

Lien entre le prix de la Bourse et les défis liés aux nouvelles énergies renouvelables

La notion de territorialité

Cet article introduit la notion de territorialité dans l'analyse des prix de la Bourse. La stratégie utilisée consiste à prévoir le choc sur le marché électrique en utilisant la géolocalisation des centrales de production renouvelable stochastique (solaire et éolienne).

Stéphane Genoud et al.

Avec le grand mouvement de libéralisation commencé en 1997 en Europe dans le secteur électrique, l'électricité est devenue un bien échangeable sur diverses Bourses comme l'EEX (European Electrical Exchange) qui depuis 2002 règle les prix de l'Allemagne, de l'Autriche et de la Suisse.

Les prix des commodités, dont l'électricité fait partie, sont influencés par plusieurs facteurs comme la géopolitique des pays producteurs de pétrole, le niveau de la demande ou l'évolution économique. Dans le domaine de l'électricité, l'influence des nouvelles énergies renouvelables (NER) sur les prix a l'effet d'un choc exogène, difficilement prévisible. Un exemple historique d'un choc sur le système a été le 4 octobre 2009 où le prix a été de -500,02 €/MWh ou, plus proche de nous, le 17 août 2014 où le prix a atteint -2,40 €/MWh.

Cet article est le troisième proposé sur l'analyse des prix boursiers de l'électricité. C'est la conclusion des deux premiers articles de la « série » parus dans cette revue, « Le marché financier de l'électricité en Allemagne [1] » et « Prédiction des prix spot de l'électricité sur le marché allemand [2] ». Le premier a fourni aux lecteurs une introduction au marché de la Bourse avec ses princi-

pales caractéristiques, le deuxième a expliqué quelques modèles d'analyse temporelle des prix spot de l'électricité.

Une approche territoriale

La solution à laquelle notre équipe travaille actuellement s'appuie sur l'idée qu'il est possible d'améliorer la prédiction de production des NER en introduisant un lien spatial entre la position dans l'espace des infrastructures et les prédictions météorologiques prévues sur les sites. Par exemple, il est possible de construire des cartes de champ de vent qui, conjuguées à la localisation des éoliennes, permettent d'estimer la production d'énergie par ce vecteur pour un horizon temporel donné. L'introduction de la dimension spatiale dans le modèle de prédiction repose sur la prise en compte de trois facteurs : la connaissance de la nature, la position des infrastructures de production dans l'espace et le développement d'une approche d'interpolation des données météorologiques pour pouvoir estimer la production sur les sites. Comme le lien entre météo et infrastructures est spatial, nous devons utiliser une approche par Systèmes d'Information Géographique (SIG) qui sont actuellement les seuls outils permettant de trai-

ter et d'analyser des bases de données spatiales.

Pourquoi l'union des deux approches ?

Dans les sciences, la contamination entre différentes branches du savoir est assez commune. Par exemple, une bonne partie de la finance est construite sur l'équation brownienne (nom dérivé de Robert Brown [1773-1858]) née pour décrire le mouvement des particules de poussière dans un fluide. L'union entre deux branches différentes des sciences pouvant donc se produire, voyons comment la géostatistique et analyse des séries temporelles peuvent se marier de même que les contributeurs de ces approches.

Bref historique des modèles géospatiaux

En se basant sur l'article de Lee Chapman et de John E. Thornes, 2003 « The use of geographical information systems in climatology and meteorology » [3], on peut identifier différents axes principaux de recherche.

Dans l'estimation de la demande d'électricité, par exemple, Balocco & Grazzini, 2000 [4] utilisent des indicateurs météo dans un SIG pour faire de la planification en milieu urbain. Ces systèmes SIG peuvent être utilisés aussi du côté de l'offre, Sorenson & Meibom [5] ont réalisé un modèle de décision qui incorporait les données réelles des orages pour anticiper les problèmes sur les réseaux électriques géoréférencés.

Dans le domaine des énergies renouvelables, Baban & Parry, 2001[6], ont créé un système pour optimiser la position des centrales éoliennes; le même travail a été fait par Broesamle, 2000 [7] pour le potentiel des panneaux solaires.

La littérature dans le modèle temporel pour l'énergie avec donnée météo est très vaste. Pour une vision complète, l'article de S.Jebaraj et S. Inyan, 2004 [8] fournit un cadre plus détaillé. En résumé, ces recherches suivent souvent le même schéma : un modèle de base qui sert de benchmark (généralement un Arma, pré-

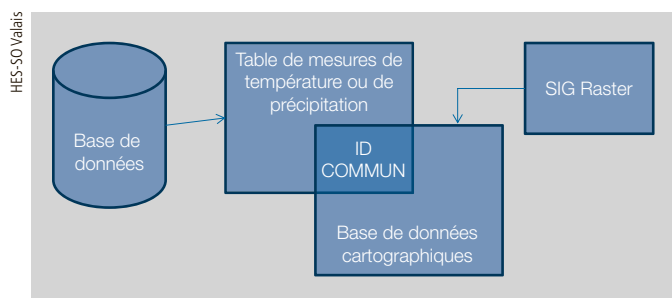


Figure 1 Méthodologie pour la création de la base de données.

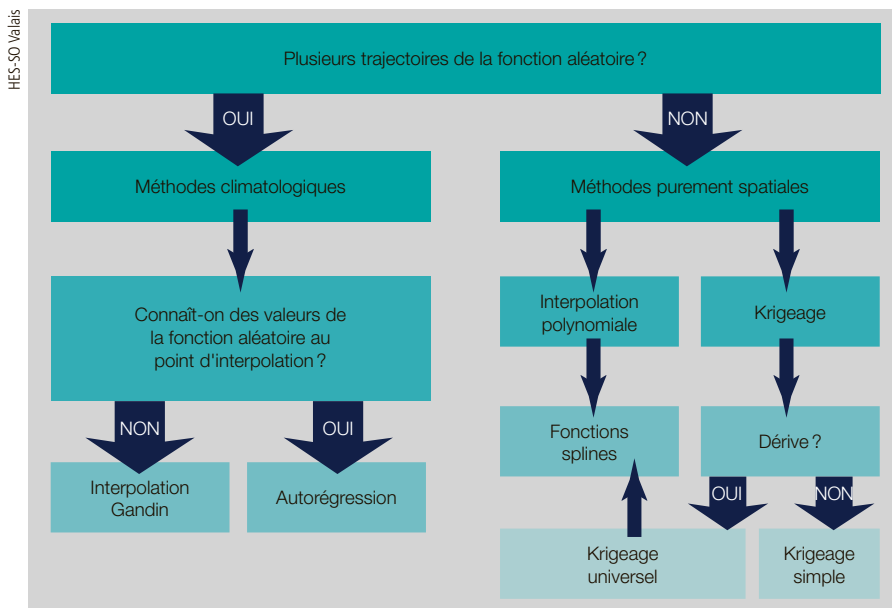


Figure 2 Approche des méthodes d'interpolation (d'après Laborde 2000 [13]).

senté dans notre deuxième article) suivi de quelques modèles plus ou moins complexes.

En conclusion de ce bref résumé historique, il faut citer les premiers travaux sur les « Spatial time series » avec données météo qui ont été faits par Cliff, 1975 [9] où chaque série temporelle est associée à une coordonnée spatiale. De cette approche, il y a des résultats intéressants dans l'hydrologie obtenus par Bras et Rodrigues-Iturbe, 1984 [10] et en météorologie par Cressie, 1993 [11].

Introduction à l'interpolation spatiale

L'interpolation spatiale est une branche des mathématiques qui s'intéresse au problème suivant : comment prédire en tous points d'un espace donné bidimensionnel ou tridimensionnel une mesure dont on sait qu'elle existe partout dans cet espace, mais dont on a une connaissance partielle au travers d'un semi de points de mesures, comme par exemple un réseau de stations météorologiques. Il existe une foule de méthodes et d'approches qui peuvent être classées grossièrement dans deux catégories : les méthodes dites déterministes et celles qui sont probabilistes.

■ Les méthodes déterministes reposent le plus souvent sur l'établissement d'une équation (comme par exemple une simple régression linéaire) qui permettra de prédire la valeur en fonction d'une ou plusieurs variables explicatives. C'est par exemple le cas de la régression qui décrit la décroissance de la température d'environ 1°C à chaque fois que l'altitude aug-

mente de 100 m. Il existe aussi des méthodes géométriques comme l'approche par Polygones de Thiessen ou encore barycentriques comme la célèbre IWD (Inverse Weighted distance) qui est aujourd'hui la méthode la plus employée au monde. Toutes ces méthodes reposent sur l'établissement d'une règle d'interpolation explicite et valable dans tout l'espace à interpoler. On parle alors d'espace isotrope et cela signifie que la structure spatiale du phénomène n'est pas prise en compte. C'est pour cette raison que ces modèles d'interpolations sont plutôt utilisés pour représenter un phénomène global à petite échelle, c'est-à-dire pour des grandes zones.

■ Contrairement aux méthodes globales décrites ci-dessus, les approches probabilistes sont plutôt utilisées pour représenter les modèles à grande échelle, c'est-à-dire à l'échelon local. Ces méthodes reposent principalement sur l'approche par géostatistique. Cette stratégie vise à estimer la fonction aléatoire qui décrit le modèle en étudiant la dépendance spatiale du phénomène aux différentes échelles sur lesquelles il se déploie. On utilise pour cela un variogramme qui permet de visualiser la variance spatiale de tous les couples possibles de mesures effectuées dans l'espace considéré. On peut de cette façon construire un modèle gigogne adapté à la description du phénomène aux petites distances, aux distances moyennes et enfin aux grandes distances. Ce modèle est ensuite utilisé pour l'interpolation appelée ici le krigage. Il existe plusieurs sortes de krigage qui sont utilisées en fonction des hypothèses que l'on fait sur

la façon dont se déploie le phénomène dans l'espace et sur le comportement du variogramme.

Pour être performante, l'interpolation spatiale repose fortement sur un côté heuristique et expert. Il est donc difficile de l'utiliser pour des procédures en séries. Cependant, elle aide à la compréhension de la diffusion du phénomène dans l'espace et facilite le passage vers des approches plus automatiques comme celle des réseaux de neurones de type GRNN (Kanevski 1999 [12]).

Union des deux approches spatiales et temporelles

La méthodologie simplifiée pour unir les approches spatiales et temporelles consiste en quatre étapes principales :

- Dans un premier temps, une base de données géoréférencée des stations météo d'Allemagne sera constituée dans un environnement de SIG (figure 1). Ces stations serviront de point d'entrée des prédictions météo faites par un météorologue. Chaque station sera donc renseignée pour les valeurs pertinentes, par exemple pour la production de panneaux photovoltaïques on utilisera l'ensoleillement, les chutes de neige et la couverture nuageuse.
- Dans un deuxième temps, un processus d'interpolation sera entrepris pour pouvoir spatialiser les phénomènes météo partout sur le territoire. Les meilleures méthodes d'interpolation parmi les familles possibles seront recherchées (figure 2).
- Chaque méthode sera évaluée qualitativement par une approche de validation croisée qui consiste à rechercher les résidus en comparant les prédictions avec les mesures réelles de chaque station. Pour cela, une station est retirée de la base de données et sa position dans l'espace est prédite à partir du panel restant.
- Au final, cette étape permettra de choisir la méthode d'interpolation la plus efficace pour faciliter la construction d'un atlas journalier le plus fiablement et le plus rapidement possible.

Union des deux modèles dans la pratique

Comme expliqué dans la méthodologie, tout commence par la base de données des infrastructures des NER. La constitution de cette couche d'information est primordiale, mais triviale. En effet, les pays développés sont dotés d'un service de l'information spatiale qui intègre maintenant des données géoréférencées sur les systèmes de production d'énergie renouvelable. La carte ci-dessous

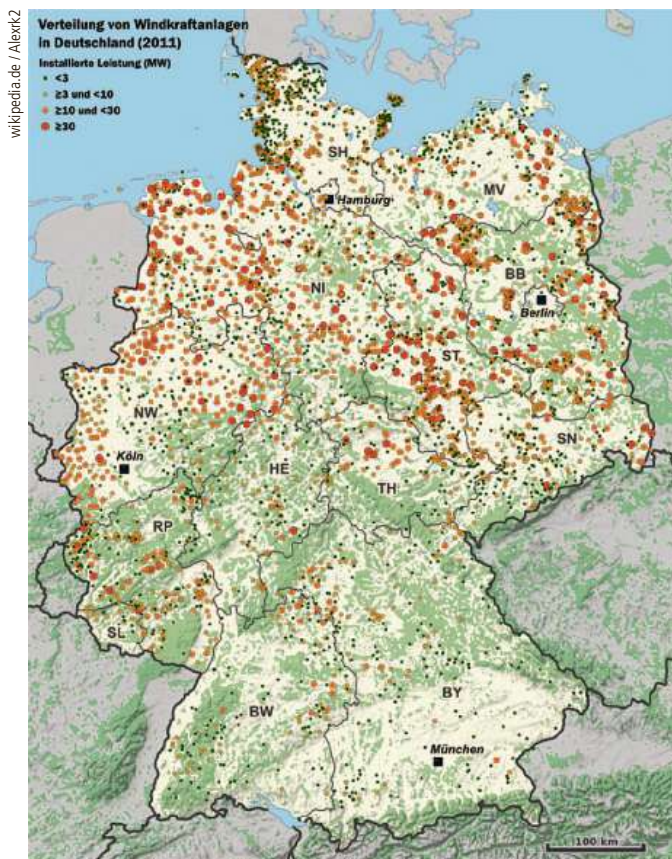


Figure 3 Localisation des éoliennes sur le territoire allemand.

(figure 3) montre la position des éoliennes pour l'Allemagne.

Par ailleurs, ces cartes numériques ne sont pas de simples représentations des infrastructures mais de véritables bases de données. Autrement dit, une série d'informations attributaires sont attachées à ces points, comme par exemple la production par heure, l'âge de l'objet, le propriétaire... On parlera, pour ces données, d'information spatiale par destination en opposition à la représentation de l'objet sur la carte qui est spatiale par nature. Les données de production par heure liées à un système de production d'énergie renouvelable nous permettront d'estimer la production par une simple addition après vérification que les conditions météo sont réunies pour le site.

Pendant, les conditions d'obtention de ces données ne sont pas homogènes et dépendent grandement de la politique de diffusion autorisée par le pays ou par les prestataires qui ont pour mission de les gérer. Les coûts d'achat des données peuvent donc être extrêmement variables.

La question de la prise en compte de la météo

Cette partie correspond à l'aspect le plus délicat de l'approche. Elle s'appuie, d'une part, sur la constitution d'une base de données des stations de mesures météo

et, d'autre part, sur l'exploitation de ces mesures pour produire un modèle cartographique par un processus d'interpolation. C'est la question de l'interpolation qui est la plus délicate. En effet, il est absolument impossible de visualiser LA représentation spatiale réelle du phénomène. On ne peut en avoir qu'une image approximative. Dans ce contexte, la notion d'erreur est sans fondement. C'est pour cela que l'on considère les interpolations spatiales comme judicieuses si elles permettent de donner des résultats fiables ou non judicieuses dans le cas contraire.

Estimation des productions

Chaque production de NER dépend d'une fonction de production. Par

exemple pour le soleil, l'énergie produite dépend du rendement de production et de l'énergie reçue par le panneau. Ces fonctions permettent donc de convertir les paramètres météo (soleil, vent, couverture nuageuse...), ainsi que des caractéristiques des installations de production (hauteur de mâts, surface, orientation...), en énergie produite.

Les capacités de production attachées attributairement aux semis de points permettront de définir des zones de potentiel de production par le biais d'une requête topologique d'inclusion (figure 4).

Les cartes interpolées de la météo seront donc intégrées et, via une fonction de conversion, il sera alors possible d'estimer la production énergétique de l'Allemagne par tranches horaires (J. TASTU, P. PINSON, E. KOTWA, H.AA. NIELSEN, H. MADSEN en 2011 [14]). Cette estimation des volumes horaires de production sera introduite de façon journalière aux méthodes de prévision économétrique comme facteur explicatif.

Il s'agit d'analyser les données du marché pour vérifier à quel moment le marché subit les variations des productions de NER impliquant donc une variation des prix intra-day. Ces modèles de prévision permettront de pouvoir valoriser économiquement cette approche.

Résultat attendu et prochaine étape

Nous avons vu dans les articles précédents que l'augmentation de la variance des prix de l'électricité est due essentiellement aux impacts des variations non prévisibles des NER. Notre approche bottom up basée sur une vision introduisant un lien spatial entre la position dans l'espace des infrastructures et les prédictions météorologiques prévues sur les sites permettra d'anticiper les productions stochastiques et donc d'augmenter l'acceptabilité de ces énergies dans un réseau de

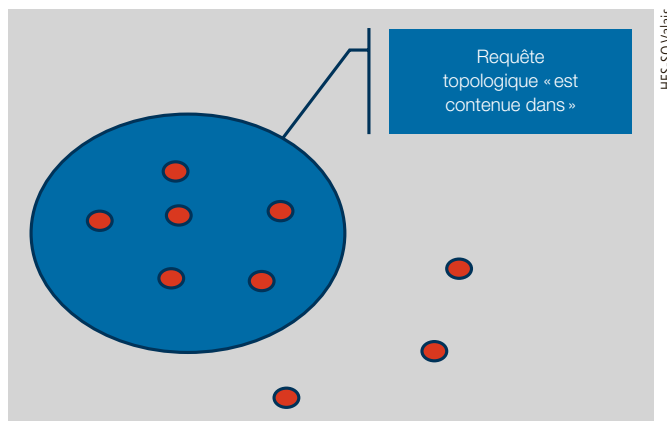


Figure 4 Fonctionnement de la requête topologique.

plus en plus sous contrainte. Cela évitera aussi de mettre en réserve, pour les marchés de capacité, un grand nombre de centrales. Certes, aujourd'hui il y a beaucoup de centrales qui ne produisent pas autant qu'elles ne le pourraient. Par contre, avec des changements comme la hausse des prix des émissions de CO₂ ou une croissance économique soutenue, il est possible que les réserves des centrales sous-utilisées diminuent rapidement.

La prévision des variations de prix de l'électricité dues aux variations de production des NER permettrait, dans une prochaine étape, aux acteurs suisses de l'électricité de faire des arbitrages sur le marché et donc d'accroître les rendements de leurs installations de production de pointe. Les résultats permettraient aussi aux grands consommateurs de réduire le risque de prix sur les contrats d'électricité structurés.

Lien

■ www.hevs.ch

Références

- [1] S. Genoud, F.M. Cimmino, D. Previdioli, Le marché financier de l'électricité en Allemagne, Bulletin SEV/AES, 2014.
- [2] S. Genoud, et Al., Prédiction des prix spot de l'électricité sur le marché allemand, Bulletin SEV/AES, 2015.
- [3] Lee Chapman and John E. Thornes, The use of geographical information systems in climatology and meteorology, 2003.
- [4] Balocco & Grazzini, Thermodynamic parameters for energy sustainability of urban areas, Solar Energy, 2000.
- [5] Sorenson & Meibom, GIS tools for renewable energy modelling, Renewable Energy, 1999.
- [6] Baban & Parry, Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK, Renewable Energy, 2001.
- [7] Broesamle, Broesamle H, Mannstein H, Schillings C, Trieb F, Assessment of solar electricity potentials in North Africa based on satellite data and a geographic information system, Solar Energy, 2000.

- [8] S. Jebaraj, S. Inyan, A review of energy models, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2004.
- [9] Cliff, The EMR energy demand and price modeling system, IMACS, 1975.
- [10] Bras et Rodrigues-Iturbe, Scale considerations in the modeling of temporal rainfall, 1984.
- [11] Cressie, Geostatistics: a tool for environmental modelers, Oxford University Press, 1993.
- [12] Kanevski, M. F. Spatial predictions of soil contamination using general regression neural networks. SYSTEMS RESEARCH AND INFORMATION SCIENCE, 8, 241-256, 1999.
- [13] Laborde, J. P. Méthodes d'interpolation et géostatistiques pour la cartographie automatique. Notes de cours, Université de Nice, Sophia Antipolis, CNRS-UMR, 2000.
- [14] J. Tastu, P. Pinson, E. Kotwa, H.Aa. Nielsen, H. Madsen, Spatio-temporal analysis and modeling of short-term wind power forecast errors, Wind Energy, 2011.

Auteurs

D^r **Stéphane Genoud** est professeur en Management de l'énergie à l'Institut Entrepreneurship & Management de la HES-SO Valais Wallis. Il est titulaire d'un CFC d'électricien, d'un diplôme d'ingénieur HES, d'une licence en économie, de plusieurs masters (finance et énergie) et d'une Thèse de Doctorat en économie sur l'analyse, d'un point de vue du développement durable, des modes de production de l'électricité. En parallèle à ses activités académiques, il a créé plusieurs sociétés où il travaille aussi comme consultant senior, membre du conseil. Ses travaux de recherches se concentrent sur la création de valeur ajoutée autour de l'énergie, ainsi que sur l'analyse des marchés de l'électricité.

HES-SO Valais Wallis, 3960 Sierre,
stephane.genoud@hevs.ch

D^r **Jean-Christophe Loubier** est professeur à l'Institut Entrepreneurship & Management de la HES-SO Valais Wallis. Docteur en sciences de l'université Joseph Fourier de Grenoble dans le domaine des dynamiques et structures spatiales, il s'est spécialisé dans les problématiques d'interfaces hommes/milieux et plus particulièrement dans le domaine des effets de la mise en action du développement durable sur des systèmes complexes mêlant économie touristique de masse et milieu naturel. Parallèlement à cette approche thématique, ses travaux actuels se développent selon deux axes : une recherche méthodologique et épistémologique dont l'objectif est de traiter de la complexité en géographie dans le champ quantitatif d'une part et la géogouvernance d'autre part.

jchristophe.loubier@hevs.ch

Francesco Maria Cimmino est actuellement assistant de recherche à l'Institut Entrepreneurship & Management de la HES-SO Valais Wallis. Il a obtenu un master de deuxième niveau en Statistique et Économie alla Sapienza de Rome (2012) et un master en économétrie pour la banque et la finance à l'Aix-Marseille School of Economics (2014). Il travaille actuellement sur une thèse de doctorat dans le domaine des marchés de l'électricité, domaine à la frontière de la finance et de l'énergie.

francesco.cimmino@hevs.ch

Zusammenfassung

Zusammenhang zwischen dem Börsenpreis und den Herausforderungen bezüglich der neuen erneuerbaren Energien Die Bedeutung der Territorialität

Dies ist der dritte und letzte Artikel einer Reihe, die im Bulletin betreffend die Analyse der Strompreise an der Börse erschienen ist. Die betrachtete Lösung fusst auf der Idee, dass die Vorhersage bezüglich der Produktion neuer erneuerbarer Energien verbessert werden kann, indem ein räumlicher Zusammenhang zwischen der Position der Infrastrukturen im Raum und den Wetterprognosen an den Standorten hergestellt wird. Es ist so zum Beispiel möglich, Windfeldkarten zu erstellen, mit denen die Energieproduktion anhand dieses Vektors für einen bestimmten Zeithorizont abgeschätzt werden kann, wenn sie unter Berücksichtigung des Standorts der Windkraftanlagen betrachtet werden.

Die Einführung der räumlichen Dimension beim Prognosemodell bedingt den Einbezug dreier Faktoren: Kenntnisse der Umgebung, Position der Produktionsinfrastrukturen im Raum und Entwicklung eines Interpolierungsansatzes für meteorologische Daten, um die Produktion an den Standorten abschätzen zu können. Da die Verbindung zwischen Wetter und Infrastruktur räumlicher Natur ist, ist eine Methode mit einem Geografischen Informationssystem (GIS) zu wählen. Denn nur ein solches System erlaubt es, Datenbanken mit räumlichen Daten zu verarbeiten und zu analysieren. Es wird zuerst eine Datenbank mit den Infrastrukturen der erneuerbaren Energien angelegt und die Produktion dieser Anlagen wird unter Berücksichtigung des Wetters geschätzt. Dank der Verwendung der interpolierten Wetterdaten kann die Energieproduktion einer Region für Zeiträume von einer Stunde geschätzt werden.

Mit dieser Methode können stochastische Produktionen vorhergesehen werden, was es erlaubt, die Akzeptanz dieser Energien in einem Netz, das immer mehr unter Druck gerät, zu steigern. Die Prognose von Strompreisschwankungen wegen Schwankungen in der Produktion neuer erneuerbarer Energien wird es den Schweizer Elektrizitätsunternehmen in einem nächsten Schritt ermöglichen, auf dem Markt Entscheide zu treffen und dadurch die Erträge ihrer Anlagen zur Spitzenproduktion zu erhöhen. Diese Ergebnisse bieten auch den Grossverbrauchern die Möglichkeit, das Preisrisiko auf strukturierten Stromverträgen zu senken. Cr