détient sur le marché des produits physiques. En distinguant au sein des actifs physiques détenus par un opérateur une fraction des stocks qui serait couverte et une fraction complémentaire qui ne le serait pas, Stein (1961) établit que l'opérateur cherchant à maximiser son utilité n'a pas nécessairement intérêt à couvrir la totalité des stocks qu'il détient sur le marché physique.

La proportion optimale de stocks à couvrir étant déterminée, comment, en pratique, cette opération doit-elle être réalisée ? Formulée de manière plus précise, la question s'énonce ainsi : si la proportion optimale de stocks à couvrir correspond à la quantité Q_{SC} , faut-il prendre une position à terme correspondant exactement à la quantité Q_{SC} ?

Selon Ederington (1979), lorsqu'il initie une couverture sur le marché à terme, un opérateur doit considérer, contrairement à ce que pensait Stein, que le comportement des prix à terme n'est pas strictement identique à celui des prix au comptant. Par conséquent, la position sur le marché à terme n'est pas nécessairement identique à celle que l'opérateur désire couvrir sur le marché physique. Si la quantité optimale de stocks à couvrir est Q_{SC} , la quantité de contrats Q_F qui doit être vendue à terme pour couvrir ces stocks sera différente de Q_{SC} . Cette quantité optimale est déterminée par maximisation de l'utilité anticipée de l'opérateur sous contrainte d'une minimisation de la variance du rendement des stocks couverts. La quantité Q_F est donc différente de la quantité Q_{SC} , laquelle était différente de la quantité de stocks détenus par l'opérateur.

Pour que la pratique consistant à prendre sur le marché des contrats à terme une position identique, mais inverse, à la position à couvrir sur le marché physique soit justifiée, il faudrait que la volatilité des prix au comptant soit identique à celle des prix à terme. Ceci aurait pour conséquence une corrélation parfaite entre les variations des prix sur le marché au comptant et sur le marché à terme. Or la volatilité des prix à terme est inférieure à celle des prix au comptant et ce d'autant plus

nettement que l'échéance des contrats à terme est éloignée. Plus l'horizon de la position de couverture est important, plus le ratio de couverture doit être inférieur à un. La pratique naïve considérant que le ratio de couverture est égal à un reste pertinente pour des opérations dont l'échéance est rapprochée. Ces dernières représentent justement l'essentiel des transactions sur un marché de matières premières.

1.2. Les options et la protection contre le risque de volatilité des prix à court terme

Les contrats à terme (*forward* et *futures*) sont des instruments fermes ou symétriques. Cette caractéristique implique qu'ils protègent l'opérateur qui les utilise contre un risque défavorable, mais qu'ils le privent également d'une évolution des cours qui se révélerait favorable. Cette affirmation est tout à fait exacte pour le contrat *forward* dépourvu de liquidité car négocié sur un marché de gré à gré. Elle l'est moins pour le contrat *futures* négocié sur un marché doté d'une chambre de compensation, car l'opérateur peut toujours compenser sa position à terme quand il entrevoit une évolution des cours favorable dont il serait privé du fait de sa couverture.

Les options sur matières premières sont des actifs asymétriques qui permettent aux opérateurs de se protéger contre les risques de prix et de tirer simultanément profit d'une évolution favorable des cours qu'ils n'auraient pas (ou qu'ils auraient mal) anticipée.

1.2.1. Le principe de la couverture

Pour se protéger contre la hausse des prix, l'opérateur doit acheter des options d'achat, ce qui implique le paiement d'une prime versée au vendeur de l'option. Cette dernière sera exercée ou vendue en cas de hausse des cours, ce qui assure la protection de l'opérateur. L'option sera abandonnée si, au lieu de s'élever, les cours ont baissé. Cette modalité de couverture est parfaite, mais coûteuse et, de ce fait, beaucoup moins utilisée que la couverture par les contrats à terme.

La couverture contre la hausse des cours peut être envisagée par la vente d'options de vente. La protection est dans ce cas égale au montant de la prime perçue par le vendeur, mais elle disparaît dès que la hausse des cours est supérieure au montant de la prime. En cas de baisse des cours (au lieu de la hausse anticipée), l'opérateur doit compenser sa position pour éviter d'être exercé. La protection par la vente d'options est donc partielle, risquée et demande une grande compétence de la part de l'opérateur.

Les principes de la couverture sont les mêmes quand on veut se protéger contre la baisse des cours. S'il recherche une très bonne couverture, l'opérateur doit acheter des options de vente. Il peut également envisager de vendre des options d'achat, mais cette couverture est relativement dangereuse et ne peut être recommandée qu'aux opérateurs particulièrement compétents.

1.2.2. Les différents types d'options

Les options négociées sur les marchés organisés ont des contrats à terme pour actif sous-jacent. Elles sont, de ce fait, parfaitement standardisées. Elles ne sont pas très nombreuses, mais pour les matières premières qui en bénéficient, le volume des transactions est, toutes proportions gardées, très élevé. Tel est le cas aux Etats-Unis du pétrole, du fioul, de l'essence, du gaz naturel, du maïs, du blé, des graines de soja, du café, de cacao et du sucre. En Europe, les options sur contrats à terme de

matières premières ne sont actives que pour les métaux du London Metal Exchange et plus spécialement l'aluminium et le cuivre.

Les options sur matières premières négociées sur le marché de gré à gré ne sont pas standardisées. Faute de chambre de compensation, elles ne sont pas négociables, même s'il est possible pour les opérateurs de compenser leur position avant l'échéance en se retournant vers la contrepartie avec laquelle ils ont contracté. Elles sont, par ailleurs, plus diversifiées. A côté des options de première génération (fondamentalement identiques à celles qui sont négociées sur les marchés organisés) sont échangées des options de deuxième génération, parfois qualifiées d'exotiques. Les options asiatiques, ou options sur moyenne, en sont le prototype. Elles répondent aux besoins des opérateurs qui veulent garantir un prix de vente moyen ou un prix d'achat moyen sur une période de temps déterminé.

1.3. Les instruments fermes et la protection contre le risque de volatilité des prix à long terme

Négoié dans le cadre des marchés de gré à gré, le *swap* est l'instrument le plus utilisé par les opérateurs pour se protéger contre le risque de prix à long terme, mais il n'est pas le seul. Sur certains marchés organisés, il est possible d'acheter ou de vendre des contrats *futures* pour des échéances très éloignées. Elles peuvent atteindre 7 ans pour le contrat de pétrole négocié au New York Mercantile Exchange et 27 mois pour les contrats de cuivre et d'aluminium négociés au London Metal Exchange.

1.3.1. Les swaps de matières premières

Le *swap* est un instrument de couverture relativement simple dans son principe. Il permet à un producteur de fixer son prix de vente et à un utilisateur de déterminer son prix d'achat pour une période de temps librement déterminée lors de la négociation du *swap*, généralement comprise entre 18 mois et 5 ans, mais pouvant atteindre, dans des circonstances exceptionnelles, 10 ans.

Dans un *swap* de matière première, l'un des deux co-contractants s'engage à verser, pendant une certaine période et à intervalles réguliers, un prix *spot* qui est par nature variable, et à recevoir un prix fixe ; le second co-contractant s'engage, lui, à recevoir le prix variable et à verser le prix fixe. Dans la mesure où un *swap* de matière première ne se dénoue jamais par une livraison physique, mais par des versements monétaires, on peut le définir comme un contrat signé entre deux parties et prévoyant le versement de paiements périodiques égaux à la différence nette entre un prix fixe et un prix flottant, pour un volume donné d'une matière première bien spécifiée, et ceci durant toute la vie du contrat.

L'opérateur qui redoute une hausse des prix (l'industriel qui achète des matières premières à prix variable sur le marché *spot*) et veut s'en protéger va monter un *swap* avec une banque (mais cela peut être une société de négoce) aux termes duquel l'institution financière (ou le négociant) accepte de lui verser (chaque semaine, chaque mois, chaque trimestre, etc.) un prix flottant (correspondant au prix qu'il verse lui-même sur le marché *spot* pour acquérir la matière première dont il a besoin) et de recevoir aux mêmes dates un prix fixe.

Bien évidemment, le risque de prix dont s'est protégé l'opérateur a été transféré à la banque. Cette dernière ne souhaitant pas, en règle générale, le conserver dans ses livres, elle va le reporter sur

des marchés organisés. La banque étant exposée à un risque de hausse des cours, elle se couvre en achetant des contrats à terme ou, beaucoup plus rarement, des options d'achat sur contrats à terme. Elle peut également monter un deuxième *swap*, symétrique du premier, dans lequel la banque reçoit le prix flottant et verse le prix fixe. La couverture peut venir également de la compensation dans les livres de la banque d'un *swap* qu'elle avait précédemment enregistré qui l'exposait à un risque de baisse des prix. Dans la mesure où il est extrêmement rare que deux *swaps* soient le parfait miroir l'un de l'autre, la banque doit toujours se retourner vers les marchés organisés pour couvrir un risque résiduel. Cette couverture par compensation est une modalité très intéressante pour les banques qui disposent d'un livre de *swaps* bien diversifié (la diversification étant entendue par rapport au type de transactions enregistrées et par rapport à l'origine des opérateurs), car elle réduit très sensiblement le coût de leur protection.

De la même manière, l'opérateur qui redoute une baisse des prix (le producteur de matières premières) et veut s'en protéger monte un *swap* aux termes duquel il reçoit de sa contrepartie (généralement une banque, mais cela peut être une société de négoce) un prix fixe et lui verse un prix flottant. Dans cet exemple, comme dans le précédent, le risque de prix est transféré à la banque. Pour se protéger contre la baisse des cours, la banque se couvre en vendant des contrats à terme, en achetant des options de vente sur contrats à terme, en montant des *swaps* miroirs ou en compensant dans ses livres un *swap* qui l'exposait à un risque de hausse.

Le *swap* est un instrument de couverture remarquable, mais il présente l'inconvénient de bloquer définitivement les prix pour toute la durée du *swap*. Il prive ainsi l'opérateur du bénéfice d'une évolution favorable des cours (d'une baisse s'il verse le prix fixe et reçoit le prix flottant ; d'une hausse, s'il reçoit le prix fixe et verse le prix flottant).

C'est pour permettre aux producteurs de s'assurer un prix de vente minimal sans perdre pour autant la possibilité de tirer profit d'une hausse et aux utilisateurs de matières premières de s'assurer un prix d'achat maximal sans perdre la possibilité de bénéficier d'une baisse des cours, que furent développés les instruments optionnels. Ces derniers protègent, en effet, les opérateurs contre une évolution défavorable des prix sans les priver pour autant d'une évolution favorable des cours.

1.3.2. Les contrats futures à long terme

Les contrats *futures* ont précédemment été présentés comme des instruments de gestion du risque de prix à court terme car, sur la plupart des marchés à terme, l'échéance des contrats est très rarement supérieure à 9-12 mois, et l'essentiel des transactions et de la position ouverte est concentré sur les échéances rapprochées. Il faut cependant remarquer que les échéances de certains contrats négociés sur les marchés organisés ont tendance à s'accroître pour atteindre plusieurs années. De ce fait, il devient possible, à condition que la liquidité soit au rendez-vous, de couvrir des risques de hausse ou de baisse des cours à 3, 5 ou 7 ans.

En réalité, les contrats *futures* ne sont guère utilisés pour gérer des risques à long terme car, en matière de prix, l'horizon de gestion des opérateurs (négociants, producteurs et industriels) est rarement supérieur à une année (l'exercice comptable). Ceci est vrai, mais il n'est pas, malgré tout, interdit pour l'exploitant d'une mine ou d'un gisement pétrolier de tirer profit de prix exceptionnellement élevés. Il n'est pas interdit non plus à l'industriel ayant un horizon de production

de plusieurs années (un fabricant de voitures préparant un nouveau modèle, un raffineur sur le point d'introduire une nouvelle unité de raffinage) de tirer profit de prix exceptionnellement bas pour des horizons éloignés.

Les contrats *futures* à long terme sont en fait importants pour les opérateurs à la recherche d'informations sur les prix utiles aux opérations à long terme qu'ils entreprennent (voir la section trois de cet article).

Le véritable intérêt des contrats *futures* à long terme est indirect. Il est de faciliter le développement des *swaps* de matière première. Quand un professionnel cherche à se protéger contre la baisse des prix par un *swap* à 5 ans prévoyant des versements périodiques mensuels (ceci est un exemple), il transfère ce risque à une banque, laquelle ne souhaite pas, en général, le conserver dans ses livres. Pour s'en débarrasser, elle va le reporter sur le marché à terme en vendant des contrats sur toutes les échéances mensuelles jusqu'à un horizon de 5 ans (les échéances mensuelles n'étant pas nécessairement toutes cotées, la banque devra pratiquer ce que l'on appelle une couverture en pile ; pour éviter de compliquer inutilement la présentation, il est supposé que les échéances mensuelles sont toutes cotées jusqu'à l'horizon de 5 ans).

Les contrats *futures* à long terme présentent un autre intérêt pour la banque servant de contrepartie à un *swap* : celui de pouvoir déterminer le prix fixe qu'elle verse à l'opérateur qui se protège contre le risque de baisse des cours. Ce prix, incluant le profit de la banque et le coût des imperfections de couverture, sera déterminé à partir de l'ensemble des prix à terme cotés jusqu'à l'horizon de 5 ans.

Le raisonnement est bien évidemment identique, mais inverse si la banque est contrepartie d'un *swap* dans lequel l'opérateur industriel se protège contre la hausse des prix des matières premières. La différence tient simplement au fait que la banque achète des contrats à terme, ce qui lui permet, là également, de déterminer le prix fixe qu'elle recevra pendant toute la durée du *swap*.

En fait, il y a une parfaite complémentarité entre les *swaps* et les contrats à long terme négociés sur les marchés organisés. Les premiers ne pourraient pas se développer si les banques qui servent de contrepartie aux opérations de couverture des professionnels opérant sur des marchés de matières premières ne pouvaient à leur tour reporter les risques de prix sur les marchés organisés et déterminer avec précision le montant du prix fixe proposé à l'opérateur qui se couvre. Quant aux contrats à long terme, ils ne pourraient pas se développer en l'absence de *swaps*, les opérations de spéculation (inexistantes sur des horizons aussi éloignés) ou de couverture directe (relativement limitées) ne pouvant à elles seules apporter suffisamment de transactions pour assurer leur essor.

La dernière implication du développement conjoint des *swaps* et des contrats *futures* à long terme est de favoriser l'intégration des différents prix (à court terme, à moyen terme et à long terme) qui caractérisent les marchés de matières premières et de réduire la segmentation de la structure par terme des prix des matières..., mais ceci est une toute autre histoire.

1.4. Les instruments optionnels et la protection contre le risque de volatilité des prix à long terme

Ces instruments sont nombreux, et ils sont tous négociés sur le marché de gré à gré.

1.4.1. Le cap

Le *cap* est un instrument de nature optionnelle permettant à un opérateur qui s'approvisionne à des dates régulières (chaque semaine, chaque mois, chaque trimestre) d'être protégé sur une longue période (de 6 mois à 3 ans) contre une hausse des prix tout en lui permettant de bénéficier d'une éventuelle baisse des cours. *A priori*, cet opérateur pourrait se couvrir en achetant des options d'achat européennes, chacune d'elle ayant pour échéance l'une des dates d'approvisionnement. S'il souhaitait se couvrir pour les 12 prochains mois contre une hausse, sans se priver d'une éventuelle baisse des cours, l'opérateur pourrait acheter 12 options européennes. Une telle modalité de couverture aurait deux inconvénients : elle serait coûteuse (il faudrait s'acquitter de 12 primes), et la gestion administrative en serait lourde. Le *cap* permet de se couvrir aussi bien qu'avec des options traditionnelles tout en limitant les inconvénients.

Grâce à l'achat d'un *cap* l'opérateur est assuré de payer un prix maximal correspondant au prix d'exercice du *cap*. Voyons comment cet instrument est utilisé.

A chaque date d'approvisionnement (la semaine, le mois, le trimestre, etc.) l'opérateur et la banque (qui a vendu le *swap*) comparent le coût d'approvisionnement sur le marché *spot* et le prix d'exercice du *cap*.

- Si le coût d'approvisionnement sur le marché *spot* est supérieur au prix d'exercice, l'opérateur exerce son option et la banque lui verse une somme égale à la différence entre le prix *spot* et le prix d'exercice.

- Si le coût sur le marché *spot* est inférieur au prix d'exercice, l'opérateur abandonne son option, la banque ne reçoit rien et l'opérateur conserve pour lui le bénéfice résultant d'un approvisionnement inférieur au prix d'exercice.

Bien évidemment, l'avantage ainsi consenti à l'acheteur du *cap* n'est pas gratuit. Le coût est représenté par une prime perçue par le vendeur du *cap* (la banque) et payée par l'opérateur lors de l'achat du *cap*. Elle accroît le prix de revient de la matière première. Cette prime indemnise le vendeur du *cap* pour le risque de prix qu'il assume.

En achetant un *cap*, l'opérateur se protège contre la hausse des prix. Ce risque est assumé par le vendeur du *cap*. Ce dernier essaie, bien évidemment, de se couvrir contre le risque qu'il prend en charge. Pour la banque, la couverture la plus simple est d'acheter des contrats à terme au moment de la vente du *cap*. Bien évidemment, dans la réalité, le prix à terme ne peut pas être parfaitement identique au prix au comptant et rien ne permet de penser (bien au contraire) que la banque est parfaitement couverte, mais elle le sait lorsqu'elle vend le *cap*, et elle en tient compte pour déterminer le prix du *cap* qu'elle propose à l'opérateur.

1.4.2. Le floor

Le *floor* est un instrument symétrique du *cap*. C'est un outil de nature optionnelle. Il permet à un opérateur qui vend des matières premières à des dates régulières d'être protégé contre une baisse des prix, tout en lui permettant de tirer profit d'une éventuelle hausse des cours. Cet instrument est utilisé par les producteurs de matières premières et tous les opérateurs qui détiennent des stocks. Il leur permet de s'assurer un prix de vente minimal.

Les modalités de fonctionnement du *floor* sont identiques – toutes choses égales par ailleurs – à celles du *cap*. Il n'est donc pas nécessaire d'insister.

1.4.3. Le collar

Pour l'acheteur d'un *cap* ou d'un *floor*, le coût de ces instruments est représenté par le montant de la prime qu'il doit verser au vendeur. Il peut être élevé, surtout si le cours garanti est très proche du prix sur le marché *spot* au moment de l'achat du *cap* et du *floor*. C'est pour atténuer ce coût que fut créé le *collar*, parfois dénommé tunnel.

Le *collar* est un instrument résultant de la combinaison d'un *cap* et d'un *floor*. Acheter un *collar* conduit à acheter un *cap* et à vendre simultanément un *floor*. Vendre un *collar* consiste à vendre un *cap* et à acheter un *floor*.

1.4.3.1. L'achat d'un collar

Un industriel craint une hausse du prix d'une matière première indispensable à son activité de production. Il souhaite se couvrir par l'achat d'un *cap*, mais il estime que la prime exigée par le vendeur est trop élevée. Il décide alors d'avoir recours à l'achat d'un *collar*. Il achète, pour ce faire, un *cap* et vend un *floor* ayant deux prix d'exercice différents.

Par l'achat d'un *cap*, l'opérateur se protège contre une hausse des cours au-delà d'un niveau fixé par le prix d'exercice du *cap*, mais en vendant un *floor* il renonce *ipso facto* au bénéfice d'une baisse en deçà du niveau fixé par le prix d'exercice du *floor*. En contrepartie de la renonciation au bénéfice d'une baisse des cours, l'opérateur perçoit la prime correspondant à la vente du *floor*, ce qui réduit d'autant le coût d'achat du *cap*.

1.4.3.2. La vente d'un collar

Un producteur craint une baisse du prix de la matière première qu'il produit ou qu'il détient en stock. Pour une raison identique à celle évoquée par l'acheteur du *cap*, l'opérateur souhaite se couvrir par la vente d'un *collar*. Pour ce faire, il vend un *cap* et achète un *floor*.

Par l'achat d'un *floor*, le producteur est protégé contre une baisse du prix en deçà du niveau fixé par le prix d'exercice du *floor*, mais en vendant un *cap*, il renonce *ipso facto* au bénéfice d'une hausse des cours au-delà du niveau fixé par le prix d'exercice du *cap*. En contrepartie de la renonciation au bénéfice d'une hausse des cours, le producteur perçoit une prime correspondant à la vente du *cap*, ce qui réduit d'autant le coût d'achat du *floor*.

1.4.4 Les swaptions

Les options sur les *swaps*, expression souvent contractée sous l'appellation de *swaptions*, sont des instruments conférant à ceux qui les détiennent le droit, mais pas l'obligation, de réaliser un *swap* avec le vendeur de l'option. Il existe bien évidemment des options d'achat et des options de vente.

Dans le cas d'une option d'achat, l'acheteur acquiert le droit de payer le prix fixe, pendant toute la durée du *swap*. Dans le cas d'une option de vente, l'acheteur de l'option a le droit de recevoir le prix fixe, pendant toute la durée du *swap*. Que l'acheteur détienne un *call* ou un *put*, il doit verser une prime au vendeur pour le droit qu'il a de pouvoir initier ou non un *swap*.

Les différents instruments de couverture présentés dans cette section reposent, pour certains d'entre eux au moins, sur l'information apportée par plusieurs prix à terme. Pour bien comprendre comment ces instruments sont élaborés et utilisés, il est intéressant de connaître la façon dont évolue la relation unissant tous les prix à terme pour les différentes maturités disponibles : la structure par terme.

Section 2. La volatilité et la structure par terme des prix des matières premières

Sur un marché à terme coexistent toujours plusieurs prix à terme de maturités différentes. La présence de ces prix, publiquement disponibles, est particulièrement intéressante pour les opérateurs qui utilisent l'information ainsi offerte à des fins de couverture, mais également pour la gestion des stocks et pour l'investissement, comme nous le verrons dans la section trois. La réunion de ces différents prix constitue la structure par terme. Ce concept n'est pas spécifique aux matières premières : on le retrouve, en finance, dès l'instant où un actif est simultanément coté pour différentes échéances. Il est également essentiel pour l'analyse des taux d'intérêt et des taux de change.

Les prix à terme des matières premières étant volatils, la structure par terme se modifie dans le temps : elle est caractérisée par une certaine dynamique. L'objet de cette section est de préciser, d'expliquer et d'illustrer, à travers un exemple, cette dynamique.

Tous les prix à terme n'ont pas le même comportement. En réalité, la volatilité des prix à terme évolue en fonction de la maturité des contrats : c'est l'effet Samuelson. Par ailleurs, le fait que les prix n'évoluent pas d'une façon identique soulève la question d'une éventuelle segmentation de la structure par terme. Il est possible, en effet, d'envisager une certaine déconnection entre différentes parties de la courbe des prix. Ensuite, si tous les prix à terme ne fluctuent pas de la même façon, on peut se demander si leurs mouvements sont purement erratiques ou s'il existe, au contraire, un moyen de déterminer certains éléments communs à tous ces mouvements. L'analyse en composantes principales permet de répondre à ce problème. Enfin, il est possible de s'interroger sur l'évolution de la volatilité des prix des matières premières. A-t-elle tendance à augmenter dans le temps, comme l'ont remarqué certaines études réalisées sur les prix des actions ? Pour répondre à cette question, nous proposons une étude de l'évolution de la volatilité des prix à terme du pétrole brut sur une période de 13 ans.

2.1. L'effet Samuelson

Dans un marché de matières premières, tous les prix à terme n'évoluent pas de la même façon. Leur maturité, de ce point de vue, est déterminante. En effet, les prix à court terme sont caractérisés par une grande instabilité, tandis que les prix à long terme sont beaucoup plus stables. Ceci se traduit par une structure décroissante des volatilités le long de la courbe des prix, et par une corrélation entre le prix à terme le plus proche et les autres prix qui décline avec la maturité.

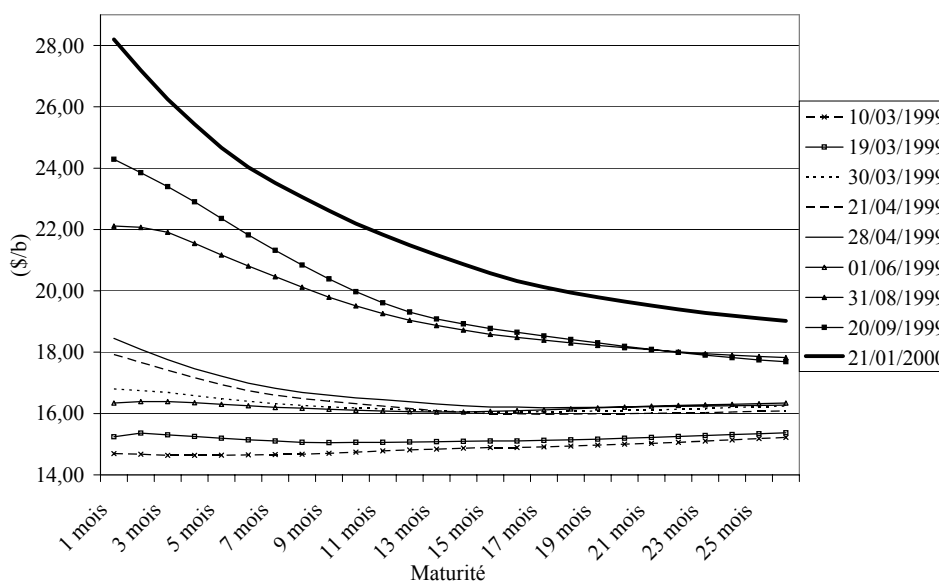
Cette décroissance des corrélations est souvent qualifiée d'« effet Samuelson ». Elle constitue un autre élément explicatif du fait que, sur un marché à terme, le prix au comptant et le prix à terme ne se comportent pas exactement de la même façon. Intuitivement, cet effet est dû au fait qu'un choc

affecte d'autant plus intensément un prix à terme que sa maturité est faible (Samuelson, 1965). En effet, lorsqu'un contrat parvient à expiration, du fait de la convergence entre le prix au comptant et le prix à terme, ce dernier réagit beaucoup plus fortement aux chocs informationnels. Ces fluctuations de prix, influençant avant tout la partie à court terme de la courbe, sont dues au marché physique et à des modifications de l'offre et de la demande.

Anderson (1985), Milonas (1986), et Fama et French (1987) ont mis en évidence la présence d'un effet Samuelson pour un nombre important de marchés de matières premières et d'actifs financiers. Deaton et Laroque (1992, 1996) et Chambers et Bailey (1996) ont quant à eux montré que l'effet Samuelson est une fonction des coûts de stockage. Plus précisément, lorsque le coût de stockage est élevé, les chocs se transmettent assez faiblement par le biais des stocks. Par conséquent, la volatilité des prix à terme diminue rapidement avec la maturité. Enfin, en 1988, Fama et French ont montré que l'effet Samuelson peut parfois être violé sur les maturités les plus proches lorsque les stocks sont abondants. Dans ce cas en effet, les volatilités des prix peuvent initialement augmenter avec la maturité du contrat, car aucune rupture de stocks n'est envisageable à court terme.

La figure 1 propose une illustration de l'effet Samuelson. Elle montre en effet comment la courbe des prix du pétrole brut se déforme, à différentes dates d'observation situées entre mars 1999 et janvier 2000. Les prix sont ceux du contrat West Texas Intermediate (WTI) négocié sur le New York Mercantile Exchange (Nymex). Sur cette figure, les prix à court terme apparaissent comme nettement plus volatils que les prix à long terme. Ce phénomène est particulièrement clair entre mars et avril 1999 lorsque, le report disparaissant, les prix passent en situation de déport. Clairement, cette modification affecte avant tout les prix rapprochés.

Figure 1. Fluctuation des courbes de prix du contrat WTI



Source : Lautier, 2003

Ces différences dans le comportement des prix à terme de différentes maturités suggèrent que des forces de marché différentes déterminent les prix à court et à long terme, ce qui soulève la question d'une éventuelle segmentation de la structure par terme.

2.2. La segmentation de la structure par terme des prix des matières premières

Une structure par terme segmentée est caractérisée par une séparation de la courbe des prix en plusieurs sous-ensembles distincts. Chacun d'eux correspond à des besoins économiques différents des opérateurs, et il est caractérisé par une offre et une demande spécifiques. La segmentation temporelle s'explique par deux phénomènes : la spécialisation de l'activité des agents sur certaines opérations qui les conduisent à intervenir uniquement (sur le marché *forward* comme sur le marché des contrats) sur un sous-ensemble de maturités, d'une part, la réticence de ces agents à modifier leur portefeuille pour tirer profit d'éventuelles opportunités d'arbitrage, d'autre part.

L'hypothèse de segmentation peut être testée en examinant le contenu informationnel de la structure par terme des prix. En effet, si la segmentation est empiriquement établie, l'information apportée par les prix devrait changer de nature avec la maturité du contrat.

Un test de cette nature a été réalisé dans le marché du pétrole brut (Lautier, 2003). Il a montré que les différences observées entre les deux extrémités de la courbe des prix sont telles que l'information concentrée sur les maturités courtes est totalement inutile pour reconstituer les prix à long terme. De ce fait, la courbe des prix du pétrole brut est segmentée. Par ailleurs, l'étude montre que d'un point de vue informationnel, il y a trois groupes cohérents de prix à terme : le premier correspond aux maturités allant de 1 à 28 mois, le deuxième est situé entre 29 et 47 mois, et le dernier regroupe les maturités comprises entre 4 et 7 ans. Parmi ces trois groupes, seuls le premier et le troisième ont un contenu informationnel.

Ainsi, pour le court terme, la production, la consommation, le niveau des stocks et la crainte des ruptures d'approvisionnement seraient les facteurs explicatifs les plus importants de la relation de prix. Pour des maturités plus éloignées, au contraire, les facteurs explicatifs changeraient : les taux d'intérêt, l'inflation anticipée et les prix des énergies concurrentes détermineraient les prix à terme. Dans ce cas, l'information apportée par les prix serait utilisée pour l'investissement.

Les tests réalisés sur le marché du pétrole ont également montré que la segmentation évolue dans le temps. En 1995, selon Gabillon, elle était située au niveau du 18^{ème} mois. Depuis cette date cependant, l'intégration du marché a progressé jusqu'au 28^{ème} mois. Cette évolution peut être expliquée par le processus de maturation du marché à terme. Depuis 1995, le volume des transactions sur le Nymex s'est accru, repoussant ainsi vers des maturités plus éloignées la frontière des contrats activement échangés. Par ailleurs, l'existence de produits dérivés autres que les contrats à terme – les swaps – a pu contribuer à une meilleure intégration. Ce type de phénomènes est caractéristique du processus de maturation d'un marché dérivé, et l'on peut s'attendre à ce que la segmentation diminue et se déplace vers des maturités plus éloignées dans le futur. Cependant, ce qui est spécifique au marché du pétrole brut, c'est l'introduction, depuis 1999, de contrats à long terme. Ceci a créé un nouveau segment dans la courbe des prix, séparé du segment le plus court par des maturités intermédiaires n'ayant pas (ou très peu) de contenu informationnel. Cette extrémité longue de la structure par terme est faiblement connectée aux maturités les plus proches. Ainsi, en dépit de progrès non négligeables, l'intégration temporelle n'est pas encore acquise dans le cas du marché du pétrole brut.

Les raisons expliquant cette segmentation du marché à terme du pétrole brut peuvent probablement être trouvées dans la présence de différentes catégories de participants localisés aux deux extrémités de la courbe : les opérateurs en demande de couverture, agissant sur les maturités courtes, et les investisseurs intervenant sur les prix à long terme. Une liquidité insuffisante empêche vraisemblablement ces opérateurs de quitter leur habitat préféré et d'entreprendre des arbitrages entre maturités. La difficulté à initier des opérations *reverse cash and carry*, due au manque de stocks physiques caractérisant les marchés en situation de déport, est un autre facteur explicatif, particulièrement important dans le cas du pétrole. De plus, les règles de fonctionnement du Nymex imposent des restrictions sur les transactions qui peuvent également freiner l'intégration temporelle. Elles stipulent par exemple que la position d'un opérateur sur le marché à terme du pétrole brut ne doit pas excéder 20 000 contrats.

2.3. L'analyse en composantes principales de la structure par terme des prix

L'utilisation d'une analyse en composantes principales constitue une autre façon d'appréhender la dynamique des prix à terme. En effet, cette méthode statistique permet de réduire les dimensions d'un ensemble de données en contractant l'information qu'il contient. Dans un système incluant de nombreuses variables, la plupart du temps, certaines variables évoluent de concert parce qu'elles sont influencées par les mêmes forces directrices. Et le plus souvent, l'analyse en composantes principales permet de montrer que ces forces sont peu nombreuses.

Dans le domaine des matières premières, l'analyse en composantes principales a été employée par Cortazar et Schwartz (1994), Tolmasky et Hindanov (2002), et Lautier et Galli (2002). Les premiers se sont intéressés à l'analyse de la structure par terme des prix du cuivre. Les deuxièmes se sont consacrés au caractère saisonnier des produits pétroliers. Les troisièmes ont étudié l'influence de la maturité sur la dynamique des prix.

L'application d'une analyse en composantes principales permet tout d'abord, dans la lignée des travaux réalisés dans le domaine des taux d'intérêt², d'identifier les types de mouvements caractérisant la courbe des prix des matières premières. Dans les marchés pétroliers comme dans celui du cuivre, ces mouvements, au nombre de trois, sont relativement simples à décrire. Ils correspondent à des déplacements parallèles de la courbe (facteur de niveau), à des déplacements relatifs (facteur de pente), et à des déformations de la courbe (facteur de courbure). L'existence de mouvements de pentification et de déformation est, là encore, un élément expliquant le fait que, sur un marché à terme, les prix au comptant et à terme n'évoluent pas de façon tout à fait similaire.

L'analyse en composantes principales permet ensuite de déterminer quelle est la contribution de chacun de ces trois facteurs à la volatilité de l'ensemble de la courbe des prix. Dans le cas du pétrole brut, un tel calcul montre que si l'on considère les maturités les plus courtes (jusqu'à 18 mois), les deux premiers facteurs (niveau et pente) expliquent 99% de la variance totale des prix à terme. Par conséquent, au lieu de prendre en compte tous les prix à terme pour expliquer les mouvements de la courbe des prix, il suffit de s'intéresser à ces deux facteurs. En revanche, lorsque des prix à long terme

² L'identification des mouvements des taux d'intérêt est en particulier due à Litterman et Scheinkman (1991) et à Kueh, Litterman et Scheinkman (1994).

(jusqu'à sept ans) sont intégrés dans l'analyse, le premier facteur perd en importance, principalement en faveur du second facteur ainsi que, plus marginalement, du troisième facteur.

La dynamique de la courbe des prix étant caractérisée (décroissance des volatilités avec la maturité) et identifiée (déplacements parallèles et pentification), il est possible de s'interroger sur l'évolution de cette dynamique dans le temps.

2.4. L'évolution dans le temps de la volatilité des prix à terme du pétrole brut

Pour mieux comprendre l'évolution du marché du pétrole brut, son processus de maturation, ainsi que la dynamique des prix à terme, nous examinons l'évolution de la volatilité des prix à terme dans le temps. Notre étude porte sur une période de treize ans, allant du début de l'année 1989 à la fin de l'année 2001. L'idée est de tester l'hypothèse d'un éventuel accroissement de la volatilité des prix du pétrole, parallèlement aux analyses menées sur ce thème dans les marchés d'actions³. Cet accroissement pourrait être dû, par exemple, à l'utilisation de certains produits dérivés sophistiqués basés sur les contrats à terme, à des interventions intempestives et inopportunes de spéculateurs ou enfin, plus simplement, à une diminution des marges de manœuvre des opérateurs du marché physique.

Cette interrogation sur l'évolution dans le temps de la volatilité des prix n'est pas spécifique aux marchés de matières premières. Elle vient de l'importance accrue des investisseurs institutionnels (et de l'impact que peuvent avoir les opérations de certains d'entre eux, les *hedge funds*) et du développement permanent de nouveaux instruments toujours plus sophistiqués. L'inquiétude provient de ce que, les marchés dérivés organisés étant caractérisés par une très grande liquidité, ils rendent possible l'intervention déstabilisatrice de certains spéculateurs. Poussé à son extrême, un tel phénomène remettrait en cause l'utilité même des marchés dérivés puisque, créés à l'origine pour répondre à l'instabilité, ils en viendraient à la susciter.

Cette étude est effectuée à partir de trois indicateurs très simples : l'écart-type, les fluctuations quotidiennes maximales et les corrélations des prix à terme. Elle ne se donne pas pour objectif de répondre définitivement à ces questions, qui mériteraient un développement plus conséquent. Elle apporte simplement quelques éclairages.

2.4.1. L'écart-type des prix à terme du pétrole brut

Le tableau 1 reproduit la volatilité des prix à terme pour des maturités de un à douze mois, calculée pour chacune des treize années et pour l'ensemble de la période.

Ce tableau offre tout d'abord une bonne illustration de l'effet Samuelson : pour toutes les années considérées, et pour toutes les maturités étudiées, la volatilité des prix à terme décroît strictement avec leur horizon. La violation mise en évidence par Fama et French (1988) ne se manifeste à aucune occasion. Ce résultat est conforme à l'intuition : le marché du pétrole brut est en effet structurellement en situation de déport.

³ Sur ce thème, il est par exemple possible de consulter l'étude publiée en décembre 2002 par le Conseil des Marchés Financiers, intitulée « L'augmentation de la volatilité du marché des actions » (54 p).

Tableau 1. Ecart-type des prix à terme du pétrole brut, 1989-2001

Année	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	9 mois	10 mois	11 mois	12 mois
1989	1,20	1,08	1,06	1,06	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,02	1,02
1990	6,57	6,05	5,37	4,78	4,31	3,91	3,58	3,30	3,06	2,86	2,70	2,57
1991	1,88	1,78	1,63	1,54	1,44	1,35	1,26	1,18	1,12	1,07	1,03	1,00
1992	1,28	1,20	1,13	1,07	1,02	0,97	0,91	0,86	0,81	0,77	0,74	0,70
1993	1,71	1,64	1,57	1,50	1,43	1,36	1,30	1,24	1,18	1,12	1,06	1,01
1994	1,69	1,52	1,39	1,28	1,18	1,10	1,03	0,96	0,90	0,85	0,80	0,76
1995	0,88	0,87	0,80	0,73	0,67	0,63	0,59	0,56	0,54	0,51	0,49	0,48
1996	2,23	2,22	2,19	2,10	1,98	1,84	1,71	1,60	1,50	1,41	1,32	1,25
1997	4,03	3,62	3,18	2,76	2,38	2,06	1,79	1,56	1,33	1,15	1,01	0,90
1998	1,55	1,50	1,47	1,45	1,43	1,41	1,38	1,35	1,31	1,27	1,22	1,18
1999	4,50	4,33	4,10	3,85	3,61	3,38	3,17	2,98	2,80	2,64	2,50	2,36
2000	2,91	2,78	2,69	2,62	2,57	2,53	2,49	2,45	2,41	2,38	2,35	2,33
2001	3,53	3,34	3,20	3,03	2,86	2,69	2,54	2,40	2,26	2,14	2,03	1,92
Moyenne	2,61	2,46	2,29	2,14	1,99	1,87	1,75	1,65	1,56	1,48	1,41	1,34
1989-2001	4,87	4,61	4,36	4,14	3,93	3,75	3,58	3,43	3,29	3,17	3,05	2,95

Quant à l'évolution de la volatilité dans le temps, elle est mise en évidence en reproduisant en caractères gras les écart-types dont la valeur est supérieure à la moyenne observée sur la période. A cet égard, l'année de la guerre du Golfe se distingue, naturellement, par une volatilité particulièrement élevée. Hormis cette année spécifique, les périodes de plus forte volatilité correspondent, pour toutes les maturités ou presque, aux années 1997, 1999, 2000, et 2001. Or, ces années sont toutes situées en fin de période.

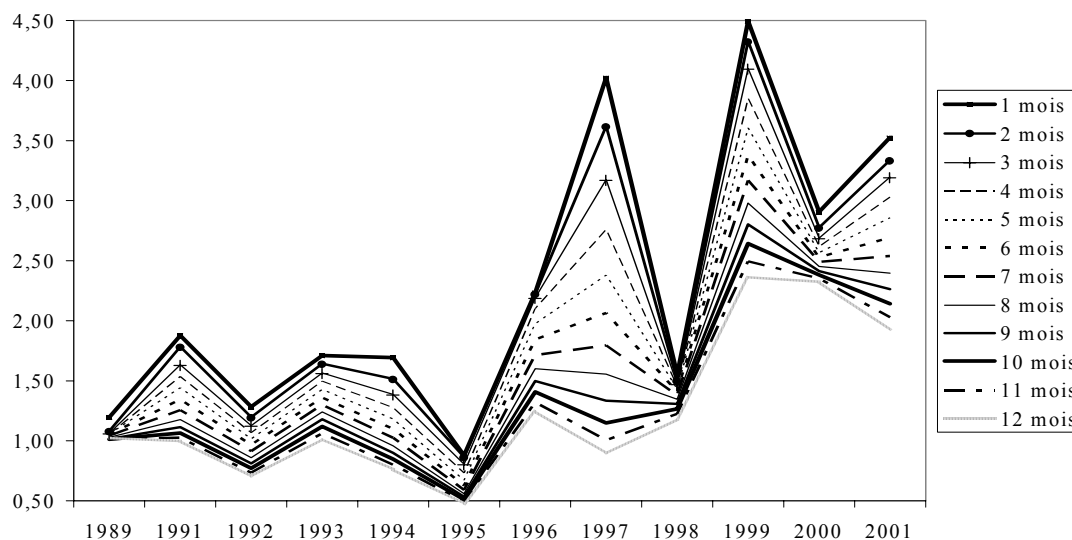
Pour avoir une vision plus claire de l'évolution de la volatilité dans le temps, nous avons éliminé l'année 1990, qui inclut la guerre du Golfe et peut être légitimement considérée comme exceptionnelle. Le tableau 2 reprend les calculs du tableau 1, mais la moyenne est calculée sans tenir compte de l'année 1990.

Tableau 2. Ecart-type des prix à terme du pétrole brut, 1989-2001 (ex 1990)

Année	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	9 mois	10 mois	11 mois	12 mois
1989	1,20	1,08	1,06	1,06	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,02	1,02
1991	1,88	1,78	1,63	1,54	1,44	1,35	1,26	1,18	1,12	1,07	1,03	1,00
1992	1,28	1,20	1,13	1,07	1,02	0,97	0,91	0,86	0,81	0,77	0,74	0,70
1993	1,71	1,64	1,57	1,50	1,43	1,36	1,30	1,24	1,18	1,12	1,06	1,01
1994	1,69	1,52	1,39	1,28	1,18	1,10	1,03	0,96	0,90	0,85	0,80	0,76
1995	0,88	0,87	0,80	0,73	0,67	0,63	0,59	0,56	0,54	0,51	0,49	0,48
1996	2,23	2,22	2,19	2,10	1,98	1,84	1,71	1,60	1,50	1,41	1,32	1,25
1997	4,03	3,62	3,18	2,76	2,38	2,06	1,79	1,56	1,33	1,15	1,01	0,90
1998	1,55	1,50	1,47	1,45	1,43	1,41	1,38	1,35	1,31	1,27	1,22	1,18
1999	4,50	4,33	4,10	3,85	3,61	3,38	3,17	2,98	2,80	2,64	2,50	2,36
2000	2,91	2,78	2,69	2,62	2,57	2,53	2,49	2,45	2,41	2,38	2,35	2,33
2001	3,53	3,34	3,20	3,03	2,86	2,69	2,54	2,40	2,26	2,14	2,03	1,92
Moyenne	2,28	2,16	2,03	1,91	1,80	1,70	1,60	1,51	1,43	1,36	1,30	1,24

En éliminant l'année 1990, l'écart entre la moyenne et les années situées en fin de période (1997, 1999, 2000, 2001) se creuse. Il semble donc que l'on assiste, depuis 1999 au moins, à une augmentation de la volatilité, ce qui apparaît assez clairement à travers la figure 2.

Figure 2. Ecart-type des prix à terme de un à douze mois, 1989-2001 (ex 1990)



Face à cet accroissement de volatilité, il peut être intéressant de voir si le phénomène affecte ou non toutes les maturités considérées de façon homogène. Si, par exemple, il s'avérait que les prix à court terme deviennent relativement plus volatils que les prix à long terme, l'augmentation de la volatilité du marché à terme pourrait alors être attribuée à une augmentation de la volatilité sur le marché physique, laquelle se transmettrait au marché papier, tout en étant amortie du fait de l'effet Samuelson. Dans ce cas, les inquiétudes relatives à l'éventuelle action déstabilisatrice de certains opérateurs du marché à terme n'auraient pas de motifs. En revanche, une telle observation n'exclurait pas une déstabilisation du marché physique... ce qui pose d'autres problèmes.

Le tableau 3 permet de montrer, pour les années identifiées précédemment (c'est-à-dire, dans une vision un peu restrictive, de 1999 à 2001), de quelle façon la volatilité affecte les différentes maturités. Il représente en effet, pour chacune de ces trois années et maturité par maturité, l'écart entre la volatilité observée et la moyenne de la période calculée au tableau 2 (sans prendre en considération l'année 1990).

Tableau 3. Ecarts de volatilité par rapport à la moyenne pour les années 1999 à 2001

Ecarts	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	9 mois	10 mois	11 mois	12 mois
1999/M	2,21	2,17	2,07	1,94	1,80	1,68	1,57	1,47	1,37	1,28	1,20	1,12
2000/M	0,63	0,62	0,65	0,70	0,76	0,83	0,89	0,94	0,98	1,02	1,06	1,08
2001/M	1,25	1,18	1,16	1,11	1,06	1,00	0,94	0,88	0,83	0,78	0,73	0,68

Le calcul des écarts par rapport à la moyenne montre que la volatilité des prix à court terme augmente plus que celle des prix à long terme en 1999 et en 2001. Pour ces deux années en effet,

l'écart de la volatilité par rapport à la moyenne est d'autant plus élevé que la date d'expiration du contrat est rapprochée. En revanche, c'est le phénomène inverse qui est observé pour l'année 2000. Par conséquent, si le critère de l'écart-type des prix à terme nous permet de mettre en évidence une augmentation de la volatilité au cours de la période récente, il nous est impossible, faute peut être de disposer d'un historique suffisamment long, d'imputer cet accroissement de volatilité à une hausse des fluctuations de prix sur le marché physique, ou à une augmentation indépendante de la volatilité sur le marché à terme.

2.4.2. Les fluctuations de prix quotidiennes

Le second critère retenu pour mesurer la volatilité du marché est la variation de prix maximale quotidienne observée au cours de la période, pour chaque année et pour chaque maturité. Ce critère complète le premier dans la mesure où l'écart-type reflète uniquement la moyenne des écarts, et non leur distribution. Il ne permet donc pas de montrer si l'accroissement de la volatilité constaté provient ou non, pour une large part, de plus fortes fluctuations observées au cours d'une journée. Pour étudier cet aspect de la volatilité, nous nous intéressons, dans un premier temps, aux variations de prix quotidiennes maximales observées, et, dans un second temps, à la fréquence et à l'ampleur des variations de prix quotidiennes.

• Les variations de prix quotidiennes maximales

Le tableau 4 reproduit les variations de prix quotidiennes maximales, exprimées en valeur absolue et en pourcentage, enregistrées au cours de la période pour chaque année et chaque maturité. Dans un premier temps, les fluctuations à la baisse ne sont donc pas distinguées des fluctuations à la hausse.

Tableau 4. Variations quotidiennes maximales en pourcentage et en valeur absolue, 1989-2001

Années	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	9 mois	10 mois	11 mois	12 mois
1989	16,39	9,10	7,19	6,54	7,49	6,30	5,91	5,95	15,96	5,99	6,00	6,01
1990	16,01	10,01	9,74	9,78	10,17	10,56	10,94	10,50	10,03	9,50	8,92	8,44
1991	33,00	31,89	27,98	24,74	22,65	20,89	19,22	17,70	16,39	15,03	13,87	12,87
1992	6,89	6,93	6,39	5,87	5,58	5,43	5,29	5,09	4,99	4,94	4,84	4,74
1993	6,53	6,31	5,99	5,69	5,46	5,29	5,19	4,99	4,84	4,69	4,55	4,41
1994	6,94	6,46	6,19	5,94	5,62	5,38	5,13	4,83	4,66	4,49	4,33	4,24
1995	6,05	4,21	3,28	3,05	2,81	2,67	2,52	2,31	2,15	2,05	2,06	2,07
1996	10,10	6,84	6,05	5,87	5,67	5,61	5,49	5,48	5,52	5,43	5,40	5,24
1997	5,45	4,41	4,09	3,92	3,74	3,56	3,42	3,43	3,54	3,65	3,75	3,79
1998	15,29	14,78	12,37	11,76	10,63	9,70	8,96	8,37	7,87	7,52	7,23	6,95
1999	6,90	6,52	6,22	5,76	5,39	5,06	4,71	4,44	4,26	4,10	4,01	3,86
2000	12,14	9,02	8,38	8,11	8,02	7,89	7,94	7,98	7,99	7,90	7,84	7,78
2001	15,25	14,55	11,45	11,53	11,63	11,27	10,56	9,91	9,37	9,02	8,78	8,67
Moyenne	12,07	10,08	8,87	8,35	8,07	7,66	7,33	7,00	7,50	6,49	6,28	6,08
1989-2001	33,00	31,89	27,98	24,74	22,65	20,89	19,22	17,70	16,39	15,03	13,87	12,87

Pour mettre en évidence leur évolution, les fluctuations de prix maximales situées au-dessus de la moyenne calculée sur l'ensemble de la période sont, là encore, reproduites en caractère gras. Ainsi, le tableau 4 montre que les variations les plus fortes (à la baisse ou à la hausse) correspondent aux années 1990, 1991, 1998, 2000 et 2001. Parmi les trois années de forte volatilité identifiées à partir du critère de l'écart-type des prix à terme, seules les années 2000 et 2001 se distinguent à nouveau, quoique de façon un peu moins prononcée pour l'année 2000. Cependant, la présence de l'année 1998 dans les années de fortes fluctuations confirme bien l'idée d'un accroissement de l'ampleur des fluctuations maximales sur la période récente. Par ailleurs, ces variations maximales n'affectent pas toujours toutes les maturités de façon homogène, sans qu'une tendance claire puisse être identifiée à cet égard.

Si l'on exclut à nouveau la période de la Guerre du Golfe (tableau 5), l'accroissement de l'ampleur des fluctuations maximales au cours de la période récente est confirmé, cette fois pour toutes les maturités de l'année 2000. Par ailleurs, l'année 1989 apparaît comme marquée d'assez amples fluctuations, et les années 2000-2001 sont situées largement au-dessus de la moyenne de la période.

Tableau 5. Variations quotidiennes maximales en pourcentage et en valeur absolue, 1989-2001 (ex 1991)

Années	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	9 mois	10 mois	11 mois	12 mois
1989	16,39	9,10	7,19	6,54	7,49	6,30	5,91	5,95	15,96	5,99	6,00	6,01
1990	16,01	10,01	9,74	9,78	10,17	10,56	10,94	10,50	10,03	9,50	8,92	8,44
1992	6,89	6,93	6,39	5,87	5,58	5,43	5,29	5,09	4,99	4,94	4,84	4,74
1993	6,53	6,31	5,99	5,69	5,46	5,29	5,19	4,99	4,84	4,69	4,55	4,41
1994	6,94	6,46	6,19	5,94	5,62	5,38	5,13	4,83	4,66	4,49	4,33	4,24
1995	6,05	4,21	3,28	3,05	2,81	2,67	2,52	2,31	2,15	2,05	2,06	2,07
1996	10,10	6,84	6,05	5,87	5,67	5,61	5,49	5,48	5,52	5,43	5,40	5,24
1997	5,45	4,41	4,09	3,92	3,74	3,56	3,42	3,43	3,54	3,65	3,75	3,79
1998	15,29	14,78	12,37	11,76	10,63	9,70	8,96	8,37	7,87	7,52	7,23	6,95
1999	6,90	6,52	6,22	5,76	5,39	5,06	4,71	4,44	4,26	4,10	4,01	3,86
2000	12,14	9,02	8,38	8,11	8,02	7,89	7,94	7,98	7,99	7,90	7,84	7,78
2001	15,25	14,55	11,45	11,53	11,63	11,27	10,56	9,91	9,37	9,02	8,78	8,67
<i>Moyenne</i>	<i>10,33</i>	<i>8,26</i>	<i>7,28</i>	<i>6,99</i>	<i>6,85</i>	<i>6,56</i>	<i>6,34</i>	<i>6,11</i>	<i>6,76</i>	<i>5,77</i>	<i>5,64</i>	<i>5,52</i>

Pour étudier un peu plus précisément l'évolution des fluctuations de prix maximales, il peut être intéressant de distinguer les fluctuations à la hausse et la baisse. L'intuition sous-jacente (beaucoup plus évidente, cependant, sur des marchés d'actions que sur des marchés de contrats à terme) est que les périodes de baisse peuvent susciter des comportements de panique poussant les prix plus loin qu'ils ne le devraient et induire ensuite des corrections, donc une plus forte volatilité des prix.

Le tableau 6 s'intéresse uniquement aux fluctuations maximales à la hausse. Parmi les cinq années citées précédemment, seules quatre restent remarquables : 1990, 1991, 1998 et 2001.

Tableau 6. Fluctuations quotidiennes maximales à la hausse, en pourcentage, 1989-2001

Max	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	9 mois	10 mois	11 mois	12 mois
1989	9,02	4,28	4,50	5,23	7,49	5,82	5,91	5,95	15,96	5,99	6,00	6,01
1990	14,54	8,74	6,88	7,11	7,33	7,54	7,72	7,89	8,04	8,15	8,23	8,30
1991	12,79	13,15	6,35	6,51	6,66	6,79	6,90	6,98	7,04	7,08	7,11	7,14
1992	5,06	4,81	4,61	4,48	4,29	4,16	4,03	3,89	3,76	3,63	3,49	3,40
1993	4,41	4,35	4,41	4,36	4,26	4,11	4,03	4,01	3,94	3,86	3,79	3,72
1994	6,76	6,44	6,19	5,94	5,62	5,38	5,13	4,83	4,66	4,49	4,33	4,24
1995	3,37	3,20	3,28	3,05	2,81	2,67	2,52	2,31	2,10	2,00	1,89	1,79
1996	9,86	6,84	6,05	5,87	5,67	5,61	5,49	5,48	5,52	5,43	5,40	5,24
1997	5,45	4,41	4,09	3,92	3,74	3,56	3,42	3,43	3,54	3,65	3,75	3,79
1998	15,29	14,78	12,37	11,76	10,63	9,70	8,96	8,37	7,87	7,32	6,79	6,46
1999	6,76	6,01	5,61	5,29	4,98	4,72	4,56	4,41	4,26	4,10	4,01	3,86
2000	8,45	7,46	6,68	5,88	5,29	5,19	5,09	4,99	4,89	4,89	4,93	4,97
2001	8,41	8,22	7,80	7,55	7,31	7,09	6,93	6,76	6,59	6,43	6,26	6,05
Moyenne	8,47	7,13	6,06	5,92	5,85	5,56	5,44	5,33	6,01	5,15	5,08	5,00
1989-2001	15,29	14,78	12,37	11,76	10,63	9,70	8,96	8,37	15,96	8,15	8,23	8,30

La comparaison entre les fluctuations maximales à la hausse (tableau 6) et les fluctuations maximales à la baisse (tableau 7) montre que, au cours de la période, les variations maximales sont plus importantes à la baisse qu'à la hausse. Les années caractérisées par les plus fortes variations à la baisse sont identiques à celles du tableau 4 : 1989, 1990, 1998, 2000, 2001.

Tableau 7. Fluctuations quotidiennes maximales à la baisse, en pourcentage, 1989-2001

Min	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois	9 mois	10 mois	11 mois	12 mois
1989	-16,39	-9,10	-7,19	-6,54	-6,46	-6,30	-5,91	-5,61	-5,26	-4,95	-4,65	-4,39
1990	-16,01	-10,01	-9,74	-9,78	-10,17	-10,56	-10,94	-10,50	-10,03	-9,50	-8,92	-8,44
1991	-33,00	-31,89	-27,98	-24,74	-22,65	-20,89	-19,22	-17,70	-16,39	-15,03	-13,87	-12,87
1992	-6,89	-6,93	-6,39	-5,87	-5,58	-5,43	-5,29	-5,09	-4,99	-4,94	-4,84	-4,74
1993	-6,53	-6,31	-5,99	-5,69	-5,46	-5,29	-5,19	-4,99	-4,84	-4,69	-4,55	-4,41
1994	-6,94	-6,46	-6,04	-5,68	-5,31	-5,08	-4,85	-4,56	-4,40	-4,24	-4,09	-3,94
1995	-6,05	-4,21	-3,04	-2,85	-2,64	-2,49	-2,33	-2,19	-2,15	-2,05	-2,06	-2,07
1996	-10,10	-5,18	-5,40	-4,46	-4,07	-4,02	-3,96	-3,98	-4,01	-4,06	-4,12	-4,16
1997	-4,43	-3,79	-3,43	-3,17	-2,96	-2,79	-2,67	-2,65	-2,62	-2,54	-2,46	-2,38
1998	-10,90	-10,61	-10,02	-9,55	-9,11	-8,77	-8,44	-8,13	-7,82	-7,52	-7,23	-6,95
1999	-6,90	-6,52	-6,22	-5,76	-5,39	-5,06	-4,71	-4,44	-4,21	-3,96	-3,90	-3,78
2000	-12,14	-9,02	-8,38	-8,11	-8,02	-7,89	-7,94	-7,98	-7,99	-7,90	-7,84	-7,78
2001	-15,25	-14,55	-11,45	-11,53	-11,63	-11,27	-10,56	-9,91	-9,37	-9,02	-8,78	-8,67
Moyenne	-11,66	-9,58	-8,56	-7,98	-7,65	-7,37	-7,08	-6,75	-6,47	-6,19	-5,95	-5,74
1989-2001	-33,00	-31,89	-27,98	-24,74	-22,65	-20,89	-19,22	-17,70	-16,39	-15,03	-13,87	-12,87

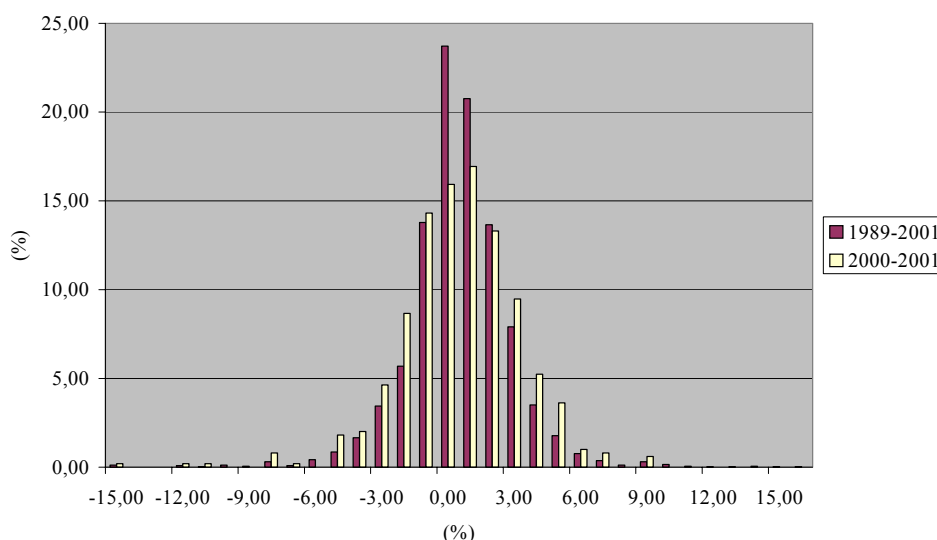
Ce phénomène de fluctuations fortes à la baisse n'est cependant pas nécessairement uniquement imputable à des comportements mimétiques en situation de baisse des cours. Il peut être du, plus simplement, au fait que le marché à terme américain du pétrole brut est dominé par des opérateurs en position de couverture courte – c'est-à-dire vendeurs de contrats à terme – comme l'avait montré Verleger dans une étude publiée en 1996.

L'étude des variations de cours maximales observées semble donc confirmer les résultats obtenus à l'aide du critère de l'écart-type, à savoir l'accroissement de la volatilité des prix sur une période récente. Une étude un peu plus précise peut cependant être menée à l'aide du critère des variations quotidiennes, en se référant cette fois, non plus aux seules variations maximales observées, lesquelles représentent des cas extrêmes, mais à la fréquence et à l'ampleur des variations quotidiennes.

● Fréquence de distribution des variations de prix

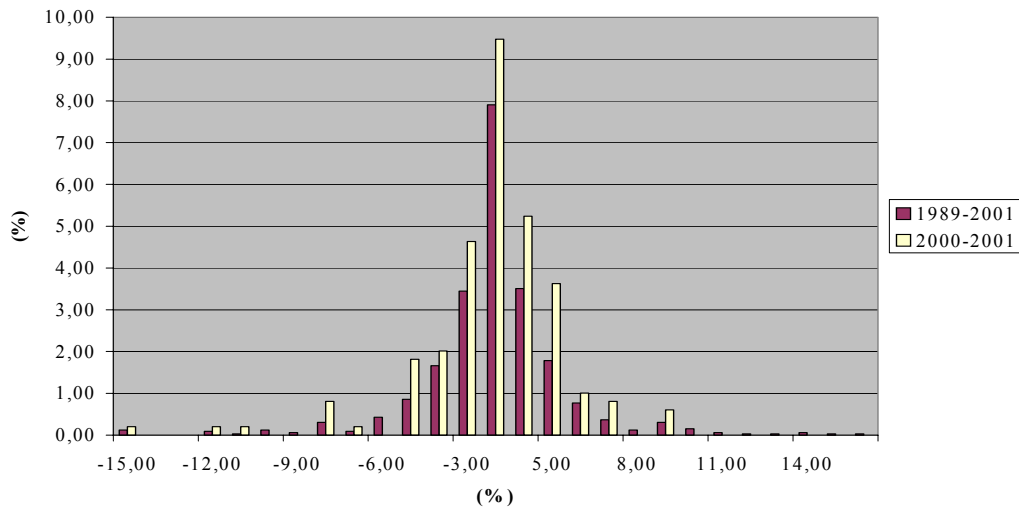
La figure 3 permet de comparer la fréquence de distribution des variations quotidiennes des prix à terme à un mois, exprimées en pourcentage et en valeur absolue pour deux périodes différentes, de 1989 à 2001 et pour les années 2000-2001. Cette figure montre que la période 2000-2001 est caractérisée par des fluctuations de plus grande amplitude. Les fluctuations d'une faible ampleur (de 0 à 1% par jour en valeur absolue) sont en effet plus fréquentes sur l'ensemble de la période 1989-2001. Elles représentent, plus précisément, 23,7% des fluctuations observées. Pour les années 2000-2001, la proportion de ces fluctuations passe à 15,93% seulement. Le nombre de fluctuations de faible ampleur diminue donc au cours des années 2000-2001. En revanche, les fluctuations de taille plus importantes, de 5% par exemple, augmentent.

Figure 3. Fréquence de distribution des variations de prix quotidiennes, en pourcentage et en valeur absolue, pour les prix à terme à un mois et pour deux périodes : 1989-2001 et 2000-2001.



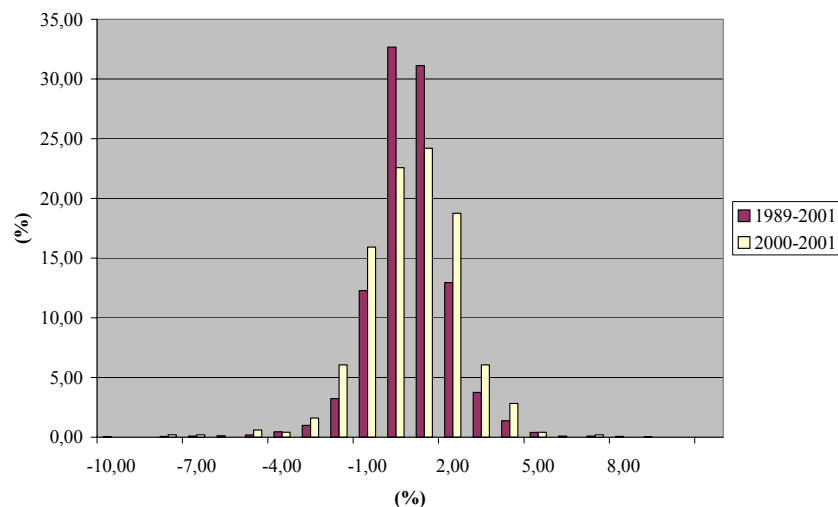
La figure 4 permet de mettre en évidence, de façon plus précise, l'augmentation des fluctuations de grande ampleur au cours de la période 2000-2001. Elle se focalise en effet sur les fluctuations quotidiennes de plus de 3% en valeur absolue. Celles-ci apparaissent alors comme nettement plus nombreuses pour la période 2000-2001.

Figure 4. Fréquence de distribution des variations de prix quotidiennes supérieures à 3% en valeur absolue, pour les prix à terme à un mois et pour deux périodes : 1989-2001 et 2000-2001.



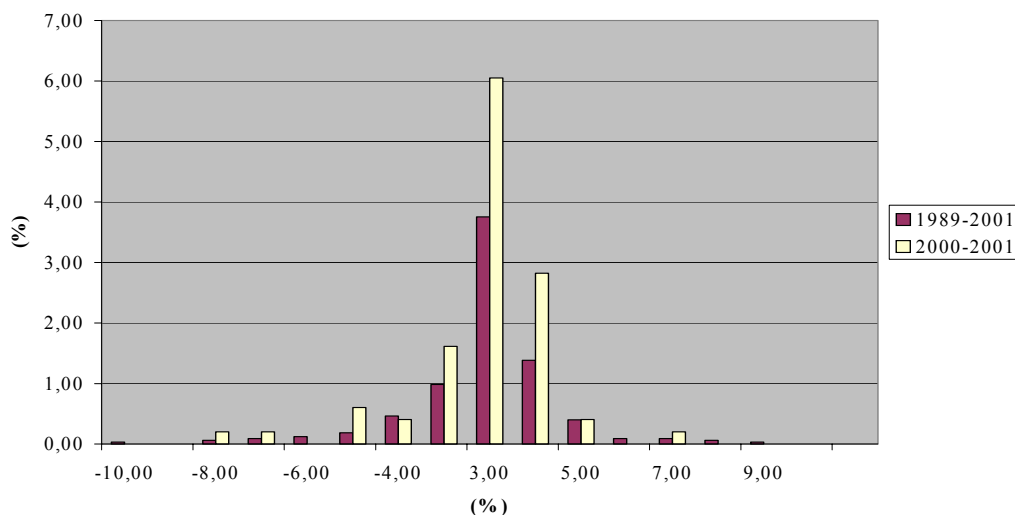
Après avoir étudié l'évolution de la fréquence de distribution des fluctuations de prix pour des prix à terme d'une maturité de un mois, il peut être intéressant de se demander si le même phénomène se reproduit, à l'identique, pour des maturités plus éloignées. L'étude de la fréquence de distribution des variations quotidiennes des prix à terme à 12 mois, reproduite par la figure 5, montre en premier lieu que les variations de faible ampleur sont, pour les prix à long terme, beaucoup plus importantes que pour les prix à court terme. En effet, pour la période 1989-2001, les variations comprises entre 0% et 1% représentent non plus 23,7% des fluctuations observées, comme c'était le cas pour les prix à un mois, mais 32,67%.

Figure 5. Fréquence de distribution des variations de prix quotidiennes, en pourcentage et en valeur absolue, pour les prix à terme à douze mois et pour deux périodes : 1989-2001 et 2000-2001.



Par ailleurs, on observe, en tendance, la même évolution pour les prix à long et à court terme : le nombre de fluctuations de faible ampleur est beaucoup moins important pour la période 2000-2001 qu'il ne l'est pour la période 1989-2001. La figure 6, qui reproduit les fluctuations quotidiennes d'une ampleur supérieure à 3% en valeur absolue, illustre bien ce phénomène, qui apparaît d'ailleurs comme plus marqué pour les prix à terme à douze mois que pour les prix à un mois.

Figure 6. Fréquence de distribution des variations de prix quotidiennes supérieures à 3% en valeur absolue, pour les prix à terme à douze mois et pour deux périodes : 1989-2001 et 2000-2001.



Du point de vue de la fréquence et de l'ampleur des fluctuations quotidiennes, il semble donc que la volatilité du marché du pétrole brut se soit accrue au cours des années récentes. L'ampleur des fluctuations maximales a augmenté, ainsi que le nombre de fluctuations de grande ampleur.

Cet accroissement de la volatilité a-t-il eu un impact sur la façon dont se transmettent les chocs le long de la courbe des prix ? Certaines fluctuations de grande ampleur semblent parfois affecter certaines maturités plutôt que d'autres. Il est donc légitime de se demander si ces fluctuations n'entraînent pas une diminution de la corrélation entre les prix à terme de différentes maturités, ce qui traduirait une moindre efficacité des relations d'arbitrage inter-temporelles sur le marché à terme et donc, une moindre efficacité du marché.

2.4.3. L'évolution des corrélations entre les prix à terme

Le troisième critère retenu pour apprécier l'évolution dans le temps de la volatilité des prix à terme du pétrole brut est donc la corrélation entre les prix à terme. Une simple application de l'effet Samuelson permet de prédire que la corrélation entre deux prix à terme de maturité rapprochée doit être supérieure à la corrélation entre un prix à court terme et un prix à long terme.

Le tableau 8 reproduit les corrélations, au cours de la période 1989-2001, entre le prix à un mois et les prix ayant une maturité de deux à douze mois. Dans la mesure où nous nous intéressons, cette fois, à une éventuelle diminution de ces corrélations au fil du temps, les chiffres en caractères

gras représentent les corrélations situées *au-dessous* de la moyenne calculée sur l'ensemble de la période. Les années marquées par une faible corrélation sont les années 1989, 1991, et, de façon moins prononcée, 1996 et 2000. Quoique, une fois de plus, la période de la guerre du Golfe se démarque, il semble que le critère des corrélations ne laisse pas apparaître d'évolution significative sur la période d'étude. Elle ne permet d'observer ni une diminution des corrélations considérées dans leur ensemble, ni une diminution de la corrélation entre la partie courte et la partie longue de la courbe des prix.

Tableau 8. Corrélations entre le prix à terme à 1 mois et les prix à terme de 2 à 12 mois, 1989-2001

Corrélations	1/2 M	1/3 M	1/4 M	1/5 M	1/6 M	1/7 M	1/8 M	1/9 M	1/10 M	1/11 M	1/12 M
1989	0,917	0,832	0,758	0,710	0,673	0,639	0,606	0,577	0,551	0,526	0,501
1990	0,993	0,992	0,987	0,980	0,973	0,966	0,959	0,952	0,946	0,940	0,933
1991	0,979	0,929	0,874	0,824	0,782	0,752	0,726	0,708	0,692	0,676	0,661
1992	0,998	0,997	0,995	0,993	0,991	0,989	0,986	0,983	0,979	0,974	0,968
1993	0,998	0,996	0,994	0,992	0,990	0,989	0,987	0,986	0,984	0,981	0,979
1994	0,992	0,980	0,968	0,958	0,948	0,939	0,928	0,917	0,907	0,897	0,887
1995	0,991	0,978	0,966	0,953	0,936	0,917	0,898	0,878	0,856	0,831	0,809
1996	0,967	0,931	0,907	0,895	0,891	0,888	0,885	0,882	0,880	0,876	0,873
1997	0,997	0,993	0,989	0,983	0,974	0,962	0,943	0,914	0,874	0,827	0,776
1998	0,986	0,968	0,951	0,936	0,924	0,916	0,911	0,907	0,903	0,900	0,896
1999	0,999	0,996	0,993	0,991	0,988	0,984	0,982	0,979	0,976	0,973	0,969
2000	0,986	0,966	0,945	0,925	0,904	0,885	0,868	0,853	0,839	0,825	0,811
2001	0,991	0,980	0,973	0,968	0,962	0,958	0,953	0,949	0,946	0,943	0,940
Moyenne	0,984	0,964	0,946	0,931	0,918	0,906	0,895	0,883	0,872	0,859	0,846
1989-2001	0,995	0,987	0,978	0,969	0,959	0,950	0,941	0,931	0,922	0,912	0,903

L'étude des corrélations entre les autres prix à terme (prix à deux mois et prix pour les échéances consécutives, prix à trois mois et prix pour les échéances consécutives,) est reproduite en annexe. Elle confirme la spécificité des années 1989, 1991 et 2000. En revanche, l'année 1996 n'apparaît plus comme significativement différente des autres. L'élimination des deux années 1989 et 1991, et le calcul d'une nouvelle moyenne ne prenant pas en compte ces deux années, ne permettent pas de modifier les remarques faites ci-dessus. Au regard des corrélations entre prix à terme, aucune évolution sensible ne peut donc être mise en évidence entre 1989 et 2001.

Ainsi, l'augmentation constatée de la volatilité sur le marché du pétrole brut entre les années 1989 et 2001 ne permet pas de conclure, à l'aide des critères retenus dans cette étude, à une réduction de l'efficacité des opérations d'arbitrage inter-temporelle.

Section 3. La volatilité et ses implications pour la gestion de l'entreprise

La volatilité des prix des matières premières n'est pas sans implications pour les entreprises produisant, commercialisant et transformant des matières premières. Celles-ci si se trouvent en effet exposées à un risque de prix. Les marchés dérivés constituent avant tout une réponse à ce besoin de couverture. Cependant, à travers l'information apportée par les prix à terme, ces marchés procurent

également un moyen de gérer les stocks détenus sur le marché physique. Ils peuvent même servir de support à la décision d'investissement.

3.1. La couverture contre le risque de prix

Les opérations de couverture contre le risque de prix constituent l'utilisation la plus naturelle des marchés dérivés de matières premières, créés dans cet objectif.

Comme cela a été souligné en première section de cet article, une stratégie de couverture traditionnelle consiste à prendre une position courte (longue) sur le marché à terme pour couvrir une position longue (courte) sur le marché physique, les deux positions ayant le même volume et la même échéance. Au fur et à mesure de la progression des marchés de matières premières, de nouvelles stratégies ont cependant été envisagées. Certaines d'entre elles sont particulièrement intéressantes parce qu'elles exploitent l'information apportée par la structure par terme des prix des matières premières. Cette information sert à instaurer un décalage entre les échéances des positions détenues sur le marché physique et sur le marché à terme. Plus précisément, la stratégie vise dans ce cas à couvrir des engagements de livraison différée à *long* terme à l'aide de contrats à *court* terme.

Deux raisons peuvent conduire à mettre en place une telle stratégie.

La première est la recherche d'une plus grande liquidité. En effet, dans tous les marchés à terme, les contrats les plus activement échangés sont ceux dont la maturité est la plus proche. Privilégier les échéances les plus courtes permet de couvrir un plus gros volume sans subir de variations de prix. En contrepartie, il devient alors nécessaire de renouveler régulièrement le portefeuille de couverture lorsque la date d'expiration des contrats approche, afin de maintenir en permanence une position sur le marché papier. Par conséquent, cette stratégie expose à un risque de renouvellement de la position.

La seconde raison est la recherche d'une amélioration de la performance commerciale. Etre capable d'avoir des positions à long terme sur le marché physique et de couvrir le produit de ces ventes constitue en effet un enjeu non négligeable. En témoigne le succès rencontré par Metallgesellschaft⁴ lorsque, au début des années 1990, cette entreprise a proposé des échéances de livraison sur le marché physique atteignant 5 à 10 ans.

Cette première tentative de couverture avec décalage d'échéance, initiée par la firme allemande, s'est soldée par un échec retentissant : 2,4 milliards de dollars de pertes. Cependant, elle a suscité de nombreuses recherches visant à apprécier l'intérêt de telles opérations. L'étude de ce cas permet en effet de formuler trois conclusions essentielles.

Première conclusion, les modèles de structure par terme –qui ont pour objet de répliquer le plus fidèlement possible la structure par terme des prix des matières premières observée empiriquement – sont très utiles pour la gestion du risque de prix lorsque la couverture est conçue de façon dynamique. En effet, en présence d'un décalage entre les échéances des positions détenues sur le marché physique et sur le marché à terme, le volume de ces positions ne peut être identique. Les modèles de structure par terme acquièrent alors toute leur importance, car ils offrent un moyen, non

⁴ L'affaire Metallgesellschaft a donné lieu à de nombreuses publications. Les articles de Culp et Miller (1994, 1995), et de Edwards et Canter (1995) sont particulièrement bien documentés.

seulement de valoriser la position sur le marché physique, mais également de déterminer le ratio de couverture adéquat.

Seconde conclusion, la capacité d'un modèle à représenter correctement la structure par terme des prix est un élément essentiel de la performance d'une stratégie de couverture. L'efficacité des opérations de couverture peut en effet être totalement remise en question par l'usage d'un mauvais modèle. C'est une erreur de ce type qui explique en partie la débâcle de Metallgesellschaft.

Troisième conclusion : il ne faut pas négliger les flux financiers susceptibles d'être engendrés par la stratégie de couverture. Ces derniers peuvent provenir des appels de marge nécessaires au maintien de la position sur le marché à terme et du coût du renouvellement du portefeuille de couverture. Les dirigeants de Metallgesellschaft et ses actionnaires n'étaient certainement pas conscients du montant que ces flux pouvaient atteindre, par manque d'informations ou parce que ces sommes avaient été sous-estimées

Les travaux de recherche initiés à la suite de l'affaire Metallgesellschaft, sur les stratégies de couverture associées aux modèles de structure par terme des prix des matières premières (Brennan et Crew (1997), Schwartz (1997), Neuberger (1999), Routledge, Seppi et Spatt (2000), Veld-Merkoulova et de Roon (2003)...) partagent un certain nombre de points communs.

En premier lieu, ils abordent tous le problème de la couverture en construisant un portefeuille dont le comportement réplique celui de l'actif à couvrir (la position à long terme sur le marché physique). Ce portefeuille est une combinaison de contrats à terme de différentes maturités. Le nombre de ces positions à terme est au moins égal au nombre de facteurs sous-jacents inclus dans le modèle de structure par terme. Dans un modèle de structure par terme des prix des matières premières, un facteur sous-jacent (ou variable d'état) est une source d'incertitude affectant le comportement du prix à terme. Traditionnellement, le choix de ces facteurs se porte sur le prix au comptant, le *convenience yield*⁵, le taux d'intérêt, et le prix à long terme.

En deuxième lieu, ces travaux ont montré que pour couvrir correctement un engagement *forward*, il faut que la sensibilité de la valeur présente de l'engagement par rapport à chacun des facteurs sous-jacents soit égale à celle du portefeuille de couverture. Par conséquent, les ratios de couverture dépendent des variables d'état et leur valeur diminue lorsque la maturité de la position *forward* augmente.

En troisième lieu, à ce jour, les maturités des contrats à terme composant le portefeuille de couverture sont toujours choisies de façon arbitraire, tout comme la date du renouvellement du portefeuille. Enfin, peu de travaux ont été réalisés sur les coûts de transaction et sur les coûts de financement associés aux positions détenues sur le marché à terme. L'aspect opérationnel de ces stratégies a donc été un peu négligé.

⁵ Le *convenience yield* est un concept spécifique aux matières premières. Il est parfois traduit en français par le terme « rendement d'opportunité ». Le *convenience yield* représente le revenu implicite associé à la détention de stocks sur le marché physique. Il peut être apparenté, dans d'autres domaines de la finance, aux dividendes associés à une action, ou aux coupons associés à une obligation.

3.2. La gestion des stocks

Les marchés dérivés ne servent pas qu'à la couverture contre le risque de fluctuation des prix. A travers l'information qu'ils diffusent concernant les prix à terme, ils autorisent également une meilleure allocation des marchandises dans le temps et dans l'espace. En particulier, ils constituent un outil utile pour la gestion des stocks.

L'apport fondamental des marchés à terme, du point de vue de la gestion des stocks, est de rendre les opérateurs indifférents à l'évolution du niveau absolu des cours. En présence de marchés à terme, ils n'ont en effet à se préoccuper que de l'évolution *relative* des cours, c'est-à-dire du différentiel entre le prix à terme pour une échéance donnée et le prix au comptant. Lorsque ce différentiel est positif, le marché est en report. Dans le cas inverse, il est en déport.

Un détenteur de matières premières fait évoluer ses stocks de marchandises en fonction de l'évolution qu'il anticipe sur les cours futurs. Quand il prévoit une hausse des prix, il accumule des stocks. Inversement quand il anticipe une baisse, il s'en débarrasse. Toute la difficulté réside dans le fait d'avoir une information fiable sur l'évolution des cours. Dans la mesure où un prix à terme est une anticipation, conditionnelle à l'information disponible à une date donnée, du prix au comptant futur, les marchés à terme apportent une telle information. Plus précisément, en combinant cette information avec des opérations de couverture, il est possible d'améliorer la gestion des stocks détenus par les entreprises et les organismes de stockage.

En gérant des stocks à l'aide des informations et des instruments fournis par un marché à terme, l'entrepreneur ne raisonne plus par rapport à des prix absolus, mais il se réfère à des écarts entre le prix au comptant et le prix à terme. Les opérations de couverture ne doivent plus alors être considérées comme une assurance contre les pertes, mais comme un instrument de gestion des stocks.

Selon qu'il existe un report ou un déport, l'opérateur diminue ses stocks ou au contraire les augmente. En présence d'un report, le marchand achète du physique parce que le prix au comptant est relativement bas par rapport au prix à terme et qu'il a de bonnes raisons de penser qu'il y aura égalité à l'échéance entre les prix au comptant et à terme. Dans le cas d'un déport, le marchand réduit ses stocks parce que le prix au comptant est relativement haut par rapport au prix à terme et qu'il a de bonnes raisons d'anticiper une réduction du déport dans les mois à venir. Plus le déport est fort, plus l'incitation est grande à se débarrasser de marchandises pour alimenter un marché où se fait sentir la relative rareté des produits physiques. La vente de stocks superflus à un moment de rareté (la hausse relative du prix au comptant par rapport au prix à terme traduit un excès de demande ou une insuffisance de l'offre au comptant) abaisse le prix au comptant, et l'achat de contrats élève les cours à terme. L'organisme de stockage régularise par ses interventions sur les marchés à terme l'évolution des prix et des flux de produits physiques. Plus le report est important, plus l'incitation est grande pour l'opérateur à acheter des marchandises et à les conserver. En réalisant un profit de stockage, il allège par là même un marché surchargé. Si le déport et le report sont faibles et si aucune raison particulière ne conduit l'opérateur à envisager une variation de la base, il ne modifie pas le volume de ses stocks et les opérations de couverture sont peu nombreuses.

Ainsi, les marchés à terme permettent à celui détenant des stocks excédentaires de se rendre compte de la perte subie en conservant des marchandises qui ne lui sont pas indispensables, à une

époque où l'offre est réduite. Le marché à terme permet également de déterminer le profit induit par un accroissement des stocks quand l'offre de produits physiques est trop importante sur le marché au comptant.

Cette analyse contribue à expliquer les variations dans le temps du volume des opérations de couverture. De nombreuses opérations sur les marchés de contrats sont en effet initiées dans l'anticipation d'un changement dans la relation entre le prix au comptant et le prix à terme.

3.3. La décision d'investissement

Les marchés à terme, par l'information qu'ils offrent, peuvent également servir de support à la décision d'investissement. Dans ce contexte, l'horizon des décisions d'investissement étant généralement supérieur à celui des transactions sur le marché à terme, il est nécessaire de disposer d'un modèle permettant de prolonger la courbe des prix. Le recours aux modèles de structure par terme des prix, dans ce contexte, est assez intuitif : avec un tel outil, il est en effet possible de déterminer un prix à terme pour n'importe quelle date d'expiration, même si cette dernière est très éloignée. Par conséquent, il est également possible de valoriser les flux de trésorerie futurs associés à un projet d'investissement.

Toutes les études utilisant les modèles de structure par terme pour la décision d'investissement sont conçues dans le cadre des options réelles. Cette théorie, basée sur une analogie avec les options financières, a pour objectif d'identifier la composante optionnelle comprise dans la plupart des projets d'investissement et de l'évaluer, lorsque c'est possible⁶. Son principal avantage est que, contrairement aux méthodes traditionnellement utilisées pour la sélection des projets d'investissement – comme la valeur actuelle nette – elle prend en considération la flexibilité d'un projet. C'est d'autant plus important que le projet est entaché d'irréversibilité, comme c'est le cas de la plupart des investissements miniers.

Toutes les études réalisées dans le domaine de la décision d'investissement (Brennan et Schwartz (1985), Schwartz (1997), Schwartz (1998), Smith et McCardle (1998), Schwartz et Smith (2000), Cortazar, Schwartz et Cassassus (2001), ...) partagent un certain nombre de points communs. Le cadre d'analyse choisi est souvent assez rudimentaire, parce que la valorisation d'une option est généralement beaucoup plus compliquée que celle d'un contrat à terme. Pour ce qui est du projet d'investissement, les auteurs supposent, la plupart du temps, que le volume et la qualité des réserves minières sont connus, de même que leurs coûts d'extraction et d'exploitation. Ils ignorent le progrès technologique et le risque d'expropriation. Ainsi, la principale source d'incertitude devient le prix de la matière première, dont le comportement dynamique est représenté avec un modèle de structure par terme, la plupart du temps lui aussi simplifié. Quant aux options réelles associées au projet, parmi les différentes catégories développées dans la littérature sur ce thème, c'est à celle de reporter l'investissement qu'est accordée la plus grande attention. Cette option est d'ailleurs la plus simple de toutes. Elle représente la possibilité d'attendre avant d'investir, afin de collecter de l'information utile à la décision d'investissement. Certains auteurs s'intéressent cependant également à d'autres options :

⁶ Une présentation de la théorie des options réelles peut être trouvée dans Copeland et Antikarov (2001), Grinblatt et Titman (2001), Trigeorgis (1999).

celle de fermer temporairement la mine, celle d'abandonner, celle de modifier l'intensité de l'exploitation, celle de développer le projet en plusieurs étapes. Enfin, les travaux empiriques dans ce domaine sont rares, parce que l'estimation des paramètres des modèles devient une question délicate lorsque l'horizon d'analyse dépasse celui des contrats échangés sur le marché.

La recherche dans le domaine de la décision d'investissement a donc commencé par explorer des cadres d'analyses assez idéalistes : tout, sauf le prix de la matière première, est le plus souvent supposé connu dans la mine. Les travaux progressent cependant vers plus de réalisme. Récemment par exemple, d'autres sources d'incertitude – en particulier les risques géologique et technique – ont été prises en considération.

Conclusion

La volatilité est un élément incontournable pour tout opérateur intervenant dans le domaine des matières premières ; elle va de pair avec cette catégorie d'actifs. C'est pour cette raison que très tôt, des moyens ont été mis en œuvre pour y remédier. Exploités avec profit dans d'autres domaines où la volatilité se faisait ressentir, ces moyens n'ont cessé de se développer sous l'impulsion des opérateurs. Cette évolution a permis d'aboutir à un ensemble extrêmement varié, allant du plus simple au plus sophistiqué, d'instruments, de marchés et de techniques qui rendent possible l'obtention d'une protection à court ou à long terme, qui permettent une meilleure gestion des stocks, et qui peuvent servir de support à la décision d'investissement.

Ces instruments et marchés, bien que très diversifiés, n'en sont pas pour autant redondants. Bien au contraire, ils sont complémentaires, et cette complémentarité introduit de nombreux liens, non univoques, entre produits et entre marchés. Au cœur de cet ensemble, grâce à l'information qu'ils fournissent, se trouvent les marchés organisés. Les prix à terme issus de ces derniers présentent en effet l'avantage indéniable d'être publiquement disponibles. Par ailleurs, le caractère standardisé des transactions auxquelles ils se réfèrent facilite grandement les comparaisons inter temporelles. Naturellement, l'existence de tels liens soulève la question d'un éventuel risque systémique susceptible de fragiliser l'ensemble de la construction. Ce type de problème est au cœur des interrogations des institutions régulatrices de ces marchés. A ce jour cependant, ce type de risque ne s'est pas manifesté.

Bien des problématiques relient donc les matières premières aux autres actifs financiers. Il est cependant possible d'identifier deux caractéristiques propres aux matières premières. Premièrement, dans ces marchés, la volatilité change selon la situation de prix. Plus précisément, elle est moins forte lorsque les prix sont en report que lorsqu'ils sont en déport. En situation de déport en effet, les stocks sont rares sur le marché physique, et ils peuvent ne pas suffire à absorber les chocs affectant l'offre et la demande. Cette pénurie peut également rendre délicates, voire impossibles, les opérations d'arbitrage entre le marché physique et le marché papier, contribuant ainsi à une plus forte volatilité des prix. Deuxièmement, dans les marchés de matières premières, quelle que soit la situation de prix, les opérations d'arbitrage sont rendues difficiles par l'existence de différentiels de qualité, la présence de coûts de transport, de stockage et de livraison, par le caractère non stockable de certaines marchandises, et par l'impossibilité dans laquelle un opérateur peut se trouver d'emprunter des

matières premières pour réaliser des ventes à découvert. Cette imperfection des opérations d'arbitrage est un autre élément susceptible d'augmenter la volatilité des prix.

Références bibliographiques

Anderson R. (1985). Some determinants of the volatility of futures prices. *Journal of Futures Markets*, 5, 331-348.

Brennan M.J. & Crew N. (1997). Hedging long maturity commodity commitments with short-dated futures contracts, *in* M. Dempster & S. Pliska (Eds), *Mathematics of derivatives securities*, pp 165-190, Cambridge: Cambridge University Press.

Chambers M.J. & Bailey R.E. (1996). A Theory of commodity price fluctuations. *Journal of Political Economy*, 104(5), 924-957.

Conseil des Marchés Financiers. (2002). L'augmentation de la volatilité du marché des actions, décembre, 54 p.

Copeland T. & Antikarov V. (2001). *Real options : a practitioner's guide*, Texere, 372 p.

Cortazar G. & Schwartz E.S. (1994). The valuation of commodity contingent claims, *Journal of Derivatives*, 1(4), 27-39.

Cortazar G., Schwartz E.S., & Casassus J. (2001). Optimal exploration investments under price and geological-technical uncertainty: a real options model. *R & D Management*, 31, 181-189.

Culp C.L. & Miller M.H. (1994). Hedging a flow of commodity deliveries with futures: lessons from Metallgesellschaft. *Derivatives Quarterly*, 1(1), 7-15.

Culp C.L. & Miller M.H. (1995). Metallgesellschaft and the economics of synthetic storage. *Journal of Applied Corporate Finance*, 7(4), 62-76.

Deaton A. & Laroque G. (1992). On the behaviour of commodity prices. *Review of Economic Studies*, 59(198), 1-24.

Deaton A. & Laroque G. (1996). Competitive storage and commodity price dynamics. *Journal of Political Economy*, 104(5), 896-923.

Ederington L. (1979). The hedging performance of the new futures markets, *Journal of Finance*, 34, 157-170.

Edwards F.R. & Canter M.S. (1995). The collapse of Metallgesellschaft: unhedgeable risks, poor hedging strategy, or just bad luck? *Journal of Futures Markets*, 15(3), 221-264.

Fama E.F. & French K.R. (1987). Commodity futures prices: some evidence of forecast power, premiums, and the theory of storage, *Journal of Business*, 60(1), 55-74.

Fama E.F. & French K.R. (1988). Business cycles and the behavior of metals prices, *Journal of Finance*, 43(5), 1075-1093.

- Gabillon J. (1995). Analysing the forward curve, in Risk Books (1st ed.), *Managing Energy Price risk*, London.
- Grinblatt M. & Titman S. (2001). *Financial markets and corporate strategy*, 2nd edition, Mc Graw Hill, 880 p.
- Lautier D. & Galli A. (2002). Report on term structure models of commodity prices: elaboration and improvement. French Institute of Energy Research (IFE), 70 p.
- Lautier D. (2003). The informational value of crude oil futures prices. Working Paper 2003-6, Cereg, University Paris IX.
- Milonas N. (1986). Price variability and the maturity effect, *Journal of futures markets*, 6, 443-460.
- Neuberger A. (1999). Hedging long-term exposures with multiple short-term futures contracts, *The Review of Financial Studies*, Fall, 12(3), 429-459.
- Routledge B.R., Seppi D.J. & Spatt C.S. (2000). Equilibrium Forward Curves for Commodities, *Journal of Finance*, 55(3), 1297-1338.
- Samuelson P.A. (1965). Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly. *Industrial Management Review*, 6, 41-49, Spring.
- Schwartz E.S. (1997). The stochastic behavior of commodity prices: implications for valuation and hedging. *Journal of Finance*, 52, 923-973.
- Schwartz E.S. (1998). Valuing long-term commodity assets. *Journal of Energy Finance and Development*, 3, 85-99.
- Simon Y. & Lautier D. (2001). *Marchés dérivés de matières premières et gestion du risque de prix*, 2^o éd., Economica, Paris.
- Simon Y. & Lautier D. (2003). *Techniques financières internationales*, 8^o éd., Economica, Paris.
- Smith J.E. & McCardle K.F. (1998). Valuing oil properties: integrating option pricing and decision analysis approaches. *Operations Research*, 46(2), 198-217.
- Stein J.L. (1961). Simultaneous determination of spot and futures prices. *American Economic Review*, 51, 1012-25.
- Tolmasky C. & Hindanov D. (2002). Principal component analysis for correlated curves and seasonal commodities: the case of the petroleum market. *Journal of Futures Markets*, 22 (11), 1019-1035.
- Veld-Merkoulova Y.V. & de Roon F.A. (2003). Hedging long-term commodity risk. *Journal of Futures Markets*, 23(2), 109-133.
- Verleger P.K. (1996). *The link between financial and physical markets*, Charles River Associates Study, Washington.
- Trigeorgis L., (1999). *Real options*, MIT Press.

Annexe. Corrélations entre prix à terme

Tableau A1. Corrélations entre le prix à terme à 2 mois et les prix à terme de 3 à 12 mois, 1989-2001

Corrélations	2/3 M	2/4 M	2/5 M	2/6 M	2/7 M	2/8 M	2/9 M	2/10 M	2/11 M	2/12 M
1989	0,9808	0,9450	0,9167	0,8916	0,8673	0,8432	0,8191	0,7980	0,7763	0,7567
1990	0,9988	0,9943	0,9897	0,9841	0,9785	0,9730	0,9671	0,9618	0,9561	0,9504
1991	0,9817	0,9495	0,9153	0,8841	0,8605	0,8398	0,8253	0,8117	0,7979	0,7850
1992	0,9996	0,9986	0,9972	0,9955	0,9935	0,9913	0,9883	0,9845	0,9798	0,9746
1993	0,9994	0,9984	0,9972	0,9958	0,9945	0,9933	0,9919	0,9903	0,9883	0,9866
1994	0,9968	0,9912	0,9848	0,9785	0,9717	0,9640	0,9554	0,9472	0,9389	0,9303
1995	0,9966	0,9904	0,9821	0,9701	0,9553	0,9399	0,9240	0,9055	0,8840	0,8642
1996	0,9911	0,9813	0,9752	0,9724	0,9706	0,9674	0,9648	0,9628	0,9594	0,9559
1997	0,9990	0,9967	0,9927	0,9862	0,9759	0,9592	0,9322	0,8943	0,8494	0,7989
1998	0,9955	0,9868	0,9777	0,9693	0,9628	0,9587	0,9552	0,9524	0,9492	0,9456
1999	0,9992	0,9977	0,9959	0,9936	0,9912	0,9889	0,9865	0,9838	0,9811	0,9782
2000	0,9940	0,9815	0,9668	0,9508	0,9351	0,9210	0,9085	0,8966	0,8845	0,8727
2001	0,9975	0,9941	0,9907	0,9874	0,9841	0,9810	0,9781	0,9757	0,9733	0,9711
<i>Moyenne</i>	0,9946	0,9850	0,9755	0,9661	0,9570	0,9477	0,9382	0,9280	0,9168	0,9054
1989-2001	0,9976	0,9922	0,9858	0,9787	0,9711	0,9634	0,9555	0,9474	0,9393	0,9312

Tableau A2. Corrélations entre le prix à terme à 3 mois et les prix à terme de 4 à 12 mois, 1989-2001

Corrélations	3/4 M	3/5 M	3/6 M	3/7 M	3/8 M	3/9 M	3/10 M	3/11 M	3/12 M
1989	0,9898	0,9755	0,9600	0,9434	0,9260	0,9074	0,8907	0,8734	0,8579
1990	0,9979	0,9948	0,9905	0,9859	0,9812	0,9759	0,9714	0,9661	0,9608
1991	0,9904	0,9722	0,9522	0,9357	0,9212	0,9103	0,9000	0,8895	0,8795
1992	0,9996	0,9986	0,9972	0,9955	0,9935	0,9907	0,9870	0,9824	0,9773
1993	0,9997	0,9990	0,9981	0,9971	0,9961	0,9951	0,9937	0,9921	0,9905
1994	0,9985	0,9953	0,9913	0,9865	0,9808	0,9742	0,9674	0,9602	0,9523
1995	0,9982	0,9935	0,9850	0,9734	0,9607	0,9472	0,9315	0,9127	0,8947
1996	0,9977	0,9948	0,9928	0,9912	0,9886	0,9860	0,9839	0,9807	0,9773
1997	0,9993	0,9968	0,9919	0,9832	0,9683	0,9432	0,9072	0,8635	0,8138
1998	0,9976	0,9928	0,9875	0,9831	0,9800	0,9773	0,9750	0,9724	0,9693
1999	0,9996	0,9987	0,9972	0,9955	0,9937	0,9917	0,9894	0,9871	0,9844
2000	0,9963	0,9881	0,9775	0,9662	0,9555	0,9458	0,9363	0,9266	0,9170
2001	0,9991	0,9972	0,9950	0,9927	0,9904	0,9882	0,9862	0,9842	0,9823
<i>Moyenne</i>	0,9972	0,9921	0,9859	0,9792	0,9720	0,9641	0,9554	0,9454	0,9352
1989-2001	0,9983	0,9947	0,9898	0,9842	0,9782	0,9717	0,9650	0,9580	0,9510

Tableau A3. Corrélations entre le prix à terme à 4 mois et les prix à terme de 5 à 12 mois, 1989-2001

Corrélations	4/5 mois	4/6 mois	4/7 mois	4/8 mois	4/9 mois	4/10 mois	4/11 mois	4/12 mois
1989	0,9962	0,9884	0,9780	0,9659	0,9520	0,9391	0,9255	0,9132
1990	0,9990	0,9966	0,9934	0,9897	0,9849	0,9810	0,9761	0,9713
1991	0,9949	0,9842	0,9736	0,9636	0,9556	0,9478	0,9397	0,9320
1992	0,9996	0,9987	0,9973	0,9955	0,9930	0,9895	0,9849	0,9799
1993	0,9998	0,9992	0,9985	0,9977	0,9967	0,9955	0,9941	0,9926
1994	0,9990	0,9968	0,9935	0,9893	0,9841	0,9786	0,9722	0,9651
1995	0,9984	0,9932	0,9846	0,9745	0,9634	0,9500	0,9335	0,9174
1996	0,9993	0,9982	0,9970	0,9951	0,9928	0,9910	0,9882	0,9851
1997	0,9991	0,9957	0,9888	0,9758	0,9529	0,9190	0,8769	0,8283
1998	0,9987	0,9959	0,9931	0,9910	0,9890	0,9872	0,9852	0,9827
1999	0,9997	0,9989	0,9977	0,9963	0,9947	0,9927	0,9906	0,9883
2000	0,9976	0,9918	0,9844	0,9769	0,9697	0,9624	0,9547	0,9469
2001	0,9994	0,9983	0,9968	0,9952	0,9935	0,9920	0,9904	0,9888
Moyenne	0,9985	0,9951	0,9905	0,9851	0,9786	0,9712	0,9625	0,9532
1989-2001	0,9989	0,9962	0,9924	0,9879	0,9829	0,9774	0,9716	0,9656

Tableau A4. Corrélations entre le prix à terme à 5 mois et les prix à terme de 6 à 12 mois, 1989-2001

Corrélations	5/6 mois	5/7 mois	5/8 mois	5/9 mois	5/10 mois	5/11 mois	5/12 mois
1989	0,9975	0,9917	0,9836	0,9733	0,9632	0,9523	0,9425
1990	0,9992	0,9973	0,9946	0,9904	0,9874	0,9832	0,9789
1991	0,9969	0,9913	0,9849	0,9793	0,9736	0,9674	0,9614
1992	0,9997	0,9988	0,9975	0,9955	0,9924	0,9882	0,9834
1993	0,9998	0,9993	0,9987	0,9980	0,9970	0,9957	0,9943
1994	0,9993	0,9974	0,9946	0,9907	0,9862	0,9808	0,9746
1995	0,9981	0,9926	0,9851	0,9762	0,9651	0,9511	0,9371
1996	0,9997	0,9990	0,9977	0,9959	0,9944	0,9921	0,9894
1997	0,9987	0,9940	0,9836	0,9638	0,9328	0,8934	0,8470
1998	0,9992	0,9977	0,9964	0,9950	0,9937	0,9922	0,9902
1999	0,9997	0,9990	0,9980	0,9967	0,9950	0,9932	0,9912
2000	0,9982	0,9942	0,9893	0,9841	0,9786	0,9727	0,9664
2001	0,9997	0,9989	0,9978	0,9966	0,9955	0,9942	0,9928
Moyenne	0,9989	0,9962	0,9924	0,9873	0,9811	0,9736	0,9653
1989-2001	0,9992	0,9970	0,9939	0,9901	0,9859	0,9811	0,9760

**Tableau A5. Corrélations entre le prix à terme à 6 mois et les prix à terme de 7 à 12 mois,
1989-2001**

Corrélations	6 /7 mois	6/8 mois	6/9 mois	6/10 mois	6/11 mois	6/12 mois
1989	0,9982	0,9935	0,9865	0,9788	0,9703	0,9624
1990	0,9994	0,9977	0,9943	0,9923	0,9888	0,9852
1991	0,9984	0,9951	0,9915	0,9875	0,9830	0,9784
1992	0,9997	0,9988	0,9973	0,9947	0,9910	0,9866
1993	0,9998	0,9995	0,9990	0,9982	0,9971	0,9960
1994	0,9994	0,9977	0,9950	0,9915	0,9871	0,9818
1995	0,9982	0,9937	0,9875	0,9790	0,9679	0,9564
1996	0,9998	0,9990	0,9978	0,9966	0,9947	0,9925
1997	0,9982	0,9912	0,9755	0,9488	0,9133	0,8702
1998	0,9996	0,9989	0,9981	0,9972	0,9960	0,9944
1999	0,9998	0,9991	0,9982	0,9969	0,9954	0,9937
2000	0,9988	0,9961	0,9928	0,9890	0,9845	0,9796
2001	0,9998	0,9992	0,9984	0,9975	0,9964	0,9952
Moyenne	0,9992	0,9969	0,9932	0,9883	0,9820	0,9748
<i>1989-2001</i>	0,9993	0,9976	0,9949	0,9917	0,9879	0,9837

**Tableau A6. Corrélations entre le prix à terme à 7 mois et les prix à terme de 8 à 12 mois,
1989-2001**

Corrélations	7/8 mois	7/9 mois	7/10 mois	7/11 mois	7/12 mois
1989	0,9985	0,9944	0,9890	0,9826	0,9764
1990	0,9995	0,9969	0,9958	0,9931	0,9902
1991	0,9990	0,9970	0,9944	0,9911	0,9875
1992	0,9997	0,9986	0,9966	0,9935	0,9897
1993	0,9999	0,9996	0,9990	0,9982	0,9972
1994	0,9994	0,9977	0,9952	0,9918	0,9873
1995	0,9986	0,9950	0,9891	0,9808	0,9717
1996	0,9997	0,9988	0,9979	0,9963	0,9945
1997	0,9973	0,9867	0,9656	0,9351	0,8965
1998	0,9998	0,9993	0,9987	0,9978	0,9965
1999	0,9998	0,9992	0,9983	0,9971	0,9957
2000	0,9992	0,9974	0,9949	0,9917	0,9879
2001	0,9998	0,9994	0,9987	0,9979	0,9968
Moyenne	0,9992	0,9969	0,9933	0,9882	0,9821
<i>1989-2001</i>	0,9994	0,9979	0,9957	0,9928	0,9894

**Tableau A7. Corrélations entre le prix à terme à 8 mois et les prix à terme de 9 à 12 mois,
1989-2001**

Corrélations	8/9 mois	8/10 mois	8/11 mois	8/12 mois
1989	0,9986	0,9955	0,9910	0,9863
1990	0,9983	0,9982	0,9963	0,9941
1991	0,9994	0,9980	0,9958	0,9931
1992	0,9996	0,9982	0,9957	0,9925
1993	0,9999	0,9995	0,9989	0,9980
1994	0,9994	0,9979	0,9953	0,9916
1995	0,9988	0,9952	0,9893	0,9821
1996	0,9997	0,9991	0,9980	0,9966
1997	0,9959	0,9817	0,9577	0,9251
1998	0,9998	0,9994	0,9987	0,9977
1999	0,9998	0,9992	0,9984	0,9973
2000	0,9995	0,9981	0,9959	0,9931
2001	0,9999	0,9995	0,9989	0,9980
Moyenne	0,9991	0,9969	0,9931	0,9881
<i>1989-2001</i>	0,9994	0,9982	0,9962	0,9935

**Tableau A8. Corrélations entre le prix à terme à 9 mois et les prix à terme de 10 à 12 mois,
1989-2001**

Corrélations	9/10 mois	9/11 mois	9/12 mois
1989	0,9990	0,9966	0,9933
1990	0,9982	0,9970	0,9954
1991	0,9995	0,9982	0,9962
1992	0,9994	0,9977	0,9952
1993	0,9999	0,9994	0,9987
1994	0,9995	0,9978	0,9950
1995	0,9987	0,9948	0,9894
1996	0,9998	0,9992	0,9982
1997	0,9948	0,9794	0,9547
1998	0,9999	0,9994	0,9986
1999	0,9998	0,9993	0,9985
2000	0,9996	0,9983	0,9963
2001	0,9999	0,9995	0,9988
Moyenne	0,9991	0,9966	0,9929
<i>1989-2001</i>	0,9995	0,9983	0,9964

Tableau A9. Corrélations entre le prix à terme à 9 mois et les prix à terme de 10 à 12 mois, 1989-2001

Corrélations	10/11 mois	10/12 mois
1989	0,9992	0,9971
1990	0,9996	0,9987
1991	0,9996	0,9983
1992	0,9994	0,9979
1993	0,9998	0,9993
1994	0,9994	0,9976
1995	0,9985	0,9950
1996	0,9997	0,9990
1997	0,9948	0,9797
1998	0,9998	0,9993
1999	0,9998	0,9994
2000	0,9996	0,9984
2001	0,9999	0,9994
Moyenne	0,9992	0,9969
<i>1989-2001</i>	0,9996	0,9985

Tableau A10. Corrélations entre le prix à terme à 11 mois et le prix à terme à 12 mois, 1989-2001

Corrélations	11/12 mois
1989	0,9993
1990	0,9997
1991	0,9996
1992	0,9995
1993	0,9998
1994	0,9994
1995	0,9988
1996	0,9997
1997	0,9949
1998	0,9998
1999	0,9998
2000	0,9996
2001	0,9998
Moyenne	0,9992
<i>1989-2001</i>	0,9996