

N° d'ordre : 111 - 2003

**PRODUITS DÉRIVÉS CLIMATIQUES :
ASPECTS ÉCONOMÉTRIQUES ET FINANCIERS**

THÈSE

présentée

devant **L'UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD – LYON I –**

pour l'obtention

du **DIPLOME DE DOCTORAT DE SCIENCES DE GESTION**

(arrêté du 25 avril 2002)

présentée et soutenue publiquement le

lundi 7 juillet 2003

par

Olivier ROUSTANT

JURY :

Jean-Paul LAURENT, Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon I, Directeur de recherche
François DUFRESNE, Professeur à HEC Lausanne, Rapporteur
Olivier SCAILLET, Professeur à HEC Genève, Rapporteur
Laurent CARRARO, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
Jean-Claude AUGROS, Professeur à l'Université Claude Bernard – Lyon I
Daniel SERANT, Professeur à l'Université Claude Bernard – Lyon I

Le domaine des produits dérivés climatiques est, par nature, à l'intersection de la finance, de l'assurance, des mathématiques appliquées, de la météorologie et de l'environnement... Je tiens par conséquent à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Jean-Paul LAURENT pour avoir eu l'audace d'accepter de lancer sur le sujet... un algébriste de formation ! Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude pour la confiance qu'il m'a accordée ainsi que pour ses conseils tout au long de la thèse.

Ce travail a été réalisé au sein du département 3MI de l'école des mines de Saint-Etienne, où d'importants moyens en statistiques ont été déployés, avec le concours de MM. Laurent CARRARO et Xavier BAY. Je les remercie vivement pour leur soutien.

Je tiens à remercier MM. François DUFRESNE et Olivier SCAILLET d'avoir bien voulu accepter d'être les rapporteurs de mes travaux. Je voudrais aussi remercier MM. Daniel SERANT et Jean-Claude AUGROS pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, les relectures qu'ils ont effectuées, et les discussions constructives dont ils m'ont fait profiter : leur participation à ce jury est pour moi un honneur.

Je remercie la société Météo-France, qui nous a fourni les données météorologiques, et la société Fininfo, qui nous a fourni les données boursières.

Mes remerciements vont également à ceux qui m'ont apporté leurs compétences pour les questions relatives au climat et à l'environnement. Merci à Monsieur Pierre VOIGNIER de la société Rhéa, qui m'a fait spontanément bénéficier d'informations rares et pertinentes ; merci à Monsieur Serge TABOULOT de Météo-France, et à Madame Mireille BATTON-HUBERT du centre SITE de l'école des mines, pour leur aide en météorologie ; merci à Madame Natacha GONDRAN pour les nombreuses discussions amicales sur les aspects environnementaux.

Merci à tous les membres du département 3MI, et donc Mmes Anca BADEA, Céline HELBERT, Laure MESSIAEN et Monsieur Eric TOUBOUL, pour l'agréable atmosphère de travail et l'ambiance cordiale qu'ils ont su faire régner autour de moi durant ces quelques années. Merci aussi à tous les membres de l'ISFA pour leur accueil chaleureux et constant malgré l'intermittence de mes visites !

Merci à Muriel et à Julie pour leur patience et leur soutien au quotidien.

Enfin, je voudrais remercier tout spécialement Madame Danièle TARRAL, sans qui cette thèse n'aurait probablement jamais débutée.

A ma mère,
pour sa merveilleuse dignité
et sa présence affectueuse
tout au long de ces années.

A mon père,
disparu trop tôt.

Table des matières.

CHAPITRE 0. INTRODUCTION GENERALE.	1
A. DES RISQUES CLIMATIQUES NON CATASTROPHIQUES AUX PRODUITS DERIVES CLIMATIQUES.....	3
I. Les risques climatiques non catastrophiques.....	3
II. Modalités de gestion : produits dérivés climatiques.....	5
B. QUELQUES EXEMPLES DE PRODUITS DERIVES CLIMATIQUES.	6
I. Le cas « standard » d'un producteur d'énergie.....	6
II. Un exemple de swap entre deux utilisateurs finaux.....	9
III. Un exemple de contrat exotique : l'assurance de la floraison des cerisiers au Japon.....	10
C. LE CONTEXTE.....	11
I. Le développement des produits dérivés.	11
II. Le changement climatique et l'augmentation des risques climatiques.....	12
III. La mondialisation et l'augmentation des besoins de couverture des risques climatiques.	12
IV. L'émergence de transferts de risques « alternatifs ».....	13
D. QUELQUES APPLICATIONS DES PRODUITS DERIVES CLIMATIQUES.	13
I. Réduire la volatilité induite par le climat.	13
II. De nouveaux instruments de diversification.	14
III. Applications à l'environnement.	14
E. LE MARCHÉ DES PRODUITS DERIVES CLIMATIQUES.....	15
I. Les acteurs.	16
II. Etat du marché.	18
III. Quelques spécifications de contrats.	22
F. PANORAMA DES PROBLEMES.	26
I. Difficultés spécifiques.....	26
II. Place des modèles statistiques.....	27
III. Problèmes spécifiques.....	28
G. APPLICATION DES MODELES STATISTIQUES AUX PRODUITS DERIVES CLIMATIQUES.	30
I. Modélisation statistique des aléas climatiques.	30
II. La pratique de l'évaluation.	31
III. Le risque de modèle.	32
H. OBJECTIF ET ORGANISATION DE LA THESE.	34
REFERENCES	36
CHAPITRE 1. MODELISATION DE LA TEMPERATURE.	41
A. UNE APPLICATION DE DEUX MODELES ECONOMETRIQUES DE TEMPERATURE A LA GESTION DES RISQUES CLIMATIQUES.	43
I. Statistique descriptive.....	47
II. Ajustement d'un modèle linéaire ARMA.....	50
III. Modèle linéaire à variance périodique.	53
IV. Performances des modèles. Application à la gestion des risques climatiques.	64
V. Réponse du modèle (VP) à un choc.	72
VI. Performances réelles.....	75
VII. Conclusions de la section A.	78
B. COMPLEMENTS.....	84
C. MODELISATION DE LA TEMPERATURE : ASPECT MULTIVARIE.....	97
I. Quelques précisions sur le cadre de travail.....	99
II. Etudes descriptives préliminaires.....	100
III. Modélisation VAR.	105
IV. Comparaison des prévisions.....	111
V. Conclusion de la section C.	121
ANNEXE DU CHAPITRE 1, SECTION C	123
CONCLUSIONS DU CHAPITRE 1.	131
REFERENCES DU CHAPITRE 1.	133

CHAPITRE 2. ASPECTS FINANCIERS.....	135
A. L'ÉVALUATION DES PRODUITS DERIVES CLIMATIQUES.....	137
I. <i>Evaluation dans l'univers historique et bêta nul.</i>	137
II. <i>Indépendance entre marché et température.</i>	138
B. ÉVALUATION DES ACTIONS DES ENTREPRISES SENSIBLES AU CLIMAT.	147
I. <i>Résultats théoriques.</i>	147
II. <i>Etude empirique de la sensibilité des actions à la température.</i>	156
III. <i>Conclusions de la section B.</i>	175
CONCLUSIONS DU CHAPITRE 2.	177
REFERENCES DU CHAPITRE 2	178
ANNEXE DU CHAPITRE 2	179
CHAPITRE 3. INCERTITUDES DE MODELISATION. REPERCUSSIONS SUR LES PRIX.....	181
A. CALCUL DES PRIX.....	183
I. <i>Formules d'évaluation.</i>	183
II. <i>Méthodes de calcul.</i>	184
B. METHODOLOGIE.....	186
I. <i>Evaluation de l'erreur d'estimation.</i>	187
II. <i>Evaluation de l'incertitude des prix.</i>	188
C. IMPACT DES ERREURS DE MODELE SUR LA PRIME PURE D'UN CONTRAT FUTURE.....	190
I. <i>Cadre de travail.</i>	190
II. <i>Evaluation de l'impact de l'erreur d'estimation.</i>	191
III. <i>Evaluation de l'impact de mauvaises spécifications du modèle.</i>	193
IV. <i>Conclusions de la section C.</i>	200
D. CONSEQUENCES ET ORIGINES DE L'ERREUR D'ESTIMATION SUR LE PRIX DES PRODUITS DERIVES CLIMATIQUES.	202
I. <i>Cadre de travail. Notations.</i>	202
II. <i>Incertitude des prix avec la modélisation des indices de température.</i>	203
III. <i>Incertitude des prix avec la modélisation de la température.</i>	208
IV. <i>Conclusions de la section D.</i>	212
CONCLUSIONS DU CHAPITRE 3.	217
REFERENCES DU CHAPITRE 3.	218
ANNEXE DU CHAPITRE 3	221
CONCLUSION GENERALE.	229
BIBLIOGRAPHIE GENERALE.....	233

Chapitre 0. Introduction générale.

Apparus aux Etats-Unis en 1997, à la suite de la déréglementation du marché de l'électricité, les produits dérivés climatiques ont été introduits pour aider à se prémunir contre les risques climatiques non catastrophiques. Historiquement, ils ont permis d'apporter une protection aux producteurs d'électricité qui subissent des manques à gagner importants à chaque fois que l'hiver est doux. Cependant, il ne s'agit pas de produits d'assurance mais d'authentiques produits financiers, construits sur des « sous-jacents » d'un type particulier, qui sont des mesures de grandeurs climatiques.

La présente thèse rassemble les études de quelques aspects de ces nouveaux produits ; ses objectifs seront précisés à la fin du chapitre. Auparavant, au cours de quelques paragraphes introductifs, on se propose de familiariser le lecteur avec les produits dérivés climatiques et de répondre aux questions essentielles qu'il peut se poser à leur sujet. Nous ferons d'abord une description des risques climatiques sous-jacents et expliquerons en quoi les produits dérivés climatiques, qui sont de nature purement financière, permettent d'aider à leur gestion ; nous donnerons alors quelques exemples de transactions réalisées avec les produits dérivés climatiques ; nous présenterons ensuite le contexte, économique et géographique, qui explique pour une part leur apparition ; nous donnerons quelques applications, et observerons que leur champ va au-delà des objectifs initiaux de conception ; nous procéderons à un état des lieux des cinq premières années d'existence du marché des produits dérivés climatiques ; nous ferons ensuite un panorama des problèmes de gestion et remarquerons la place particulière allouée aux modèles statistiques dans leur résolution ; un chapitre est alors consacré à ces modèles, leur utilisation et les risques qu'elle génère. Les principaux travaux réalisés sur les produits dérivés climatiques sont présentés au cours de ces deux derniers paragraphes.

A. Des risques climatiques non catastrophiques aux produits dérivés climatiques.

I. Les risques climatiques non catastrophiques.

1. Quelques exemples.

Les risques climatiques non catastrophiques sont des risques économiques que supportent les entreprises dont l'activité est sensible au climat : l'impact du climat sur la consommation est alors la source de manques à gagner pouvant être importants. On entend souvent les professionnels du tourisme se plaindre, à juste titre, des « mauvaises saisons », responsables d'une diminution de l'affluence des vacanciers, mais d'autres secteurs sont également concernés comme ceux de l'énergie, de l'agroalimentaire, de l'agriculture... Par exemple, les producteurs d'électricité sont touchés par le niveau inhabituellement faible de la demande des usagers, en chauffage lorsque les hivers sont cléments, et en climatisation lorsque les étés sont doux ; les distributeurs de sodas, de sirops et autres boissons rafraîchissantes sont pénalisés par la fraîcheur relative des températures estivales, à l'origine d'une diminution de la satiété chez leurs clients ; les agriculteurs sont également sensibles à ces risques qui viennent s'ajouter aux autres types de risques de nature catastrophique, comme le gel ou la grêle, car le rendement et la qualité des récoltes dépendent des bonnes conditions climatiques durant tout le cycle de maturation.

2. Analyse des risques climatiques non catastrophiques.

Ces risques climatiques se distinguent des risques climatiques catastrophiques par plusieurs aspects.

Tout d'abord, alors que les catastrophes naturelles peuvent porter atteinte à la vie humaine, les risques étudiés ont des conséquences purement financières ; celles-ci peuvent se répercuter au plan humain, comme par des licenciements, mais la gravité des impacts est assurément moindre.

Le risque est souvent volumétrique car les impacts sont fonction de la diminution du volume du chiffre d'affaires. Mais celle-ci peut également être couplée avec une diminution du prix de vente, imposé par la médiocrité de la demande.

D'autre part, il n'y a pas ici de sinistres physiquement constatables : pas de dégâts matériels, pas de dommages visibles. Les conséquences s'observent dans les comptes des entreprises, ce qui les rend plus difficiles à évaluer.

La localisation en temps et en espace est aussi très différente. Cette différence s'apprécie en termes de concentration. Les événements catastrophiques sont toujours concentrés dans le temps : leur durée est courte, allant de quelques secondes pour un tremblement de terre à quelques heures pour une tempête ou un cyclone ; en revanche, les manques à gagner dus à de mauvaises conditions climatiques se font ressentir sur des périodes plus longues, de l'ordre de quelques mois. Les événements catastrophiques sont également souvent concentrés dans l'espace : la zone sinistrée est restreinte, de la taille d'un champ pour un orage de grêle à la surface d'une région pour un tremblement de terre ou une tempête ; au contraire, les mauvaises conditions climatiques responsables d'une baisse de l'affluence ou de la consommation touchent généralement un territoire plus étendu, à l'échelle d'un pays.

Enfin des possibilités d'échange existent entre des agents économiques exposés à des risques symétriques. Par exemple, le gérant d'un parc d'attractions et le gérant d'un complexe de cinémas ont des intérêts opposés à ce qu'il pleuve ; de même, si la clémence d'un hiver peut défavoriser un producteur d'électricité, il est certain qu'elle avantage les « gros » consommateurs, comme les hôpitaux, les PME¹...

3. Mesure des risques. Evaluation des impacts.

Certains risques peuvent se mesurer avant qu'ils ne se matérialisent, comme le risque de change, que l'on peut suivre en observant le mouvement des taux de change. Cette possibilité existe pour les risques climatiques non catastrophiques. On peut en effet souvent relier la qualité d'une saison à des données météorologiques, ce qui suppose en réalité deux étapes : l'identification d'un ou plusieurs facteurs climatiques influents, et le choix d'un instrument de mesure approprié.

Dans le cas de l'électricité, c'est la température, essentiellement, qui dirige la consommation. Il existait d'ailleurs, avant que les produits climatiques ne voient le jour, des indices journaliers fonction de la température, appelés degrés-jours, pour mesurer le risque climatique. Ceux-ci mesurent l'écart de la température à un niveau seuil correspondant peu ou

¹ Pour les grandes entreprises, l'implantation à l'étranger atténue la sensibilité au climat.

prou à la température ambiante à laquelle la consommation est minimale ; l'hiver par exemple, l'indice degré-jour (en anglais : *degree-day*) est défini par :

$$DD = (18 - T_t)^+ = \max(18 - T_t; 0)$$

où T_t est la température à la date t , exprimée en degrés. Une mesure du risque de température sur une saison peut alors être effectuée au moyen du cumul de ces indices :

$$DD_{\text{saison}} = \sum_{\text{saison}} (18 - T_t)^+$$

Les instruments de mesure des risques climatiques étudiés varient : hauteur de pluie, hauteur de neige, vitesse du vent ... et dépendent quelquefois de plusieurs aléas climatiques. A l'heure actuelle, c'est la température qui est majoritairement employée, mais parfois à l'aide d'indices différents de celui montré ci-dessus.

Les impacts, on l'a vu, sont difficiles à chiffrer directement car les dommages ne sont pas facilement observables. Une solution existe cependant, consistant à rechercher une fonction reliant la mesure du risque aux conséquences qu'il engendre : ce sont les *fonctions d'endommagement*, bien connues des producteurs d'électricité. Naturellement, l'inconvénient majeur est l'asymétrie d'une telle mesure, qui ne peut être faite - en réalité - que par celui qui en subit les effets ! Et ceci nous amène à étudier les modalités de gestion des risques climatiques non catastrophiques.

II. Modalités de gestion : produits dérivés climatiques.

1. L'impossibilité d'une gestion de type assurance.

Le premier constat à la suite de la présentation précédente est l'impossibilité d'une gestion de type assurance des risques climatiques non catastrophiques. Il y a d'abord l'importance du volume du risque : l'épisode du cyclone Andrew, qui a déseparé jusqu'aux réassureurs, rappelle l'importance de ce facteur. D'autre part, une couverture indemnitaire est ici quasi-impossible : à la difficulté objective de mesurer les impacts économiques du climat sur le chiffre d'affaires des entreprises, s'ajoute un problème d'asymétrie puisque, même si les mesures de variables climatiques sont publiques, seul l'assuré peut connaître avec précision l'impact de ces variables sur les résultats. Par ailleurs, ce sont les entreprises les plus exposées aux risques climatiques qui veulent se prémunir. On peut craindre alors qu'un phénomène

d'antisélection conduise à les exclure du marché en raison de la concurrence... Est-il possible en effet, d'imaginer un marché d'assurances où, de façon similaire à ce qui se passe sur le marché automobile, les « mauvais conducteurs » sont les principaux clients ? Enfin l'aléa moral serait également présent : comment pourrait-on contraindre les conducteurs à se soucier de leur conduite, autrement dit, comment pourrait-on contraindre les entreprises concernées à procéder en interne à une gestion de leurs risques climatiques ?

2. D'une assurance climatique aux produits dérivés climatiques.

On observe dans ce qui précède qu'une difficulté majeure est la quasi-impossibilité de chiffrer les sinistres consécutifs aux mauvaises conditions climatiques. Une solution consiste alors... à laisser ce problème aux clients ! Autrement dit, on calcule les versements en fonction de la mesure des risques climatiques et non pas selon le montant des pertes financières dues au climat. On passe donc d'une couverture indemnitaire à une couverture paramétrique, et la mesure des impacts est laissée aux entreprises.

Concrètement, il s'agit de produits financiers construits à partir d'indices climatiques d'où leur nom de produits dérivés climatiques. Ils se présentent sous la forme de futures (ou « swaps »), d'options, collars, etc. Nous en donnerons quelques exemples dans la prochaine section.

3. Les avantages d'une gestion financière.

La gestion financière des risques climatiques non catastrophiques constitue une alternative viable à la gestion de type assurance. Le fait d'englober ces produits dans le marché financier permet en particulier de profiter de sa capacité d'absorption (il n'y a donc plus de problème de volume) et de sa souplesse. En outre, les risques climatiques sont relativement décorrélés du marché financier, ce qui attire les spéculateurs et les investisseurs et devrait favoriser à terme la liquidité du marché des produits dérivés climatiques.

B. Quelques exemples de produits dérivés climatiques.

I. Le cas « standard » d'un producteur d'énergie.

Parmi les transactions de produits dérivés climatiques, le cas le plus fréquent est celui d'un producteur d'énergie souhaitant se protéger contre un hiver doux. Il va sans dire que la douceur de l'hiver, en faisant chuter la consommation, affecte les résultats de l'industriel. La

sensibilité du résultat au climat est assez bien mesurée par un indice à base des degrés-jours introduits au paragraphe 3 de la section précédente ; dans cette situation, on utilisera l'indice HDD², égal à la somme sur la période hivernale³ des écarts de température relativement à la température de confort de 18°C :

$$HDD = \sum_{\text{période hivernale}} (18 - T_t)^+$$

où T_t est la température moyenne journalière à la date t .

A titre d'illustration, on a représenté sur la Figure 0.1 une approximation de la fonction d'endommagement d'un producteur de gaz basé à Paris⁴ ; la température de référence est celle d'Orly et la période considérée s'étale du 15/11 au 15/3.

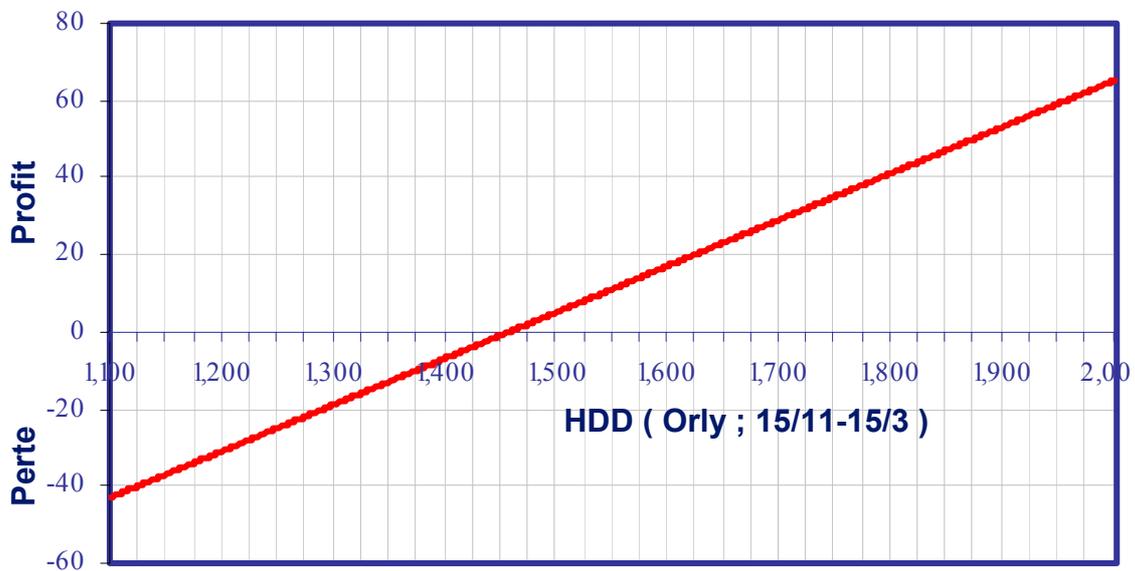


Figure 0.1. Le cas d'un producteur de gaz : sensibilité du résultat au climat.

Vu la définition de l'indice HDD, on observe qu'un hiver doux correspond à de faibles valeurs de l'indice. Pour se protéger, le producteur de gaz peut donc prendre une position courte dans un contrat future sur l'indice HDD ou une position longue dans une option de vente sur cet indice ; c'est cette dernière possibilité qui a été retenue par l'industriel. Les caractéristiques précises du contrat sont présentés dans le Tableau 0.1 . Comme une option de

² Les indices HDD et CDD sont présentés en détail au paragraphe III de la section E.

³ Celle-ci dépend des contrats ; elle s'étale souvent d'octobre à avril inclus (c'est le cas au CME, voir § E.III.1) ou bien de novembre à mars. Dans l'exemple ci-dessus, la période hivernale est encore plus courte, commençant le 15 novembre et se terminant le 15 mars.

⁴ D'après (Deboaisne, 2000).

vente standard, l'industriel en position d'acheteur va donc exercer l'option si l'indice HDD du prochain hiver est inférieur à 1500 (°C), réalisant alors un gain de $(1500 - HDD) \times 130.000$ FF ; comme c'est souvent le cas, une valeur supérieure de paiement (*cap*) a été fixée, limitant le gain à 40.000.000 FF. Le profil de paiement est représenté sur la Figure 0.2 . Comme pour une option standard, l'industriel est protégé par rapport à de faibles valeurs du sous-jacent (voir Figure 0.3), c'est-à-dire ici par rapport à des températures hivernales douces.

☐ Type	: Put Option HDD
☐ Acheteur du Put	: Producteur de Gaz
☐ Vendeur du Put	: BNP Paribas
☐ Période de Référence	: Du 15 novembre 2000 au 15 mars 2001
☐ Lieu de Référence	: Station Météo France de Paris Orly
☐ Indice Climatique	: HDD cumulés
☐ Base de Calcul	: Données fournies par Météo France
☐ Montant Notionnel	: 40.000.000 FRF
☐ Montant de la Prime	: ● francs
☐ Prix d 'Exercice	: 1500 HDD
☐ Valeur du Tick	: 130.000 FRF par HDD

Tableau 0.1. Le cas d'un producteur de gaz : termes du produit dérivé climatique.

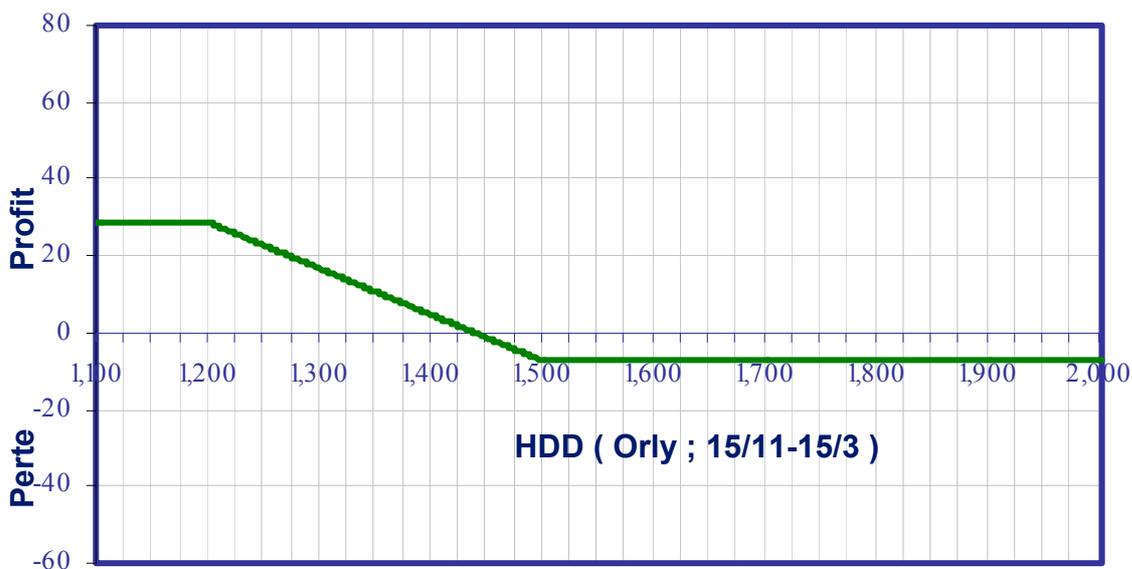


Figure 0.2. Le cas d'un producteur de gaz : profil de paiement du produit dérivé climatique.

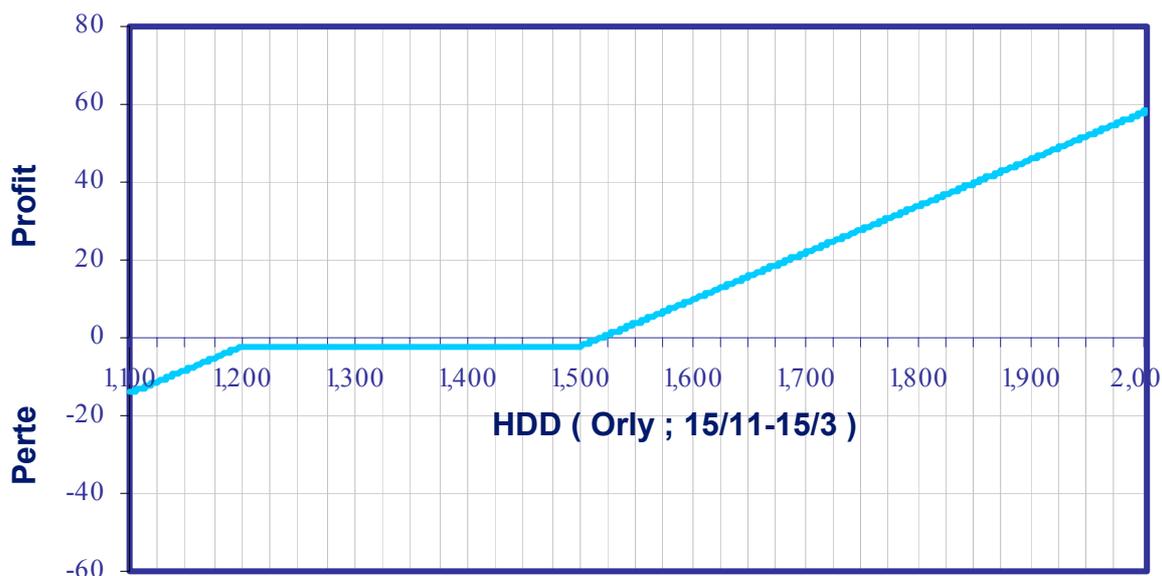


Figure 0.3. Le cas d'un producteur d'énergie : sensibilité du résultat au climat après couverture.

II. Un exemple de swap entre deux utilisateurs finaux⁵.

Il est d'usage d'appeler « swap » un contrat entre deux parties pour lequel aucun versement initial n'a lieu : un contrat future est donc une forme de swap, et c'est d'ailleurs son appellation courante dans le monde des dérivés climatiques. Pourtant, un swap au sens fort sous-entend un échange entre deux acteurs concernés par un risque commun et non pas seulement entre un acteur et une institution financière (voir par exemple les swaps de taux d'intérêt, réalisant l'échange entre un taux variable et un taux fixe), et c'est ce type de swap dont nous voulons donner un exemple.

La transaction a été réalisée par Worldwide Weather Trading Co entre un parc d'attraction et un fabricant de glaces situés au même endroit. Les deux parties ont des risques symétriques par rapport à la température estivale : tandis que les températures caniculaires avantagent le fabricant de glaces en faisant grimper la consommation de glaces, elles nuisent au parc d'attraction en provoquant la baisse de la fréquentation. L'impact du climat a été évalué de part et d'autre, et les deux parties sont tombées d'accord pour réaliser un swap sur le nombre de jours « chauds », définis par les jours où la température excède 96°F. De façon précise, le parc d'attraction accepte la transaction lorsque l'été comprend moins de 15 jours chauds et verse alors la somme de 50.000\$/jour chaud au fabricant de glaces ; inversement, le fabricant

⁵ En raison du manque de liquidité et de moyens de couverture avérés, les swaps s'effectuent la plupart du temps entre des utilisateurs finaux (voir § E.I.) – L'exemple est tiré de (Barrieu, 2000).

de glaces s'engage à verser 50.000\$/jour chaud à la condition qu'il y ait eu plus de 15 jours chauds dans l'été. D'autre part, il a été convenu que le montant total échangeable serait de 1 million de \$. Il s'agit donc d'un swap dont le sous-jacent est un indice conditionnel de température (voir Figure 0.4).

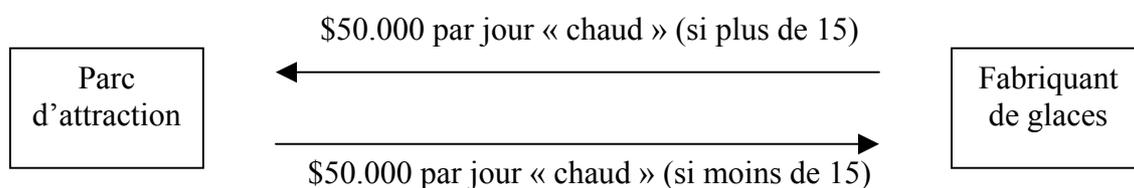


Figure 0.4. Un swap de température entre un parc d'attraction et un fabricant de glaces.

III. Un exemple de contrat exotique : l'assurance de la floraison des cerisiers au Japon⁶.

Au Japon, la floraison des cerisiers est un événement d'une grande importance, qui amène les habitants à sortir dans les parcs et les jardins pour pique-niquer sous les frondaisons étoilées de petites fleurs roses. Quelquefois pourtant, lorsque la température est trop clémente pendant la période de maturation des arbres, la floraison se produit trop tôt, à une période où il fait encore trop frais pour en profiter, et cette précocité est alors préjudiciable aux petites et moyennes entreprises de tourisme et de loisir qui en tirent bénéfice.

L'idée est donc venue au premier assureur dommages du Japon, Tokio Marine and Fire Insurance, de proposer une protection contre ce risque. Les contrats prennent la forme d'une option à saut (*gap call option*), la compensation devenant effective lorsque la température moyenne journalière dépasse 7.5°C tous les jours d'une longue période, le versement étant alors proportionnel au nombre de jours « chauds » (voir la Figure 0.5). Les caractéristiques et la valeur des contrats dépendent des clients, et à titre d'exemple, un restaurant peut acheter un contrat pour un prix de 1.5 million de yens (11.960 €) correspondant à une valeur d'indemnisation de 450.000 yens (3.590 €) par jour.

⁶ D'après une dépêche AFP datée du 17/01/03.

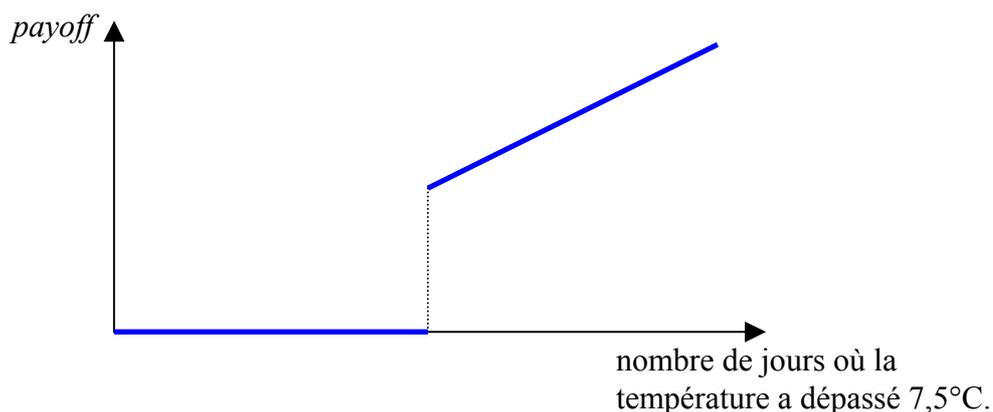


Figure 0.5. Une option à saut (*gap call option*) climatique pour la floraison des cerisiers au Japon.

C. Le contexte.

Les produits dérivés climatiques ont vu le jour dans un contexte particulier, à l'intersection de deux changements majeurs, climatique pour le premier avec le réchauffement de la planète, économique pour le second avec la mondialisation. Ce contexte justifie pour une part leur création, rendue possible grâce aux moyens modernes de gestion. Par ailleurs, leur marché s'inscrit dans la nouvelle vague des transferts de risques alternatifs, et se place à côté des nouveaux marchés des produits dérivés d'assurance et des produits dérivés de l'électricité.

I. Le développement des produits dérivés.

Précisons tout de suite qu'il était difficile, de toute façon, de procéder à la gestion des risques climatiques non catastrophiques auparavant. Ces risques ont pourtant toujours existé, dès les premiers temps de l'agriculture. Mais pouvait-on faire autrement pour s'en prémunir que de constituer des réserves lors des années grasses ? Nous avons vu en effet dans la section précédente que la gestion externe des risques climatiques non catastrophiques ne peut pas se faire sous la forme d'une assurance mais sous la forme de produits dérivés. Or la gestion des produits dérivés a longtemps été délicate, et ce n'est véritablement qu'après la découverte de la formule de valorisation des options standard en 1973 par Black et Scholes que ce marché a pris de l'importance⁷. La gestion des risques climatiques ne pouvait donc guère se faire plus tôt. A l'heure actuelle en revanche, le développement de la finance quantitative et de l'informatique donne plus de moyens aux ingénieurs de gestion.

⁷ La taille du marché global des produits dérivés est estimée aujourd'hui à cent mille milliards de dollars.

Mais les produits dérivés climatiques n'auraient peut-être pas vu le jour si dans le même temps, les besoins de couverture des risques climatiques et les risques eux-mêmes n'avaient pas augmenté.

II. Le changement climatique et l'augmentation des risques climatiques.

Le réchauffement maintenant avéré de la planète n'a pas toujours toutes les conséquences qu'on lui attribue. Ainsi, dans l'accroissement vertigineux de l'impact économique des catastrophes naturelles observé au cours de la dernière décennie⁸, une part est sans doute due à la progression de l'urbanisation. Notons au passage que certains événements ont même dépassé la capacité de couverture des assureurs⁹. Toutefois, l'augmentation concomitante du nombre de catastrophes¹⁰ renforce le sentiment que l'on peut nourrir au quotidien que le changement climatique se traduit par une augmentation des risques climatiques. Comme ce changement va se poursuivre dans les prochaines années, nous pouvons donc nous préparer à ce que cela dure.

III. La mondialisation et l'augmentation des besoins de couverture des risques climatiques.

D'une façon générale, la mondialisation se traduit à l'heure actuelle par une intensification de la concurrence. Celle-ci a certainement contribué à la modification de la gestion interne des entreprises, avec un fonctionnement avec moins de fonds propres et une externalisation des services. Il n'est pas difficile alors de comprendre que les entreprises souhaitent désormais réduire au maximum la volatilité de leurs résultats, et donc en particulier la volatilité induite par le climat. En outre, dans le secteur de l'énergie, l'intensification de la concurrence a entraîné une vague de dérèglementations, partie des Etats-Unis en 1997 et se déroulant à présent en Europe¹¹ : de grosses entreprises sensibles aux risques climatiques se sont donc retrouvées exposées aux aléas de l'économie. Cette conjugaison de facteurs a donc engendré un accroissement net des besoins en couverture de risques climatiques non catastrophiques à travers le monde.

⁸ cf. le rapport de l'ONU pour les catastrophes naturelles : facteur 6.7 des années 60 aux dix dernières années en valeur.

⁹ Ouragan « Andrew » en 1992 aux Etats-Unis.

¹⁰ Dans le même rapport de l'ONU (cf. supra), on indique un facteur 4 des années 60 aux dix dernières années pour chiffrer l'augmentation du nombre de catastrophes naturelles.

¹¹ Le 25 novembre 2002, l'union européenne a voté à l'unanimité la dérèglementation du marché de l'électricité ; celle-ci deviendra opérationnelle en 2004 pour les particuliers, en 2007 pour les entreprises.

IV. L'émergence de transferts de risques « alternatifs ».

C'est donc dans ce contexte d'accroissement des risques climatiques et économiques que sont apparus en 1997 les produits dérivés climatiques, pour répondre aux besoins de gestion des risques climatiques non catastrophiques ; c'est, pour l'essentiel, le formidable développement des produits dérivés, qui a rendu possible leur création. On conçoit alors aisément que d'autres marchés aient pu voir le jour, résultant à la fois de l'augmentation ou de l'apparition de risques, et de la possibilité de pouvoir les gérer sur un marché mondial en pleine expansion. Ainsi, deux autres marchés avaient vu le jour quelques années plus tôt¹² :

- les produits dérivés d'assurance (*insurance derivatives*)¹³, pour la gestion de produits d'assurance, limités pour l'heure aux catastrophes naturelles, et lancés par le Chicago Boarding Of Trade (CBOT) en 1993 ;
- et les produits dérivés de l'électricité (*power derivatives*), pour la gestion du prix de l'électricité, avec le lancement du 1^{er} contrat future par la place norvégienne Nord Pool en 1995 et la 1^{ère} option par le New York Mercantile Exchange (NYMEX) en 1996.

L'émergence de ces nouveaux marchés est un phénomène nouveau et remarquable car ils concernent des risques qui, justement, ne sont pas des risques de marché, mais qui au contraire sont relativement décorrélés des fluctuations de la bourse : en ce sens, on parle de transferts de risques alternatifs.

D. Quelques applications des produits dérivés climatiques.

I. Réduire la volatilité induite par le climat.

Le but premier des produits dérivés climatiques est de pouvoir réduire la volatilité du chiffre d'affaires relativement aux risques climatiques non catastrophiques. Aujourd'hui encore, c'est la principale utilisation qui est faite de ces produits. En outre, la dégradation des conditions climatiques observée au cours des dernières décennies – et susceptible de s'aggraver dans le futur, pourrait conduire les agents économiques à recourir davantage aux produits dérivés climatiques ; ainsi dans un rapport récent¹⁴, l'ONU préconise leur emploi pour répondre à

¹² Voir (Geman, 1999), (Geman, 2000).

¹³ Voir aussi (Geman, 1994) et (Scherer, 2000).

¹⁴ Voir (ONU, 2002).

l'augmentation envisagée des pertes économiques liées au climat dans le secteur agricole. Cependant, d'autres applications ou perspectives d'applications existent.

II. De nouveaux instruments de diversification.

Tout d'abord, les produits dérivés climatiques peuvent être employés comme outil de diversification dans la gestion de portefeuilles. Comme les aléas du climat sont en principe largement décorrélés des fluctuations de la bourse, c'est à juste titre qu'un investisseur peut compter sur une diminution du risque en plaçant une partie de son capital dans des produits dérivés climatiques. Les institutions bancaires l'ont bien compris et proposent maintenant des « fonds climatiques », constitués par une panoplie d'options, de swaps, d'obligations climatiques et d'obligations catastrophes.

III. Applications à l'environnement.

Le renforcement des politiques environnementales, matérialisé par le protocole de Kyoto (1997), peut également suggérer des applications dans le domaine de l'environnement. Weinstein (2001), par exemple, montre que les produits dérivés climatiques sont un outil potentiel pour la gestion des permis d'émission et des certificats verts.

1. Des outils pour la gestion des permis d'émission.

Les permis d'émission visent à réduire l'émission des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et autres composés organiques à base de carbone) par les industriels. Rappelons brièvement leur principe¹⁵. Chaque industriel dispose d'un quota fixé par le législateur indiquant la quantité maximale de gaz à effet de serre qu'il peut dégager dans l'atmosphère ; l'écart à ce quota est alors comptabilisé au crédit ou au débit de l'industriel. Un marché est alors possible : les industriels qui se trouvent dans l'incapacité de respecter leur quota peuvent acheter les permis d'émission dont ils ont besoin à ceux qui ne l'ont pas atteint ; les échanges de crédit sont incités par la menace de pénalités – voire d'interdictions - qui, en théorie, sont applicables aux industriels qui dépassent leur quota sans acheter de crédits à d'autres industriels. Or, dans le cas des producteurs d'énergie, on observe que le dégagement des gaz à effet de serre dépend fortement des conditions climatiques puisque celles-ci régissent l'activité industrielle. On peut donc imaginer des produits dérivés climatiques d'un nouveau type, permettant l'échange des risques climatiques contre les permis d'émission. Par exemple, un tel swap, conclu entre un producteur d'énergie et une banque, permettrait à l'industriel de recevoir les permis

¹⁵ Pour plus de précisions, voir par exemple (Gondran, 2001) ou (Barrieu, 2002).

d'émission dont il a besoin en cas de bonne saison et le contraindrait à en céder en cas de mauvaise saison. Remarquons que les contrats de ce type ont l'avantage de ne donner lieu à aucune transaction financière.

2. Des outils pour la gestion des certificats verts.

L'application des produits dérivés climatiques peut également s'envisager dans le cadre de la gestion des certificats verts¹⁶. Ce système de certificats concerne l'électricité « verte », c'est-à-dire celle produite à partir de sources renouvelables telles que l'éolien, la géothermie... Il a été mis en place à la suite de la directive européenne datant de septembre 2001, imposant aux pays des pourcentages minimums de consommation en électricité verte. S'agissant de consommation, et non de production, il est apparu nécessaire de trouver un système permettant de suivre à la trace l'électricité verte. De là les certificats verts. A la base, les certificats verts, associés à une quantité d'énergie, sont délivrés aux producteurs d'électricité verte. Ces derniers peuvent ensuite vendre leurs certificats soit directement auprès de clients finaux, dans le cadre de contrats classiques d'approvisionnement, soit par l'intermédiaire de distributeurs d'énergie.

Les produits dérivés climatiques peuvent s'avérer utiles pour faciliter la gestion des certificats. Par exemple, on peut imaginer un contrat entre un exploitant de fermes éoliennes et un institut financier échangeant des risques climatiques contre des certificats verts. En cas de conditions climatiques défavorables, l'exploitant se verrait recevoir des certificats verts qu'il n'aurait pu obtenir par sa seule production, et se verrait contraint d'en céder à l'institution financière en cas de bonnes conditions de vent¹⁷.

E. Le marché des produits dérivés climatiques.

Initié en 1997 aux Etats-Unis par un contrat signé entre le groupe Enron et de petits producteurs d'énergie suite à la déréglementation du marché de l'énergie¹⁸, le marché des produits dérivés climatiques atteint aujourd'hui un volume cumulé de 11,8 milliards de dollars. Deux marchés organisés ont été créés : aux Etats-Unis, sur la place boursière du Chicago Mercantile Exchange (CME, septembre 1999), et en Europe, au London International

¹⁶ Le système des certificats verts que nous allons présenter maintenant est décrit en détail dans (Martin, 2002).

¹⁷ L'institution financière permet ainsi la mise en relation entre producteurs et utilisateurs (finaux ou intermédiaires) - Exemple tiré de Weinstein (2001).

¹⁸ Voir (Barrieu, 2000).

Financial Futures and Options Exchange (Euronext-LIFFE, fin 2001). Toutefois la liquidité y est faible et la majorité des transactions s'effectue de gré à gré. Le marché est en expansion depuis sa création ; cependant, la faillite du même Enron - l'un des plus importants courtiers - en Janvier 2002, a jeté un froid ; signalons également le retrait de BNP Paribas à la même date.

Nous allons maintenant présenter le marché plus en détail, en commençant par faire un tour d'horizon des différents acteurs, puis en examinant ses caractéristiques : taille, localisation, nature des contrats..., et leur évolution. Nous précisons ensuite quelques spécifications de contrats ; ceux-ci proviennent uniquement des marchés organisés, en raison d'une part de la grande variété des transactions de gré à gré – ce qui anéantirait toute tentative de présentation exhaustive, et d'autre part de la difficulté d'accès aux informations publiques sur ces transactions. En réalité comme on le verra, plus de 80% des contrats sont du type de ceux que l'on trouve sur les marchés organisés.

I. Les acteurs.

Une première catégorie d'acteurs est naturellement constituée des entreprises qui ont une demande en couverture pour les risques climatiques auxquelles elles sont exposées. En tête, semblent toujours figurer les producteurs d'énergie¹⁹, initiateurs du marché, mais d'autres secteurs sont maintenant représentés comme l'agroalimentaire, les loisirs, le tourisme... Notons que certaines entreprises susceptibles d'être concernées se montrent frileuses à entrer dans le marché, semble-t-il en raison des coûts quelquefois « dissuasifs » des transactions ; ce serait le cas, notamment, des entreprises agricoles²⁰.

Les interlocuteurs tout désignés des entreprises exposées au climat sont les organismes bancaires et d'assurances qui forment une deuxième catégorie d'acteurs. Leur rôle, à l'heure actuelle, semble consister la plupart du temps à mettre en relation des utilisateurs finaux plutôt qu'à prendre une partie du risque ; le manque de liquidité d'une part, et l'absence de moyens de couverture avérés peuvent sans doute expliquer cet état de fait. Outre les contrats personnalisés, on trouve souvent, parmi les produits proposés, des *hedge funds* ou « fonds

¹⁹ On dispose de peu d'informations à ce sujet ; cependant, en 2000, 90% des transactions concernaient les producteurs d'énergie (d'après Barrieu, 2000).

²⁰ Voir (Trevor, Linsley, 2002).

climatiques », regroupant un ensemble de produits dérivés attachés à des risques climatiques²¹ (obligations catastrophes, produits dérivés climatiques...). Les souscripteurs de ces fonds endossent alors une pluralité de risques climatiques.

Parmi ces souscripteurs, on rencontre une troisième catégorie d'acteurs constituée des investisseurs ou des spéculateurs attirés par la perspective de gains importants sur un marché décorrélé des fluctuations boursières.

A titre indicatif, on pourra consulter sur le Tableau 0.2 une liste de vingt acteurs principaux, utilisés comme référence pour une étude faisant l'état des lieux du marché des produits dérivés climatiques, et dont nous présentons maintenant les résultats.

1.	Accord Energy Limited (Centrica Subsidiary)
2.	Aquila Energy
3.	AXA Corporate Solutions
4.	Bank of Tokyo-Mitsubishi Ltd.
5.	BNP Paribas
6.	Cargill Incorporated
7.	El Paso Merchant Energy
8.	Element Re Capital Products Inc.
9.	Enron
10.	Entergy-Koch (formerly Axia Energy)
11.	Hess Energy Trading Company
12.	Mirant Americas Energy Marketing LP
13.	Mitsui Sumitomo Insurance Company, Ltd. (formerly Mitsui Marine and Fire Insurance Company Ltd.)
14.	Mizuho Corporate Bank (formerly Industrial Bank of Japan)
15.	Reliant Energy Services, Inc.
16.	Societe Generale
17.	Swiss Re New Markets
18.	The Tokio Marine and Fire Insurance Co. Ltd.
19.	Tokyo Electric Power Company, Inc.
20.	TXU Europe Energy Trading Ltd.

Tableau 0.2. Quelques intervenants du marché des produits dérivés climatiques (avril 2001 à mars 2002).

²¹ La Société Générale (SG) ou la Caisse des Dépôts et Consignations (CDC), par exemple, proposent ce type d'investissement.

II. Etat du marché.

Nous donnons ici quelques chiffres essentiels du marché des produits dérivés climatiques. Ils proviennent d'une étude réalisée par PriceWaterhouseCoopers auprès d'une vingtaine d'intervenants majeurs²² pour la période d'avril 2001 à mars 2002. L'étude mentionne également les résultats des années précédentes, ce qui permet de suivre l'évolution du marché depuis son origine. Les résultats sont présentés sur la Figure 0.6, la Figure 0.7 et la Figure 0.8.

1. Taille – Répartition géographique.

On observe globalement une expansion du marché avec un doublement de la valeur des transactions depuis la 1^{ère} étude de 1998. L'expansion est également géographique avec une récente, mais fulgurante progression du marché en Europe et en Asie²³ ; cependant les Etats-Unis dominant encore nettement le marché avec environ 80% des échanges.

2. Répartition des transactions selon la nature des risques.

Des conclusions analogues peuvent être tirées à propos de la nature des risques climatiques échangés : la température reste le risque majoritaire mais les autres risques – la pluie, en particulier, sont de plus en plus représentés ; cette diversification se remarque aussi « à l'intérieur » du risque de température : les contrats standard de type HDD (pour l'hiver) et CDD (pour l'été) se voient concurrencés par des contrats d'autres types²⁴. Cette diversification va sans doute de pair avec l'apparition de nouveaux acteurs dans le marché des produits dérivés climatiques : à côté des producteurs d'énergie préoccupés par le risque de température, sont venues se joindre des chaînes de parc d'attraction dont le principal risque est la pluie, des stations de sport d'hiver soucieuses de la hauteur de neige, etc. Remarquons pour finir l'inégalité entre l'hiver et l'été, les échanges relatifs à la saison hivernale étant de loin les plus importants (le phénomène a d'ailleurs tendance à s'accroître). Pour l'expliquer, on peut raisonner sur les transactions sur la température réalisées en Amérique du Nord, qui constituent une large majorité. Or on peut vérifier que l'amplitude des variations de température est plus élevée au cours de l'hiver²⁵. Le risque de température est donc plus important dans cette saison.

²² Voir la liste complète sur le Tableau 0.2.

²³ On peut remarquer, en comparant le nombre de transactions et leur valeur, que les transactions réalisées en Asie se rapportent à des nominaux très inférieurs, en moyenne, à ce qui est pratiqué dans les autres continents.

²⁴ La définition précise des indices HDD et CDD sera donnée au paragraphe suivant.

²⁵ Voir par exemple (Cao, Wei, 1998).

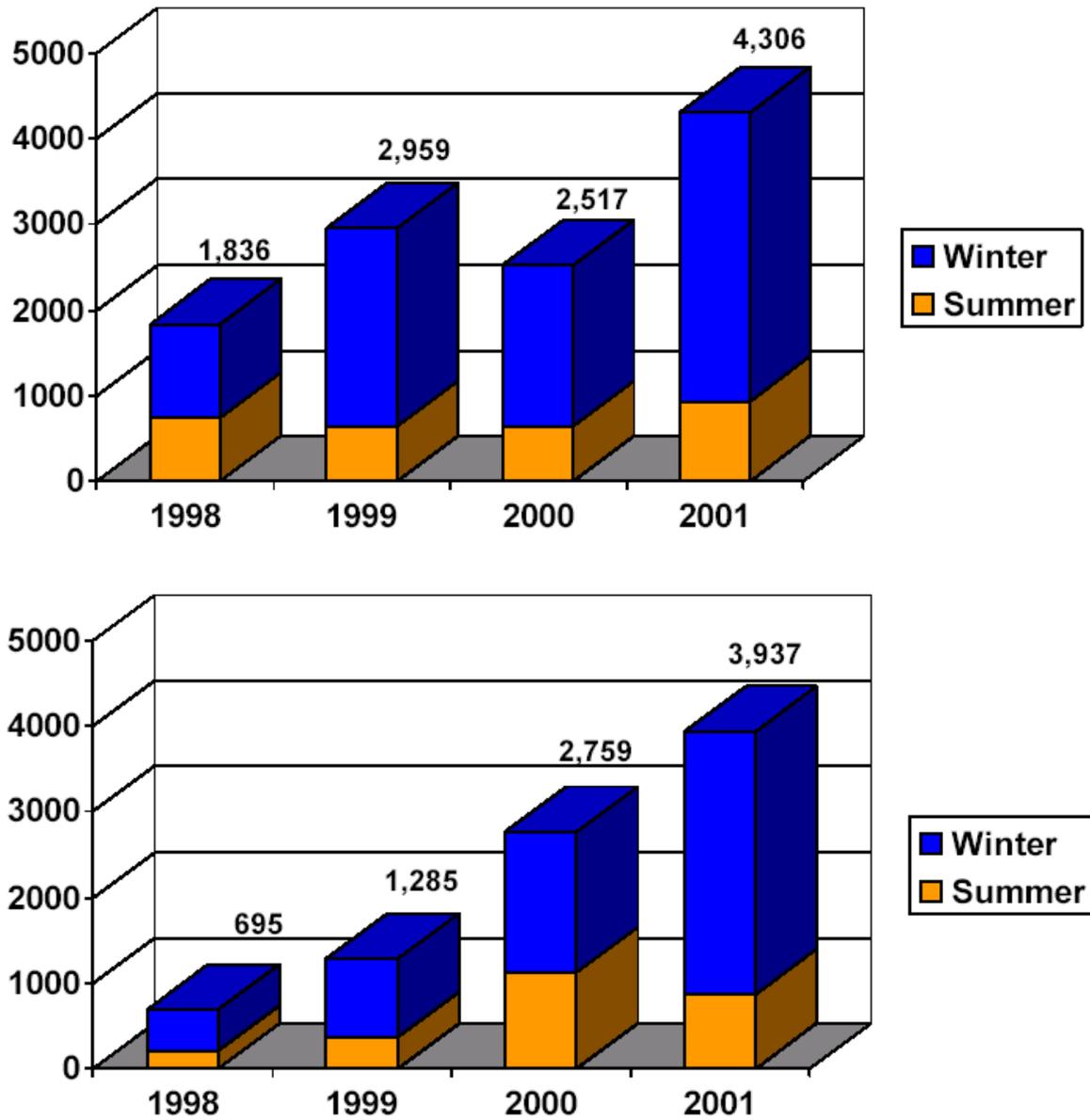


Figure 0.6. Taille du marché des produits dérivés climatiques : valeur (haut) en millions de dollars, et nombre de transactions (bas).

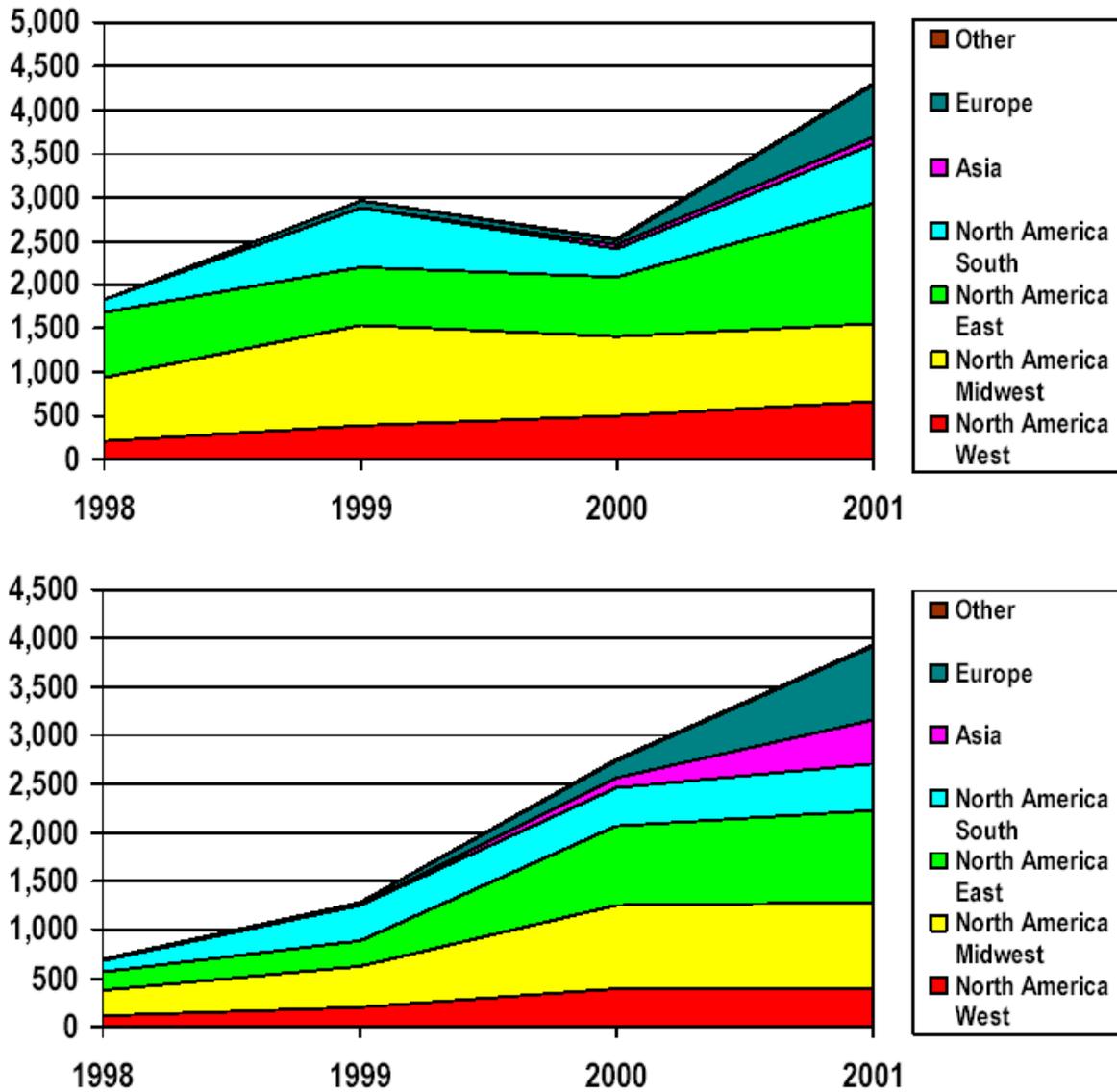


Figure 0.7. Répartition géographique du marché des produits dérivés climatiques : valeur (haut) en millions de dollars, et nombre de transactions (bas).

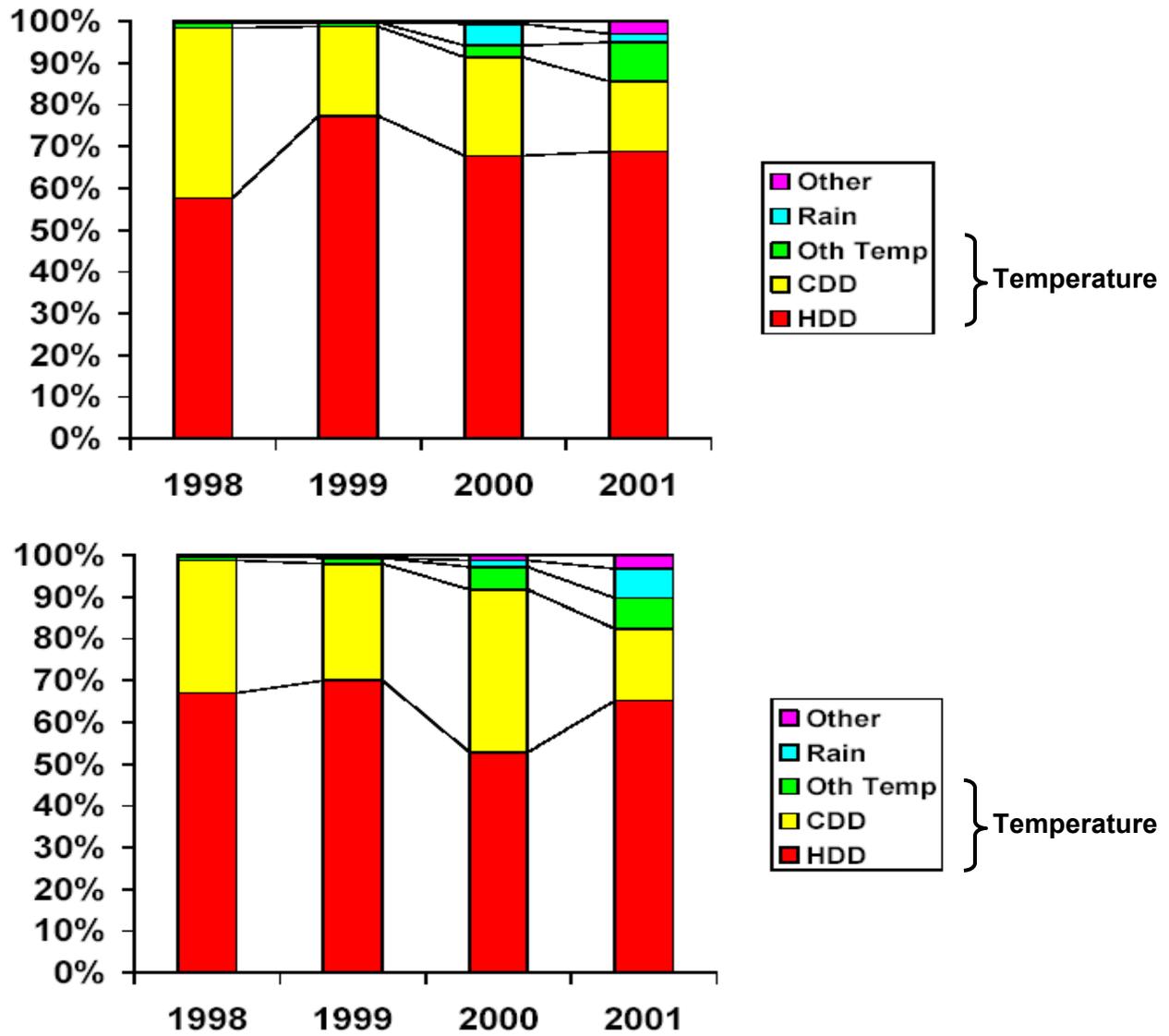


Figure 0.8. Répartition des transactions de produits dérivés climatiques selon la nature du risque : en valeur (haut) et en nombre de transactions (bas).

III. Quelques spécifications de contrats.

1. Sur les marchés organisés.

Sur le CME et le LIFFE-Euronext, seul le risque de température apparaît dans les contrats ; c'est le risque climatique pour lequel le besoin de couverture est le plus important à l'heure actuelle. Les spécifications sont résumées dans le Tableau 0.3.

Marché	CME	LIFFE-Euronext
Indice de référence	Indice HDD, indice CDD	100 + Température moyenne
Longueur de la période d'exposition au risque	1 mois	a) 1 mois b) 1 saison
Localisation des contrats	10 villes des Etats-Unis : Atlanta, Chicago, Cincinnati, Dallas, Des Moines, Las Vegas, New York, Philadelphia, Portland, Tucson.	Londres, Paris, Berlin
Nature des contrats	Futures ou options	Futures
Maturité	1 à 12 mois	a) 1 à 12 mois b) 1 à 2 saisons identiques
Nominal	1°F = 100\$	1°C = 3.000€ (ou £)

Tableau 0.3. Spécifications des contrats sur les marchés organisés, en 2002.

Localisation

Le marché se concentre autour des sites qui enregistrent la plus grande liquidité : Londres, Paris, Berlin en Europe, New York, Chicago, Dallas, ... en tout une dizaine de villes, aux Etats-Unis.

Période d'exposition au risque

Les périodes d'exposition au risque doivent être au minimum de 1 mois et peuvent aller jusqu'à une saison.

Maturité

Pour les contrats mensuels (resp. saisonniers), la maturité s'étale de 1 à 12 mois (resp. deux saisons identiques : deux hivers ou deux étés) : à une date donnée, on peut donc souscrire 12 contrats mensuels différents, un pour chacun des douze prochains mois (resp. quatre contrats saisonniers : un pour chacun des deux prochains hivers et des deux prochains étés).

« *Sous-jacent* »

Le risque de température est mesuré par le biais d'indices construits à partir de la température journalière moyenne, définie comme la moyenne des températures minimale et maximale observées. Ces indices font office de sous-jacents pour les produits dérivés de température.

Au LIFFE-Euronext, c'est simplement la moyenne mensuelle (ou sur une saison) de ces températures à laquelle on ajoute 100, qui fait référence :

$$I(\text{période}) = 100 + \frac{1}{L} \cdot \sum_{t \in \text{période}} T_t$$

où T_t désigne la température moyenne du jour t en degrés Celsius et L la longueur de la période.

Au CME, on utilise les *degrés-jours* (*degree days*) déjà bien connus des professionnels de l'énergie,

$$CDD(t) = (T_t - 65)^+ \quad HDD(t) = (65 - T_t)^+$$

- où la température T_t est donnée en degrés Fahrenheit²⁶ -, et les indices de référence sont le cumul des degrés-jours sur la période concernée :

$$CDD(\text{mois}) = \sum_{t \in \text{mois}} (T_t - 65)^+ \quad HDD(\text{mois}) = \sum_{t \in \text{mois}} (65 - T_t)^+$$

Le seuil de 65°F - environ 18°C, correspond à peu de choses près à un minimum dans la consommation d'électricité : quand on s'écarte de cette température « de confort », la consommation augmente - celle des appareils de chauffage l'hiver, celle des réfrigérateurs et des climatiseurs l'été²⁷. L'indice HDD - pour *Heating Degree Day* (« degré-jour chauffage »), qui cumule les écarts en dessous de cette température, est donc adapté à l'hiver ; en pratique, il sert de sous-jacent pour les mois d'octobre à avril inclus. Inversement, l'indice CDD - pour *Cooling Degree Day* (« degré-jour réfrigération »), convient à l'été ; il est employé d'avril à octobre inclus. Les mois d'octobre et d'avril se placent à la charnière de deux saisons²⁸ : c'est pourquoi on les retrouve dans les deux types d'indices.

On peut d'ores et déjà remarquer que pour les mois d'hiver et d'été les mesures de risque par des indices de type degré-jour (CME) donnent des résultats équivalents à la température moyenne (LIFFE-Euronext) : pour les mois d'hiver par exemple, la quasi-totalité des

²⁶ La correspondance entre degré Fahrenheit et degré Celsius s'effectue au moyen de la formule :

$$TF = 32 + 1,8 \times TC$$

où TF (resp. TC) désigne la température en degré Fahrenheit (resp. Celsius).

²⁷ Voir par exemple (Ellithorpe, Putnam, 2000).

²⁸ ... commerciales : « l'hiver boursier » s'étale d'octobre à avril, « l'été boursier » de mai à septembre.

températures est située en dessous de 65°F si bien que l'indice HDD d'un mois d'hiver est une fonction affine de la température moyenne :

$$HDD(\text{mois d'hiver}) \approx \sum_{t \in \text{mois}} (65 - T_t) = L \times \left[65 - \frac{1}{L} \cdot \sum_{t \in \text{mois}} T_t \right].$$

Nominal

Enfin, on donne à chaque unité d'indice (en degré) une valeur financière arbitraire par le biais du nominal. Notons que les risques unitaires associés aux contrats futures mensuels du CME (100\$) et du LIFFE-Euronext (3.000€) se correspondent à peu près à l'heure actuelle, au moins en ce qui concerne les mois d'hiver ou d'été. En effet, considérons par exemple un mois d'hiver. Un contrat future paye la différence entre la valeur de l'indice constatée et la valeur contractuelle. Or, la formule ci-dessus indique qu'une variation de 1°C de la température moyenne²⁹ est équivalente à une variation de 30°C dans l'indice HDD, ce qui correspond à une variation de 54°F (cf. note 26). Etant donnée que les devises sont - à l'heure où nous parlons, du même ordre de grandeur, on en déduit qu'un paiement de 100\$ dans un contrat future acheté au CME est équivalent à un paiement d'environ 5.400€ pour le contrat correspondant au LIFFE-Euronext.

D'autre part, avec 100\$ par degré-jour, la taille des contrats proposés au CME est inférieure à ce qui se pratique sur les marchés OTC³⁰ ; avec la remarque précédente, il en est donc de même pour les contrats du LIFFE-Euronext. Comme pour le choix des localités, cette disposition favorise la liquidité du marché.

■ Un exemple d'utilisation.

Considérons le cas le plus fréquent d'un producteur d'énergie confronté au risque de température. Plaçons-nous par exemple juste avant l'hiver, et considérons un petit fournisseur d'énergie alimentant la ville de Chicago, désireux de se protéger contre le risque que la température soit trop douce lors du prochain hiver. Celui-ci peut alors se couvrir en prenant des positions courtes au CME sur un certain nombre de contrats futures de type HDD pour les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février, mars et avril. La protection fonctionne alors comme une couverture par des futures classique, lui donnant une compensation au cas où le risque se produit et amputant ses résultats dans le cas contraire. Supposons par exemple que les contrats HDD du mois de décembre qu'il a souscrits aient été cotés à 1115 points au

²⁹ Ou, ce qui revient au même, une variation de 1°C dans l'indice du LIFFE-Euronext.

³⁰ En 2000, Ellithorpe et Putnam donnaient comme « taille typique », la valeur de 5.000\$ par degré-jour.

moment de la transaction (ce qui porte à $1115 \times 100\$ = 115.000\$$ la valeur future d'un de ces contrats, le nominal étant de 100\$ au CME). A la fin du mois de décembre, deux situations sont possibles :

- Le mois de décembre a été clément et l'indice HDD a été évalué, par exemple, à 900. Ses pertes de production sont alors compensées par un gain égal, pour chaque contrat souscrit, à :

$$(1115 - 900) \times 100\$ = 21.500\$$$

- Inversement si l'hiver a été rude et que l'indice HDD a été évalué à 1300, alors ses gains de production seront compensés par une perte de $(1300 - 1115) \times 100\$ = 18.500\$$ par contrat. ■

2. Sur le marché OTC.

Les transactions de gré à gré s'effectuent sous des formes très variées, autorisant la couverture d'une gamme étendue de risques climatiques : la température bien sûr, mais aussi la pluie, la neige, le vent, l'ensoleillement, etc. Cette diversité se retrouve également :

- dans la nature des produits dérivés :
 - o en plus des futures et des options, on trouve des *collars*, *strangles* et autres montages classiques (qu'il est d'ailleurs souvent possible de synthétiser à partir d'options standard) ;
 - o il existe également des *obligations climatiques (weather-linked bonds)*, analogues aux obligations catastrophes : l'obligation procure un taux intéressant à son détenteur en échange de l'engagement à porter tout ou partie d'un risque climatique non catastrophique³¹ ;
- dans la maturité (parfois plusieurs années) ;
- ou dans le choix des indices climatiques. Ainsi ne serait-ce que pour la température, on rencontre en plus des indices HDD, CDD et de température moyenne, les indices de température maximale, température minimale, l'indice GDD utilisé en agriculture³², l'indice EDD³³ ..., ainsi que des combinaisons de ces indices.

³¹ La première obligation climatique aurait été lancée par Koch Industries pour une maturité de trois ans sur un nominal de 45 millions de dollars (Ellithorpe, Putnam, 2000).

³² L'indice GDD (Growing Degree Day), défini par $GDD(t) = (T_t - 50)^+$, est donc un indice CDD dont le seuil est fixé à 50°F (environ 10°C) au lieu de la valeur usuelle 65°F. Il semble avoir été introduit en agriculture pour traduire le fait que la température est un facteur influent pour la croissance des cultures au-delà de 50°F (en en deçà de 86°F – environ 30°C, voir Trevor, Linsley, 2002). L'existence d'un deuxième seuil explique que l'on

Cependant on peut remarquer que plus de 80% des transactions se font sur la température et sont basées sur les indices CDD et HDD qu'utilise le CME³⁴.

D'autre part, les dérivés sont souvent « cappés » c'est-à-dire que le paiement, ou *payoff*, est limité. En ce qui concerne les transactions de type futures ou options, il est aisé de remarquer qu'ajouter une clause limitant le montant des paiements revient à rajouter au portefeuille une position - longue ou courte selon le cas - dans une option d'achat. Ainsi, détenir une option d'achat cappée (*capped call* ou *call spread*) de prix d'exercice K et de paiement maximal M , est équivalent à détenir un portefeuille constitué de l'option d'achat standard de même prix d'exercice et d'une position courte dans l'option d'achat de prix d'exercice $K + M$ (voir la Figure 0.9.).

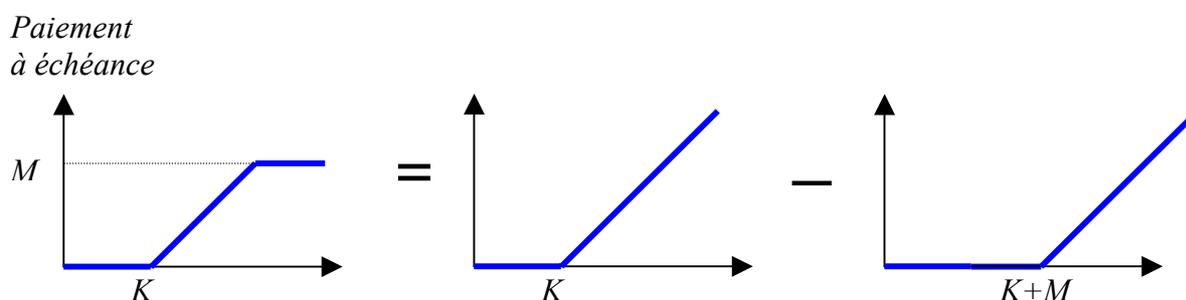


Figure 0.9. Décomposition d'une option d'achat cappée (*call spread*) en deux options d'achat standard.

F. Panorama des problèmes.

I. Difficultés spécifiques.

Comme pour tout nouveau produit dérivé, se posent pour les produits dérivés climatiques les questions de l'évaluation, de la couverture, de la gestion de portefeuilles, etc. Toutefois, les caractéristiques tout à fait particulières du sous-jacent rendent la tâche délicate.

La difficulté majeure provient du fait que les sous-jacents climatiques ne sont pas échangeables. Ainsi, pour les contrats Futures, la procédure d'arbitrage de type *cash-and-*

rencontre également la définition plus restrictive (par exemple dans Ellithorpe, Putnam, 2000) :

$$GDD(t) = \max\left((T_i - 50)^+ ; 86\right).$$

³³ Energy Degree Day, $EDD = HDD + CDD$ (Ellithorpe, Putnam, 2000).

³⁴ D'après l'étude réalisée par PriceWaterhouseCoopers pour WRMA, présentée dans la section "Etat du marché" de cette introduction (voir en particulier la Figure 0.8).

carry est inopérante. De même, pour les options écrites directement sur des sous-jacents climatiques, la méthodologie de Black et Scholes basée sur la duplication de l'option avec le sous-jacent est hors de propos. En revanche, elle pourrait être envisagée lorsque le sous-jacent de l'option est constitué d'un contrat future climatique (comme c'est le cas sur le marché du Chicago Mercantile Exchange). Cependant, la faible liquidité sur le marché des contrats futures rend le mécanisme inapplicable. Mais, évidemment, cette faible liquidité est liée - justement - au caractère non-monnayable des sous-jacents climatiques. C'est donc ici aussi cette caractéristique qui est responsable, bien que d'une façon moins directe, de l'inefficacité de la méthodologie de Black et Scholes. Au final, la situation est donc équivalente à une situation de marchés incomplets, et des techniques *ad hoc* doivent être employées.

Par ailleurs, l'incertitude liée aux risques climatiques n'est pas seulement temporelle, de même que pour les actions ou les taux d'intérêts, mais également spatiale. Cette dimension complique la situation à plusieurs égards. D'une part, d'un point de vue technique, les modélisations sont plus complexes. D'autre part, le nombre des stations météorologiques est limité, ce qui oblige pour étudier un risque climatique en un endroit donné à recourir aux mesures de stations voisines ; le risque de base qui en résulte peut être très important (cas de la pluie).

Enfin une troisième source de difficultés est le manque de données de prix : la confidentialité sur le marché OTC, la faible liquidité sur les marchés organisés font que les prix des transactions parviennent au compte-goutte. Des pratiques courantes ne peuvent donc plus être effectuées : ainsi le calage sur les données de marché (*mark-to-market*) est-il impossible et la gestion de portefeuilles « traditionnelle », utilisant les caractéristiques financières individuelles des actifs, doit-elle s'adapter au fait que ces caractéristiques ne sont pas disponibles sur le marché.

II. Place des modèles statistiques.

1. Du *mark-to-market* au *mark-to-model*.

Le vide formé par l'absence de données de prix revêt la modélisation statistique d'une importance particulière. Car si, pour les marchés classiques, les sorties de modèles sont utilisées comme une aide à la décision, leur rôle pour les produits dérivés climatiques est celui de référence : n'ayant pas d'historiques de prix sur lesquels s'appuyer, les courtiers n'ont

guère d'autre choix avant d'entamer les négociations, que d'examiner les prix de modèles obtenus par des simulations du climat. Ces simulations peuvent également être d'un grand secours pour la gestion de portefeuilles. En effet, s'il est impossible, à partir d'historiques de prix, de connaître une estimation de la rentabilité espérée ou de la matrice de variance-covariance des produits constitutifs d'un *hedge fund*, on peut espérer pouvoir obtenir ces estimations en calculant des prix de modèles de ces produits.

2. Utilisation pour la résolution des problèmes généraux.

La modélisation statistique est donc à la base des solutions envisageables pour les produits dérivés climatiques aux problèmes-types des produits dérivés : évaluation, couverture, gestion de portefeuilles, etc. On trouvera dans le Tableau 0.4 un panorama simplifié de la situation.

Bien souvent, la modélisation va concerner un ensemble de sous-jacents. Il peut s'agir de prendre en compte la présence de plusieurs risques comme dans le cas de la gestion des *hedge-funds*. Il peut s'agir également d'utiliser la dimension spatiale pour améliorer la modélisation relative à un lieu, étant donné que les variables climatiques sont des éléments interdépendants du phénomène complexe des déplacements de masses d'air. Il peut s'agir encore d'utiliser la dimension géographique comme moyen de couverture partielle : on peut penser qu'un bon moyen de se protéger du risque relatif à une position est de prendre la position opposée dans un lieu proche, par exemple souscrire à Lyon le même contrat que l'on a vendu à Paris. Cette idée ne peut s'appliquer qu'aux aléas climatiques pour lesquels on observe une réelle dépendance spatiale : la température rentre dans ce cadre, mais la pluie, par exemple, en sort.

Outre la couverture géographique, un autre axe de recherche pour la couverture et l'évaluation consiste à utiliser des produits dérivés corrélés, comme les produits de l'électricité. Ceci pourrait s'appliquer, notamment, à toutes les transactions – la majorité actuellement – qui font intervenir un producteur d'énergie.

III. Problèmes spécifiques.

A côté des problèmes généraux, communs à tous les produits dérivés, se posent des problèmes spécifiques aux produits dérivés climatiques. Nous donnons ci-dessous une liste de quelques-uns de ces problèmes.

1. Que faire si aucune mesure de la variable climatique n'est disponible ?

Les marchés organisés ont restreint les contrats qu'ils proposent à des grandes villes, pour lesquelles on dispose d'un historique conséquent de données de température. Cependant lorsqu'on sort de ces quelques villes, il est fréquent d'avoir des historiques limités, voire inexistant, et la question se pose de savoir s'il est possible, et comment il est possible, de gérer un contrat relatif à un tel site. Dans le cas de la température où des dépendances spatiales existent, un axe de recherche est d'utiliser les sites avoisinants pour lesquels des mesures sont disponibles.

2. Comment concevoir des produits dérivés climatiques adaptés aux besoins des acteurs ?

Cette question se pose par exemple pour le secteur de l'agriculture. Pour fournir une protection efficace contre de mauvaises récoltes, il semble nécessaire de prendre en compte au moins deux sous-jacents, la température et la pluie, en des sites en général non référencés. Si, pour la température, le problème de l'absence de données peut être contourné, il n'en va pas de même de la pluie pour laquelle le risque de base est très élevé. En outre, il s'avère indispensable de préciser le lien entre les conditions climatiques et la quantité de récolte obtenue.

Cette question se pose également, dans une moindre mesure, sous l'angle de l'amélioration de la couverture existante. Pour l'heure, les produits dérivés climatiques offrent une compensation proportionnelle aux écarts d'une variable climatique par rapport à un niveau ou un seuil convenu ; or il est possible que la fonction d'endommagement des acteurs ne soit pas linéaire : on peut imaginer que la sévérité d'une mauvaise saison oblige l'entreprise touchée à procéder à des licenciements, à avoir recours à des emprunts dans de mauvaises conditions, etc. qui sont d'autant de surcoûts envisageables.

3. Gestion des risques climatiques.

Outre son utilité directe pour les produits dérivés climatiques, la connaissance des risques climatiques peut intéresser les agents économiques dans une perspective de prévision des risques.

Problèmes-types	Difficultés spécifiques	Axes de recherche
<i>Evaluation</i>	Sous-jacent non échangeable	- Modélisation statistique du sous-jacent - Développement de méthodologies propres aux marchés incomplets (emploi de fonctions d'utilité)
<i>Couverture / Evaluation</i>	Sous-jacent non échangeable	- Modélisation statistique d'un ensemble de sous-jacents - Couverture partielle avec des produits financiers corrélés (dérivés de l'énergie) - Couverture géographique en utilisant la corrélation spatiale des sous-jacents (cas de la température par exemple)
<i>Gestion de portefeuilles</i>	Manque de données de prix	- Modélisation statistique de l'ensemble des sous-jacents du portefeuille

Tableau 0.4. Spécificités des produits dérivés climatiques pour la résolution des problèmes-types des produits dérivés.

G. Application des modèles statistiques aux produits dérivés climatiques.

I. Modélisation statistique des aléas climatiques.

Jusqu'à présent, les recherches ont porté principalement sur la température : c'est en effet l'aléa climatique qui intervient le plus souvent dans les contrats (voir le paragraphe « Etat du marché »). On trouve également quelques travaux sur la pluie (Moréno, 2001). Au plan statistique, la pluie paraît plus difficile à modéliser que la température, car elle suppose la connaissance de la loi jointe de *deux* variables aléatoires : l'occurrence de la pluie, et la hauteur de pluie lorsqu'il pleut ; il y a, en outre, le problème de la discontinuité spatiale : il peut pleuvoir des cordes sur un lieu... aux environs duquel le soleil brille³⁵ ! Paradoxalement pourtant, il semble que la pluie ait été davantage étudiée, notamment en raison des applications à l'agriculture, l'hydrologie et l'écologie. Des modèles élaborés, de type spatio-temporel, sont déjà développés (voir Sanso, Guenni, 2000). Cependant, l'adaptation de ces modèles à la thématique financière ne semble pas avoir été encore réalisée. Dans le cas de la température, les travaux se concentrent sur la modélisation de l'aléa en un lieu fixé ; le mouvement des masses nuageuses, ou des phénomènes climatiques exogènes comme El Niño ou son homologue de l'Atlantique, ne sont pas encore incorporés³⁶.

³⁵ Le risque de base pour la pluie n'est-il pas surévalué ? C'est cette question que Dischel (2000) s'est posée et dont il nous invite à reconsidérer la réponse : on trouve, dans certaines situations, des corrélations nettes entre les précipitations mesurées en des lieux différents.

³⁶ On pourra néanmoins consulter (Dischel, 1998) pour une discussion autour du phénomène El Niño, et (Antoniadou et al., 2001) pour une étude de l'oscillation Atlantique Nord.

Parmi les recherches déjà effectuées sur la température, on peut distinguer essentiellement deux voies. La première consiste à adapter des modèles traditionnels de la finance au cas de la température. Ainsi, Dischel (1998), Dornier et Quéruef (2000) ou Moréno (2000) ont présenté quelques extensions du modèle de Hull et White³⁷. On rencontre également le mouvement brownien géométrique, pour modéliser les indices de température de type HDD ou CDD (Davis, 2001). Et plus récemment, Brody, Syroka et Zervos (2001) ont introduit le processus d'Ornstein-Uhlenbeck *fractionnaire*, obtenu en remplaçant le mouvement brownien standard par un mouvement brownien fractionnaire, de façon à prendre en compte un effet de mémoire longue. Cette stratégie est également observée par (Caballero, Jewson, Brix, 2002), qui emploient un modèle de type ARFIMA. La deuxième approche est davantage de nature inférentielle, la modélisation s'effectuant exclusivement à partir de l'examen des données ; on emploie alors des méthodes et des résultats issus du domaine des séries temporelles. Initialement, Cao et Wei (1998) ont introduit un modèle linéaire ARMA avec une variance périodique. Son adéquation avec les données françaises semble relativement bonne (Roustant, 2002). Cependant, ses défauts semblent amplifiés dans le cas des villes des Etats-Unis et il devient alors nécessaire d'introduire une composante d'hétéroscédasticité conditionnelle (Campbell, Diebold, 2000).

II. La pratique de l'évaluation.

Comment passer de la modélisation statistique à l'évaluation et la gestion des produits dérivés climatiques ? Au plan théorique, la question n'a pas une réponse immédiate comme c'est le cas des produits dérivés pour lesquels le sous-jacent est coté : il est absurde de vouloir répliquer une option climatique avec... des indices de température, de pluie, de vent ou de neige ! La méthodologie de Black et Scholes ne peut donc pas s'appliquer ici. Des approches spécifiques ont été ébauchées. Davis (2001) fait remarquer que dans le cas du marché climatique, les agents (comme les compagnies d'énergie) ne sont pas représentatifs, et utilise le concept de « valeur marginale » de l'économie ; cela l'amène à étudier la loi de probabilité jointe d'un indice HDD et du prix de l'énergie de référence. Barrieu et El Karoui (2002) proposent un cadre général pour les produits dérivés écrits sur des actifs non liquides et déterminent simultanément la structure optimale des contrats et leur prix ; selon leurs résultats, on ne devrait pas modéliser le risque non financier (ici : climatique) séparément du risque financier. Pour les produits dérivés climatiques, on peut voir ce résultat comme l'extension d'une approche actuarielle. En effet, lorsqu'on fait les hypothèses d'une faible

³⁷ Voir (Hull, White, 1990).

aversion au risque de l'investisseur³⁸ et de l'indépendance entre la température et le marché financier³⁹, la formule d'évaluation qui est donnée dans la proposition 3 se réduit au principe de la variance :

$$P = E[\textit{payoff actualisé}] + \lambda \cdot \textit{var}[\textit{payoff actualisé}].$$

Plus généralement, dans l'avenir, des méthodes d'évaluation pourraient se baser sur des approches spécifiques aux marchés incomplets telles que celle développée par Carr, Geman et Madan (1999).

Dans la pratique - à défaut d'un véritable consensus, l'évaluation se fait selon une approche actuarielle. Les produits dérivés climatiques sont évalués par une formule du type (voir Geman, 2001) :

$$P = E[\textit{payoff actualisé}] + \lambda \cdot \sigma[\textit{payoff actualisé}]$$

où l'espérance et l'écart-type sont calculés dans l'univers historique, et où λ est choisi... à la discrétion des intéressés. C'est le « principe de l'écart-type », bien connu en assurance, où il est employé pour le calcul des primes ; sa popularité est due pour l'essentiel à son invariance par rapport à une transformation d'échelle. On pourra consulter (Bühlmann H., 1996) pour une présentation des différents principes de calcul de primes. Notons que certaines de ces règles heuristiques peuvent être justifiées par des résultats théoriques : le principe de la variance par exemple, est une approximation de méthodes d'évaluation non linéaires basées sur les fonctions d'utilité (Gerber, Parfumi, 1998) ; en outre, l'aversion pour le risque λ peut être reliée à la probabilité de la ruine de l'assureur (voir par exemple Gerber, 1980).

III. Le risque de modèle.

La faible liquidité du marché des produits dérivés climatiques rend impossible toute tentative de validation à partir des données de marché (calibration) et accroît par conséquent l'importance des prix de modèles. Or les modèles sont des approximations de la réalité, toujours entachés d'erreurs. Puisque les modèles prennent de l'importance, il importe de se soucier davantage de leurs résultats.

Or, si la validation statistique d'un modèle est évidemment nécessaire pour reproduire avec réalisme des trajectoires de sous-jacents climatiques, elle n'en demeure pas moins insuffisante

³⁸ Ce qui est vérifié dans le cas des entreprises.

³⁹ Ce qui est vrai en première approximation : on n'observe pas, par exemple, de corrélation linéaire significative entre l'indice CAC 40 et la température à Paris.

pour assurer de l'efficacité du modèle pour l'évaluation. En effet, considérons par exemple le cas du modèle ARMA, utilisé pour modéliser la température. Il consiste, *grosso modo*, en une somme de trois termes : un terme stochastique, une composante de saisonnalité et un terme de tendance sous la forme d'une droite. On peut penser qu'une petite erreur sur la pente de la droite a un impact non négligeable sur les trajectoires de température prédites, et par voie de conséquence en une erreur significative sur les prix annoncés. Pareil désagrément ne serait pas le premier à être observé en finance. Par exemple, même si, théoriquement, l'analyse moyenne-variance de Markovitz est un outil puissant pour sélectionner un portefeuille optimal, son implémentation pose de sérieuses difficultés car l'estimation des poids du portefeuille optimal est très sensible aux erreurs d'estimation des rendements espérés et de la matrice de variance-covariance des actifs individuels (voir Bawa, Brown et Klein, 1979). La prise en compte de ce phénomène a même amené à reconsidérer certaines conclusions pourtant « bien » établies. Par exemple, Jorion (1985) a montré que l'idée selon laquelle la diversification peut à la fois augmenter le rendement et diminuer le risque est erronée ; en considérant l'erreur d'estimation, on observe que les bénéfices de la diversification se situent plus vraisemblablement dans la réduction du risque. On aura compris, en général, la nécessité de se préoccuper des erreurs de modélisation.

« Le » risque de modèle est, en réalité, multiple. Il peut s'agir, comme nous l'avons envisagé jusqu'à présent, de simples *erreurs d'estimation*. C'est le cas en gestion de portefeuilles, c'est aussi le cas dans le contexte des options standard : c'est ainsi que l'on quantifie l'incertitude des prix d'options données par la formule de Black et Scholes en évaluant les répercussions de l'erreur d'estimation de la volatilité (voir Campbell, Lo, Mac Kinlay, 1997, § 9.3.3.). Les insuffisances de cette démarche consistent dans le fait qu'elle ne considère que les erreurs intrinsèques au modèle, sans remettre en cause la validité même du modèle : il ne s'agit pas, à proprement parler, des risques de modèle, mais des risques *du* modèle. Une approche plus générale et plus réaliste consiste donc à supposer que le modèle lui-même est incertain : il devient un événement possible parmi d'autres, auquel on assigne une certaine probabilité d'occurrence. L'inférence est alors réalisée dans un cadre bayésien, et les intervalles de confiance des paramètres englobent alors l'incertitude autour du modèle. Une introduction à ce sujet est faite dans (Cairns, 2000). En pratique cependant, l'évaluation du risque de modèle est délicate et requiert une bonne connaissance de plusieurs modèles : c'est une approche sans doute prématurée pour les produits dérivés climatiques.

H. Objectif et organisation de la thèse.

La présente thèse aborde les aspects économétriques et financiers de l'évaluation des produits dérivés climatiques de température.

Sa structuration en trois chapitres retrace la logique de l'évaluation présentée à la section précédente : modélisation statistique du sous-jacent, aspects financiers de l'évaluation, et estimation des incertitudes des prix dues aux risques de modèle.

Le premier chapitre traite donc la modélisation statistique de la température. Dans un premier temps, seul l'aspect temporel est pris en compte. Deux modèles linéaires univariés de type AR sont alors étudiés et comparés, permettant d'une part de dégager les caractéristiques communes de la dynamique de la température aux différents lieux, et d'autre part d'aboutir à une première conclusion quant à la pertinence de tenir compte de la situation courante dans la gestion des risques climatiques. Aussi naturelle que soit cette première approche, consistant à modéliser la température grâce à l'historique des températures, elle n'en est pas moins limitée car un grand nombre de variables météorologiques influence la température. Au moins aimerait-on prendre en compte le phénomène de circulation atmosphérique. Ainsi, dans un deuxième temps, le modèle linéaire le plus performant est généralisé à un modèle spatio-temporel de type VAR ; les progrès qu'apporte cette extension sont alors quantifiés.

Le second chapitre aborde quelques aspects financiers, en élargissant le champ de l'étude aux actions des entreprises sensibles au climat. Dans un premier temps, nous revenons sur la pratique de l'évaluation, et montrons dans un cadre simple que l'indépendance de la température avec le marché financier donne un argument en faveur de l'utilisation de l'univers historique dans l'évaluation. Dans un deuxième temps, nous examinons l'indépendance entre la température et le marché. Des anomalies ont en effet été remarquées sur le cours des actions : ainsi dans une étude empirique réalisée sur la ville de New York, Saunders (1993) observe que le rendement des actions est significativement plus élevé les jours où l'ensoleillement est fort. Ces effets, cependant relativement faibles, sont généralement attribués à des causes comportementales⁴⁰. D'autre part, dans le cas des entreprises sensibles au climat, les bonnes conditions climatiques dopent les ventes et pourraient donc avoir des conséquences visibles sur les cours de leurs actions. Dans ce cas, on

⁴⁰ D'autres anomalies ont été observées, comme la possible corrélation des cycles lunaires avec les rendements des actions (Yuan, Zheng, Zhu, 2001). Voir également (Cao, Wei, 2001).

s'attend à ce que le facteur « température » soit pris en compte par le marché, ce que nous étudions.

Le troisième chapitre est consacré à l'estimation de l'incertitude autour des prix que l'on obtient en utilisant le modèle de température développé au chapitre 1 et en adoptant l'approche actuarielle pour l'évaluation. Les deux types de produits dérivés climatiques (standard) sont considérés : futures et options, et deux types d'erreurs de modèle sont envisagés : l'erreur d'estimation des paramètres, et l'écart à la normalité de la distribution des résidus. Outre les renseignements sur les prix que l'on peut en tirer, cette étude permet de porter un regard critique sur l'utilisation du modèle de type AR et d'en préciser les principaux défauts.

Références

- Antoniadou T., Besse P., Fougères A.L., Le Gall C., Stephenson D.B., *L'oscillation Atlantique Nord et son influence sur le climat européen*, Revue de Statistique Appliquée, **XLIX**(3), 39-60, 2001.
- Bank for International Settlements, *Regular OTC Derivatives Market Statistics*, May 2002.
- Barrieu P., *Produits dérivés météorologiques et environnement*, thèse de doctorat en sciences de gestion, Groupe HEC, www.hec.fr, 2002.
- Barrieu P., El Karoui N., *Optimal design of derivatives in illiquid markets*, Quantitative Finance, **2**, 181-188, 2002.
- Barrieu P., *Introduction au marché des produits dérivés météo*, séminaire ISFA « Couverture des risques naturels et climatiques », Paris, 24 et 25 octobre 2000.
- Bawa V.S., Brown S.J., Klein R.W., *Estimation Risk and Optimal Portfolio Choice*, Studies in Bayesian Econometrics Bell Laboratories Series, New York: North Holland, 1979.
- Brody D.C., Syroka J., Zervos M., *Dynamical Pricing of Weather Derivatives*, working paper, 2001.
- Bühlmann H., *Mathematical Methods in Risk Theory*, Springer-Verlag, 1996.
- Caballero R., Jewson S., Brix A., *Long memory in surface air temperature: detection, modeling, and application to weather derivative valuation*, Climate Research, **21**, 127-140, 2002.
- Cairns A.J.G., *A discussion of parameter and model uncertainty in insurance*, Insurance: Mathematics and Economics, **27**, 313-330, 2000.
- Campbell J.Y., Lo A.W., MacKinlay A.C., *The Econometrics of Financial Markets*, (Princeton University Press), 1997.

Campbell S., Diebold F.X., *Weather Forecasting for Weather Derivatives*, working paper, 2000.

Cao M., Wei J., *Stock Market Returns : A Temperature Anomaly*, working Paper, 2001.

Cao M., Wei J., *Pricing Weather Derivatives: an Equilibrium Approach*, working paper, Queen's University Kingston and University of Toronto, Ontario, Canada, 1998.

Carmona R., *Calibrating Degree Days Options*, working paper, 1999.

Carr P., Geman H., Madan D., *Pricing and Hedging in Incomplete Markets*, working paper, 1999.

Davis M., *Pricing weather derivatives by marginal value*, Quantitative Finance, **1**, 1-4, 2001.

Deboaisne E., *Les dérivés climatiques*, séminaire ISFA « Couverture des risques naturels et climatiques », Paris, 24 et 25 octobre 2000.

Dischel R., *Double Trouble: Hedging Rainfall and Temperature*, Risk Magazine and Energy Power Risk Management, August 2001.

Dischel R., *Seeding a Rain Market*, Environmental Finance, September 2000.

Dischel R., *Is precipitation Basis Risk Overstated?*, Risk Magazine and Energy Power Risk Management, August 2000.

Dischel R., *Warning - La Niña Volatility*, Energy and Power Risk Management, November 1998.

Dischel R., *The Fledgling Weather Market Takes Off, Part. 2.*, Applied Derivatives Trading, October 1998.

Dornier F., Quéruef M., *Caution to the wind*, Risk, Energy and Power Risk Management, August 2000.

Ellithorpe D., Putnam S., *Weather Derivatives and Their Implications for Power Markets*, The Journal of Risk Finance, 19-28, Winter 2000.

Eydeland A., Geman H., *Pricing power derivatives*, Risk, 71-73, October 1998.

- Fewings D.R., Pekoç E.A., *Robust Crop Hedging Strategy for Free Market Agriculture*, working Paper.
- Geman H., *Instruments dérivés à sous-jacent exotique : l'exemple des dérivés climatiques*, Banque & Marchés, **53**, 5-9, 2001.
- Geman H., *The Bermuda Triangle: Electricity, Weather and Insurance Derivatives*, Journal of Alternative Investments, 2000.
- Geman H., *Insurance and Weather Derivatives: from Exotic Options to Exotic Underlyings*. Risk Books, London, 1999
- Geman H., *Cat Calls*, Insurance, **7**(9), 86-89, 1994.
- Gerber H.U. and Parfumi G., *Utility Functions: From Risk Theory to Finance*, North American Actuarial Journal, **2**(3), 74-100, 1998.
- Gerber H.U., *An Introduction to Mathematical Risk Theory*, Huebner, 1980
- Gondran N. *Système de diffusion d'information pour encourager les PME/PMI à améliorer leurs performances environnementales*, thèse de doctorat en Sciences et Techniques du Déchet, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, www.agora21.org/entreprise/these2.html, 2001.
- Jorion P., *International Portfolio Diversification with Estimation Risk*, Journal of Business, **58**(3), 259-278, 1985.
- Martin P.-E., *Certificats verts : situation européenne et mode d'emploi*, Systèmes Solaires, **147**, 10-17, 2002.
- Moréno M., *Rain Risk*, Speedwell Weather Derivatives, www.weatherderivs.com, 2001.
- Moréno M., *Evaluation des Dérivés Climatiques*, Speedwell Weather Derivatives, www.weatherderivs.com, 2000.
- Moréno M., *Riding the Temp*, Weather Derivatives, FOW Special Supplement, December 2000.

Nott D.J., Dunsmuir W.T.M., Kohn R., Woodcock F., *Statistical Correction of a Deterministic Numerical Weather Prediction Model*, Journal of the American Statistical Association, **96**(455), 2001.

ONU, Climate Change & The Financial Services Industry, www.unepfi.net, July 2002.

Quérue! M., *Les risques climatiques et naturels : de nouvelles opportunités pour les investisseurs*, séminaire ISFA « Couverture des risques naturels et climatiques », Paris, 24 et 25 octobre 2000

Roustant O., *Une application de deux modèles économétriques de température à la gestion de risques climatiques (1^{ère} partie)*, Banque & Marchés, **58**, 22-29, 2002.

Roustant O., *Une application de deux modèles économétriques de température à la gestion de risques climatiques (2^{ème} partie)*, Banque & Marchés, **59**, 36-44, 2002.

Sanso B., Guenni L., *A Nonstationary Multisite Model for Rainfall*, Journal of the American Statistical Association, **95**(452), 2000.

Saunders E.M.J., *Stock Prices and Wall Street Weather*, American Economic Review, **83**, 1337-1345.

Scherer A., *Les cat-bonds : de nouvelles opportunités pour les réassureurs*, séminaire ISFA « Couverture des risques naturels et climatiques », Paris, 24 et 25 octobre 2000.

Tchapda Djamen I., *Evaluation de flux monétaires en présence d'un ou plusieurs risques de défaut*, thèse de doctorat, 2002.

Trevor C., Linsley P., *The use of weather derivatives in agriculture*, University of Northumbria at Newcastle, 2002.

Weinstein J., *Carbon-denominated weather swaps*, Environmental Finance, November 2001.

Weather Risk Management Association, *Results of Second Annual Industry-Wide Survey*, www.wrma.org, 2002.

Wikle C.K., Milliff R.F., Nychka D., Berliner L.M., *Spatiotemporal Hierarchical Bayesian Modeling: Tropical Ocean Surface Winds*, Journal of the American Statistical Association, **96**(454), 2001.

Yuan K., Zheng L., Zhu Q., *Are Investors Moonstruck? Lunar Phases and Stock Returns*, University of Michigan Business School, 2001.