

Modélisation des marchés de matières premières

Louis MARGUERITTE
Jean-Baptiste NESSI

Institut des Actuaires
Auditorium CNP

Vendredi 10 Avril 2009

Introduction

- Un développement fulgurant du marché des matières premières et une liquidité croissante de ses actifs dérivés sont observés.
- Les normes comptables IAS/IFRS visent à construire des bilans en " juste valeur " et le législateur impose de nouvelles contraintes concernant la capacité à produire des valorisations indépendantes et précises.

Introduction

- Un développement fulgurant du marché des matières premières et une liquidité croissante de ses actifs dérivés sont observés.
- Les normes comptables IAS/IFRS visent à construire des bilans en " juste valeur " et le législateur impose de nouvelles contraintes concernant la capacité à produire des valorisations indépendantes et précises.

Problématique

Compte tenu des propriétés statistiques particulières, quelle modélisation employer pour la valorisation d'un produit dérivé sur matières premières conforme au cadre réglementaire IAS39 ?

Plan

- 1 Analyse au regard du référentiel IFRS
- 2 Analyse des propriétés statistiques
 - Nature des données
 - Indicateurs standards et analyse de la distribution
 - Analyse de la volatilité
 - Retour à la moyenne et saisonnalité
 - Analyse de la corrélation
- 3 Modélisation par modèles de courbes
 - Modèle de courbe 1 facteur
 - Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1
 - Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Analyse au regard du référentiel IFRS

Analyse au regard du référentiel IFRS

La norme IAS 39 donne quelques informations sur les critères que doivent remplir les modèles de pricing employés dans le cadre de la valorisation des instruments financiers.

Analyse au regard du référentiel IFRS

La norme IAS 39 donne quelques informations sur les critères que doivent remplir les modèles de pricing employés dans le cadre de la valorisation des instruments financiers.

§AG75 " . . . La juste valeur est estimée sur la base des résultats d'une technique de valorisation qui utilise au maximum des données de marché, et qui repose aussi peu que possible sur des données spécifiques à l'entité. On attend d'une technique de valorisation qu'elle parvienne à une estimation réaliste de la juste valeur si

- elle reflète raisonnablement la façon dont on s'attend à ce que le marché valorise l'instrument,
- les données introduites dans la technique de valorisation représentent raisonnablement les attentes du marché et les évaluations des facteurs de risque et de rendement inhérents à l'instrument financier. "

Analyse au regard du référentiel IFRS

La norme IAS 39 donne quelques informations sur les critères que doivent remplir les modèles de pricing employés dans le cadre de la valorisation des instruments financiers.

§AG75 " . . . La juste valeur est estimée sur la base des résultats d'une technique de valorisation qui utilise au maximum des données de marché, et qui repose aussi peu que possible sur des données spécifiques à l'entité. On attend d'une technique de valorisation qu'elle parvienne à une estimation réaliste de la juste valeur si

- elle reflète raisonnablement la façon dont on s'attend à ce que le marché valorise l'instrument,
- les données introduites dans la technique de valorisation représentent raisonnablement les attentes du marché et les évaluations des facteurs de risque et de rendement inhérents à l'instrument financier. "

⇒ Les techniques de valorisation retenues fournissent des valorisations cohérentes avec les contreparties. Les données alimentant le dispositif de valorisation sont des données de marché observables, fréquemment mises à jour et non spécifiques à l'entité.

Analyse au regard du référentiel IFRS

§AG76 "... Par conséquent une technique de valorisation :

- *intègre tous les facteurs que les intervenants sur le marché prendraient en considération pour fixer un prix et*
- *est conforme aux méthodes économiques acceptées pour la fixation du prix d'instruments financiers. Une entité calibre périodiquement la technique de valorisation et en vérifie la validité en utilisant les prix des transactions courantes sur le marché qui peuvent être observées pour le même instrument (sans modification ni reconditionnement) ou selon des données de marché observables."*

Analyse au regard du référentiel IFRS

§AG76 "... Par conséquent une technique de valorisation :

- *intègre tous les facteurs que les intervenants sur le marché prendraient en considération pour fixer un prix et*
- *est conforme aux méthodes économiques acceptées pour la fixation du prix d'instruments financiers. Une entité calibre périodiquement la technique de valorisation et en vérifie la validité en utilisant les prix des transactions courantes sur le marché qui peuvent être observées pour le même instrument (sans modification ni reconditionnement) ou selon des données de marché observables."*

⇒ Le choix du modèle de valorisation est justifié par une analyse des facteurs de risques spécifiques au produit. Le second point fait appel à ce que l'on nommera le suivi du domaine de validité du modèle.

Analyse au regard du référentiel IFRS

Enfin il est à noter que les écarts de valorisation raisonnables ne sont pas en contradiction avec les normes IFRS :

"An entity might arrive at a range of possible values for an instrument because of the different sources of information available and the different reasonable alternative assumptions that an entity could use. An entity determines its best estimate of fair value within that range by making judgement, different entities might arrive at different estimates of fair value for the same instrument and both entities might still meet the objective of fair value measurement"

IASB Expert Advisory Panel : Measuring and disclosing the fair value of financial instruments In markets that are no longer active

Analyse des propriétés statistiques

Nature des données

- Les données utilisées sont celles du NYMEX (New-York Mercantile Exchange). Les principaux contrats à terme sont cotés sur ce marché globalisé du pétrole.

Nature des données

- Les données utilisées sont celles du NYMEX (New-York Mercantile Exchange). Les principaux contrats à terme sont cotés sur ce marché globalisé du pétrole.



FIGURE: Evolution du prix future 6 mois entre 2003 et 2007

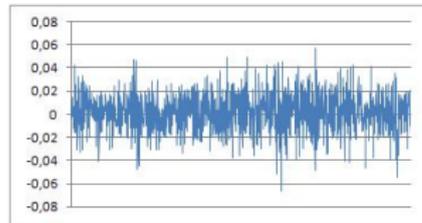


FIGURE: Evolution des logarithmes des rendements quotidiens du prix future entre 2003 et 2007

Indicateurs standards et analyse de la distribution

- On réalise une étude de statistiques descriptives sur les rendements quotidiens des futures génériques sur une période de 5 ans. On observe un excès de kurtosis traduisant l'épaisseur des queues en comparaison à une loi normale.

Indicateurs standards et analyse de la distribution

- On réalise une étude de statistiques descriptives sur les rendements quotidiens des futures génériques sur une période de 5 ans. On observe un excès de kurtosis traduisant l'épaisseur des queues en comparaison à une loi normale.
- L'adéquation des log-rendements à une loi normale est rejetée quelque soit le test employé :

Test	Statistique	p-value
Kolmogorov-Smirnov	0,062437	< 0,0050
Cramer-Von Mises	0,735272	< 0,0050
Anderson-Darling	5,519264	< 0,0050

TABLE: Tests de normalité d'une série quotidienne de contrats futures de maturité 6 mois

Analyse de la volatilité

Effet Samuelson

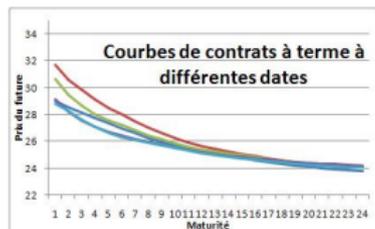


FIGURE: Courbes de contrats à terme à différentes dates

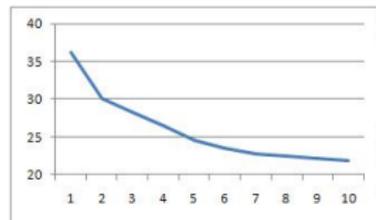


FIGURE: Structure à terme de la volatilité implicite

- La volatilité est plus grande pour les courtes maturités que pour les longues.

Analyse de la volatilité

Effet Samuelson

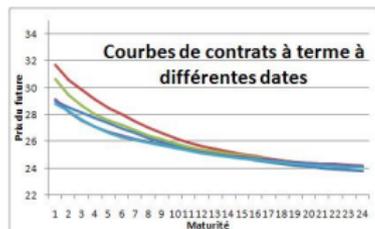


FIGURE: Courbes de contrats à terme à différentes dates

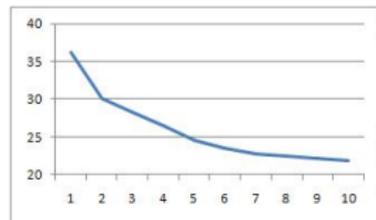


FIGURE: Structure à terme de la volatilité implicite

- La volatilité est plus grande pour les courtes maturités que pour les longues.
- Cet effet est appelé effet Samuelson : les acteurs de marché s'intéressent plus à des gains de court terme.

Analyse de la volatilité

Effet Samuelson

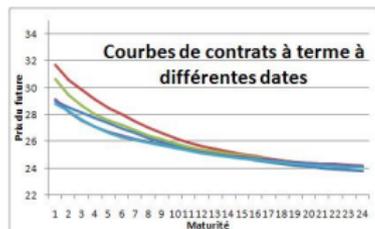


FIGURE: Courbes de contrats à terme à différentes dates

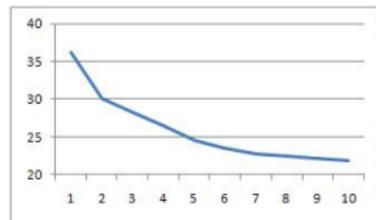


FIGURE: Structure à terme de la volatilité implicite

- La volatilité est plus grande pour les courtes maturités que pour les longues.
- Cet effet est appelé effet Samuelson : les acteurs de marché s'intéressent plus à des gains de court terme.
- Phénomène identique pour les courbes de taux d'intérêts.

Analyse de la volatilité

Surface de volatilité

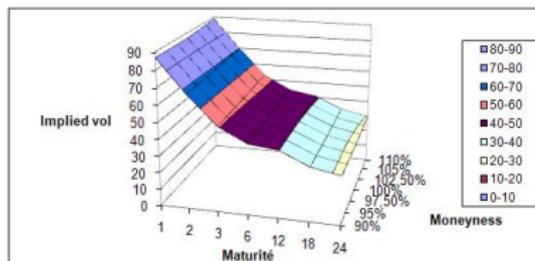


FIGURE: Surface de volatilité au 12/09/2007

Analyse de la volatilité

Surface de volatilité

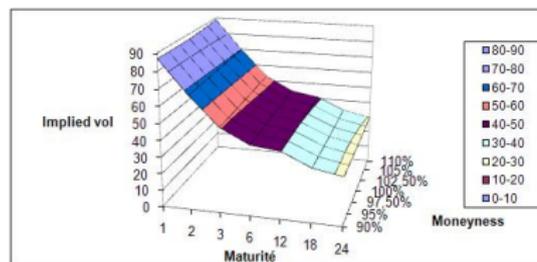


FIGURE: Surface de volatilité au 12/09/2007

- On retrouve l'effet Samuelson décrit précédemment.

Analyse de la volatilité

Surface de volatilité

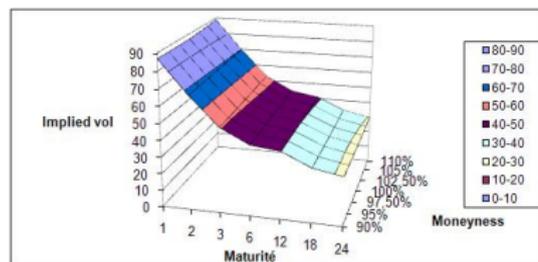


FIGURE: Surface de volatilité au 12/09/2007

- On retrouve l'effet Samuelson décrit précédemment.
- Pour une maturité fixée, la volatilité implicite augmente à mesure que le *strike* augmente. On observe ce qui est appelé *l'upside skew*.

Retour à la moyenne et saisonnalité

- Pour le gaz comme pour le pétrole, nous décelons une propriété de retour à la moyenne des cours de l'actif étudié.

Retour à la moyenne et saisonnalité

- Pour le gaz comme pour le pétrole, nous décelons une propriété de retour à la moyenne des cours de l'actif étudié.
- Contrairement aux données du gaz, les données relatives au pétrole ne mettent pas en évidence la propriété de saisonnalité.

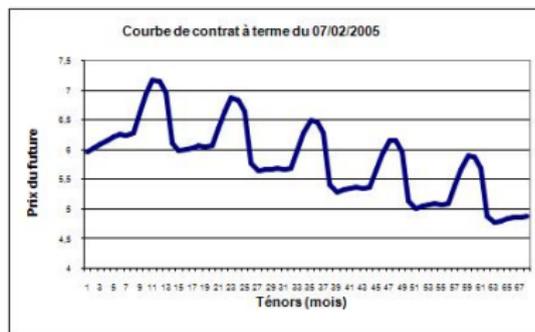


FIGURE: Courbe du contrat à terme du 07/02/2005

Analyse de la corrélation

- Forte corrélation des prix de contrats à terme.

Analyse de la corrélation

- Forte corrélation des prix de contrats à terme.
- Une analyse classique en composantes principales montre un pouvoir explicatif $> 90\%$ pour seulement deux facteurs. (Un facteur de niveau et un facteur de pentification).

Analyse de la corrélation

- Forte corrélation des prix de contrats à terme.
- Une analyse classique en composantes principales montre un pouvoir explicatif $> 90\%$ pour seulement deux facteurs. (Un facteur de niveau et un facteur de pentification).

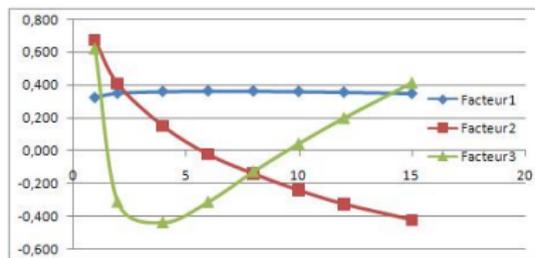


FIGURE: Sensibilité de la déformation de la courbe suite à un choc pour chacun des facteurs

Modèles de courbes

Modèle de courbe 1 facteur

Modélisation

- Le modèle 1 facteur de Schwartz suppose que le prix à terme suit la diffusion H.J.M suivante :

$$dF(t, T) = \sigma e^{-\alpha(T-t)} F(t, T) dW_t$$

où W_t est un brownien géométrique sous la probabilité risque-neutre.

Modèle de courbe 1 facteur

Modélisation

- Le modèle 1 facteur de Schwartz suppose que le prix à terme suit la diffusion H.J.M suivante :

$$dF(t, T) = \sigma e^{-\alpha(T-t)} F(t, T) dW_t$$

où W_t est un brownien géométrique sous la probabilité risque-neutre.

⇒

$$F(t, T) = F(0, T) \exp \left(\int_0^t \sigma e^{-\alpha(T-u)} dW_u - \frac{1}{2} \int_0^t \sigma^2 e^{-2\alpha(T-u)} du \right)$$

Modèle de courbe 1 facteur

Modélisation - Suite

- Dynamique du prix spot :

En posant

$$g(t) = \ln(F(0, t)) + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \ln(F(0, t))}{\partial t} + \frac{\sigma^2}{4\alpha} (1 - e^{-2\alpha t})$$

On obtient alors :

$$dS_t = \alpha [g(t) - \ln(S_t)] S_t dt + \sigma S_t dW_t$$

Modèle de courbe 1 facteur

Modélisation - Suite

- Dynamique du prix spot :

En posant

$$g(t) = \ln(F(0, t)) + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \ln(F(0, t))}{\partial t} + \frac{\sigma^2}{4\alpha} (1 - e^{-2\alpha t})$$

On obtient alors :

$$dS_t = \alpha [g(t) - \ln(S_t)] S_t dt + \sigma S_t dW_t$$

- Ce modèle induit une dynamique du prix spot avec retour à la moyenne reproduisant la courbe de contrat à terme prise comme input.

Modèle de courbe 1 facteur

Calibration

- Calibration par optimisation de la structure à terme de la volatilité implicite.

Modèle de courbe 1 facteur

Calibration

- Calibration par optimisation de la structure à terme de la volatilité implicite.
- Pour un jeu de paramètres donné, on calcule la volatilité implicite du modèle en inversant la formule de Black-Scholes.

Modèle de courbe 1 facteur

Calibration

- Calibration par optimisation de la structure à terme de la volatilité implicite.
- Pour un jeu de paramètres donné, on calcule la volatilité implicite du modèle en inversant la formule de Black-Scholes.
- On cherche ainsi les paramètres α et σ qui minimisent l'erreur quadratique entre la volatilité implicite du modèle et celle de marché.

Modèle de courbe 1 facteur

Résultats

Stabilité

- Algorithme d'optimisation stable.
- σ stable mais α plus volatil.

Modèle de courbe 1 facteur

Résultats

Stabilité

- Algorithme d'optimisation stable.
- σ stable mais α plus volatil.

Conclusion

Ce modèle ne présente pas d'arbitrage sur la courbe des prix à terme mais un éventuel arbitrage sur l'ensemble de la surface.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Modélisation

- L'utilisation du modèle précédent est limitée à quelques options. L'extension proposée consiste à supposer que la volatilité n'est plus constante, mais dépendante du temps. La dynamique des prix futures se réécrit alors :

$$dF(t, T) = \sigma_t e^{-\alpha(T-t)} F(t, T) dW_t$$

où W_t est un mouvement brownien sous la probabilité risque-neutre.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Modélisation - Suite

- Dynamique du prix spot :

avec

$$h(t) = \ln F(0, t) + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \ln F(0, t)}{\partial t} + \frac{1}{2} \int_0^t \sigma_u^2 e^{-2\alpha(t-u)} du$$

$$dS_t = \alpha [h(t) - \ln(S_t)] S_t dt + \sigma_t S_t dW_t$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Modélisation - Suite

- Dynamique du prix spot :

avec

$$h(t) = \ln F(0, t) + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \ln F(0, t)}{\partial t} + \frac{1}{2} \int_0^t \sigma_u^2 e^{-2\alpha(t-u)} du$$

$$dS_t = \alpha [h(t) - \ln(S_t)] S_t dt + \sigma_t S_t dW_t$$

- Formules fermées type BS à coefficients dépendant du temps pour les vanilles.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Calibration

- Calibration par méthode de bootstrapping : on considère σ_t comme une fonction constante par morceaux, les intervalles étant bornés par les maturités des options considérées.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Calibration

- Calibration par méthode de bootstrapping : on considère σ_t comme une fonction constante par morceaux, les intervalles étant bornés par les maturités des options considérées.
- Les volatilités sont liées par la relation suivante qui donne σ_1 :

$$\sigma_{implT_1}^2 T_1 = \int_0^{T_1} \sigma_1^2 e^{-2\alpha(T_1-u)} du$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Calibration

- Calibration par méthode de bootstrapping : on considère σ_t comme une fonction constante par morceaux, les intervalles étant bornés par les maturités des options considérées.
- Les volatilités sont liées par la relation suivante qui donne σ_1 :

$$\sigma_{implT_1}^2 T_1 = \int_0^{T_1} \sigma_1^2 e^{-2\alpha(T_1-u)} du$$

- En itérant le procédé on trouve σ_2

$$\sigma_{implT_2}^2 T_2 = \int_0^{T_1} \sigma_1^2 e^{-2\alpha(T_2-u)} du + \int_{T_1}^{T_2} \sigma_2^2 e^{-2\alpha(T_2-u)} du$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Calibration - Suite

- La méthode de bootstrapping est un procédé itératif permettant d'obtenir les valeurs de σ_t de proche en proche

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Calibration - Suite

- La méthode de bootstrapping est un procédé itératif permettant d'obtenir les valeurs de σ_t de proche en proche

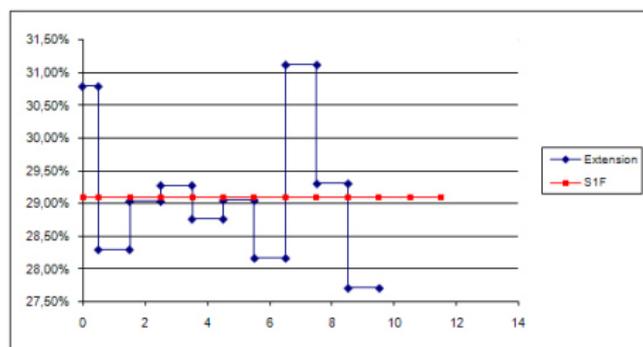


FIGURE: Variation de σ_t en fonction de la maturité au 04/09/2007

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1

Résultats

Conclusion

- Algorithme d'optimisation stable.
- Pas d'arbitrage sur la courbe des prix à terme.
- Pas d'arbitrage sur la structure à terme de la volatilité mais un éventuel arbitrage sur le smile.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Modélisation

- Le modèle précédent ne permet pas de pricer certaines options fortement dépendantes du *skew* comme les options digitales. L'extension proposée consiste, à partir de l'extension 1, à rajouter un paramètre prenant en compte le risque de smile.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Modélisation

- Le modèle précédent ne permet pas de pricer certaines options fortement dépendantes du *skew* comme les options digitales. L'extension proposée consiste, à partir de l'extension 1, à rajouter un paramètre prenant en compte le risque de smile.
- Le *skew* étant monotone, un modèle log décalé permettrait d'éviter l'utilisation d'un modèle à volatilité locale de Dupire aux instabilités connues.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Modélisation

- Le modèle précédent ne permet pas de pricer certaines options fortement dépendantes du *skew* comme les options digitales. L'extension proposée consiste, à partir de l'extension 1, à rajouter un paramètre prenant en compte le risque de smile.
- Le *skew* étant monotone, un modèle log décalé permettrait d'éviter l'utilisation d'un modèle à volatilité locale de Dupire aux instabilités connues.

$$dF(t, T) = \sigma_t e^{-\alpha(T-t)} (F(t, T) + k) dW_t$$

où W_t est un mouvement brownien sous la probabilité risque-neutre.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration

- Première idée : calibration sur deux séries d'options vanilles de strikes proches.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration

- Première idée : calibration sur deux séries d'options vanilles de strikes proches.
- Seconde idée : calibration par valorisation d'une option digitale

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration

- Première idée : calibration sur deux séries d'options vanilles de strikes proches.
- Seconde idée : calibration par valorisation d'une option digitale
- Prix d'une digitale : $\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[e^{-rT} \mathbb{1}_{F(T, T_1) \geq K} | \mathcal{F}_t] = e^{-rT} \mathcal{N}(d_{\log dcal})$

avec

$$d_{\log dcal} = \frac{\ln\left(\frac{F(0, T) + k}{K + k}\right) + \frac{1}{2} \sigma_{\log dcal}^2(T)}{\sqrt{\sigma_{\log dcal}^2(T)}}$$
$$\sigma_{\log dcal}^2(T) = \int_0^T \sigma_u^2 e^{-2\alpha(T-u)} du$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration

- Première idée : calibration sur deux séries d'options vanilles de strikes proches.
- Seconde idée : calibration par valorisation d'une option digitale
- Prix d'une digitale : $\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[e^{-rT} \mathbb{1}_{F(T, T_1) \geq K} | \mathcal{F}_t] = e^{-rT} \mathcal{N}(d_{logdcal})$

avec
$$d_{logdcal} = \frac{\ln\left(\frac{F(0, T) + k}{K + k}\right) + \frac{1}{2} \sigma_{logdcal}^2(T)}{\sqrt{\sigma_{logdcal}^2(T)}}$$

$$\sigma_{logdcal}^2(T) = \int_0^T \sigma_u^2 e^{-2\alpha(T-u)} du$$

- Le prix de marché d'une telle option est :

$$e^{-rT} \mathcal{N}(d_2(\sigma_{BS}(K, T))) - Vega(\sigma_{BS}(K, T)) * skew$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration - Suite

$$\bullet \Phi^{-1} \left[\underbrace{\mathcal{N}(d_2(\sigma_{BS}(K, T))) - e^{rT} \text{Vega}(\sigma_{BS}(K, T)) * \text{skew}}_{\text{Market}(K, T)} \right] = \frac{\ln\left(\frac{F(0, T) + k}{K + k}\right) + \frac{1}{2} \sigma_{\log dcal}^2(T)}{\sqrt{\sigma_{\log dcal}^2(T)}}$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration - Suite

$$\bullet \Phi^{-1} \left[\underbrace{\mathcal{N}(d_2(\sigma_{BS}(K, T))) - e^{rT} \text{Vega}(\sigma_{BS}(K, T)) * skew}_{Market(K, T)} \right] = \frac{\ln\left(\frac{F(0, T) + k}{K + k}\right) + \frac{1}{2} \sigma_{logdcal}^2(T)}{\sqrt{\sigma_{logdcal}^2(T)}}$$

$$\ln\left(\frac{F(0, T) + k}{K + k}\right) + \frac{1}{2} \sigma_{logdcal}^2(T) = \sqrt{\sigma_{logdcal}^2(T)} \Phi^{-1}(Market(K, T))$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration - Suite

$$\bullet \underbrace{\Phi^{-1}[\mathcal{N}(d_2(\sigma_{BS}(K, T))) - e^{rT} \text{Vega}(\sigma_{BS}(K, T)) * skew]}_{Market(K, T)} = \frac{\ln\left(\frac{F(0, T) + k}{K + k}\right) + \frac{1}{2}\sigma_{logdcal}^2(T)}{\sqrt{\sigma_{logdcal}^2(T)}}$$

$$\ln\left(\frac{F(0, T) + k}{K + k}\right) + \frac{1}{2}\sigma_{logdcal}^2(T) = \sqrt{\sigma_{logdcal}^2(T)}\Phi^{-1}(Market(K, T))$$

- En élevant au carré on obtient une équation du second degré que l'on résout en retenant la racine positive :

$$\sigma_{logdcal}^2(T) = f(k, \sigma_{BS}(K, T))$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration - Suite

- On trouvera par bootstrapping la fonction σ_t constante par morceaux qui permet de reproduire parfaitement la structure à terme de la volatilité implicite.

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Calibration - Suite

- On trouvera par bootstrapping la fonction σ_t constante par morceaux qui permet de reproduire parfaitement la structure à terme de la volatilité implicite.
- En notant K_0 le *strike* de référence nous trouvons k , le paramètre minimisant la fonction critère suivante :

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\ln\left(\frac{F(0,T)+k}{K_i+k}\right) + \frac{1}{2}f(k, \sigma_{BS}(K_0, T))}{\sqrt{f(k, \sigma_{BS}(K_0, T))}} - \Phi^{-1}(\text{Market}(K_i, T)) \right)^2$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Résultats

Mesure de skew par différences finies (schémas variés)

$$skew(K_i, T) = \frac{1}{2} \frac{\sigma(K_{i-1}, T) - \sigma(K_i, T)}{K_{i-1} - K_i} + \frac{1}{2} \frac{\sigma(K_i, T) - \sigma(K_{i+1}, T)}{K_i - K_{i+1}}$$

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Résultats

Mesure de skew par différences finies (schémas variés)

$$skew(K_i, T) = \frac{1}{2} \frac{\sigma(K_{i-1}, T) - \sigma(K_i, T)}{K_{i-1} - K_i} + \frac{1}{2} \frac{\sigma(K_i, T) - \sigma(K_{i+1}, T)}{K_i - K_{i+1}}$$

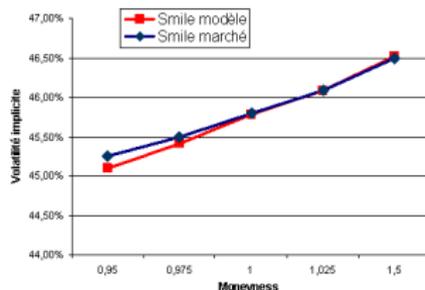


FIGURE: Comparaison des volatilités implicites (maturité 6 mois) du modèle et du marché au 7 juin 2006

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Résultats - Suite

Stabilité

- Algorithme d'optimisation stable.
- Stabilité du paramètre k .

Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2

Résultats - Suite

Stabilité

- Algorithme d'optimisation stable.
- Stabilité du paramètre k .

Résultats

- Pas d'arbitrage sur la courbe de contrat à terme ni sur la structure à terme de la volatilité implicite.
- Facteur de risque *skew* entièrement contrôlé au voisinage d'un strike de référence.

Conclusion

Modèle	Calibration		Recommandations
	Futures	Options	
Courbe 1-facteur	+++	+	Pas d'arbitrage sur la courbe des contrats à terme, à employer pour la valorisation de produits monostrike faiblement path-dependent.
Courbe 1-facteur extension 1	+++	++	Absence d'arbitrage sur la courbe des contrats à terme et sur la structure à terme de la volatilité. A employer pour la valorisation de produits path-dependent mais indépendants du skew.
Courbe 1-facteur extension 2	+++	+++	Absence d'arbitrage sur la courbe des contrats à terme et sur la structure à terme de la volatilité et le smile. A employer pour la valorisation de produits path-dependent et skew-dependent.

Conclusion

Modèle	Calibration		Recommandations
	Futures	Options	
Courbe 1-facteur	+++	+	Pas d'arbitrage sur la courbe des contrats à terme, à employer pour la valorisation de produits monostrike faiblement path-dependent.
Courbe 1-facteur extension 1	+++	++	Absence d'arbitrage sur la courbe des contrats à terme et sur la structure à terme de la volatilité. A employer pour la valorisation de produits path-dependent mais indépendants du skew.
Courbe 1-facteur extension 2	+++	+++	Absence d'arbitrage sur la courbe des contrats à terme et sur la structure à terme de la volatilité et le smile. A employer pour la valorisation de produits path-dependent et skew-dependent.

Extensions possibles :

Mise en oeuvre d'un modèle de courbe à 2 facteurs permettant de modéliser d'autres matières premières ou produits plus complexes (comme les produits de corrélation).

Rappel du plan

- 1 Analyse au regard du référentiel IFRS
- 2 Analyse des propriétés statistiques
 - Nature des données
 - Indicateurs standards et analyse de la distribution
 - Analyse de la volatilité
 - Retour à la moyenne et saisonnalité
 - Analyse de la corrélation
- 3 Modélisation par modèles de courbes
 - Modèle de courbe 1 facteur
 - Modèle de courbe 1 facteur - Extension 1
 - Modèle de courbe 1 facteur - Extension 2