

**Mémoire présenté le :**

**pour l'obtention du Diplôme Universitaire d'actuariat de l'ISFA  
et l'admission à l'Institut des Actuaires**

Par : Bilal SADOU

Titre Gestion indicielle du risque météorologique – Méthodes de tarification pour la gestion d'un portefeuille et couvertures indicielles multirisques

Confidentialité :  NON  OUI (Durée :  1 an  2 ans)

*Les signataires s'engagent à respecter la confidentialité indiquée ci-dessus*

*Membre présents du jury de l'Institut  
des Actuaires*

signature

*Entreprise :*

Nom : Bilal SADOU

Signature : 

*Directeur de mémoire en entreprise :*

Nom : Gabriel GROSS

Signature :

Invité :

Nom :

Signature :

*Autorisation de publication et de mise  
en ligne sur un site de diffusion de  
documents actuariels (après expiration  
de l'éventuel délai de confidentialité)*

Signature du responsable entreprise



Signature du candidat



**GESTION INDICIELLE DU RISQUE  
MÉTÉOROLOGIQUE**

-

**MÉTHODES DE TARIFICATION POUR LA  
GESTION D'UN PORTEFEUILLE ET  
COUVERTURES INDICIELLES  
MULTIRISQUES**

**Mémoire d'Actuariat**  
ISFA 2017

**Bilal SADOU**

Tuteur : Bernard FINAS

**METEOPROTECT**

**ISFA**  **GRANDE ÉCOLE  
D'ACTUARIAT  
ET DE GESTION  
DES RISQUES**  
INSTITUT DE SCIENCE FINANCIÈRE ET D'ASSURANCES

# Résumé

**Mots-Clés :** Gestion du risque météorologique, Assurance indicelle, Assurance paramétrique, Dérivés climatiques, Produits indiciels multirisques, Énergies renouvelables

Sous l'effet du changements climatiques impliquant une évolution au long terme du niveau moyen de certaines grandeurs météorologiques et une augmentation de l'amplitude de leurs variations ; ces dernières années ont vu se multiplier les anomalies météorologiques.

Si de nombreuses entreprises, entre autres, sont exposées aux risques qui découlent de ces changements, peu d'entre elles se couvrent contre ceux-ci. Les conséquences de la variabilité climatique ont longtemps été perçues par l'Homme comme le fruit de la fatalité et les risques correspondants sont difficilement assurables au moyen d'outil classique. Les produits indiciels étudiés dans le présent mémoire représentent un outil de couverture envisageable pour le transfert des risques météorologiques, ils représentent alors une alternative intéressante au modèle indemnitaire dans ce cas.

Après avoir présenté le contexte général de ce travail en première partie, nous évoquerons dans la seconde les principales méthodes (de modélisation et de tarification) liées à la gestion indicelle des risques météorologiques.

Nous proposerons ensuite un cadre formel pour la conception de couvertures indicelles dans un cadre multirisque ; un certain nombre d'agents économiques météo-sensibles sont, en effet, exposés simultanément à plusieurs de ces risques et pourraient profiter de produits de couverture qui les agrègent.

La méthode envisagée sera ensuite appliquée dans le cas de producteurs d'énergie renouvelable. Les filières éolienne et photovoltaïque étant particulièrement sensibles aux conditions météorologiques, nous étudierons une couverture visant à garantir le revenus de ces producteurs.

# Abstract

**Keywords :** Weather risk management, Index insurance, Parametric insurance, Weather derivatives, Multi-peril index insurance, Renewable energies

As a result of climate change, which refers to a long-term change in the average level of certain meteorological variables and an increase in the amplitude of their variations, weather anomalies have multiplied in recent years.

While many companies are exposed to the risks arising from these changes, few of them hedge against these risks. The consequences of climate variability have indeed long been perceived as the fruit of fate and the corresponding risks difficult to cover using traditional insurance product. The parametric cover studied in this paper represents a promising alternative to the traditional insurance paradigm.

After having presented the general context of this work in the first part, we will evoke in the second part the principal methods (of modelling and pricing) related to the parametric management of meteorological risks.

We will then propose a formal framework for the design of index hedges in a multi-risk framework ; a certain number of weather-sensitive economic agents are exposed simultaneously to several of these risks and could benefit from hedging products that aggregate them.

The method envisaged will then be applied using a case study of renewable energy producers. As wind farms and photovoltaic plants are particularly sensitive to meteorological conditions, we will study a cover aimed at guaranteeing the income of these producers.

# Remerciements

Je tenais à remercier chaleureusement l'équipe de Meteo Protect dans son intégralité de m'avoir ainsi accueilli, d'avoir facilité mon intégration au sein de l'entreprise et mon entrée dans le monde du travail. Ils m'ont permis d'effectuer mon alternance dans des conditions idéales, que ce soit de travail ou de vie.

Je souhaite plus particulièrement remercier mon maître d'apprentissage Bernard Finas pour sa disponibilité, son écoute, l'aide qu'il m'a apportée et les conseils qu'il m'a prodigués. Chacune de ces composantes m'ont été précieuses.

Je remercie également Gabriel Gross, directeur général de Meteo Protect, et Daniel Jessula, secrétaire général, de m'avoir offert l'opportunité d'intégrer leur entreprise.

Je souhaite ensuite remercier l'ensemble de l'équipe technique pour le temps qu'ils m'auront accordé, les connaissances partagées et la bonne humeur apportée. Je suis en particulier reconnaissant envers Julien Gorintin et Laurent Politis pour le temps qu'il m'ont accordé et les réponses qu'ils ont apportées à mes nombreuses questions.

Je désire enfin remercier les membres de mon entourage qui auront contribué, indirectement et inconsciemment, au bon déroulement et à la réalisation de ce mémoire.

# Table des matières

<b>I</b>	<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>7</b>
1	Contexte du Mémoire	8
2	Changements Climatiques	9
3	Risques Climatiques	11
3.1	Caractéristiques . . . . .	11
3.2	La notion d'assurabilité . . . . .	13
3.3	Difficultés liées aux risques climatiques non catastrophiques . . . . .	14
4	Gestion du Risque Climatique	16
4.1	Stratégies de couverture . . . . .	16
4.1.1	Gestion opérationnelle et stratégique . . . . .	16
4.1.2	Assurance traditionnelle/indemnitaire . . . . .	17
4.2	Dérivés climatiques et assurance indicielle . . . . .	18
4.2.1	Principe . . . . .	18
4.2.2	Principales différences . . . . .	18
4.2.3	Exemple simple . . . . .	19
4.2.4	Chronologie . . . . .	20
4.2.5	Organisation du marché des dérivés climatiques . . . . .	22
4.2.6	Avantages et Inconvénients . . . . .	23
4.2.7	Assurance indicielle, sécurité alimentaire et développement économique . . . . .	25
<b>II</b>	<b>MODELISATION ET TARIFICATION DU RISQUE METEOROLOGIQUE</b>	<b>27</b>
5	Contexte	28
5.1	Caractéristiques des données météorologiques . . . . .	28
5.2	Notations . . . . .	29
6	Modélisation des indices	30
6.1	Estimation de tendances . . . . .	30
6.2	Historical Burn Analysis . . . . .	33
6.3	Modélisation directe des indices . . . . .	33
6.3.1	Estimation non paramétrique . . . . .	33
6.3.2	Estimation Paramétrique . . . . .	36
6.4	Modélisation des séries quotidiennes . . . . .	37

<b>7</b>	<b>Tarification</b>	<b>38</b>
7.1	Chargement de la prime pure . . . . .	39
7.2	Critère d'évaluation des différentes méthodes . . . . .	40
7.3	Utilisation de prévisions météorologiques, suivi du niveau de l'indice et provisionnement . . . . .	42
<b>III</b>	<b>COUVERTURES INDICIELLES MULTIRISQUES</b>	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Motivations et Implications</b>	<b>44</b>
8.1	Motivations . . . . .	44
8.2	Considérations supplémentaires nécessaires . . . . .	45
8.2.1	Au niveau de la modélisation des indices et de la tarification . . . . .	45
8.2.2	Au niveau de la définition de l'indice et de la structuration du produit . . . . .	46
<b>9</b>	<b>Méthode de conception de solutions indicielles multirisques</b>	<b>47</b>
9.1	Cadre général . . . . .	47
9.2	Identification des risques météorologiques . . . . .	48
9.3	Définition des indices météorologiques . . . . .	49
9.4	Analyse des risques : étude de l'aléa . . . . .	50
9.5	Agrégation des risques . . . . .	50
9.6	Validation et tarification de la couverture . . . . .	51
<b>IV</b>	<b>EXEMPLE D'APPLICATION POUR LE SECTEUR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES</b>	<b>54</b>
<b>10</b>	<b>Introduction</b>	<b>55</b>
<b>11</b>	<b>Conception du produit de couverture indicielle multirisques</b>	<b>60</b>
11.1	Identification des risques . . . . .	60
11.2	Définition des indices . . . . .	62
11.2.1	Production éolienne annuelle . . . . .	62
11.2.2	Production photovoltaïque annuelle . . . . .	63
11.3	Analyse des risques . . . . .	65
11.4	Agrégation des risques . . . . .	68
11.5	Validation et tarification de la couverture . . . . .	69
11.6	Recapitulatif de l'approche de modélisation des indices et de tarification . . . . .	75
11.7	Limites . . . . .	76
<b>V</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE : LIMITES, APPORTS ET PERSPECTIVES</b>	<b>78</b>
<b>VI</b>	<b>ANNEXE</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Définitions supplémentaires</b>	<b>88</b>
<b>B</b>	<b>Insurance Linked Securities</b>	<b>89</b>

<b>C</b>	<b>INDICES NON MÉTÉOROLOGIQUES</b>	<b>92</b>
C.1	Indices Agricoles . . . . .	92
C.1.1	Indice Rendement . . . . .	93
C.1.2	Indices obtenus à partir du traitement d'images satellitaires . . . . .	95
C.2	Indices de Prix . . . . .	96
<b>D</b>	<b>Méthode de détection de dépendance</b>	<b>97</b>
<b>E</b>	<b>L'anormalité et la normalité</b>	<b>99</b>
<b>F</b>	<b>Exemples de solutions multirisques</b>	<b>101</b>
F.1	Anormalité des séries quotidiennes . . . . .	101
F.2	Anormalité d'indices prédéfinis . . . . .	104
F.3	Autres exemples . . . . .	106
<b>G</b>	<b>Figures Supplémentaires</b>	<b>109</b>

## Première partie

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

*Cette première partie présente le cadre général de ce mémoire. Nous présenterons d'abord l'entreprise où il fut réalisé et les motivations du choix du sujet. Nous traiterons ensuite rapidement du risque climatique, des différentes solutions envisageables afin de le gérer et en particulier des dérivés climatiques que nous introduirons à cette occasion.*

# Chapitre 1

## Contexte du Mémoire

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de ma troisième année de formation d'actuaire à l'ISFA effectuée en alternance chez Meteo Protect depuis fin septembre et précédée d'un stage (de fin d'année de master 1) effectué dans cette même entreprise.

Meteo Protect est une start-up française fondée en 2011 dont le siège social se situe à Paris. Courtier en assurance et réassurance, elle est spécialisée dans la gestion financière du risque météorologique à l'aide de produits indiciels. De l'identification du risque à la création de la solution de couverture, Meteo Protect maîtrise chaque étape de la chaîne de valeur, en s'appuyant sur ses propres bases de données météo et sa propre plateforme de tarification. Coverholder des Lloyd's, courtier agréé et Managing General Agent (MGA), elle aide des grandes entreprises du secteur énergétique à réduire leur exposition aux risques de volumes et de prix. Elle fournit de plus une plateforme de souscription et de pricing à différentes coopératives agricoles dont Axereal (première coopérative céréalière française comptant 16000 adhérents), Asaja (association des producteurs d'olives de la région espagnole de Jaen comptant 22 000 membres) et l'union nationale des Producteurs de pommes de terre (UNPT).<sup>1</sup>

L'activité de courtage de Meteo Protect consiste donc à développer des produits de couverture permettant le transfert du risque météo de différents agents économiques. Ainsi, Meteo Protect analyse la sensibilité de ses clients aux risques météos, les conseille dans leur gestion de ces derniers, construit des indices sur mesure afin de les refléter au mieux et sert d'intermédiaire avec les différents preneurs de risques. Meteo Protect compte aujourd'hui une vingtaine de salariés de formations très variées (actuaire, commerciaux, météorologues, ingénieurs agronomes...) formant ainsi la plus grande équipe d'Europe spécialisée dans la gestion de ce risque.

Le choix de sujet du mémoire, à savoir l'étude de produits indiciels multirisques, est motivé par la nécessité grandissante de disposer de couvertures indicielles permettant d'agrèger les différents risques météos auxquels est soumise une entreprise. Une part importante des clients de Meteo Protect est constituée d'entreprises appartenant au secteur de l'agriculture, secteur fortement exposé à l'aléa climatique et où les risques sont multiples. De telles solutions pourraient alors stimuler l'intérêt des agriculteurs et de nombreux autres acteurs pour qui ils représenteraient un réel avantage.

---

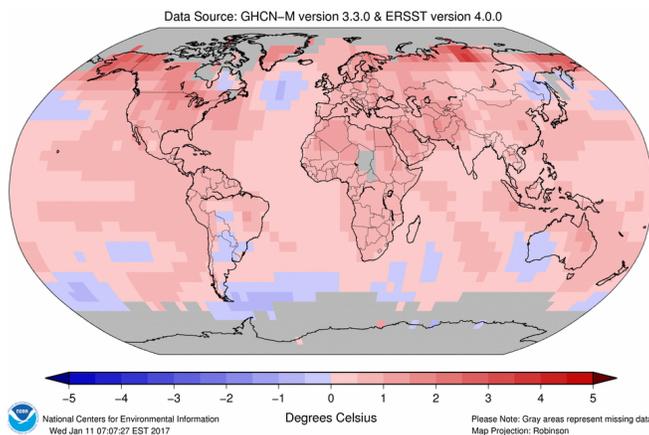
1. <http://www.weatherandeconomics.com>

## Chapitre 2

# Changements Climatiques

**Définition 1 (Changement Climatique).** *Variation de l'état du climat, qu'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels (notamment les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques) ou à des forçages externes ou des changements anthropiques persistants.*<sup>1</sup>

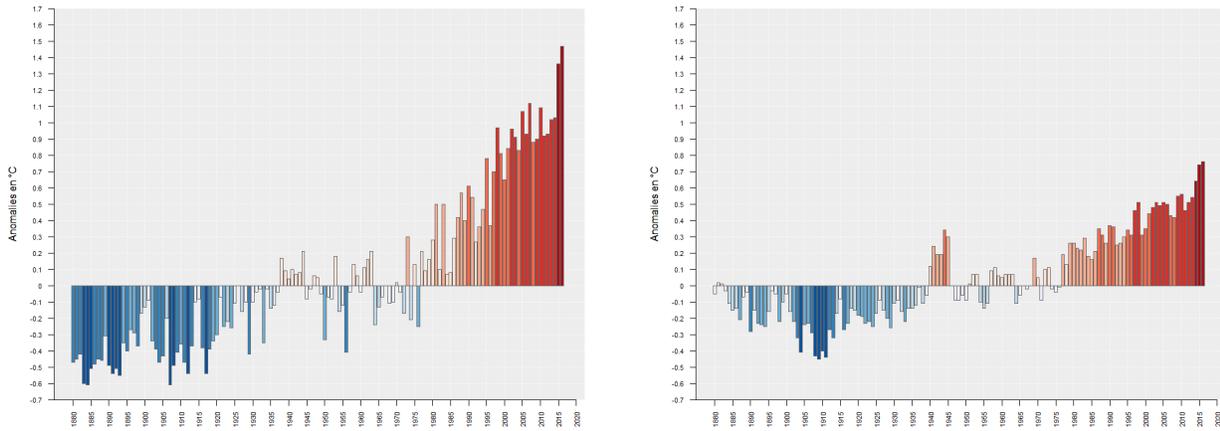
Les questions relatives au changement climatique font partie depuis quelques décennies des problèmes majeurs se posant aux différents acteurs de l'économie. L'accentuation du phénomène ainsi que la multiplication des catastrophes en résultant ont entre autres contribué à une prise de conscience collective et importante autour de ces problématiques. Cependant, comme le souligne le climatologue de renom James Hansen, la reconnaissance par le grand public du "changement climatique d'origine humaine" est encore freinée par sa mauvaise compréhension de la variabilité naturelle du climat. S'il est vrai que le système dynamique qu'est le climat présente une multitude de comportements "imposés" à différentes fréquences (quotidienne : températures diurnes/nocturnes ; saisonnale . . .), il est aujourd'hui important de comprendre que les conclusions et mises en garde apportées par les scientifiques quant à la variation du climat au long terme prennent en compte le bruit lié à cette variabilité naturelle [Sol12]. Ces changements, maintenant avérés, ont/auront un impact certain, global, et non négligeable sur la société et l'économie mondiale. Toutefois, il est encore difficile de préciser quels seront ces effets aux différentes échelles spatiales et temporelles. Naturellement, il est tout aussi complexe d'évaluer avec certitude quel sera l'impact de ce changement sur le secteur de l'assurance ; ce dernier, pouvant avoir des répercussions systémiques, risque cependant de modifier, de façon non négligeable, le paysage assurantiel dans les prochaines décennies.



**Figure 2.1:** Températures moyennes annuelles calculées sur l'année 2016 relativement à la période 1981-2010 (source : NOAA, Climate at a Glance)

1. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_fr.pdf)

Parmi les nombreux aspects du changement climatique, le réchauffement planétaire occupe un rôle prépondérant (si bien que l'on constate parfois une confusion entre les deux termes). Phénomène traduisant une augmentation de chaleur retenue par l'atmosphère, il est estimé à  $0.74^{\circ}\text{C}$  depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et à  $0.13^{\circ}\text{C}$  par décennie sur les derniers cinquante ans, soit une croissance approximativement deux fois plus importante que celle observée sur les 100 années précédentes.<sup>2</sup> Les causes de ce réchauffement sont majoritairement anthropogéniques (émission de gaz à effet de serre, urbanisation. . .) et les conséquences sont nombreuses : hausse du niveau de la mer et acidification des océans, amplification des événements climatiques extrêmes, cycle de l'eau modifié, conséquences économiques. . .



**Figure 2.2:** Anomalie des températures moyennes annuelles de 1880 à 2016 à la surface des continents à gauche et des océans à droite ; normales calculées sur 1910-2000 (données : NOAA, Climate at a Glance)

S'il est important de distinguer climat et conditions météorologiques ( $\sim$  long terme/court terme), ces deux éléments ne peuvent être dissociés l'un de l'autre. Le réchauffement climatique, par exemple, entraîne des conditions météorologiques plus extrêmes et erratiques. La situation est similaire pour d'autres grandeurs météorologiques pour lesquels la modification du niveau moyen au long terme s'accompagne d'une augmentation de l'amplitude de leur variabilité. Ainsi la fréquence des anomalies météorologiques est, selon l'Organisation Mondiale de la Santé, 5 fois plus importante aujourd'hui qu'il y a 50 ans, et devrait quintupler de nouveau d'ici 40 ans selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) [GLL15].

De nombreuses entreprises sont ainsi amenées à s'interroger quant à la viabilité de leur activité dans un environnement où le changement climatique, qui devrait se poursuivre dans les prochaines années, semble se traduire par une augmentation du risque climatique. La gestion de leur " météo-sensibilité " (impact des conditions météorologiques sur leur activité) représente alors une problématique très intéressante pour le secteur de l'assurance. De plus, les changements climatiques pourraient avoir des répercussions encore plus conséquentes sur certaines populations dont la situation est déjà précaire (insécurité alimentaire, accès à l'eau potable, catastrophes naturelles, risque d'épidémie. . .). Ainsi, la Banque Mondiale estime à 100 millions le nombre de personnes supplémentaires vivant sous le seuil de pauvreté d'ici à 2030. En ce sens, ces changements climatiques représentent un challenge que la communauté internationale ne peut et ne doit ignorer.

2. <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/>

## Chapitre 3

# Risques Climatiques

### 3.1 Caractéristiques

#### Définition 2 (Risque).

1. *Danger, inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé.*<sup>1</sup>
2. *Éventualité d'un évènement futur, incertain ou d'un terme indéterminé, ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet, ou tout autre dommage. En matière d'assurance le terme désigne souvent l'évènement contre la survenance duquel nous nous assurons.*<sup>2</sup>

Une grande majorité des activités humaines comporte une part, plus ou moins importante, de risque. Ce risque provient du caractère aléatoire d'évènements (néfastes) que l'homme n'est pas en mesure de prévoir avec certitude. Les conséquences de ce dernier peuvent être de différentes natures, entre autres économiques. L'ensemble des agents économiques est ainsi soumis à différents risques ; certains d'entre eux ont conscience de l'existence de ces risques et cherchent à se prémunir contre leurs conséquences. Cette crainte de la perte dans un contexte incertain est appelée aversion au risque et justifie la demande en assurance. [CD05]

#### Définition 3 (Climat).

*Distribution statistique des conditions atmosphériques terrestres dans une région donnée et pendant une période donnée (long terme relativement à la météo).*<sup>3</sup>

#### Définition 4 (Météorologie).

*Science qui étudie les phénomènes affectant la partie la plus basse de l'atmosphère terrestre (ou troposphère).*<sup>4</sup>

Nous parlons de risques météorologiques lorsque des conditions météorologiques anormales sont synonymes de potentielles conséquences négatives sur l'activité d'une entreprise. Le terme "risques climatiques" est souvent utilisé dans la littérature alors qu'en toute rigueur c'est le terme de "risque météorologique" qui devrait être utilisé. Effectivement, c'est en général la variabilité météorologique dont il est question, et non la variabilité climatique qui concerne des échelles temporelles et spatiales bien plus importantes (temporellement supérieures à 30 ans et spatialement de l'ordre du pays, du continent). Les deux termes sont cependant acceptés dans la suite du mémoire.

---

1. [:http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/risque/69557](http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/risque/69557)

2. Grand Robert de la Langue Française

3. [:https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat](https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat)

4. [:http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/météorologie/50941](http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/météorologie/50941)

Les conséquences des aléas météorologiques sur l'activité d'une entreprise sont, la majeure partie du temps, liées au volume. Le risque météorologique peut être la cause de variabilité des revenus (perte de production, baisse de la demande, interruption de l'activité, détérioration des installations), de variabilité des coûts (réduction de l'offre impliquant une hausse des prix par exemple), mais aussi impacter de façon négative la valeur de l'actif et du passif d'une entreprise. Il se distingue des autres sources de risque économique par plusieurs aspects [BAR02] :

- Il est **géographiquement localisé** : les conditions climatiques diffèrent d'un point du globe à un autre, leurs conséquences sont donc locales.
- Il n'existe **pas de marché physique de météorologie** : il est effectivement impossible d'acheter de la température, ou n'importe quelle autre grandeur météorologique, sur un marché donné.
- Il est **impossible d'agir sur les conditions météorologiques futures** : à l'inverse d'autres facteurs de risque (économiques entre autres) sur lesquels il est possible d'agir, il est impossible de contrôler ou même d'agir sur le niveau futur des différentes grandeurs météorologiques.
- Les conditions météorologiques futures ont **une influence quasi-certaine sur les activités humaines**.

Au sein des risques climatiques, il est important de distinguer **risques** catastrophiques et **non catastrophiques** ; ces derniers présentent plusieurs spécificités [ROU07] :

- Leurs **conséquences** sont **purement financières** : même s'ils peuvent se répercuter au plan humain, leur gravité est moindre vis-à-vis des risques catastrophiques qui eux peuvent directement porter atteinte à la vie humaine.
- Il n'y a **pas de sinistre physiquement constatable** et les **pertes** sont **difficilement chiffrables**.
- Les **échelles temporelles et spatiales** sont **plus importantes que celles des événements catastrophiques** (moins concentrés dans le temps et l'espace). Certains agents économiques peuvent être exposés à des risques symétriques (des échanges sont envisageables).

Le présent mémoire traitera en majeure partie de la gestion des risques climatiques non catastrophiques résultant d'anomalies météorologiques. Le lecteur intéressé par les risques climatiques catastrophiques et leur gestion pourra, entre autres, se référer à [TOM14].

Nous concevons aisément que les risques concernés et les niveaux d'exposition dépendent fortement du secteur économique considéré, ainsi que de la région du globe/du pays concerné(e). Parmi les secteurs les plus "météo-sensibles", nous retrouvons entre autres les secteurs de l'agriculture ; où les rendements, la qualité des récoltes, les coûts et les revenus sont particulièrement dépendants de la température, des précipitations, du gel. . . , et celui de l'énergie, principalement sensible à la température en hiver pouvant être synonyme de baisse de la consommation si trop douces, de coût de production accrue en cas de vague de froid mais aussi au vent, à l'ensoleillement. . .

Nous citons, dans le tableau ci-dessous, des exemples de risques météorologiques pour différents paramètres météorologiques et secteurs d'activité. Sans prétention d'exhaustivité, cette liste illustre les besoins en assurance (entre autres multirisques) de nombreux secteurs.

SECTEURS	Temperature 	Précipitation 	Vent 	Humidité 	Rayonnement 	Conséquences 
<b>Agriculture</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Echaudage</li> <li>Gel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Période de sécheresse</li> <li>Inondations</li> <li>Neige</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tempêtes</li> <li>Vents forts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Humidité excessive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficit d'ensoleillement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Volume et qualité des récoltes</li> <li>Variabilité des prix</li> </ul>
<b>Énergie</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hiver doux</li> <li>Été tempéré</li> <li>Vague de froid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficit de précipitations (hydrolic)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficit/excès de vent</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficit d'ensoleillement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variabilité de la consommation</li> <li>Variabilité de la production</li> <li>Variabilité des prix</li> </ul>
<b>Construction</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vagues de froid</li> <li>Canicules</li> <li>Gel</li> <li>Verglas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Épisode pluvieux prolongé</li> <li>Inondations</li> <li>Neige</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tempêtes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Humidité/sécheresse excessive</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Retards</li> <li>Défauts de construction</li> <li>Sécurité</li> <li>Contraintes chimiques</li> </ul>
<b>Transport</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Canicules</li> <li>Gel</li> <li>Verglas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inondations</li> <li>Neige</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tempêtes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brouillard</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Dégâts</li> <li>Retards</li> <li>Sécurité</li> </ul>
<b>Tourisme-Loisir</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vague de froid</li> <li>Canicules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Épisodes pluvieux</li> <li>Déficit de neige (hiver)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tempêtes</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Nuageux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perte d'activité</li> </ul>
<b>Vente au détail</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Températures extrêmes</li> <li>Variations trop peu importantes (textile)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Épisode pluvieux prolongé</li> <li>Inondations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tempêtes</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficit/excès d'ensoleillement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variabilité de la demande</li> </ul>
<b>Extraction</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Températures excessives</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inondations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vent (minage)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Humidité excessive (sel)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficit/excès d'ensoleillement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dégâts</li> <li>Retards</li> <li>Sécurité</li> </ul>
<b>Événementiel</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vagues de chaleur</li> <li>Vagues de froids</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temps pluvieux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tempêtes</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Nuageux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perte d'attractivité</li> </ul>
<b>Santé</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Canicules</li> <li>Vagues de froids</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inondations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tempêtes</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficit d'ensoleillement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consommation de médicaments</li> <li>Activité accrue</li> </ul>

Figure 3.1: Exemples de risques météorologiques selon le secteurs d'activité considéré et la grandeur retenue (sources données : [SAU15], [Cel])

## 3.2 La notion d'assurabilité

**Définition 5 (Aléa Moral).** *Notion introduite au 17<sup>ème</sup> siècle par l'économiste Adam Smith qui la caractérise "comme la maximisation de l'intérêt individuel sans prise en compte des conséquences défavorables sur l'utilité collective".<sup>5</sup> Dans le cas de l'assurance, il correspond à une modification du comportement de l'assuré (se sachant couvert) augmentant son exposition au risque relativement à la situation où il ne disposait d'aucune couverture.*

**Définition 6 (Anti-sélection).** *Expression désignant les dysfonctionnements des marchés d'assurance qui résultent de l'information cachée dont les assurés peuvent disposer sur leurs propres risques et qui n'est pas accessible aux assureurs.<sup>6</sup> En considérant que tous les agents partagent le même niveau d'aversion au risque et que le contrat d'assurance proposé est le même pour l'ensemble de la population, ce sont prioritairement les mauvais risques qui seront intéressés par ce contrat. L'antisélection qui se manifeste est donc un des effets l'asymétrie d'informar-*

5. :<http://financedemarche.fr/definition/alea-moral>

6. :<https://www.universalis.fr/encyclopedie/assurance-economie-de-l-assurance/3-antisélection/>

tions.

Il est intéressant, en premier lieu, de s'interroger quant à l'assurabilité du risque concerné. Nous qualifierons d'assurable un risque pouvant être couvert par une société d'assurance. En s'inspirant d'une classification déjà proposée dans la littérature, Arthur Charpentier et Michel Denuit proposent dans [CD05] certains critères d'assurabilité que nous listons ci-dessous :

1. *Assurabilité juridique*

- Le contrat d'assurance est soumis au principe aléatoire ; autrement dit, sous peine de nullité du contrat, la survenance d'un événement doit avoir un caractère aléatoire.
- Le cadre juridique doit être constant dans le temps.

2. *Assurabilité actuarielle*

- En tenant compte de la solvabilité de l'assureur, la perte maximale ne doit pas être catastrophique.
- Le montant moyen des pertes attendues doit être identifiable et quantifiable.
- Les risques doivent être mutualisables.

Ces critères permettent en fait de se placer sous les hypothèses de la loi des grands nombres et du théorème central limite, à savoir l'indépendance des risques entre eux, leur homogénéité au sein du portefeuille (i.i.d.) et qu'ils soient de moyenne et de variance finies. Le résultat étant asymptotique, il est nécessaire de posséder un portefeuille de grande taille.

3. *Assurabilité économique*

- Il ne doit y avoir ni de problèmes d'aléa moral, ni de problèmes d'anti-sélection.
- Un marché est nécessaire, autrement dit il doit y avoir une offre et une demande qui se rencontrent (les deux parties doivent, de plus, avoir conscience du risque).

### 3.3 Difficultés liées aux risques climatiques non catastrophiques

Si l'augmentation de l'exposition aux risques climatiques (pertes résultantes de conditions météorologiques anormales plus fréquentes) devrait entraîner une hausse de la demande d'assurance pour ce genre de risque, ils ne vérifient que rarement les critères d'assurabilités listés ci-dessus.

Au regard des critères évoqués dans le paragraphe précédent, les risques climatiques non catastrophiques posent certaines difficultés liées à l'assurabilité actuarielles :

- Les conséquences de ces risques sont difficilement quantifiables (les sinistres ne sont pas physiquement constatable). Le risque de modèle dans l'évaluation du montant moyen des pertes et des fonds propres nécessaires est alors élevé.
- Ils sont difficilement mutualisables : en effet les agents présents sur une même zone géographique connaîtront des conditions météorologiques relativement similaires, sans pour autant les subir de la même façon en cas d'événements dommageables. Ainsi les hypothèses d'indépendance et d'homogénéité des risques ne sont pas vérifiées. Une solution, dont dispose les preneurs de risques au problème de non mutualisation, consiste à diversifier géographiquement leurs portefeuilles de risques sur des zones étendues.

On comprend que les hypothèses du central limite ne sont plus vérifiées ; il est alors délicat de modéliser ces risques et de les couvrir.

Comme nous le précisons ci-dessus, bien que les conditions météorologiques soient partagées par des agents sur une même zone géographique, certains d'entre eux sont plus exposés aux risques. Si le coût de la couverture est la même pour l'ensemble de ces agents, le coût des événements subis par les plus vulnérables sont subventionnés par les agents les moins exposés. Ce type de modèle n'encouragera alors pas les agents à réduire leur vulnérabilité aux risques météorologiques, créant ainsi un aléa moral [TOM14]. Un modèle où les primes demandées seraient proportionnelles aux risques supportées par chacun des agents (segmentation des risques) encouragerait à l'inverse des comportements de réduction du risque mais risqueraient d'exclure les agents les plus vulnérables à ces risques [Ste06].

Pour éviter tout problème d'asymétrie d'information, il sera nécessaire de respecter certains délais entre la date de souscription et la période de couverture afin d'éviter l'utilisation de prévisions météorologiques trop précises. Notons que ces échéances sont croissantes avec l'échelle du phénomène météorologique considéré et que les progrès des moyens d'observation, de modélisation et de calculs devraient continuer à repousser les horizons de prévisibilité.

Il est important de comprendre que le fait que le risque climatique ne soit pas assurable (au sens de la définition donnée ci-dessus) n'implique pas l'impossibilité de le couvrir. Il existe en effet d'autres moyens de transferts de risques et des institutions autres que les sociétés d'assurance qui pourront proposer des couvertures pour ces risques qualifiés de non-assurables (états, marchés financiers...). Prenons l'exemple des risques financiers (risques associés aux fluctuations de la valeur d'un actif) : ils ne peuvent être mutualisés car, associés à un événement unique, ils sont communs à plusieurs agents [PIC05]. Néanmoins, la gestion de ces risques est rendue possible par les techniques de répliquations (constitution d'un portefeuille d'actifs versant les mêmes flux que l'instrument considéré). Nous pouvons aussi évoquer les catastrophes naturelles qui, bien que de probabilité d'occurrence faible, ont des conséquences financières souvent lourdes et/ou touchent un grand nombre d'individus, rendant impossible toute mutualisation. Cependant, de nouvelles formes de transfert de risque (répartition des risques au sein d'un pool d'assureur et/ou réassureur, titrisation du risque sur les marchés financiers) permettent aujourd'hui de couvrir ces risques et d'ainsi faire reculer les frontières de l'assurabilité [CD05].

# Chapitre 4

## Gestion du Risque Climatique

### 4.1 Stratégies de couverture

Nous évoquerons ci-dessous certaines des solutions permettant de gérer, transférer le risque météorologique ou en tout cas de réduire l'exposition à ce dernier. Nous évoquerons dans un premier temps certaines des solutions de gestion stratégique et opérationnelle puis passeront en revue quelques produits d'assurance indemnitaires disponibles sur le marché avant d'introduire le sujet central de ce mémoire : les produits indiciels.

#### 4.1.1 Gestion opérationnelle et stratégique

Il sera parfois envisageable pour les agents économiques d'augmenter leur résilience aux conditions météorologiques autrement qu'en souscrivant un contrat d'assurance. Les agents, peu averses au risque, préféreront souvent assumer (autogérer) leurs risques météorologiques plutôt que d'avoir à payer un montant donné afin de les transférer. Nous citons quelques solutions qui permettent, en théorie, aux agents de réduire leur exposition aux risques météorologiques.

- **La diversification**

Les entreprises dépendant fortement d'un paramètre météorologique et ayant identifié cette dépendance peuvent chercher à l'atténuer en diversifiant l'**activité** de leur entreprise de telle sorte que les conditions leur étant initialement adverses soient bénéfiques pour leur nouvelle activité. Dans le secteur de la distribution, cela peut être fait en diversifiant sa gamme de produits par exemple. Cette stratégie permet de réduire la volatilité des pertes mais sa mise en place représente souvent un coût (en temps et en argent) non négligeable. Le risque météorologique étant localisé, il est aussi possible d'atténuer les effets de ce celui-ci en étendant son activité à de nouvelles zones **géographiques** ; on parle alors de diversification géographique. La mise en place d'une telle stratégie peut aussi représenter un coût non négligeable et n'est pas toujours fructueuse (le climat est un mécanisme complexe et changeant).<sup>1</sup>

- **L'ajout de clauses contingentes au contrat**

Les entreprises peuvent aussi transmettre le risque lié à la volatilité des prix (due aux variations météorologiques) aux clients. Mais cette solution a des limites, en particulier dans un contexte de concurrence accrue.<sup>2</sup>

---

1. <http://meteosensibilite.com/la-couverture-meteo>

2. [https://www.celsiuspro.com/Portals/0/Downloads/WeatherRisk\\_What\\_Every\\_CFO\\_Needs\\_to\\_Know\\_Now](https://www.celsiuspro.com/Portals/0/Downloads/WeatherRisk_What_Every_CFO_Needs_to_Know_Now)

- **La gestion opérationnelle**

En intégrant les prévisions météorologiques dans leurs outils de pilotage, les entreprises ayant la capacité de modifier leurs achats ou ventes en peu de temps peuvent réduire leur météo-sensibilité. Une fois de plus cette stratégie a ses limites ; en plus d'être inefficace dans le cas d'une météo défavorable prolongée, les prévisions météorologiques sur lesquelles elle repose sont rarement fiables pour des échéances supérieures à deux semaines. <sup>2</sup>

- **La constitution de fonds propres**

Cette stratégie, plus communément qualifiée d'épargne, consiste à provisionner lors des bonnes années afin de pouvoir compenser les pertes impliquées par des conditions météorologiques défavorables sur certaines années. Cette stratégie est malheureusement mise à défaut dans le cas d'une succession de mauvaises années.

#### 4.1.2 Assurance traditionnelle/indemnitare

Certains contrats d'assurance traditionnelle permettent de se couvrir contre les conditions météorologiques extrêmes (risques climatiques catastrophiques). Nous citons ci-dessous certains d'entre eux et les garanties qui leurs sont associées.

En souscrivant un contrat d'assurance pour ses biens matériels (multirisques automobile, habitation. . .) l'assuré bénéficie automatiquement d'une garantie tempête (dommages causés par le vent, la pluie, la neige, la grêle) et d'une garantie catastrophe naturelle (définie dans l'article 125-1 du Code des assurances et couvrant les dégâts dus aux inondations, aux avalanches, aux sécheresses, aux incendies. . .). Cependant, l'assurance catastrophe naturelle n'est effective que dans certaines zones déterminées par arrêté interministériel et la notion de catastrophe naturelle, du fait de sa subjectivité, est laissée au jugement des pouvoirs publics (constat nécessaire de l'état de catastrophe naturelle via la publication d'un arrêté interministériel dans le Journal officiel). De même, il existe des limites à la garantie tempête : des conditions liées à l'état de l'habitation (celle-ci doit être de "bonne construction"), les dégâts pris en compte sont limités dans le temps (pas indemnisés si le dégât survient au-delà de 48 heures après le sinistre) et la déclaration doit être faite dans les 5 jours suivant le sinistre (10 dans le cas de la garantie catastrophe naturelle).<sup>3</sup> D'autres garanties, facultatives ou d'office incluses selon les contrats, peuvent s'ajouter à ces garanties obligatoires.

Il est aussi possible pour les exploitants agricoles de se couvrir contre les aléas climatiques qui pourraient endommager leurs cultures via des contrats d'assurance péril nommé ou multirisque climatique qui les couvrent contre un ou une liste de risques explicités dans le contrat, ou contre un ensemble d'évènements reconnus pouvant diminuer leur production. Nous pouvons entre autres citer comme exemples les assurances contre le gel, les tempêtes, la grêle, l'inondation, la sécheresse, l'échaudage . . .

Ce modèle indemnitare, paradigme le plus répandu dans le secteur de l'assurance, ne peut s'appliquer à l'ensemble des risques climatiques. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre précédent, ce dernier ne s'applique que dans le cas de risques mutualisables et implique que les différentes garanties et l'ensemble des biens couverts soient définis au préalable. D'autre part, en cas de réalisation du sinistre, une expertise est nécessaire afin de déterminer le niveau de perte réelle ; cette dernière entraîne des coûts de gestion supplémentaires et un délai plus important avant règlement de l'indemnisation. Ce délais peut être préjudiciable pour l'assuré mais aussi pour l'assureur qui devra constituer des provisions plus importantes.

---

3. <https://www.ffa-assurance.fr/content/>

## 4.2 Dérivés climatiques et assurance indicielle

### 4.2.1 Principe

Les agents météo-sensibles disposent d'autres solutions de transfert du risques, les produits indiciaires. Ces produits indiciaires peuvent prendre deux formes : celles de dérivés climatiques ou d'assurance (alors qualifiée d'indicielle ou de paramétrique). Il s'agira dans le cas de l'assurance indicielle de construire un indice expliquant au maximum la variable d'intérêt ; l'indemnisation sera fonction du niveau de cet indice sur la période de couverture. Les dérivés climatiques sont des instruments financiers dont le *payoff* dépend lui aussi d'un indice météorologique. Dans les deux cas, le contrat sera défini par différents paramètres [JB05] :

- La période du contrat : date de début et de fin.
- Une station météorologique de référence (ou point de grille)
- Un ou plusieurs paramètres météorologiques.
- Une fonction *payoff* qui fixe le niveau des flux financier à associer à une valeur donnée de l'indice.
- Pour certains contrats, un niveau de prime payé par l'acheteur de protection au vendeur en début de contrat.

L'indice utilisé doit être objectif, suffisamment transparent pour être aisément quantifié et non manipulable par les différentes parties au contrat. Il doit être défini de façon rigoureuse (période, station météorologique, paramètre météorologique mesuré, méthode d'agrégation) et les données à partir desquelles il est calculé doivent être communiquées dans un délai convenable et provenir d'organismes indépendants et fiables. Tout comme les contrats d'assurance traditionnelle et les cat-bonds, l'objectif de ces produits est de protéger l'acheteur de conditions météorologiques défavorables à son activité. Cependant, à l'inverse des produits décrits supra et des *ILS* présentés en Annexe B qui concernent uniquement les risques climatiques catastrophiques, les dérivés climatiques et les produits d'assurance indicielle peuvent être utilisés dans la gestion des risques climatiques non catastrophiques (cf. Chapitre 3).

### 4.2.2 Principales différences

#### Cadre réglementaire et comptable

Si les dérivés climatiques et les produits d'assurance indicielle sont relativement proches en terme de "principe" et d'utilisation, ils disposent chacun de leur cadre réglementaire et comptable spécifique.

- Un produit d'assurance indicielle est un contrat d'assurance. Ce dernier engage l'assureur à couvrir l'assuré (personne physique ou morale) contre les conséquences financières d'un ou plusieurs risques définis préalablement dans le contrat. En échange de cette couverture, l'assuré paie en amont de la période de couverture une prime à l'assureur. Seuls les organismes agréés par l'Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution en France ont le droit de vendre des contrats d'assurance. Le traitement des contrats d'assurance est défini par la norme comptable IFRS 4 (International Financial Reporting Standards) publiée en 2004. D'après la norme IFRS4, sont des contrats d'assurance les "swaps d'assurance et autres contrats qui imposent un paiement sur la base de changements de variables climatiques, géologiques ou d'autres variables physiques spécifiques à une des parties au contrat"<sup>4</sup>. La nouvelle norme IFRS 17 "contrats d'assurance" a été publiée en mai 2017, elle devrait être applicable au premier janvier 2021.

---

4. <http://www.fincoo.com/ifrs/ifrs-04>

- Un produit dérivé est un instrument financier dont les flux futurs (et donc la valeur) dépendent d'un autre produit appelé sous-jacent. À l'image d'un contrat d'assurance indemnitaire, les dérivés climatiques sont parfois utilisés par les utilisateurs finaux comme protection contre des conditions météorologiques adverses. La question se pose alors de savoir si le contrat de dérivé météorologique doit être comptablement considéré comme un contrat d'assurance ou comme un instrument financier. Comme nous l'avons précisé ci-dessus, son traitement sera défini par la norme IFRS 4 dans le premier cas. Dans le deuxième cas, il le sera par la norme IAS 39 (International Accounting Standards) en application depuis le premier janvier 2001 [FG11]. La norme IAS 39 stipule que les contrats d'assurance (dans le champ d'application de IFRS4) sont exclus de son champ d'application<sup>5</sup>. Or selon la norme IFRS 4, les "contrats qui imposent un paiement sur la base d'une variable climatique, géologique ou autre variable physique qui n'est pas spécifique à une des parties au contrat (communément décrite en tant que dérivé climatique)"<sup>4</sup> ne sont pas des contrats d'assurance. Jugée trop complexe et inadaptée à la réalité pratique de la gestion d'instruments financiers (rapport [MM09]), IAS 39 a été remplacée par la norme IFRS 9 à partir du premier janvier 2018<sup>6</sup>. Notons de plus, que si il est possible pour toutes les entreprises qui le souhaitent d'acheter un contrat d'assurance, il n'en est pas de même pour les transactions sur produits dérivés pour lesquels de nombreuses exigences existent. À ce titre, le règlement européen EMIR (European Market and Infrastructure Regulation) imposent de nouvelles contraintes aux différents acteurs du marché des produits dérivés visant à rendre ces instruments plus sûrs et transparents<sup>7</sup>.

### Autres différences

Dans le cas de l'assurance indicelle, la couverture du risque climatique est considérée par l'acheteur de protection comme un processus d'assurance; elle vise à fournir une protection contre les pertes liées à un risque et ne doit être synonyme d'aucun potentiel gain financier pour l'acheteur de protection (uniquement réparation du sinistre subi). L'indice est alors défini de façon à être le plus représentatif du risque considéré (réel et identifié), et donc en mesure de "capter" au mieux les événements météorologiques dommageables. L'acheteur de protection espère recevoir des indemnités en cas de réalisation de tels événements et ne souhaite pas gérer une position financière au cours du temps [KOC11]. Dans le cas des dérivés climatiques, l'entreprise ouvre une position (courte ou longue selon le cas) et est censée la gérer de manière dynamique. Cependant, il est rare en pratique que ces positions soient débouclées avant la maturité. En effet, les dérivés météorologiques sont, souvent aussi, plus perçus par les acheteurs comme des contrats d'assurance que comme des outils de spéculation [BAR02].

Enfin, les règles fiscales qui entourent les produits dérivés diffèrent de celles des contrats d'assurance.

### 4.2.3 Exemple simple

On retrouve, parmi les acheteurs de protections, de nombreux producteurs d'énergie cherchant à se couvrir contre des températures hivernales douces ou des températures estivales modérées qui seront synonyme de réduction de la consommation en énergie et donc de potentielles pertes financières. La demande en énergie de chauffage en hiver est assez bien mesurée par l'indice HDD (*Heating Degree Day*) défini, pour un jour, comme la partie positive de différence entre la température de référence (souvent fixée à 18 °C) et la température journalière moyenne.

5. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=celex:32004R2086>

6. [http://www.focusifrs.com/menu\\_gauche/normes\\_et\\_interpretations/textes\\_des\\_normes\\_et\\_interpretations/ifrs\\_9\\_instruments\\_financiers](http://www.focusifrs.com/menu_gauche/normes_et_interpretations/textes_des_normes_et_interpretations/ifrs_9_instruments_financiers)

7. <http://www.amf-france.org/Acteurs-et-produits/Produits-derives/Presentation>

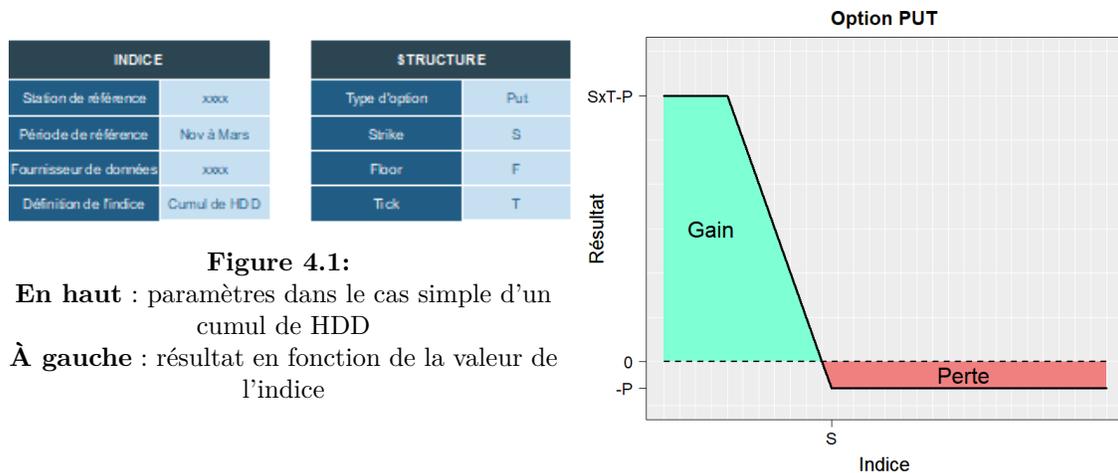
L'indice HDD hivernal correspond alors à la somme des HDD quotidiens.

$$HDD = \sum_{d \in \text{période}} (18 - T_d)^+, \quad \text{avec } T_d \text{ la température journalière moyenne} \quad (4.1)$$

Son équivalent estival, l'indice CDD (*Cooling Degree day*), est défini pour un jour donné comme la partie positive de l'opposé de la différence précédente et mesure la demande en énergie pour la climatisation.

Pour se protéger, l'énergéticien pourra par exemple prendre une position longue sur un put sur cet indice ; ainsi si l'indice reste bas au cours de l'hiver (températures douces proches de 18 °C), il sera dédommagé de :

$$\text{Payoff} = (\text{Strike} - \text{HDD})^+ \cdot \text{Tick} \quad (4.2)$$



**Figure 4.1:**

**En haut** : paramètres dans le cas simple d'un cumul de HDD  
**À gauche** : résultat en fonction de la valeur de l'indice

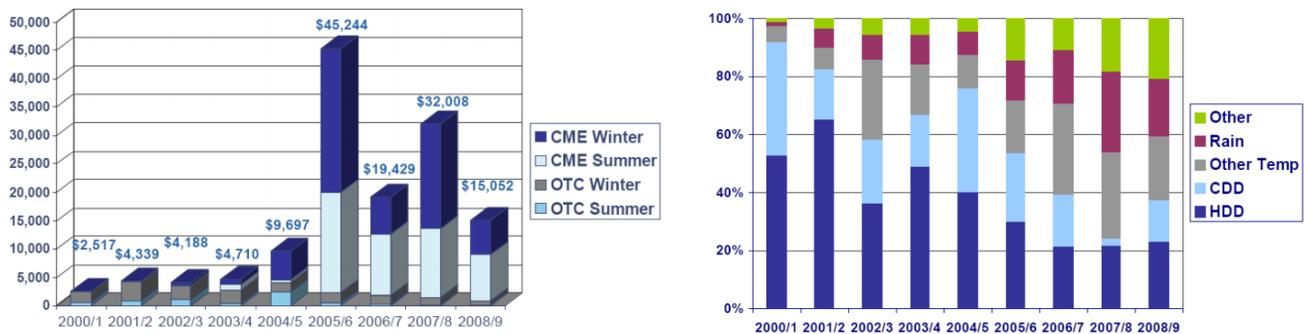
#### 4.2.4 Chronologie

Après avoir été freiné pendant la première moitié du XXème siècle, le processus de mondialisation est relancé à la fin de seconde guerre mondiale entraînant avec lui un accroissement important de la concurrence. Dans un tel contexte, réduire la volatilité de son résultat devenait primordial pour beaucoup d'entreprises. De plus le processus de dérégulation du secteur de l'énergie déjà entamé à la fin des années 70 aux USA avec la loi PURPA (*Public Utility Regulatory Policies Act*) commençant à modifier le cadre réglementaire des utilities en les obligeant à acheter du courant à des producteurs dispensés de régulation fédérale, s'accéléra dans les années 90 avec l'EPAAct (*Energy Policy Act*) élargissant l'ouverture à la concurrence en créant une nouvelle catégorie de producteur indépendants exemptés de régulation, avant d'atteindre l'Europe [DEF04]. De nombreuses entreprises se sont ainsi retrouvées exposées aux aléas économiques (concurrence grandissante, incertitudes liées à la demande impliquant un risque de volume) et aux risques climatiques, ce qui a entraîné un accroissement net des besoins en couverture de risques climatiques non catastrophiques [ROU07].

C'est dans cet environnement que fut signé entre 1996 et 1997 le premier dérivé climatique entre Enron et Koch Industries (deux grandes entreprises américaines acteurs du marché de l'énergie). Il avait pour sous-jacent un indice de température mesuré sur Milwaukee et protégeait les producteurs d'énergie contre la réalisation d'un hiver trop doux en 1997-1998 (synonyme de baisse de la demande, de perte de production et donc de diminution de chiffre d'affaire).

Des évènements climatiques dus au phénomène océanique *El Niño* ont marqué les deux premiers hivers durant lesquels les énergéticiens craignent particulièrement ce même risque. Les preneurs de risques, principalement des assurances, ont d'abord cherché à conserver l'intégralité du risque (stratégie "*buy and hold*"). Malheureusement pour eux, les premiers hivers furent particulièrement cléments, et ce sur l'ensemble du territoire américain, rendant infructueux tous les efforts de diversifications géographiques entrepris par les assureurs. Cela poussa les preneurs de risques ayant survécu à ce "fiasco" à revoir leur stratégie, ils adoptèrent une gestion du risque dynamique inspirée de celle du trading de matières premières. Les entreprises du secteur énergétiques virent alors leur activité augmentée jusqu'à la crise énergétique en 2001-2002.

Ce furent alors les assureurs, les banques et les fonds d'investissement qui prirent le relais et le CME (Chicago Mercantile Exchange), qui avait créé en 1999 le premier produit dérivé standardisé, connut un développement rapide [FG11]. Ce dernier offrait de nouveaux dérivés climatiques dans différentes villes américaines (choisies en fonction de leur population et de la variabilité de leur température), réduisant le risque de défaut et augmentant la transparence des transactions en rendant publiques les prix des contrats. Le marché attira de nouveaux participants, atteint l'Asie et l'Europe et connut dès lors une forte croissance (valeur estimée des dérivés climatiques du CME passant de 2,2 milliards de dollars en 2004 à 22 milliards, soit 10 fois plus, fin 2005 [AD13]).



**Figure 4.2:** À gauche : Valeurs des contrats négociés de 2000 à 2008 sur les marchés des dérivés climatiques en milliers de dollars

À droite : Répartition des paramètres météorologiques utilisés comme sous-jacent des contrats.

(source : [FG11] depuis Weather risk derivative survey 2009)

À partir de 2006, le marché des dérivés climatiques connaît une baisse : la valeur des produits dérivés climatiques échangées sur le marché de gré à gré et les marchés organisés passe de 45 milliards de dollars en 2005-2006 à 32 en 2007-2008 puis 15 en 2008-2009. Le CME explique en partie cela par le passage de contrats saisonniers à des contrats mensuels, mais la crise financière ainsi que l'aversion des investisseurs pour de tels produits (dont l'évaluation n'est pas aisée) semblent aussi avoir joué un rôle<sup>8</sup> [FG11]. Bien que le nombre de contrats négociés sur les différents marchés de produits dérivés chute fortement (suivant le déclin général des marchés financiers), ce marché continue de se développer ; ainsi le nombre de contrats croît de 250% de 2007 à 2009 en Asie et d'environ 50% entre 2007 et 2008 en Europe [AD13].

8. <http://wrma.org/history/>

## 4.2.5 Organisation du marché des dérivés climatiques

Ce paragraphe descriptif est en grande partie tiré de la présentation du marché des dérivés climatiques dans [FG11]. Ce marché s'organise en :

- **Un marché primaire** où les vendeurs de protections (principalement des banques, des assureurs et des réassureurs) proposent des contrats sur mesure afin de répondre au mieux aux besoins de couverture des acheteurs.
- **Un marché secondaire** où les vendeurs négocient entre eux des contrats standardisés leur permettant de gérer le risque de façon dynamique.

On retrouve cette division au niveau de la séparation entre :

- **Le marché OTC** (*Over The Counter*), sur lequel les acheteurs de couverture peuvent acquérir des produits personnalisés (dérivés ou d'assurance qualifiés d'indiciels dans ce mémoire) dans l'espace et le temps afin de transférer leurs risques météorologiques. Leur structuration passe souvent par un courtier du fait de leur spécificité. Les produits dérivés sont souvent perçus par les acheteurs comme des produits d'assurance qu'il convient de garder jusqu'à échéance [BAR02]. Ce marché est logiquement très peu liquide, ce qui est accentué une réglementation confuse et le manque de modèle de tarification efficace. Ce marché est beaucoup plus développé que le marché organisé.
- **Les marchés organisés** sur lequel les vendeurs gèrent leur portefeuille de risques à l'aide de produits standardisés. Le plus importants de ces marchés est le Chicago Mercantile Exchange (déjà évoqué dans le paragraphe précédent). La plupart des contrats négociés sur ce marché sont construits sur des indices de températures pour des grandes villes américaines, mais aussi canadiennes, japonaises, australiennes et européennes.

Les différents acteurs de ce marché sont :

- **Les utilisateurs finaux** : Il s'agit majoritairement d'entreprises météo-sensibles qui cherchent à se couvrir contre le risque météorologique afin de lisser dans le temps leurs revenus. Même si les grands énergéticiens restent les premiers utilisateurs de produits dérivés, nous retrouvons aujourd'hui, parmi ces utilisateurs, des acteurs de nombreux autres secteurs économiques. Nous pouvons bien entendu citer celui de l'agro-alimentaire, mais aussi ceux des transports, de la construction. . .
- **Les preneurs de risques** : Le développement du marché climatique a attiré de nombreux organismes parmi lesquels nous retrouvons des assureurs, des réassureurs, des banques et des fonds d'investissement. Les **assureurs** spécialisés dans la gestion des risques d'entreprises peuvent ainsi compléter les garanties de leurs contrats multirisques. Les **réassureurs** déjà experts des risques climatiques catastrophiques et disposant de fonds propres importants se sont naturellement intéressés à la gestion des risques météorologiques. Les **banques** ont vite perçu le potentiel des dérivés climatiques comme extension des produits de gestion du risque financier qu'ils proposaient déjà à leurs clients. Enfin, certains **fonds d'investissement** et traders de matières premières voient en ces produits un outil de spéculation efficace<sup>9</sup> (rendements décorrélés des fluctuations du marché action).
- **Les courtiers** : Ils jouent un rôle prépondérant sur le marché des dérivés climatiques ; ils sensibilisent et initient les utilisateurs finaux à la gestion du risque climatique et les preneurs de risque à la gestion du risque alternative. Ils font profiter les entreprises de leur expertise (identification, quantification du risque météorologique et structuration du produit) et font ensuite le lien avec les différents preneurs de risques.
- **Les fournisseurs de données** : Indépendants des différents partis, approuvés par ces derniers et fiables, ils fourniront (et seront garant de la qualité de) la donnée météorologique nécessaires au *pricing* et à la détermination des flux d'argent impliqués par le produit.

---

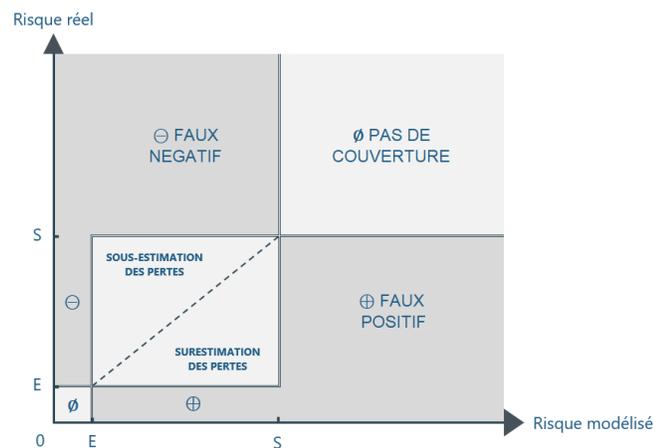
9. <http://www.climetrix.com/WeatherMarket/MarketOverview/default.asp>

## 4.2.6 Avantages et Inconvénients

Les produits décrits supra présentent plusieurs avantages actuariels et économiques vis-à-vis du modèle indemnitaire [PIE15] :

- Ils permettent de supprimer le phénomène d'aléa moral. En effet l'indemnisation n'est pas fonction du sinistre subi mais seulement du niveau de l'indice (lui-même fourni par une entité indépendante de l'assuré). Comme nous l'avons précisé précédemment, il est en théorie impossible pour l'Homme d'agir sur les conditions météorologiques et donc sur le niveau de l'indice. L'exposition au risque de l'assuré devient donc indépendante de son comportement.
- De même, si le contrat est signé suffisamment longtemps avant le début de la période de couverture, l'assuré ne possède (en théorie) pas plus d'information sur son risque que le preneur de risque. Cela permet ainsi de supprimer le phénomène d'anti-sélection. Ceci dit, les preneurs de risques posséderont généralement une meilleure expertise climatique et détiendront, de fait, souvent plus d'informations sur le risque que l'acheteur de protection.
- Ils permettront de réduire le coût de gestion des sinistres. Seul le niveau réalisé de l'indice est nécessaire à la détermination de l'indemnisation. L'évaluation du coût des sinistres par un expert n'est donc plus nécessaire.
- Les données météorologiques étant souvent publiées quotidiennement, l'indice et donc les indemnisations peuvent être déterminés dans un délai largement inférieur au délai nécessaire à l'expertise dans le cas de l'assurance indemnitaire. Les indemnisations peuvent alors être payées bien plus rapidement, ce qui avantagera en général le sinistré mais aussi le preneur de risque dont les provisions seront réduites.

Les avantages de ces produits indiciels et la flexibilité dont ils sont synonymes permettent aujourd'hui le transfert de risques non assurables au sens de la définition donnée en 3.2. Néanmoins, ils sont aussi synonymes de certains inconvénients; une des principales difficultés réside dans le fait qu'ils sont confrontés à la problématique du risque de base. Les indemnisations étant fonctions d'un indice météorologique et non de la sinistralité réalisée, il est possible d'observer un écart entre les pertes réelles subies par l'assuré et l'indemnisation versée par le preneur de risques. En pratique, le risque couvert ne correspondra jamais exactement au risque réel porté par l'acheteur de protection et nous chercherons à réduire autant que possible le risque de base.



**Figure 4.3:** Écart envisageables entre le risque réel et le risque couvert dans le cas d'un risque croissant avec la valeur de l'indice. Les valeurs de E et de S représentent respectivement les points d'entrées et de sorties ; l'assuré est indemnisé si la valeur de l'indice appartient à cet intervalle. (depuis [BOU16])

Le risque de base peut être de différentes natures :

- **Risque de base temporel** : il s'agit du risque que le sinistre se réalise en dehors de la période de couverture pré-définie. Pour un risque agricole par exemple, cela peut correspondre à un décalage dans le temps des cycles de culture qui font que la période de couverture n'est plus adaptée.
- **Risque de base spatial** : il est souvent impossible d'obtenir la valeur des paramètres météorologiques sur la localisation concernée et nous sommes contraints d'utiliser des données provenant de stations météorologiques voisines ; il y a alors un risque que les conditions météorologiques sur le site diffèrent des relevés à la station. Ce risque est croissant avec la distance du site à la station et dépend du paramètre météorologique considéré (les précipitations sont par exemple très localisées alors que les températures sont plus généralisées). Une solution pour pallier à ce problème consiste à utiliser des données météorologiques plus localisées (utilisation de données satellitaires, installation de station météo sur le site) mais la réduction du risque de base s'accompagnera d'une augmentation du risque d'aléa moral.
- **Risque de base lié à la modélisation** : il peut être de différentes natures (risque de spécification, d'implémentation, de traitement des données, d'estimation. . .) [LAL+14]. Nous pouvons entre autres citer les exemples d'une mauvaise définition de l'indice retenu (pas assez corrélé à la variabilité météo-sensible d'intérêt) ou d'une erreur d'estimation dans le prix.

Naturellement, les contrats standards proposés sur les marchés organisés présentent un risque de base spatial et temporel important (indice, localisation, période imposés) mais sont relativement bon marché. En revanche, sur le marché de gré à gré il est possible de réduire ce risque de base en structurant le produit de telle sorte que l'indice retenu dans le contrat explique au mieux la perte subie par l'assuré en cas de réalisation du sinistre. La spécificité de ces produits et l'expertise nécessaire à leur conception impliqueront néanmoins un coût supplémentaire. S'il faut veiller à faire preuve de la plus grande rigueur dans l'analyse de la météo-sensibilité, le preneur de risques doit porter une attention particulière aux besoins de l'acheteur de protection (niveaux de couvertures, de primes . . .) lors de la conception du produit ; l'objectif est ici de réduire autant que possible le risque de base associé à ce produit.

Si la réduction du risque de base est un facteur essentiel dans la souscription d'un contrat d'assurance indicielle [BOU16], la perception de l'acheteur de protection de ce risque est déterminante. La faible demande que connaît actuellement ce genre de produits peut (en partie) s'expliquer par le fait que certains agents, particulièrement averse aux risques, sont encore réticents à souscrire à des couvertures qu'ils jugent incomplètes. Les produits indiciels, du fait du risque de base dont ils sont synonymes, fournissent aux acheteurs de protections une couverture "probabiliste" (la réalisation du risque n'implique pas forcément le versement d'une indemnisation) et "partielle" (indemnisations versées en cas de réalisation du sinistre mais inférieures aux pertes subies). La théorie des perspectives, pilier de l'économie comportementale et qui fut développée par Amos Tversky et Daniel Kahneman, tente de décrire le comportement humain face au risque (gains/pertes) sur la base de constats empiriques. Une des expériences qu'ils ont menées dans [KT79] (*Probabilistic Insurance*) montre que, pour une utilité donnée, les individus préféreront une assurance "certaine" à une assurance "probabiliste". Cela illustre ce qu'ils appellent l'effet de certitude (*certainty effect*) : les individus surpondèrent généralement les résultats qui sont considérés comme certains relativement à ceux qui sont simplement probables.

Une autre source de difficulté provient du caractère non échangeable de la majeure partie des sous-jacents de ces produits (indices météorologiques), rendant inopérantes toutes les techniques classiques d'évaluation financières (impossibilité de dupliquer le sous-jacent) ; il est impossible d'obtenir des prix de marché pour les produits dérivés climatiques [ROU07].

## 4.2.7 Assurance indicielle, sécurité alimentaire et développement économique

Selon une enquête publiée fin 2017 par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le nombre de personnes sous-alimentées a augmenté en 2016 (815 millions par rapport à 770 millions en 2015), ce qui n'était pas arrivé depuis une décennie [Natb]. Selon la FAO, les changements climatiques expliquent en partie cette augmentation et devraient aggraver dans les prochaines années les conditions de vie des gens tributaires de l'agriculture, de la pêche et de la sylviculture (100 à 200 millions de personnes pourraient être exposées au risque de famine d'ici 2050 selon les experts). Ces changements constituent alors une menace directe pour le secteur agricole et donc pour la sécurité alimentaire de ces personnes qui, toujours selon la FAO, représentent plus de 45% de la population mondiale (70% des personnes souffrant de la faim dans le monde vivent dans des zones rurales et dépendent directement de l'agriculture). En effet, des conditions climatiques adverses auront des conséquences négatives sur la disponibilité, l'accessibilité, la stabilité et l'utilisation de la nourriture pour ces personnes [Nata].

Si les changements climatiques représentent un risque à l'échelle de ces individus, cela reste vrai pour des échelles spatiales plus importantes. Ainsi, de nombreux pays en développement dont les revenus dépendent aujourd'hui principalement de l'agriculture (et donc des conditions climatiques) sont directement exposés à ce risque. En plus des conséquences directes sur les récoltes (baisse de rendement, mauvaise qualité...) impliquant une hausse du risque d'insécurité alimentaire et donc un obstacle de taille au développement économique de nombreux pays, ces incertitudes liées aux conditions climatiques rendent l'accès au crédit plus difficile pour des centaines de millions de personnes précarisant d'avantage leur situation [FG11].

Face à ces défis qui se posent aujourd'hui à la communauté internationale, les produits d'assurance indicielle offrent des perspectives intéressantes en matière de transfert de risques naturels (entre autres agricoles). Pouvant parfois être synonyme d'une réduction du coût de la prime (gestion de sinistre moins onéreuse), ils permettent à davantage d'agriculteurs de renforcer leur résilience aux risques climatiques et d'obtenir un meilleur accès au financement et au crédit.

Le caractère objectif de l'indice et donc du déclenchement de la couverture permet un règlement des sinistres dans un délais plus court que dans le cas de l'assurance traditionnelle. Cette prise en charge accélérée des sinistres est un avantage considérable dans certains pays en développement où les situations des populations post-sinistres sont parfois très critiques. Ces solutions de couverture ont de fait un rôle positif à jouer dans la lutte contre la précarité en augmentant la résilience aux risques de certaines populations particulièrement exposées.

L'assurance indicielle permet de couvrir les risques à différents niveaux [ind] :

- Au niveau micro, des particuliers ou des petites entreprises achètent ces couvertures afin de gérer les risques météorologiques auxquels ils sont exposés ; c'est le cas de nombreux agriculteurs individuels (elle a par exemple été utilisée par des agriculteurs Kényans et Haïtiens).
- Au niveau méso, les principaux clients sont des agrégateurs de risques qui cherchent à couvrir leurs potentielles pertes financières. Ces agrégateurs représente alors un canal alternatif de distribution des couvertures aux niveaux micro ; la relation entre l'entité méso et les particuliers n'est cependant pas considéré comme un contrat d'assurance [Ins17]. Les produits indiciaires couvrent ainsi des banques, les institutions de micro-finance, l'agroindustrie (par exemple instaurée par la Fédération nationale des producteurs de cacao en République dominicaine)...

- Au niveau macro, elle couvre les potentiels passifs auxquels les gouvernements devraient faire face en cas de réalisation de risques climatiques, catastrophiques ou non (par exemple encouragée dans des pays comme l'Uruguay pour protéger le budget fédéral) ; ces risques sont en général transférés sur les marchés financiers (titrisation du risque) qui représente une source de capacité supplémentaire importante.

L'assurance indicielle apparaît donc comme une solution de couverture particulièrement adaptée à ces situations et régions du globe où l'agriculture figure parmi les premières sources de revenus. Ainsi la Banque Mondiale cherche aujourd'hui à motiver l'utilisation de tels produits au sein de pays en développement. Au moyen du mécanisme mondial pour l'assurance indicielle (GIIF) créé en 2009 pour répondre à ces problématiques (aggravées par le changement climatique), la Banque Mondiale développe les différentes capacités locales nécessaires à la mise en place de ces produits<sup>10</sup> et de nouveaux marchés de l'assurance indicielle.

Le programme a, jusqu'à aujourd'hui, aidé plus de 1.3 millions d'agriculteurs et micro-entrepreneurs à travers 31 pays en Afrique subsaharienne, en Amérique latine, dans les Caraïbes et dans les régions d'Asie Pacifique à accéder au crédit et leur a permis d'être en mesure de rembourser leur prêt en cas de pertes liées à un événement climatique [ind].

---

10. [:http://blogs.worldbank.org/voices/miga/fr/l-assurance-indicielle-influe-sur-le-developpement-la-ou-le-besoin-se-fait-le-plus-sentir](http://blogs.worldbank.org/voices/miga/fr/l-assurance-indicielle-influe-sur-le-developpement-la-ou-le-besoin-se-fait-le-plus-sentir)

## Deuxième partie

# MODELISATION ET TARIFICATION DU RISQUE METEOROLOGIQUE

*Nous passerons en revue, dans cette partie du mémoire, les différentes étapes liés à la tarification d'un produit indiciel sur indice météorologique. Nous présenterons dans un premier temps quelques caractéristiques des données météorologiques sur lesquelles reposent la suite de l'étude et les notations qui seront utilisées. Nous nous intéresserons ensuite à la modélisation des indices météo (estimation de tendance et modélisation des indices à partir des données détrendées), sous-jacents des dérivés climatiques, pour enfin traiter des méthodes envisageables dans la tarification de ces produits.*

# Chapitre 5

## Contexte

### 5.1 Caractéristiques des données météorologiques

Dès lors que l'indemnisation d'un produit indiciel (mais aussi son prix) dépend directement du niveau de l'indice retenu, il est impératif avant toute chose de disposer de suffisamment de données et que celles-ci soient de bonne qualité.

Les données météorologiques in situ sont le résultat de relevés effectués, à fréquence souvent quotidienne ou horaire, par différents appareils au niveau des stations météorologiques. Dès lors, ces données requièrent souvent un traitement préalable. En effet il n'est pas rare d'observer [AD13] :

- Des valeurs manquantes du fait d'un appareil cassé ou d'une perte de données.
- Des valeurs aberrantes pouvant résulter d'erreurs de mesure des appareils concernés.
- Des sauts ou des discontinuités pouvant être la conséquence d'un changement d'appareil de mesure, de localisation ou de l'environnement de la station (ombre, construction voisine. . .)
- Une tendance dans les données.

Selon le niveau de traitement effectué sur ces données, nous distinguons trois grandes catégories de données météorologiques :

- Les données synoptiques qui correspondent aux relevés bruts des différents appareils de mesure
- Les données climatiques qui correspondent aux données synoptiques après traitement des valeurs aberrantes
- Les données reconstruites qui correspondent aux précédentes corrigées des effets de changement d'appareil de mesure, de localisation ou d'environnement.

Accéder à des données de bonne qualité sur des périodes significatives n'est cependant pas chose évidente et, lorsque cela est possible, le coût de ces données est bien souvent non négligeable. À titre d'exemple, 40 ans de données d'un paramètre météorologique coûte approximativement 550 € chez Météo France. Cela représente, aujourd'hui encore, un frein au développement des marchés et contribue au manque de liquidité. Les données disponibles gratuitement sont majoritairement synoptiques, présentent bien souvent des défauts (erreurs, données manquantes, saut. . .) et ne sont que rarement utilisables à des fins commerciales. En ce qui concerne le continent Européen, nous pouvons tout de même citer la base de données de l'ECAD (European Climate Assessment & Dataset) fournissant gratuitement des données quotidiennes provenant de mesures effectuées sur plus de 4500 stations à travers 62 pays.

## 5.2 Notations

Nous ferons l'hypothèse de disposer de données de bonnes qualités, ne présentant pas de valeurs aberrantes ou de discontinuité.

### Données brutes :

Dans un premier temps, nous utiliserons comme référence géographique une unique station météorologique. Nous disposons pour cette station d'un échantillon de données météorologiques journalières ;

$$E_1 = \{ M_{i,j} ; 1 \leq i \leq d ; 1 \leq j \leq n \} \quad (5.1)$$

- **d** le nombre de jours d'observation
- **n** le nombre de paramètres météorologiques mesurés à la station

Les valeurs observées  $\{ M_{i,j} ; 1 \leq i \leq d ; 1 \leq j \leq n \}$  sont réelles, ne peuvent être déterminées a priori et dépendent d'un nombre important de paramètres. En ce sens, elles peuvent être considérées comme les réalisations de  $d \times n$  variables aléatoires réelles  $X_{i,j} ; 1 \leq i \leq d ; 1 \leq j \leq n$ .

Notons  $E_2 = \{ D_{i,j} ; 1 \leq i \leq d ; 1 \leq j \leq n \}$  les valeurs des grandeurs météorologiques *detrendées* (en utilisant comme pivot l'année de couverture, *detrending* déterministe).

### Indices :

Imaginons ensuite que pour chaque couverture,  $N$  périls aient été identifiés. Nous associons alors à chacun de ces périls un indice pertinent, défini à partir des grandeurs météorologiques *detrendées* sur une période donnée.

Note : il est aussi envisageable de travailler sur les données brutes puis de *detrender* l'indice après l'avoir construit (cf. Chapitre 5 section 6).

Cela revient à définir une fonction  $f_1$  mesurable et telle que :

$$f_1 : \begin{cases} \mathbb{R}^{d \times n} & \longrightarrow & \mathbb{R}^{T \times N} \\ E_1 \text{ ou } E_2 & \longmapsto & E_3 = \{ I_{y,k} ; 1 \leq y \leq T ; 1 \leq k \leq N \} \end{cases} \quad (5.2)$$

- **T** le nombre de jours d'observation
- **N** le nombre de paramètres météorologiques mesurés à la station
- $E_1$  si l'on travaille sur les données brutes,  $E_2$  si l'on travaille sur les données *detrendées*

À partir de l'échantillon  $\{ I_{y,k} ; 1 \leq y \leq T ; 1 \leq k \leq N \}$  nous cherchons à estimer la distribution jointe de  $Y = (Y_1, \dots, Y_N)$  où  $Y_k$  est la variable aléatoire réelle associée à l'expérience aléatoire dont les observations sont les valeurs prises par le  $k^{\text{ème}}$  indice.

Le modèle peut alors s'écrire  $(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \mathbb{Q})$  où  $\mathbb{Q}$  est la loi inconnue de  $Y$

Si l'on considère, de plus, que les  $N$  indices sont indépendants entre eux, le modèle devient

$$(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \prod_{i=1}^N \mathbb{Q}_i)$$

## Chapitre 6

# Modélisation des indices

Une des principales difficultés liées à l'évaluation des produits indiciaires découle du caractère non échangeable du sous-jacent de ces produits. L'incomplétude du marché rend discutable l'utilisation des méthodes classiques de valorisation des produits dérivés (évaluation risque neutre). Dès lors, les produits indiciaires sont majoritairement valorisés à partir de l'étude des indices sous-jacents. Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter aucune hypothèse sur le marché considéré. Cependant elle doit s'appuyer sur une analyse et une modélisation rigoureuses des indices. En effet, le prix sera dans ce cas calculé comme l'espérance conditionnelle du *payoff* du produit sur cet indice et ce dernier risque d'être sur/sous-estimé selon choix de modélisation.

Nous nous intéressons d'abord au cas d'un seul indice c'est-à-dire  $N = 1$ . Nous disposons alors respectivement des échantillons  $E_1, E_2$  et  $\{I_{y,k}; 1 \leq y \leq T; 1 \leq k \leq N\}$

Nous nous intéressons dans cette partie aux différentes méthodes de modélisation des indices météorologiques (tendance, distribution ou directement *payoffs* dans le cas de l'analyse *burn*).

### 6.1 Estimation de tendances

Les méthodes actuarielles de valorisation des dérivés climatiques reposent sur la modélisation statistique des séries concernées. Or la théorie statistique sous-jacente à l'analyse des séries temporelles nécessite bien souvent l'hypothèse de stationnarité (au moins au sens faible i.e. d'ordre 2) de celles-ci; hypothèse nullement vérifiée dans le cas de séries climatiques. En effet la plupart d'entre elles présentent des comportements au long terme (une tendance) et cyclique (une saisonnalité) particuliers et ne conservent donc pas leurs caractéristiques au cours du temps.

Le phénomène de saisonnalité et ses causes se comprennent aisément; les variations climatiques dépendent fortement de la position de la Terre et par conséquent des saisons (inclinaison de l'axe des pôles et révolution impliquant une variation d'ensoleillement). La présence d'une tendance dans la série peut-elle être la conséquence de nombreux phénomènes de différentes échelles: l'urbanisation (une grande partie des stations météorologiques où sont prises les mesures se trouvent dans la périphérie de villes), le changement climatique dû à l'activité humaine ...

Il est donc nécessaire en premier lieu de *stationnariser* la série d'intérêt; si l'on travaille sur l'indice directement, la tendance potentiellement présente devra être estimée. Si l'on travaille sur les séries quotidiennes, il faudra se préoccuper en outre des effets de la saisonnalité. Nous ne traiterons pas des méthodes de désaisonnalisation dans ce chapitre.

La présence d'une tendance dans nos données peut être :

- Détectée visuellement en observant directement les séries quotidiennes ou les indices
- Détectée à l'aide d'une moyenne mobile de fenêtre appropriée
- Testée de façon non paramétrique à l'aide de la statistique de Mann-Kendall
- Vérifiée à l'aide d'une régression linéaire
- ...

Si la série concernée présente une tendance, nous pouvons estimer celle-ci de différentes façons :

**a) Selon que la *tendance* est *estimée sur les séries historiques quotidiennes* ou *directement sur l'indice concerné* :**

- Estimer une tendance directement sur l'indice sera plus aisé. En effet comme précisé supra, il est inutile dans ce cas de se soucier des effets de saisonnalités. Cependant, cette méthode n'est pas envisageable dans le cas où l'indice est modélisé à partir d'un modèle statistique sur les séries quotidiennes, et est de plus très peu prudente si la période concernée est courte. La tendance estimée pourrait alors varier fortement d'une semaine à l'autre par exemple, ce qui contradictoire avec la définition donnée. De plus, estimer une tendance sur l'indice peut conduire à observer des valeurs n'ayant aucun sens physique (cf. exemple : valeur négative pour somme d'écart).

Nous supposons ici que l'indice peut s'écrire ( $I_{y,k} = I_y$ , pour  $k$  fixé)

$$I_y = t_y + \epsilon_y ; 1 \leq y \leq T \quad (6.1)$$

- $t_y$  représente le *trend* (déterministe)
- $\epsilon_y$  représente la composante stationnaire (v.a.iid et centrées)

L'indice *detrendé* s'écrit alors :

$$I_y^d = I_y - \hat{t}_y + \hat{t}_T ; 1 \leq y \leq T \quad (6.2)$$

- $\hat{t}_T$  représente le pivot, choisi en fonction de l'année du contrat.

- La tendance estimée à partir de données quotidiennes (donc sur une période plus longue) utilisera mieux l'ensemble des données et aura plus de sens au niveau météorologique. Le modèle s'écrit ici (décomposition additive) :

$$M_i = t_i + s_i + \epsilon_i ; 1 \leq i \leq d \quad (6.3)$$

- $M_i$  représente la valeur de la grandeur météo au jour  $i$
- $t_i$  représente le *trend* (déterministe)
- $s_i$  représente la composante saisonnière (déterministe et périodique)
- $\epsilon_i$  représente la composante stationnaire (v.a.iid et centrées)

Il faudra ici se soucier des effets de la saisonnalité avant de pouvoir estimer la tendance car celle-ci ne présentera pas les mêmes caractéristiques au cours de l'année. Nous pourrions par exemple estimer séparément des tendances par mois/saison puis les interpoler.

Il est aussi possible d'utiliser une décomposition multiplicative mais nous ne nous attarderons pas plus sur ce modèle. Il est possible à partir de celui-ci de se ramener à une décomposition additive par transformation logarithmique.

b) Selon que l'on choisisse au préalable une forme paramétrique, respectivement pour la tendance et la distribution des résidus, puis que **tous les paramètres du modèle soient estimés en une fois ou que cela soit fait en deux étapes** (estimer d'abord la tendance puis travailler ensuite sur les résidus).

Même si mathématiquement moins rigoureuse, nous préférons la deuxième méthode pour sa simplicité relative. De plus, c'est celle qui est utilisée le plus fréquemment en pratique.

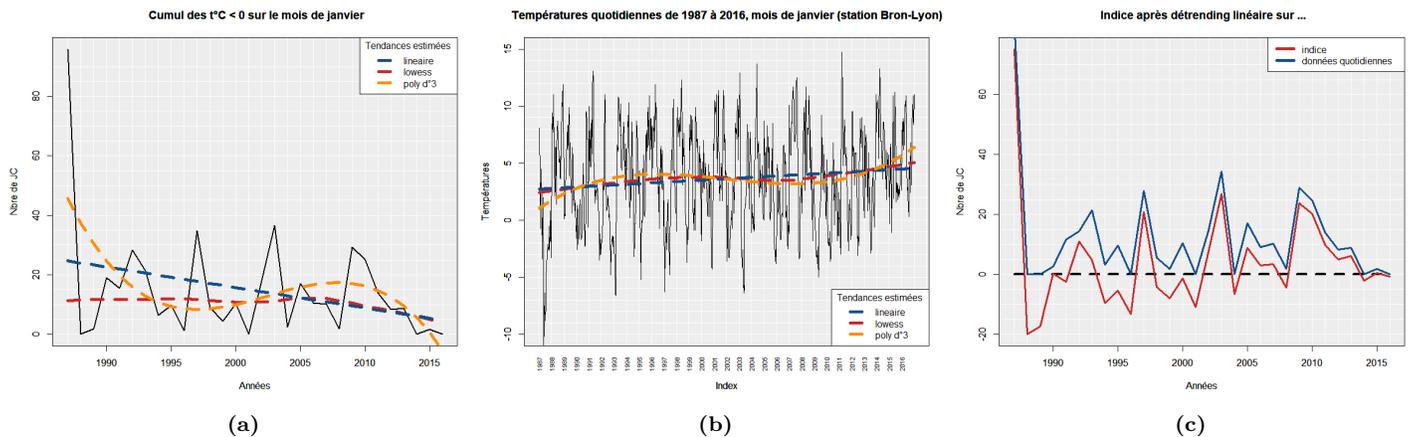
c) Selon que la **tendance soit estimée via une méthode paramétrique ou non paramétrique** :

- Méthodes paramétriques : nous imposons un type de fonction (linéaire, polynomiale, exponentielle ...) à la courbe de tendance et un critère à minimiser (typiquement MCO).
- Méthodes non paramétriques : aucune hypothèse n'est faite a priori sur la forme de la tendance (moyenne mobile, LOESS...).

Le nombre d'années utilisées est aussi un paramètre important : plus nous utilisons un grand nombre d'années, plus nous nous attendons à obtenir une estimation précise de la tendance. Ceci est uniquement vrai si la tendance est parfaitement estimée, ce qui est bien sûr impossible et le devient encore plus quand nous utilisons un grand nombre d'années; il faut donc trouver un juste milieu.

Le choix d'une tendance paramétrique doit s'appuyer sur de fortes présomptions quant à la nature de la tendance. Plus cette tendance paramétrique sera estimée sur une période longue, plus il y aura de chance qu'elle soit mauvaise. Ainsi, si l'on dispose de données s'étendant sur une période relativement longue et que l'on n'a pas d'a priori sur la forme de la tendance, l'utilisation d'une estimation non paramétrique devrait être meilleure. Une solution alternative (en l'absence de présomptions et de suffisamment de données) est d'utiliser une courte période sans estimer de tendance.

Afin d'illustrer ces différents concepts, nous utiliserons comme exemple un indice défini sur le mois de janvier comme le cumul des températures (~moyenne quotidienne des températures horaires) inférieures à 0 °C. Nous utilisons des données Météo France de la station de Lyon Bron mesurées sur la période de 1987 à 2016 (30 ans).



**Figure 6.1:** a) Tendance estimée sur indice  
 b) Tendance estimée sur données quotidiennes  
 c) Indices obtenus selon la tendance linéaire estimée

Une fois que la présence d'une tendance dans nos données est avérée, que celle-ci est estimée, elle peut être "supprimée". Nous nous intéresserons alors à présent aux différentes méthodes nous permettant d'estimer la prime pure.

## 6.2 Historical Burn Analysis

Cette première méthode consiste à calculer les *payoffs* associés à chacune des valeurs passées de l'indice puis d'en faire la moyenne. Ce ne sont donc **pas les indices qui sont modélisés ici mais directement les indemnités qui en découlent**. L'idée générale de cette méthode est que les valeurs passées des *payoffs* fournissent une image assez fidèle de la distribution des *payoffs* futurs ; nous faisons donc l'hypothèse que ce qui s'est réalisé dans le passé devrait se répéter dans le futur. Au regard des points développés dans le premier chapitre, nous comprenons que le *detrending* joue ici un rôle prépondérant. À cette hypothèse de stationnarité s'ajoute celle d'indépendance annuelle (hypothèse forte) de l'indice. En pratique nous utilisons pour cette méthode entre trente et quarante années de données. Cette méthode dépend grandement de la qualité et de la quantité de données disponibles ; elle nécessite une quantité de données plus importante que d'autres méthodes afin d'éviter les problèmes de sur-apprentissage. Cette méthode est fréquemment utilisée par les différents acteurs du marché et fait office d'approche de référence. Simple à mettre en place, elle permet de fait de réduire le risque de modèle (avantage non négligeable alors que les indices envisagés sont relativement complexes).



Figure 6.2: Schéma explicatif de la méthode HBA

## 6.3 Modélisation directe des indices

Comme précisé précédemment nous considérerons dans un premier temps le cas d'un seul indice. Nous disposons de l'échantillon  $\{I_{y,1} ; 1 \leq y \leq T\}$  et cherchons à estimer la distribution de  $Y_1$ . Le modèle s'écrit alors  $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), Q_1)$  où  $Q_1$  est la loi de  $Y_1$ . Les hypothèses sous-jacentes à cette modélisation sont celles de stationnarité et d'indépendance interannuelle (hypothèse forte) pour chaque indice.

### 6.3.1 Estimation non paramétrique

A partir de l'échantillon  $\{I_{y,1} ; 1 \leq y \leq T\}$ , la fonction de répartition de  $Y_1$  peut être estimée de façon non paramétrique via la fonction de répartition empirique, définie par la formule :

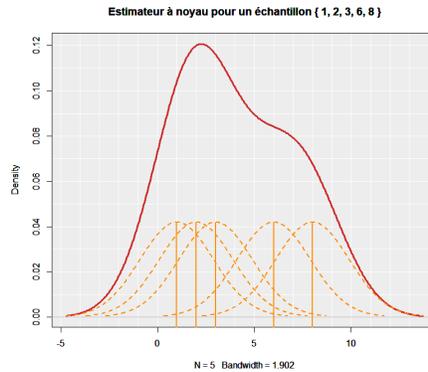
$$\widehat{F}_{Y_1}(x) = \frac{1}{T} \cdot \sum_{y=1}^T \mathbf{1}_{I_{y,1} \leq x}, \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad (6.4)$$

Cette fonction de répartition attribue le même poids à chacun des éléments de l'échantillon (uniforme discrète) et converge presque sûrement vers la fonction de répartition "réelle" (dans le cas de variables réelles, indépendantes et identiquement distribuées).

Nous pouvons généraliser l'expression donnée ci-dessus en dimension N en posant :

$$\widehat{F}_Y(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{T} \cdot \sum_{y=1}^T \mathbf{1}_{I_{y,1} \leq x_1, \dots, I_{y,n} \leq x_n}, \quad \forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \quad (6.5)$$

En pratique, nous utilisons rarement plus de 40 ans d'historiques, les distributions obtenues à l'aide des fonctions de répartition empiriques risquent alors de présenter plusieurs modes et/ou d'être très peu lisses. Il est possible de partiellement remédier à ces problèmes en utilisant la méthode d'estimation par noyau de la densité ("généralisation continue" de la méthode d'estimation par histogramme).



**Figure 6.3:** Illustration de la méthode d'estimation par noyau

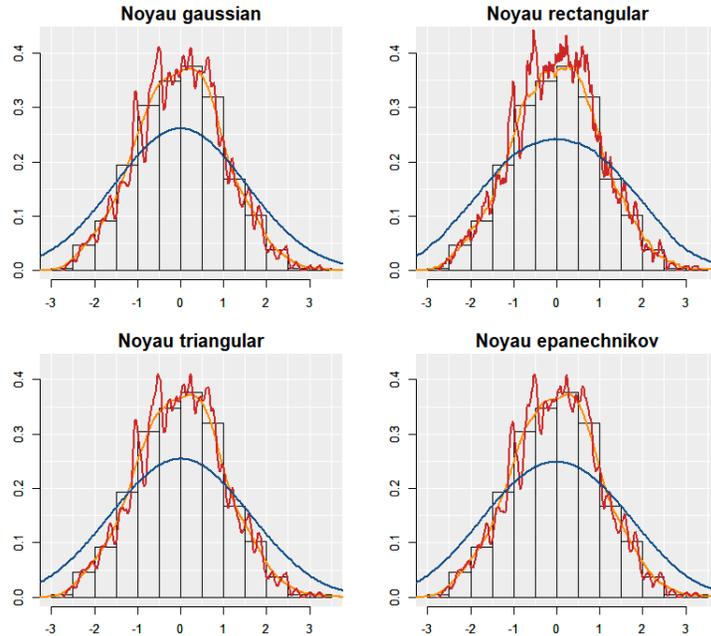
À partir de notre échantillon, l'estimateur par noyau de la densité de la v.a.r.  $Y_1$  s'écrit :

$$\widehat{f}_{Y_1}(x) = \frac{1}{T \cdot h} \cdot \sum_{y=1}^T K\left(\frac{x - I_{y,1}}{h}\right), \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad (6.6)$$

- $K: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , est une fonction intégrable appelée noyau et tq  $\int K(u) du = 1$
- $h > 0$ , est appelée fenêtre de lissage

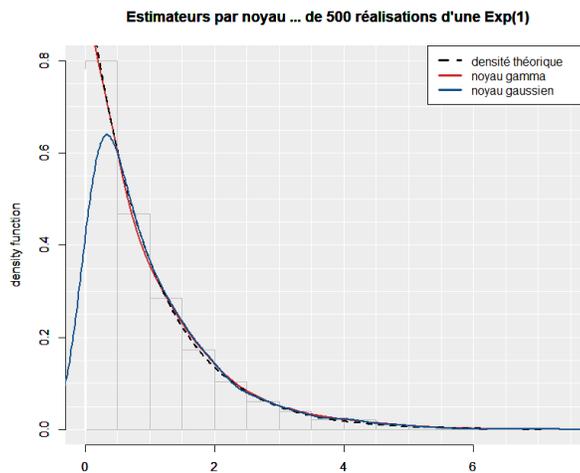
Plusieurs types de noyau existent (Gaussien, rectangulaire, triangulaire...) accordant plus ou moins d'influence au critère de distance, mais le choix de celui-ci sera en général moins déterminant et influant que celui de la fenêtre de lissage qui détermine elle la forme générale de la distribution estimée. Une fenêtre trop petite risque d'être synonyme de sur-apprentissage (densité estimée pas assez lisse et trop dépendante de l'échantillon) là où, à l'inverse, une trop grande valeur lissera de façon trop importante la densité. La fenêtre doit donc être choisie en fonction de la régularité de la densité (donc de la taille et de l'étalement de l'échantillon). Diverses méthodes de sélection de fenêtre existent :

- Validation croisée
- Critère de BW Silverman
- Méthode de Sheather et Jones
- ...



**Figure 6.4:** Influence du choix du noyau et de la taille de fenêtre. Fenêtre en orange définie via la règle de Silverman :  $fenetre = 0.9 \cdot \min(std, Q_3 - Q_1) \cdot \left(\frac{1.34}{taille\_echantillon}\right)^{\frac{1}{5}}$  (fenêtre 2 fois plus grande en bleu et 2 fois plus petite en rouge) dans le cas de 1000 réalisations indépendantes de  $N(0,1)$

Les indices avec lesquels nous travaillerons seront souvent à valeurs positives (cumul d'écart, nombre de jours critiques...). Or tous les noyaux décrits ci-dessus sont symétriques. Les utiliser dans le cas d'estimation de densité à support positif peut alors nous amener à estimer une distribution assignant un poids non nul à des valeurs négatives. Différentes méthodes existent pour réduire cet effet de bord en zéro. Nous pouvons entre autres remplacer les noyaux précédemment utilisés par d'autres qui posséderont un support borné ou asymétrique [DM13].



**Figure 6.5:** Utilisation d'un noyau gamma (asymétrique) dans le cas d'une densité à support positif

Si l'on veut n'avoir à formuler aucune hypothèse a priori sur le modèle, ou si le nombre de paramètres à estimer est trop important, les méthodes non paramétriques peuvent se montrer avantageuses. De plus, ces méthodes seront plus robustes (moins influencées par des modifications dans le modèle) que les méthodes paramétriques. Cependant, les estimateurs convergeront en général moins vite que dans le cas paramétrique et il sera très délicat d'extrapoler au-delà de la plage des données de l'échantillon.

### 6.3.2 Estimation Paramétrique

Hypothèses supplémentaires :

- La distribution appartient à une famille de loi connue.
- Le modèle est décrit par un nombre fini de paramètres qu'il faudra estimer.

Le modèle peut s'écrire :  $(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \mathbb{Q}_\theta, \Theta)$

Si l'on a a priori une raison de penser que l'indice est en adéquation avec une loi particulière, nous apportons de l'information supplémentaire au modèle. Nous nous intéresserons à la nature de l'indice retenu ; la variable d'intérêt est elle discrète continue, bornée, fortement asymétrique. . . Dans le cas d'un indice construit à partir d'une moyenne ou d'une somme sur une période suffisamment longue, le théorème central limite nous inciterait à tester une distribution normale sur l'indice, dans le cas d'une variable de comptage, nous pourrions songer à tester une distribution de Poisson. . . Nous intégrerons ainsi des considérations autres que statistiques à notre modèle (par exemple physiques dans le cas d'un indice météorologique ou agronomiques dans le cas d'un indice de rendement). Nous accepterons alors la distribution escomptée si cette dernière concorde bien avec les données.

Différents critères de concordance peuvent être étudiés :

- Disposant de relativement peu de données, les tests statistiques d'adéquations ( $\chi^2$ , Kolmogorov-Smirnov. . .) seront en général peu puissants (capacité de rejeter un mauvais modèle)
- Nous préférons dans ce cas nous fier aux analyses graphiques afin d'orienter notre choix (outils graphiques permettant de comparer le modèle empirique à celui théorique : *QQ-plot*, densité-histogramme, fonction de répartition avec intervalles de confiance . . .)

La réalisation du risque correspondra, en général, à des valeurs critiques de l'indice (au delà ou en deça d'un seuil par exemple) ; une attention particulière sera alors apportée à l'adéquation des queues de distributions empiriques et modélisées (gauche dans le cas d'un risque décroissant avec l'indice et droite dans le cas contraire). Des queues des distributions modélisées plus légères que celle des distributions empiriques conduiront à sous-tarifier le produit envisagé ; afin de tarifier ce dernier de façon prudente, des ajustements seront alors nécessaires (modification du poids de la queue de distribution par application d'un facteur exponentiel au valeur au delà ou en deça d'un seuil de référence comme proposé dans [PIE15], choix d'une loi à queue lourde . . .).

Une fois que les différentes lois de probabilité auront été précisées et que les différents paramètres de ces lois auront été inférés à partir des données (par maximum de vraisemblance par exemple), la prime pure sera classiquement évaluée par une approche de type Monte-Carlo (simulation d'un grand nombre de réalisations indépendantes permettant de se placer dans le cadre de la Loi des grands nombres ; nous retenons alors comme estimateur de la prime pure la moyenne empirique).

Quand les hypothèses initiales du modèle sont vérifiées (quand le sont-elles vraiment ?) les modèles paramétriques permettront généralement d'obtenir de meilleurs résultats que les modèles non paramétriques. Ils permettront, entre autres, d'obtenir les probabilités théoriques d'évènements extrêmes (en dehors de l'échantillon) ce qui représente un réel avantage au vu de longueur des historiques à disposition. Dans le contexte de la couverture indicelle du risque, la modélisation des queues de distributions en présence revêt une importance particulière. Cependant une erreur de spécification dans le modèle pourra conduire à d'importants biais. De plus, la complexité de ces modèles (et le nombre de paramètres nécessaires) sera croissante avec la quantité de données. Le choix d'un modèle paramétrique doit alors s'appuyer sur de solides arguments ; si l'on n'a pas de raison valable de penser qu'une distribution sera appropriée a priori, nous ne disposerons généralement pas d'assez de données pour que les résultats des tests soient concluants.

## 6.4 Modélisation des séries quotidiennes

Une alternative aux méthodes évoquées ci-dessus consiste à modéliser les séries quotidiennes des paramètres météorologiques considérés. Les indices et donc la valeur des dérivés climatiques peuvent en effet être déterminés à partir des dynamiques de ces paramètres (méthode de Monte Carlo). Bien que naturellement moins évidente à mettre en place que les méthodes précédentes, une telle méthode présente l'avantage d'utiliser de façon plus efficiente l'ensemble des données. En effet, les modèles précédents sont construits seulement à partir de  $N$  points d'observation (si l'on utilise  $N$  années d'historique) où  $N$  est en général égal à 30 ou 40 ans. L'utilisation de données quotidiennes augmente de façon considérable la quantité d'information disponible. Ces modèles dynamiques utilisent en plus (par définition) l'information apportée par l'observation de la température actuelle et permettent d'incorporer de potentielles prévisions au modèle qui représentent aussi un gain d'information. Enfin, un seul modèle suffira à l'ensemble des contrats pour une localisation et un paramètre météorologique donnés. Cependant, la complexité relative de cette méthode accroît le risque de modèle et il devient alors encore plus important d'adopter des processus de validation des différents modèles. Les effets de saisonnalité ne peuvent ici être ignorés et cette dernière doit elle aussi être modélisée. Les séries considérées étant souvent hétéroscédastiques, il est bien souvent nécessaire de modéliser la variance (de façon équivalente l'écart type) au court du temps. Il faut de plus s'intéresser à la structure d'autocorrélation temporelle des processus. Nous concevons alors que les hypothèses des modèles précédents, bien que très fortes et parfois peu réalistes, simplifient énormément le cadre d'étude (et par conséquent les modèles proposés), permettant de fait de réduire le risque de modèle.

Certaines considérations physiques s'avèreront particulièrement utiles dans le choix de la dynamique. Concernant la température, il sera intéressant de souligner que [CW01] :

- Les températures suivent un processus saisonnier prévisible. Le modèle devra reproduire ces comportements saisonniers (niveaux moyens, variabilité. . .) et prendre en compte les autres éléments influençant cette grandeur (changements climatiques donnant lieu à une tendance par exemple).
- Les températures ont tendance à évoluer autour de niveaux moyens saisonniers et il est rare qu'elles en dévient pendant une période prolongée ; les processus de retour à la moyenne (processus d'Ornstein-Uhlenbeck) se montreront alors particulièrement adaptés.
- Il ne sera pas rare d'observer une composante auto-régressive dans les variations de ces grandeurs.

Comme le montre [EB08], ces différentes caractéristiques sont partagées par les vitesses de vents pour lesquels les processus de retour à la moyenne restent adaptés. Cependant, ces considérations ne sont plus valables dans le cas des précipitations. Ces dernières sont beaucoup moins régulières que les grandeurs précédemment évoquées [STO11] et leur modélisation est de fait moins évidente. Il est tout de même intéressant de noter que [AD13] :

- Les probabilités d'occurrence de pluie suivent un pattern saisonnier.
- Les séquences de jours humides ou secs suivent un processus auto-régressif.
- Le niveau moyen et la volatilité des cumul quotidien de précipitations lors d'un jour humide. varient saisonnalement.

Les processus utilisés peuvent être à temps discret ou à temps continu et de nombreux modèles ont déjà été proposés dans la littérature, en particulier (une fois de plus) pour les températures. Le lecteur intéressé par ces sujets pourra se référer au chapitre 4.5 de [AD13] où il retrouvera un historique des différents modèles qui ont jusque-là été étudiés dans le cas de la température moyenne quotidienne et respectivement aux chapitres 9 et 10 du même ouvrage pour les indices construits sur le vent et ou sur les précipitations.

# Chapitre 7

## Tarification

Comme nous l'avons précisé dans la première partie, une grande proportion des couvertures proposées sont des produits "sur mesure" et donc très peu liquides. Ces derniers ne sont alors pas échangés sur les marchés côtés (non répliquables) et doivent donc être valorisés à l'aide de techniques assurantielles. Il s'agit alors de déterminer la valeur (actuelle) de la perte attendue (Expected Loss), celle-ci étant fonction de l'indice sous-jacent. Soit  $X$  une v.a. quantifiant l'impact du sinistre pour le risque considéré et  $P(x)$  l'indemnité correspondant à la réalisation  $x$  de  $X$ . En notant la prime pure  $\pi$ , nous avons :

$$\pi = \mathbb{E}[P(X)] \quad (7.1)$$

Calculer la prime pure revient alors à déterminer l'espérance (dans l'univers historique dans notre cas) de la variable aléatoire correspondant à l'indemnité que versera le preneur de risques. Plusieurs méthodes (déjà évoquées dans la partie précédente) sont envisageables pour le calcul de cette espérance ; la plupart consistent à modéliser la valeur de l'indice concerné et d'en déduire le montant associé. Nous résumons rapidement le principe de certaines de ces méthodes ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs dans le tableau suivant (listes non exhaustives).

BASÉ SUR :	Paielements historiques		Historique Météorologique	
NOMS	Burning Cost	Indice direct		Série quotidienne
		Non Param	Param	
PRINCIPES	Moyenne empirique des payoff historiques	Estimation non param de la fonction de répartition		1. Hyp : distrib $\in$ à une famille de loi connue 2. Estimation des paramètres Modèles dynamiques pour valeurs quotidiennes (T°C)
AVANTAGES	a. Presque aucune hypothèse à priori b. Relativement robuste aux valeurs extrêmes c. Simplicité et intuitivité des modèles d. Implémentation rapide	a. Meilleur que non paramétrique si hyp de distrib réaliste b. Pondère des valeurs au-delà de l'échantillon		a. Meilleure utilisation de la donnée dans son ensemble b. Un seul modèle (par station/série) c. Il est possible d'incorporer des forecast au modèle d. Plus grande précision
	"Approche de référence"	Kernel permet de lisser f.d.r.		
	Période définie ; nous n'avons pas à nous soucier des effets de saisonnalité.			
INCONVENIENTS	a. Convergence moins rapide que dans le cas paramétrique b. Extrapolation délicate c. Très dépendant de la fenêtre utilisée (historique pour BC, + de lissage pour Kernel)	a. Biais plus important si mauvaise spécification b. Complexité des modèles croissante avec quantité de données		a. Risque de biais encore plus important si mauvaise spécification b. Complexité accrue c. Saisonnalité, auto-corrélation... d. Plus important encore de valider le modèle
	Multimodalité et f.d.r. peu lisse peu réaliste dans certain cas	Un modèle par indice		
	a. Hypothèses d'indépendance interannuelle (forte) et de stationnarité (cf detrending) forte et souvent peu réaliste b. Mauvais si indice sur événements extrêmes ou sur période courte			

Figure 7.1: Tableau récapitulatif des méthodes de détermination de la prime pure

## 7.1 Chargement de la prime pure

La prime pure est la borne inférieure de l'ensemble des primes exigibles par le preneur de risque. En effet, afin de pouvoir faire face à la volatilité induite par le caractère aléatoire des sinistres futurs et par les incertitudes liées à la modélisation de la prime pure, le preneur de risque doit bloquer un capital additionnel correspondant au coût du risque (multiplié par un coefficient traduisant un objectif de rémunération du capital). Ce chargement doit naturellement être croissant avec le risque sous-jacent.

En gardant les notations précédentes, nous avons :

$$\mathbf{PR} = \pi + \sum_i \lambda_i \cdot \mathbf{RM}_i \quad (7.2)$$

- $\mathbf{PR}$  correspond à la prime de risque
- $\mathbf{RM}_i$  correspond à la  $i^{\text{ème}}$  mesure de risque utilisée
- $\lambda$  correspond au  $i^{\text{ème}}$  coefficient de chargement associé.

Le niveau de chargement (correspondant à la valeur du coefficient  $\lambda$ ) est déterminé par le preneur de risque selon le retour sur capital qu'il désire. Les prix ainsi obtenus sont utilisés comme étalon mais ne sont pas forcément ceux qui seront retenus au final sur le contrat. En effet les prix qui sont contractualisés peuvent être différents des prix théoriques du fait de nombreuses autres raisons micro-économiques (sous-tarification fruit de négociations, d'une volonté d'entretenir une relation avec un client, de la volonté de conserver un client par exemple) ou fonction de l'aversion au risque du preneur de risque (sur-tarification car volonté de réduire le risque de modèle par exemple). Plusieurs mesures de risques sont envisageables, il peut entre autres s'agir :

### 1. D'un indicateur de position

- Espérance :  $\pi$
- VaR/Quantile :  $VaR_\alpha(P(X))$
- TVaR :  $TVaR_\alpha(P(X))$

### 2. D'un indicateur de dispersion

- Variance :  $Var[P(X)]$
- Écart-type :  $\sigma[P(X)]$
- Écart maximal à la moyenne :  $(P_{max} - \pi)$

- $VaR_\alpha$  représente la *Value at Risk* de niveau  $\alpha$ .
- $P_{max}$  représente l'indemnisation maximale.
- $TVaR_\alpha$  représente la *Tail Value at Risk* de niveau  $\alpha$  :  $TVaR_\alpha(X) = \mathbb{E}[X|X > VaR_\alpha(X)]$

Si le chargement est appliqué sur la mesure de risque dénommée "x", nous parlerons de "principe de x". Il est possible (et même souhaitable dans certain cas) de définir un chargement à partir de plusieurs des éléments listés ci-dessus. Un chargement fonction de la lourdeur de queue de la distribution concernée est par exemple souvent ajouté dans le cas des méthodes non paramétriques.

Il est nécessaire, afin d'obtenir la prime commerciale, d'ajouter à la prime de risque différents coûts tels que les frais de courtage, de gestion, des taxes...  
Ces éléments ne seront pas détaillés dans la suite.

## 7.2 Critère d'évaluation des différentes méthodes

**Notations supplémentaires** (cf. Chapitre 5 Section 2)

À partir des valeurs d'indices réalisées, il est possible de calculer les indemnités correspondantes. Cela revient à définir une fonction  $f_2$  telle que :

$$f_2 : \left\{ \begin{array}{l} \mathbb{R}^{T \times N} \longrightarrow \mathbb{R}^T \\ E_3 \longmapsto E_4 = \{S_y; 1 \leq y \leq T\} \end{array} \right. \quad (7.3)$$

Avec  $S_y$  le niveau d'indemnité pour l'année  $y$

La prime est ensuite calculée à partir des indemnités, des valeurs des indices ou des séries quotidiennes. Nous définissons une fonction  $f_3$  telle que :

$$f_3 : \left\{ \begin{array}{l} \mathbb{R}^T \text{ ou } \mathbb{R}^{T \times N} \text{ ou } \mathbb{R}^{d \times n} \longrightarrow \mathbb{R} \\ E_4 \text{ ou } E_3 \text{ ou } (E_2 \text{ ou } E_1) \longmapsto \pi \end{array} \right. \quad (7.4)$$

### Démarche

Nous cherchons dans ce paragraphe à définir un cadre d'évaluation des différentes méthodes de tarification d'un portefeuille de risques météorologiques. Il s'agira, à partir d'un portefeuille donné, de calculer rétrospectivement les primes qui auraient été reçues pour chacune des méthodes de valorisation sélectionnées et de les comparer aux montants des sinistres effectivement réalisés. Cela pourra par exemple être fait via l'étude de la distribution des ratios  $S/P$  sur les dernières années.

Nous choisissons dans un premier temps une longueur d'historique  $T$  correspondant au nombre d'années de données utilisées. Il sera fonction de la disponibilité et de la qualité de ces dernières.

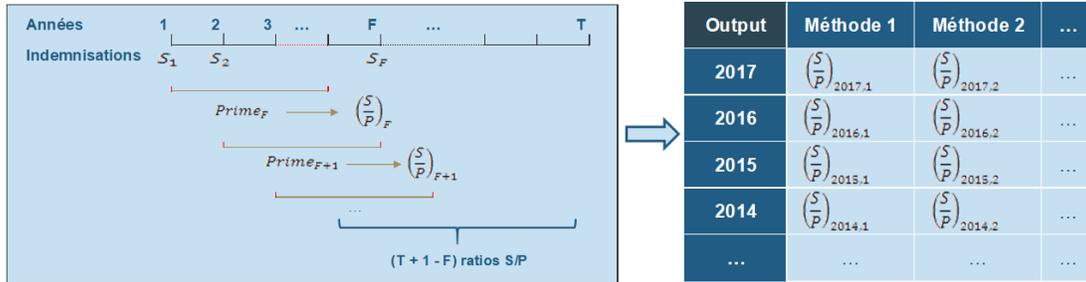
Nous disposons en entrée d'un portefeuille donné. Celui-ci sera défini par différents paramètres que sont :

- Un **ensemble de stations météorologiques** correspondant aux stations retenues pour chacun des produits du portefeuille.
- Les paramètres définissant **le/les indices sous-jacent(s)** (paramètre météorologique, fonction d'agrégation, ...).
- **Les structures** pour chaque produit (autrement dit les paramètres déterminant le niveau des flux financiers en associé à une valeur donnée de l'indice tel que le type d'option, la structure, ...).

Nous disposons aussi d'un ensemble de méthodes de tarifications que nous souhaitons évaluer. Celles-ci seront définies par :

- Une **longueur de fenêtre glissante**  $F$  définissant la longueur de la période à partir de laquelle sera déterminé le niveau de prime pour l'année suivante.
- Une **méthode de detrending** de l'indice.
- Une **méthode de détermination/calcul de la prime pure**.
- Une **méthode de chargement** et le coefficient de taux de chargement associé.

Nous calculons alors pour chacune des périodes considérées les primes correspondantes aux différents paramètres de portefeuille retenus et comparons les estimations de ratios  $S/P$  obtenus par les différentes méthodes de tarification sur la période de souscription (chacune des  $T + 1 - F$  dernières années). La démarche envisagée est schématiquement résumée dans les figures ci-dessous.

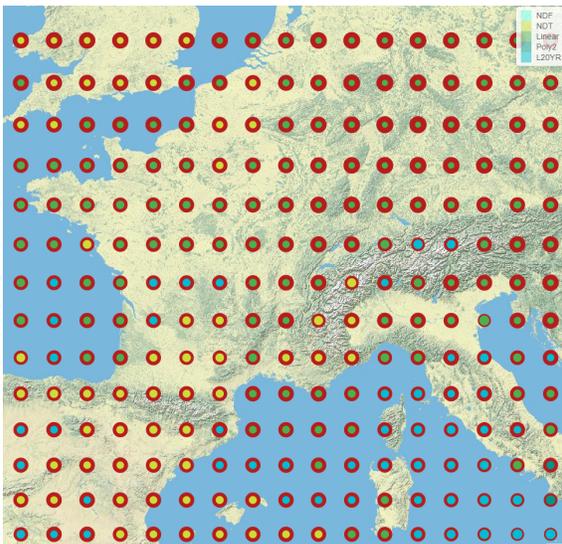


**Figure 7.2:** À gauche : schéma descriptif de la méthode. À droite : résultats obtenus en sortie

Nous pourrions alors comparer les différentes distributions obtenues en sortie (et donc les méthodes sous-jacentes) à l'aide de statistiques descriptives classiques. De plus, si nous souhaitons ordonner ces différentes méthodes, une solution consiste à utiliser le rapport entre les sinistres sur l'ensemble de la fenêtre glissante et les primes obtenues sur cette même fenêtre.

$$\left(\frac{S}{P}\right)_T^{Glob} = \frac{\sum_{i=F}^T S_i}{\sum_{i=F}^T P_i} \quad (7.5)$$

En plus des hypothèses propres aux différentes méthodes de modélisation des indices déjà énoncées dans les parties précédentes, l'hypothèse implicite d'une telle démarche est que l'étude du passé est un bon moyen d'appréhender le futur. Bien que celle-ci soit quelque peu réductrice, elle nous permet de définir un critère objectif de comparaison des différentes méthodes de tarification, outil pouvant s'avérer intéressant pour les preneurs de risques dans la gestion de leur portefeuille de risques météorologiques et le pilotage de leur politique tarifaire. De plus elle ne nécessite aucune autre hypothèse a priori et sa relative simplicité (de concept et de mise en œuvre) représente un réel avantage.



**Figure 7.3:** Carte obtenue en sortie des backtests sur les méthodes de detrending (cf. §)

Ce genre de démarche de *backtesting* peut aussi être utilisée comme critère de décision dans le choix de la longueur d'historique à utiliser ou du choix de la méthode de *detrending*. Dans ce cas, il ne s'agira plus de comparer les primes obtenues par les différentes méthodes de tarification (formule et chargement), mais de comparer directement la valeur de l'indice réalisée l'année suivante la fenêtre considérée à la valeur de l'indice "modélisée" pour cette même année. Par exemple, la carte à gauche (package "leaflet" sur R) indique à partir de données satellitaires Merra, quels auraient été pour chacun des points de grilles (dans le cas d'un indice HDD) la méthode de detrending conduisant à la plus petite erreur de prévision (couleur intérieure). La couleur du cercle extérieur et son épaisseur renseigne le sens d'inclinaison de la tendance linéaire et sa force.

### 7.3 Utilisation de prévisions météorologiques, suivi du niveau de l'indice et provisionnement

Comme nous l'avons précisé précédemment, il est impossible de prédire de manière consistante et précise les conditions météorologiques à un horizon supérieur à une ou deux semaines (conscient de la valeur limitée de ses données, Météo France fournit d'ailleurs gratuitement les prévisions au delà d'un mois alors que celles d'horizon inférieur sont payantes). Cependant, bien souvent, les contrats (assurance indicielle ou dérivé) sont signés longtemps avant le début de la période de couverture (un an, 6 mois...). Il n'existe alors aucune prévision météorologique exploitable sur le moment et la tarification doit donc s'appuyer sur les données historiques. Cependant, il est possible de tarifier le produit dans différents "scénarios climatiques" (vague de froid, canicule, températures normales...) et d'utiliser comme prix final la moyenne des prix obtenus pondérée par les probabilités respectives des scénarios (qui sera différente du prix obtenu avec un scénario moyen du fait de la non linéarité de la fonction payoff). Le lecteur intéressé par l'utilisation de prévisions météorologiques dans l'évaluation de dérivés climatiques ayant lieu juste avant le début ou pendant le contrat pourra se référer à [JC03]

Lors de la période de couverture, il peut être intéressant pour les différents partis du contrat de suivre le niveau de l'indice sous-jacent. En effet, cela permettra d'un côté à l'acheteur de protection (dans le cas d'un produit d'assurance indicielle) d'anticiper s'il percevra ou non une indemnisation et quel en sera l'ordre de grandeur. Ainsi, il pourra améliorer sa gestion opérationnelle en intégrant ces prévisions météorologiques. Du côté du preneur de risques, le suivi d'indice lui permettra de quantifier les provisions pour sinistres non déclarés (provisions limitées du fait du délai souvent très court séparant l'occurrence du risque et le versement de l'indemnisation dans le cas de l'assurance indicielle). Dans le cas d'un délai plus important avant la publication des données nécessaires au calcul du niveau de l'indice (et donc du niveau d'indemnisation), il peut être intéressant d'utiliser des données satellitaires fortement corrélées avec l'indice de référence afin d'estimer ces valeurs et de quantifier les provisions nécessaires [PIE15].

## Troisième partie

# COUVERTURES INDICIELLES MULTIRISQUES

*Nous nous attacherons, dans ce chapitre, à étudier la faisabilité de nouveaux produits de couverture indicielle permettant de se couvrir conjointement contre plusieurs périls météorologiques. Nous évoquerons dans un premier temps les raisons nous poussant à croire en la viabilité d'un tel produit et les perspectives que ces derniers pourraient offrir. Nous traiterons ensuite du cadre nécessaire à la construction de tels indices, chercherons à développer une méthode formelle et générique, et évoquerons quelques exemples envisageables selon les secteurs considérés.*

## Chapitre 8

# Motivations et Implications

### 8.1 Motivations

Un grand nombre d'agents économiques sont exposés simultanément à plusieurs risques météorologiques, dans des proportions plus ou moins importantes. Typiquement, un agriculteur sera exposé à des périls de natures météorologiques différentes (températures, précipitations...) au cours des différentes périodes de développement de ses cultures (période végétative, période reproductrice, maturation). Dans ce cas, il peut être avantageux pour les acheteurs de protection de se couvrir de façon jointe contre ces risques pour différentes raisons que nous évoquons ci-après. Couvrir ces risques dans un même contrat dit multirisques pourrait permettre de réduire le coût de la couverture. Tout d'abord, l'acheteur de protection n'aurait plus qu'à souscrire à un unique contrat ; cela présenterait l'avantage de simplifier la gestion et donc d'en réduire les coûts.

D'autre part, du fait du principe de diversification, un tel produit pourrait être synonyme de "réduction du risque" (on mutualise les risques en les combinant dans une même couverture). En pratique la prime exigée aux acheteurs de protection pourra être inférieure dans le cas d'un contrat "multirisques". En effet cette prime correspond à la valeur actuelle de la perte attendue (~prime pure) à laquelle s'ajoute un chargement correspondant au "coût du risque". Ce risque sous-jacent dont dépend donc directement le prix de la couverture peut être quantifié à l'aide d'une mesure de risque. Si la valeur de cette mesure dans le cas du "risque global", est inférieure à la somme des mesures de "risques individuels", la prime exigée pour la "couverture globale" devrait être inférieure à la somme des primes individuelles. Ce sera par exemple le cas si la mesure de risque retenue vérifie la propriété de sous-additivité (par définition dans le cas d'une mesure de risque cohérente, cf. [Aa98]).

Enfin, cela pourrait permettre de stimuler la demande en produits indicels. Selon certains auteurs, la faible demande que connaissent actuellement les produits indicels s'expliquerait plus par le caractère "probabiliste" de ces couvertures que par leur caractère "partiel" de celles-ci. Cela est illustré à partir d'expériences dans [MPS16] dans le cas de producteurs de café Guatémaltèques se voyant offrir différentes couvertures indicelles contre la sécheresse et l'excès de précipitations et dans [WTT97] où les auteurs interrogent des étudiants américains quant à leur disposition à souscrire (*Willingness To Pay*) à des polices d'assurance incendie (habitation) respectivement "complètes", "partielles" et "probabilistes". Cependant, comme le souligne [WTT97], la majeure partie des polices d'assurance sont en réalité probabilistes (exclusions de garantie précisées dans les contrats d'assurance par exemple) sans que les individus ne les ressentent forcément comme telles. Cela souligne alors l'importance de la formulation des perspectives proposées, dans notre cas la spécification des produits. Ainsi, des produits indicels couvrant plusieurs périls pourraient permettre de réduire la probabilité ressentie par l'agent de non dé-

clenchement de la couverture en cas de réalisation du risque (réalisation d'un péril non couvert), et donc, de le rassurer quant à l'efficacité d'un tel produit.

Parmi les agents dont l'activité est météo-sensible, certains ne possèdent pas l'expertise nécessaire à l'appréhension de leurs risques météorologiques. Dans le cas où ils possèdent des données historiques significatives permettant de quantifier le niveau de perte financière des années passées, il est possible d'analyser ces dernières parallèlement aux données météorologiques afin de déterminer quel indice et quels seuils doivent être utilisés. Cependant, dans le cas contraire ou dans toute autre situation où l'agent se sachant météo-sensible est dans l'incapacité de définir des indices ou de fixer des seuils (ou ne désirent tout simplement pas le faire), des couvertures où les seuils seraient définis à partir de considérations statistiques pourraient être intéressantes. Sans vouloir cibler une couverture spécifique, ces agents conscients de l'accroissement du risque météorologique souhaiteraient se couvrir afin de ne pas subir les conséquences d'un climat anormal sur leur activité (cf. Annexe E). Si certains acteurs semblent intéresser par ce genre produit, nous pensons que le risque de base impliqué dans une telle situation, où nous manquons particulièrement d'information concernant le risque sous-jacent, rendra inopérante la couverture indiciaire de celui-ci.

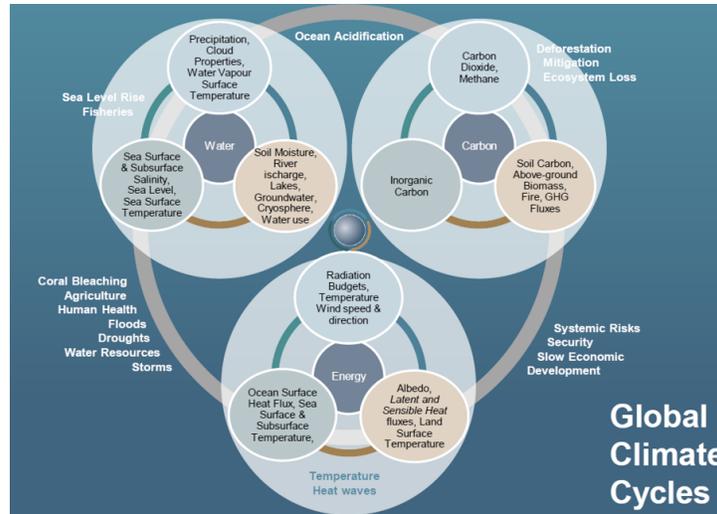
## 8.2 Considérations supplémentaires nécessaires

Considérons l'exemple décrit supra, d'un agent économique dont l'activité est météo-sensible et pour lequel plusieurs périls météorologiques ont été identifiés. Nous cherchons à créer un produit indiciaire permettant de couvrir son activité contre plusieurs de ces périls. Relativement à la situation plus classique dont nous avons parlé dans les parties précédentes, il sera nécessaire, dans la conception d'un produit indiciaire multirisques, de tenir compte de considérations supplémentaires. Nous discutons dans les prochains paragraphes des implications d'un tel produit sur la définition de l'indice, le choix de la structure et des méthodes de modélisation et de tarification.

### 8.2.1 Au niveau de la modélisation des indices et de la tarification

Si les produits classiques de couverture indiciaire sont souvent indexés sur un seul indice (et sur une seule grandeur météorologique), chaque péril identifié dans le cas d'un produit multirisques sera associé à une grandeur météorologique ou directement à un indice. Plusieurs grandeurs météorologiques pourront donc être utilisées dans la conception de l'indice. Les indices ne seront pas forcément calculés sur la même période cependant, ils seront habituellement définis pour la même station ou ensemble de stations météorologiques (choisie(s) afin de correspondre au mieux à la localisation de l'activité considérée). Pour un climat donné, les valeurs mesurées des différentes grandeurs météorologiques découlent de même processus physiques (processus internes impliqués par les interactions entre atmosphère, biosphère, lithosphère et océan et des forçages externes parmi lesquels nous distinguons les mécanismes naturels et les mécanismes anthropogéniques; pour plus de détails, se référer à [alt13]). Dès lors, différentes formes de dépendance peuvent exister (et ce à différentes échelles) entre ces grandeurs météorologiques. Ne pas tenir compte de ces potentielles relations de dépendance dans la modélisation de nos indices météorologiques et donc dans la tarification de nos produits risquerait d'introduire un biais dans nos estimations. Prenons l'exemple d'un fournisseur d'énergie; celui-ci est exposé de façon simultanée à plusieurs risques météorologiques. Sur la période hivernale par exemple, des températures trop douces impliqueront une chute de la consommation, et donc des résultats. À l'inverse, des températures particulièrement basses seront synonymes de sur-consommation et le

fournisseur pourrait se retrouver à devoir acheter de l'électricité sur le marché dans un contexte de demande accrue (et donc de prix élevés). En imaginant qu'un indice ait été défini pour chacun des risques précédents, nous concevons qu'il serait particulièrement naïf de modéliser ces indices de façon indépendante alors qu'il dérive de la même grandeur météorologique.



**Figure 8.1:** Interactions entre les principaux moteurs du climat.

Source : [BÉL16] depuis Secrétariat du Global Climate Observation System (GCOS)

## 8.2.2 Au niveau de la définition de l'indice et de la structuration du produit

Les points développés dans le paragraphe précédent soulignent l'importance de la prise en compte de la dépendance existant entre les différents événements météorologiques (modélisation de l'aléa). Au delà de cette première relation de dépendance existant entre les périls identifiés (qui sera modélisée de façon statistique), il est primordial d'étudier comment s'articulent entre eux ces différents périls (analyser l'exposition au risque et la vulnérabilité de l'activité concernée). En imaginant qu'un nombre donné de périls météorologiques aient été identifiés, il sera par exemple judicieux de se demander si ces périls concernent les mêmes risques. Cela sera le cas dans la majeure partie des situations ; par exemple pour l'agriculteur voulant se couvrir contre la réalisation d'une période de sécheresse et de gel, périls correspondant tous deux à un risque de perte de production. Cependant, ce même agriculteur aurait pu souhaiter se couvrir contre la réalisation d'autres événements météorologiques impliquant une hausse des charges opérationnelles (coûts des intrants ou du pétrole par exemple) correspondant eux à un risque de coût de production. Nous pourrions alors nous demander selon le cas si une forme de compensation est possible en cas de réalisation de conditions météorologiques défavorables à un des périls mais favorables pour les autres. De même, en cas de périls définis sur des périodes différentes, il faudra s'interroger quant à l'évolution de l'exposition au(x) risque(s) concerné(s) en cas de réalisation du/des péril(s) sur les premières périodes. Considérons l'exemple d'un agriculteur cultivant du blé tendre d'hiver et désirant se couvrir contre un excès de précipitations au moment des semis (octobre-novembre) et contre le gel de printemps au moment de la montaison (avril-mai). S'il pleut de façon intense en octobre, seule une proportion des graines semées initialement lèvera et sera donc exposée à de potentielles gelées de printemps. Face à la multitude d'indices envisageables, les éléments de réponse que nous apporterons à ces différentes questions devront être utilisés dans le choix et la définition de l'indice ainsi que dans la structuration du produit.

## Chapitre 9

# Méthode de conception de solutions indicielles multirisques

### 9.1 Cadre général

Nous cherchons, dans ce chapitre, à définir un cadre formel permettant de concevoir des solutions indicielles multirisques climatiques pertinentes. L'élément premier et indispensable à toutes ces couvertures est naturellement l'indice sous-jacent, seul élément dont dépend l'indemnisation que percevra l'acheteur de protection à l'échéance du contrat. Nous cherchons à définir cet indice de telle sorte qu'il permette de mesurer et de résumer au mieux sur une dimension (indice composite) les conséquences que peuvent avoir des anomalies météorologiques sur l'activité que nous souhaitons couvrir (variations de revenu ou perte). Il pourra s'agir de définir un indice construit à partir de plusieurs grandeurs météorologiques ou encore de définir un indice à partir de plusieurs stations météorologiques. Ces indices auront pour vocation d'agrèger les différents risques météorologiques (définis a priori) auxquels est soumise une entreprise ou, de mesurer le degré d'anormalité climatique associé à une période et une activité.

Le terme d'anormalité fait ici référence au caractère anormal ("écart" par rapport à la norme, cf. Annexe E) des conditions météorologiques impliquant des conséquences défavorables sur l'activité considérée. Il s'agira dans ce cas de définir, à partir de considérations statistiques sur l'ensemble des données historiques (approche supervisée) :

- Soit un critère définissant le caractère anormal d'une période ("anormalité binaire" : période normale ou anormale). L'indemnisation versée (en espèce ou autre) en cas de réalisation d'une période anormale sera fixe.
- Soit un moyen de quantifier le degré d'anormalité associé à une période (indice composite ou non, à valeurs réelles). L'indemnisation versée sera croissante avec le niveau d'anormalité.

Comme nous le disions précédemment, nous serons capables dans certaines situations, d'identifier les "risques météorologiques individuels" auxquels est soumise l'activité (et donc des indices pertinents pour chacun d'eux). Dans ce cas, nous chercherons la meilleure façon d'agrèger ces différents risques dans un indice composite sans tenir compte de la distribution empirique des grandeurs ou indices météorologiques retenus. Les différents choix concernant l'ensemble des paramètres utiles à la conception de l'indice composite (choix des grandeurs météorologiques, des méthodes d'agrégation, des structures ...) se baseront alors sur des considérations autres que statistiques (expertise agronomiques dans le cas de risques agricoles par exemple). Nous pensons que l'intégration de tels éléments dans la définition de l'indice devrait rendre plus efficace la couverture construite sur celui-ci.

Nous faisons l'hypothèse, par la suite, d'avoir à notre disposition des données météorologiques de bonne qualité et sans valeurs manquantes. Les différentes étapes présentées ci-dessous s'inspirent en partie des principales étapes relatives à la création d'un indice composite que préconise le manuel du Centre Commun de Recherche (CCR) et de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) [OEC08].

- Identification des risques météorologiques
- Définition des indices météorologiques
- Analyse des risques : étude de l'aléa
- Agrégation des risques
- Validation et tarification de la couverture

Il sera essentiel, au cours des différentes étapes de construction de l'indice, de bien garder en tête la finalité de l'indice. Ces considérations fourniront au cours de ces étapes un critère de sélection entre les différentes méthodes envisageables (critères de sélection des indices individuels, modalités de définitions, d'agrégations ...). Afin de s'assurer de l'efficacité de la solution proposée, nous chercherons (dans la mesure du possible) à minimiser le risque de base découlant du risque de mauvaise spécification de l'indice (pas assez corrélé à la variable d'intérêt). Il sera important, à cette fin, d'intégrer autant que possible, des informations extérieures au modèle pouvant être apportées par les experts ou les études antérieures ayant été menées sur l'activité et sa sensibilité aux conditions atmosphériques. De plus, les différents indices envisagés devront être suffisamment simples et clairs pour être "compris" sans trop de difficultés par les différents partis. En effet, la compréhension de l'indice par l'acheteur de protection et la possibilité pour lui de vérifier le niveau de ce dernier à partir des données retenues ont selon nous une importance commerciale. Nous pensons que des indices complexes ou exprimés dans des unités difficilement compréhensibles pour l'acheteur de protection nuiraient à l'attractivité de la solution de couverture.

## 9.2 Identification des risques météorologiques

**Entrées :** Un agent économique, dont l'activité principale génère des revenus qui sont susceptibles de varier en fonction des conditions météorologiques, souhaite se couvrir contre cette variabilité. Nous disposons en entrée de données météorologiques pouvant être complétées par des données propres à l'activité de l'agent, par des informations concernant les grandeurs météorologiques impactant son activité, par l'identification d'années où les conditions météorologiques furent particulièrement adverses ...

Dans cette première partie, nous cherchons d'abord à cerner et identifier les risques météorologiques auxquels l'agent économique est exposé (perte de production, baisse de la consommation, coûts supplémentaires ...). Il s'agira ensuite de spécifier, de la façon la plus précise possible, quels sont, pour chacun de ces risques, les événements météorologiques faisant peser une menace sur l'activité. Cela pourra être fait :

- en confrontant les données météorologiques aux données historiques de la variable météo-sensible (productions, ventes, coûts historiques ...) si nous disposons de telles données (approche inductive, raisonnement à partir des observations).
- nous basant sur notre connaissance des risques (ou d'autres éléments apportés par l'acheteur de protection) pesant sur l'activité considérée, autrement dit, sa météo-sensibilité (approche déductive, raisonnement à partir d'hypothèses).

Le choix de l'approche sera fonction de la quantité, de la qualité et de la granularité des données (météorologiques et économiques) à dispositions ainsi que de notre connaissance des risques météorologiques pesant sur l'activité. Dans un premier temps, il sera nécessaire :

- d'identifier à quelle(s) grandeur(s) météorologique(s) (températures, précipitations, vitesse du vent, humidité ...) correspondent les événements météorologiques retenus.
- de préciser sur quelle(s) période(s) de l'année et sur quelle(s) zone(s) géographique(s) ces événements sont susceptibles d'influer sur les variables d'intérêts.

Une fois que les différentes grandeurs météorologiques sous-jacentes auront été identifiées, nous chercherons à déterminer une source pouvant nous fournir les données correspondantes. Les données retenues comme support de l'indice et l'organisme qui les fournit devront vérifier les critères énoncés en 4.2.1. Nous devons ainsi nous assurer que ces données sont publiées dans des délais convenables, qu'elles soient accessibles aux différents partis et qu'elles soient fournies par une source neutre et fiable.

### 9.3 Définition des indices météorologiques

Nous cherchons à présent à identifier les variables météorologiques que nous pensons être les plus étroitement corrélés aux risques que nous souhaitons couvrir. Cela consistera alors à associer un indice météorologique à chacun des risques identifié dans le paragraphe précédent. Selon le niveau d'expertise, la qualité des données disponibles, il pourra s'agir de définir, pour une période et une localisation donnée :

1. Une mesure ou un critère quantifiant le degré d'anormalité (considérations statistiques) des réalisations quotidiennes d'une ou plusieurs grandeurs météorologiques sur la période retenue. Il s'agira dans ce cas de préciser :
  - si le risque se réalise en cas de valeurs élevées et/ou basses des grandeurs
  - un ou plusieurs niveaux d'anormalité définis à partir d'indicateurs statistiques (distance à une normale, mesurée en écart-type, en niveau de quantiles ...) délimitant la ou les classe(s) d'anormalité.
  - une fonction d'agrégation temporelle permettant de se ramener à une valeur unique par période et de pouvoir ainsi estimer le niveau d'anormalité associé à chacune d'entre elles.
2. Un indice météorologique pertinent défini a priori sur la base de considérations autres que statistiques (analyse du risque, avis d'experts météorologistes, agronomes, du secteur de l'énergie ...). Cela consistera à spécifier :
  - toute fonction de transformation des séries quotidiennes permettant d'obtenir une meilleure approximation du risque sous-jacent (utilisation d'une courbe de puissance pour modéliser l'énergie produite par une éolienne en fonction du vent ou défini d'un seuil critique par exemple).
  - une fonction d'agrégation temporelle des séries quotidiennes transformées ou non (par exemple moyenne, cumul ...) sur la période retenue.

Nous pouvons alors concevoir que, selon le cas considéré, la mise en place de tels indices ne requiert pas le même niveau de connaissance du risque sous-jacent. Si ces transformations sont pertinentes, elles devraient, en principe, permettre de réduire le risque de base lié à une mauvaise spécification des indices en augmentant leur capacité à capter et mesurer l'intensité des événements météorologiques défavorables que nous avons définis.

## 9.4 Analyse des risques : étude de l'aléa

À ce stade, nous avons identifié un certain nombre de risques ainsi que les événements et variables météorologiques correspondants. Nous tenterons alors de dresser une analyse probabiliste des risques retenus. Schématiquement, cela consistera à estimer les probabilités d'occurrence de chacun des événements défavorables ainsi que les dommages (et donc les pertes financières) que ceux-ci entraîneraient sur l'activité météo-vulnérable en cas de réalisation à une intensité donnée.

Nous étudierons alors l'historique des données des variables météorologiques retenues. Si les techniques statistiques seront essentielles à l'étude de ces événements météorologiques, l'ajout de considérations météorologiques (~local et court-terme) et climatologiques (~global et long terme) nous permettra de mieux percevoir les mécanismes sous-jacents. Les éléments de réponses apportés lors de cette études justifieront nos choix futurs quant aux méthodes à utiliser (définitions de l'indice, modélisations ...).

Cette analyse nous permettra, de plus, de mettre en lumière de potentielles relations de dépendance pouvant exister entre les variables météorologique et donc les différents risques. Le lecteur intéressé trouvera en annexe une liste de certaines des méthodes (graphiques et statistiques) envisageables dans la détection de dépendance entre variables quantitatives. Comme nous l'avons précédemment précisé, ces corrélations devront être prises en compte dans la modélisation de nos indices sous peine d'introduire un biais dans nos estimations.

## 9.5 Agrégation des risques

Pour chacune des combinaisons d'évènements météorologiques retenus, nous chercherons ensuite à cerner et quantifier l'impact sur la ou les variables d'intérêt en cas de réalisations à des niveaux donnés. Cela consistera par exemple à estimer la perte de récolte due à des épisodes de gel, de sécheresse... (pris indépendamment ou non). Nous chercherons à traduire ces impacts en terme de pertes financières. Les composantes de la perte totale seront rarement indépendantes (~somme des pertes estimées individuellement différente de perte totale estimée) et une attention particulière devra être apportées aux choix des méthodes d'agrégations des différents risques. Le montant agrégé de l'indemnisation qui sera versée par le preneur de risque sera en effet grandement fonction de la méthode utilisée et devra correspondre un maximum au cout estimé de la réalisation du risque agrégé. En pratique nous disposerons peu souvent de données de pertes de suffisamment bonnes qualité et granularité pour être utilisées comme unique support de cette étape; une fois de plus, les considérations des experts et de l'acheteur de protection seront essentielles.

Après l'analyse effectuée, nous devrions être en mesure d'identifier à quelles valeurs des variables météorologiques retenus la réalisation des risques correspond et de percevoir comment s'articulent entre eux ces différents risques. Nous chercherons alors à agréger les différentes variables correspondantes à chacun des risques (indices ou directement indemnisation selon les cas) afin d'estimer le flux monétaire devant être associé à chacune des combinaisons de valeurs d'indices. Autrement dit, il s'agira d'estimer une fonction reliant l'ensemble des variables météorologiques au montant de la perte lié aux risques que l'on souhaite couvrir. L'agrégat devra être défini de telle sorte que le flux résultant soit le plus proche du montant estimé des pertes liées aux risques météorologiques que l'on cherche à couvrir en cas de réalisations de ce(s) dernier(s).

Les méthode et la hiérarchie des agrégations seront fonction des éléments mis en lumière dans le précédent paragraphe. L'approche de type ascendante consistera, à partir des indices définis supra à :

- Regrouper les évènements météorologiques (et les variables météorologiques associées) susceptibles d'agir sur le niveau des mêmes variables météo-sensibles d'intérêt.
- Transformer ces variables météorologiques pour régler les potentiels problèmes d'homogénéité au sein de chaque groupe, d'effets de seuils, ... Sans informations supplémentaires liées à la vulnérabilité, nous normaliserons les indices retenus lors de la première étape. Nous choisirons la méthode la plus appropriée en fonction de la sensibilité aux valeurs extrêmes désirée, de l'unité dans laquelle nous souhaitons exprimer les indices,...
- Agréger ces variables en tenant compte de leur importance relative en terme de capacité à expliquer les variations de la variable d'intérêt (ou des pertes potentielles estimées). Sans considérations additionnelles, les méthodes de pondération et d'agrégation seront choisies selon le degré de compensation désiré, les niveaux de corrélations, si l'on doit se soucier ou non des problèmes de "redondance de l'information" en cas de forte corrélation. . .
- Répéter les étapes précédentes afin d'agréger les différents indices ainsi obtenus sur une seule dimension. L'agrégat (des indices sous-jacents ou des pertes générées par ceux-ci) retenu devra capter au mieux le niveau de perte agrégée estimé en tenant compte des interactions pouvant exister entre les pertes impliquées par chacun des "modules" de risques.

Les choix effectués lors de chacune de ces étapes devront être justifiés autant que possible et communiqués aux différents partis. Si cela n'a pas été fait précédemment, il sera nécessaire de préciser une fonction *payoff* (structure : valeur d'entrée, de sortie, montant d'indemnisation par unité d'indice...) associant à chaque niveau de l'indice météorologique composite retenu le flux monétaire correspondant. Il sera souvent plus aisé d'estimer les pertes liées à chacune des variables d'intérêts et se demander comment celles-ci s'articulent plutôt que d'estimer le *payoff* agrégé en fonction de l'indice composite; la structure globale retenue dépendant alors dans le premier de notre estimation des pertes agrégées correspondant à chacun des scénarios climatiques.

## 9.6 Validation et tarification de la couverture

Nous devrions à ce stade, avoir identifié une ou plusieurs solution de couverture des risques météorologiques. L'ensemble des paramètres utiles à la définition des indices et le profil d'indemnisation correspondant seront connus. Nous chercherons alors à nous assurer de la pertinence de l'indice sélectionné, de l'efficience de la couverture proposée.

### Étude du risque de base

Nous devons nous assurer que le risque couvert à l'aide du produit retenu correspond un maximum au risque réel que souhaite couvrir l'acheteur de protection. Cette dernière étape revêt une importance particulière au vu des limites liées à l'assurance indicielle. L'étude du risque de base associé à cette solution passera par la confrontation des pertes historiques (estimées, modélisées, renseignées par l'acheteur de protection ...) liées aux risque que l'on souhaite couvrir et des montants d'indemnisations qu'auraient générés la couverture chaque année. S'il est primordial que les couvertures envisagées se déclenchent en cas de réalisation du risque que l'on souhaite couvrir, les montants devront être strictement suffisants pour couvrir les pertes financières en cas de réalisation d'un sinistre; autrement dit nous cherchons d'abord à éviter les situations futures de faux négatifs mais aussi celles de faux positifs (cf. schéma 4.3).

Si la "viabilité historique" de la solution de couverture envisagée est un point essentiel que l'on se doit de vérifier (pouvant de plus revêtir une importance commerciale en rassurant l'acheteur de protection), nous cherchons en priorité à nous assurer de sa capacité à rester efficace dans un avenir proche (~sur la période de couverture).

Il faudra en effet se méfier des potentiels problèmes liés au sur-apprentissage en cas d'utilisation de données associées aux pertes historiques de l'acheteur de protection (rendement, fréquentations . . .) lors de la conception de l'indice. Si, par exemple, des modèles statistiques de régressions sont utilisés, il faudra s'assurer de leurs capacités à généraliser ; autrement dit, qu'ils soient bons dans l'avenir avec des données qui seront indépendantes de celles utilisées dans l'apprentissage (le lecteur intéressé trouvera une illustration plus détaillée de ces concepts dans [KOC11] dans le cas d'une couverture rendement basé sur un indice météorologique). Une solution envisageable consistera alors à séparer nos données initiales en bases d'apprentissage et de test. La première sera utilisée pour orienter nos différents choix lors de la conception de l'indice alors que la seconde sera laissée de côté pour la validation de l'indice proposé. En pratique cependant, nous ne disposerons que rarement de données en quantité suffisante pour songer à de telles approches.

Les indices construits sur la base de considérations issues des différentes expertises nous permettront en principe de nous affranchir de ces problèmes de sur-apprentissage ; les modalités de définitions dépendant moins des données historiques des variables d'intérêt, ces dernières peuvent aisément être utilisées dans la validation de l'indice. Si nous avons déjà précédemment souligné l'importance de telles considérations, cela est un argument supplémentaire en la faveur d'indices construits à partir de celles-ci.

### **Modélisation des indices et tarification de la couverture**

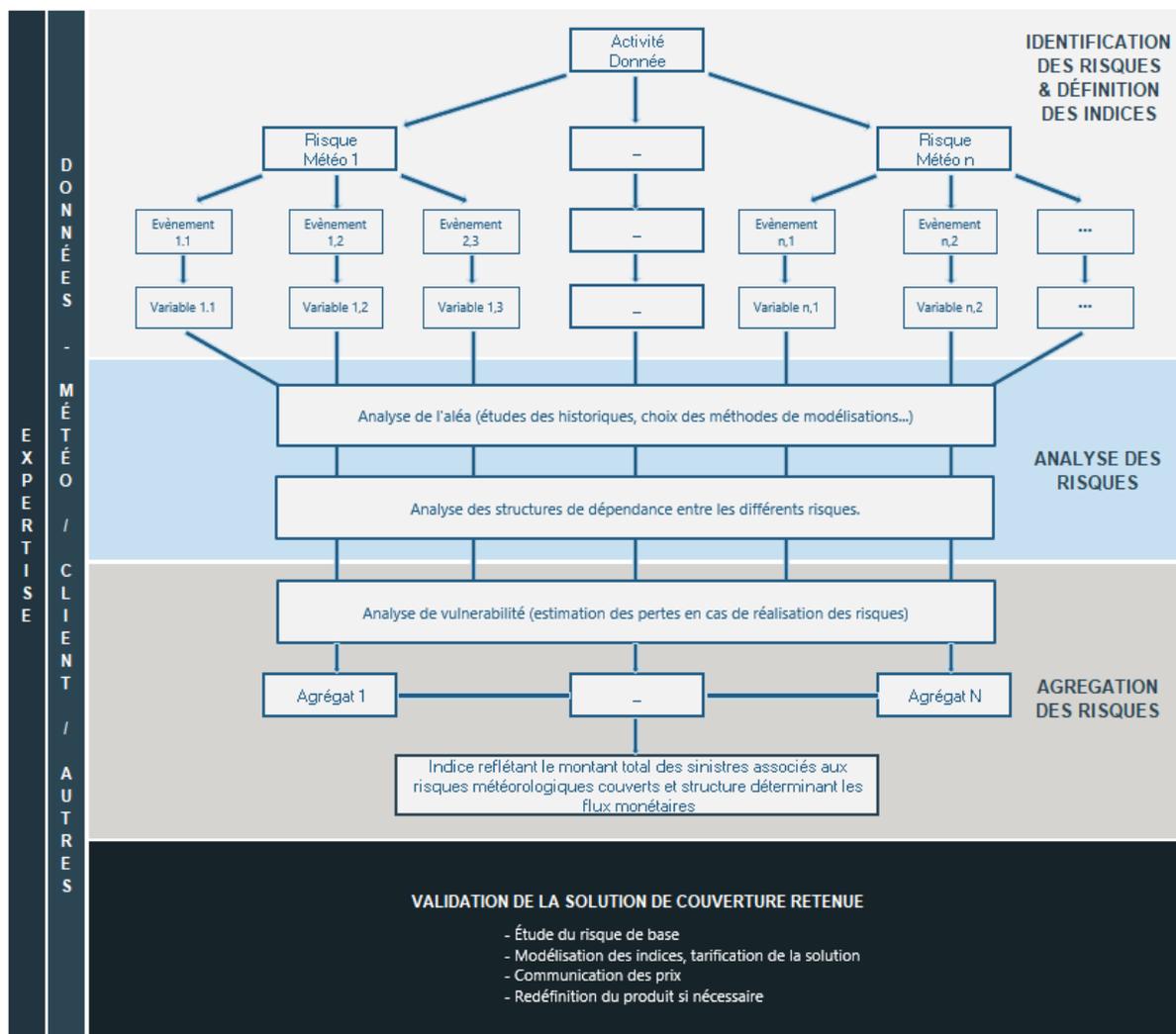
Une fois que les différents points listés ci-dessus auront été vérifiés, il sera possible de tarifier la solution de couverture retenue. Les techniques de modélisations des indices et de tarifications du produit resteront similaires à celle évoquées dans la partie II de ce mémoire. Cependant, étant à présent dans un cadre multivarié, il sera primordial de modéliser les relations de dépendance pouvant exister entre les différentes variables retenues. De nombreuses méthodes sont envisageables pour la modélisation de la dépendance : l'estimation de copules [MAS], la décomposition de Cholesky dans le cas de corrélation linéaire, l'approche d'Iman Conover pour la corrélation de rang . . . La méthode retenue sera fonction de :

- notre connaissance de la structure de corrélation : l'utilisation de copules permettra de préciser des structures plus fines (choix du type de copule fonction de la dépendance des extrêmes, la symétrie ou la symétrie de celle-ci . . .) alors que, pour les deux autres techniques évoquées, la structure imposée ne dépendra que du niveau de la mesure de corrélation estimée.
- la quantité de données disponibles : l'estimation d'une copule nécessitera un plus grand nombre de données pour estimer assez précisément la structure de dépendance alors que la mesure de corrélation (linéaire, de rang . . .) pourra être estimée à partir d'un échantillon plus réduit.

### **Communication des prix, redéfinition de la solution si nécessaire**

Le prix de la couverture étant à présent connu, il sera communiqué à l'acheteur de protection. Il ne sera pas rare que ce prix dépasse celui que l'acheteur de protection est initialement prêt à payer ou souhaite payer. Les paramètres de la solution proposée (seuil de déclenchement, niveau d'indemnisation . . .) devront alors être revus et les différentes étapes précédentes répétées jusqu'à ce que soit trouvée la solution qui conviendra à l'utilisateur final en terme de niveau de couverture et de prix. Comme nous l'avons précédemment souligné, la compréhension de l'utilisateur final est un point essentiel et un élément décisif dans la souscription d'un produit indicial.

Les différentes étapes de la méthode sont schématiquement résumées dans le graphique ci-dessous.



**Figure 9.1:** Schéma récapitulatif de la démarche générale envisagée pour la conception de couvertures indicielles multirisques

## Quatrième partie

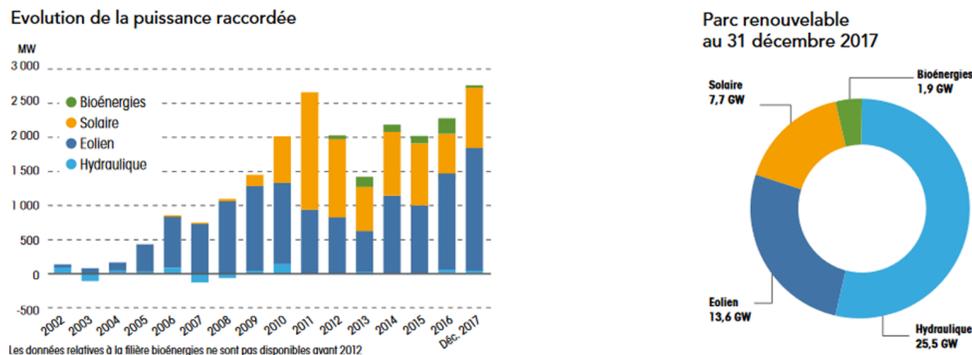
# EXEMPLE D'APPLICATION POUR LE SECTEUR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

*Nous illustrerons dans ce chapitre les différentes notions et méthodes évoquées dans les premières parties du présent mémoire. Nous choisissons de travailler sur le cas d'un portefeuille d'énergies renouvelables d'un groupe composé de centrales éoliennes et photovoltaïque. L'activité de ce groupe est donc sensible (entre autres) à la fois aux conditions de vent et d'ensoleillement.*

# Chapitre 10

## Introduction

Comme nous le soulignons dans l'introduction de ce mémoire, les changements climatiques sont aujourd'hui avérés et reconnus par la communauté scientifique. Parmi les causes anthropiques de ces changements, les émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote, ozone . . .) influent fortement sur le réchauffement climatique. Ces émissions résultent (tout comme la pollution de l'air) majoritairement du système énergétique actuel reposant sur l'utilisation d'énergies fossiles. Face au défi posé à l'Homme par ces changements climatiques, les énergies renouvelables apparaissent aujourd'hui comme une des alternatives crédibles permettant de réduire les effets négatifs de notre modèle énergétique sur notre environnement. Si la part dans les différentes sources de production d'électricité renouvelable n'a cessé de croître ces dernières années, le développement de ces moyens de production continue à être une priorité pour les pouvoirs publics. Ainsi, l'Union Européenne s'est fixée comme objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40% (relativement aux niveaux de 1990) et porter la part des énergies renouvelables à au moins 27%<sup>1</sup> à l'horizon 2030. Si la France a pris du retard sur ces objectifs fixés en janvier 2008 de 23% d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique du pays à l'horizon 2020 (et il sera sûrement difficile de le rattraper d'ici là ; 18,4% en 2017<sup>2</sup>), le Parlement a adopté en 2015 une loi relative à la transition énergétique fixant à 32% la part de consommation devant être couverte en 2030<sup>3</sup>.



**Figure 10.1:** Évolution de la puissance raccordée au réseau français à gauche : on observe une hausse importante du solaire et de l'éolien depuis le début des années 2000. Répartition du parc renouvelable français au 31 décembre 2017 à droite, l'hydraulique représente encore plus de la moitié du parc renouvelable (source : RTE - Panorama de l'électricité renouvelable en 2017)

1. [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_fr)
2. [http://www.rte-france.com/sites/default/files/panorama\\_enr\\_2017.pdf](http://www.rte-france.com/sites/default/files/panorama_enr_2017.pdf)
3. <http://www.enr.fr/editorial/65/Les-enjeux-pour-la-France>

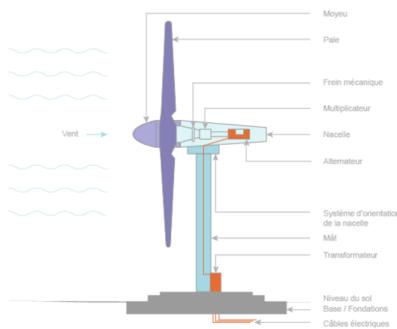
Comme nous pouvons le voir ci-dessus, les filières les plus représentées dans le parc renouvelable Français sont, par ordre d'importance, l'hydraulique, l'éolien et le solaire. Nous nous concentrons par la suite sur la production d'électricité éolienne et photovoltaïque ; ces sources d'énergie sont qualifiées d'intermittentes dans le sens où elles sont disponibles en discontinu à des niveaux variables et dépendent grandement des conditions météorologiques. Encore négligeables au début des années 2000, ces filières connaissent depuis quelques années un développement rapide qui s'explique par les progrès technologiques réalisés et les dispositifs de soutien que les pouvoirs publics ont mis en place comme le souligne [FG11] dans le cas de l'éolien.

### Rappels sur les notions d'énergie et de puissance

La puissance d'un moyen de production mesure sa capacité à délivrer une quantité d'énergie ; l'unité de puissance est le watt (W). L'énergie est elle mesurée en wattheure (Wh) ; 1 Wh correspond à l'énergie produite par un moyen de production d'une puissance de 1 W pendant une durée d'une heure.<sup>4</sup> La puissance nominale (ou installée) d'un moyen de production correspond à sa puissance maximale théorique. Dans le cas de l'énergie solaire photovoltaïque, on parle de puissance crête ; celle-ci correspond à la puissance nominale d'une cellule photovoltaïque dans des conditions standards d'ensoleillement ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) et de températures (cellule à  $25^\circ\text{C}$ ) et est mesurée en watt crête.

### L'énergie éolienne

Les éoliennes utilisent la force motrice du vent pour produire de l'énergie. Le vent (qui correspond au déplacement de masse d'air dans l'atmosphère) sont le résultat du réchauffement inégal de la surface terrestre du au rayonnement solaire (créant différentes zones de températures et de pression). Sous l'effet du vent sur les pales qui le composent, le rotor de l'éolienne entre en rotation. L'énergie cinétique du vent est alors transformée en énergie électrique.



**Figure 10.2:** Schéma explicatif du fonctionnement d'une éolienne  
(source : Connaissance des Énergies 2013)

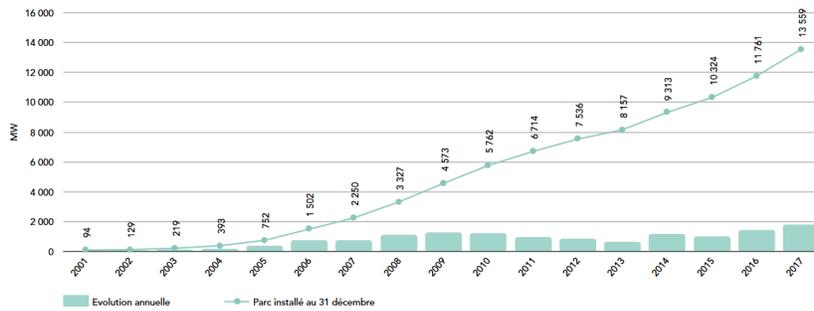
Si leur développement a été freiné jusqu'au début des années 1990 par des facteurs techniques, économiques et politiques [FG11], la production éolienne n'a cessé de croître depuis le début du millénaire comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessous. Cela s'explique en premier lieu par le développement du parc éolien ; la puissance installée a ainsi été multipliée par plus de 100 depuis 2000 pour atteindre quasiment 14 000 MW en 2017 expliquant l'évolution à la hausse de la production. La production d'énergie éolienne atteint 24 TWh en 2017 aidée par des conditions météorologiques favorables sur l'année.<sup>5</sup>

4. <http://bilan-electrique-2017.rte-france.com/production/le-parc-de-production-national/>

5. <http://bilan-electrique-2017.rte-france.com/production/23-eolien>



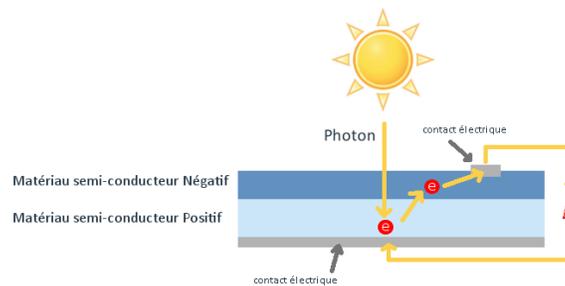
**Figure 10.3:** Évolution à la hausse de la puissance éolienne raccordée au réseau français de 2001 à 2017 (source : bilan électrique 2017 RTE)



**Figure 10.4:** Production éolienne française en forte hausse depuis le début des années 2000 (source : bilan électrique 2017 RTE)

### Énergie solaire photovoltaïque

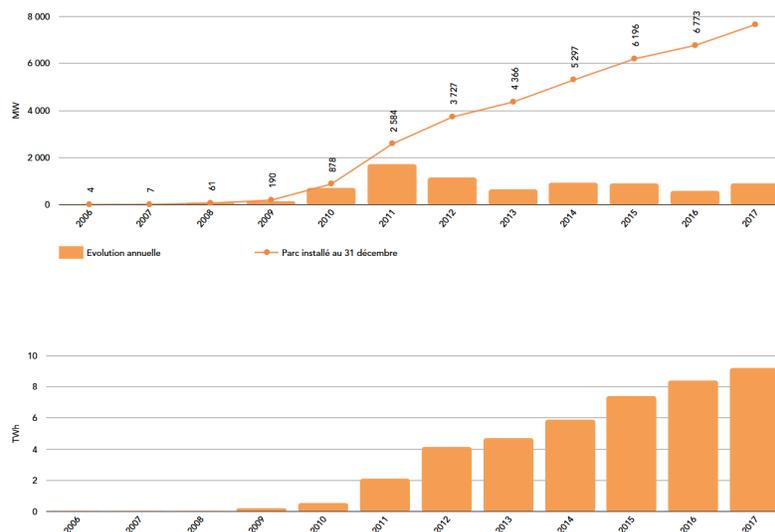
On parle d'énergie solaire photovoltaïque pour qualifier l'électricité produite au moyen de cellules photovoltaïques qui sont exposées au rayonnement solaire (énergie propagée sous forme de rayonnement électromagnétique issue de la fusion du noyau solaire). Ce phénomène est qualifié d'effet photovoltaïque ; l'électricité est schématiquement produite par le transfert d'énergie d'un photon (se heurtant à un semi conducteur) aux électrons (entourant l'atome de ce semi-conducteur) qui sont "mis en mouvement" et produisent ainsi un courant électrique.<sup>6</sup>



**Figure 10.5:** Schéma de coupe d'une cellule illustrant la production d'électricité à partir de l'énergie solaire (source : Engie)

6. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>

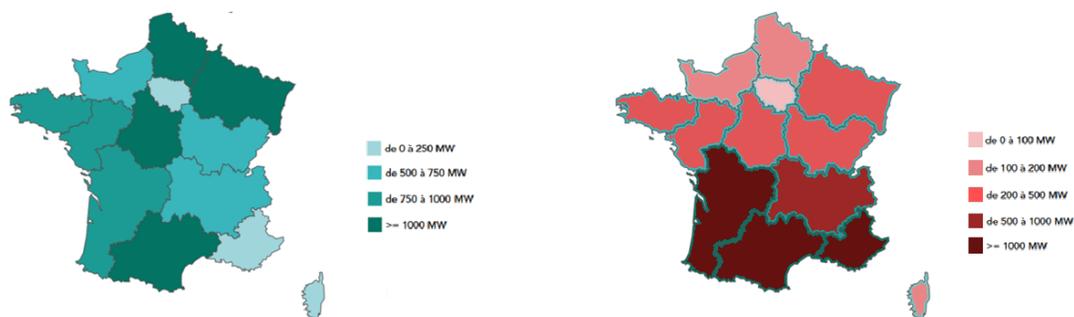
Si le photovoltaïque a connu un premier essor au milieu du vingtième siècle grâce aux recherches liées à l'industrie spatiale (approvisionnement en énergie des objets envoyés dans l'espace), la réduction progressive du coût des cellules photovoltaïques et les problématiques énergétiques liées aux changements climatiques ont contribué à la démocratisation de leur usage depuis quelques dizaines d'années.<sup>7</sup> À l'image de la capacité du parc éolien installé, le parc solaire connaît une forte progression ces dernières années. La production solaire française est, de fait, en forte hausse depuis les années 2000 comme on peut l'observer dans le graphique ci-dessous.



**Figure 10.6:** Évolution à la hausse de la puissance solaire raccordée au réseau français (en haut) et de la production solaire depuis 2006. La 1ère atteint 7660 MW en 2017. Valeur record en 2017 pour la 2nde liée aux bonnes conditions météorologiques et à la hausse de la 1ère (source : bilan électrique 2017 RTE)

### Distribution régionale des parcs solaire photovoltaïque et éolien français

Comme cela est souligné dans le bilan électrique RTE, le développement régional contrasté des filières éoliennes et solaires s'expliquent par les aspects climatiques du territoire (régime de vent, activité solaire), les contraintes environnementales et la volonté politique au niveau local.



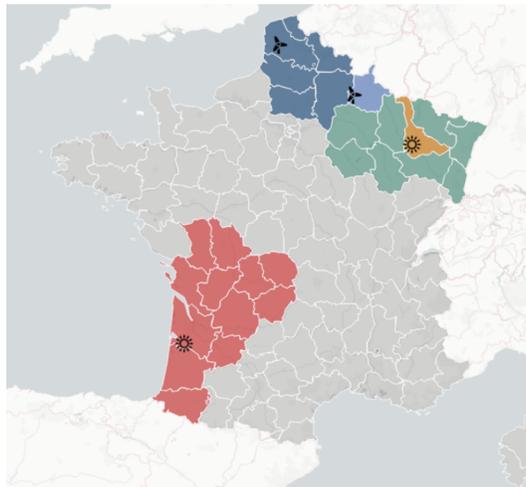
**Figure 10.7:** Capacités solaires (à g.) et éoliennes (à d.) installées dans les régions françaises. Trois de ces dernières (Nouvelle-Aquitaine, Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur) disposent d'un parc de production solaire supérieur à 1000 MW et deux (Grand-Est et Hauts-de-France) d'un parc de production éolien supérieur à 3000 MW. (source : bilan électrique 2017 RTE)

7. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers>

## Contexte

Nous considérons dans la suite l'exemple d'un producteur d'énergies renouvelables qui possède des fermes solaires et éoliennes en France. Cet exemple a pour seule finalité d'illustrer certaines des méthodes et notions décrites dans les précédentes parties de ce mémoire. Elle représente néanmoins une réalité dans le monde de l'énergie, avec des acteurs souvent présents sur ces deux segments. Nous restreindrons volontairement à deux le nombre de fermes pour chacun des moyens de production afin de simplifier l'étude

1. Deux des centrales éoliennes (déjà raccordées au réseau ou en projet) françaises les plus importantes :
  - le parc éolien de Fruges inauguré en 2008, composé de 70 éoliennes (de type Enercon 70) installées sur 16 sites dans le canton de Fruges<sup>8</sup> (région Hauts-de-France) et d'une capacité totale de 140MW.
  - le projet éolien du Mont des Quatre Faux qui devrait être composé de 63 éoliennes hautes de 200 m de puissance nominale comprise entre 3.6 et 5 MW (pour un total entre 227 et 315 MW) qui seront installées sur 5000 ha dans le département des Ardennes (région Grand-Est). L'autorisation pour ce projet a été délivrée par le préfet des Ardennes en 2017<sup>9</sup>
2. Deux des plus grands parcs solaires photovoltaïques français :
  - la centrale photovoltaïque de Toul-Rosières située en Meurthe-et-Moselle (région Grand Est) inaugurée en 2012 et qui était alors la plus grande centrale photovoltaïque d'Europe (1.4 millions de panneaux photovoltaïques installés sur 120 ha pour une puissance installée de 115 MWc)<sup>10</sup>.
  - la centrale photovoltaïque de Cestas située en Gironde (région Nouvelle-Aquitaine) et qui, lors de son inauguration en décembre 2015 durant la COP21, devenait à son tour la plus puissante d'Europe (près d'un million de modules répartis sur 250 ha pour une capacité de 300 MWc)<sup>11</sup>.



**Figure 10.8:** Localisations des parcs de production retenus et nouvelles régions correspondantes coloriées.

8. <http://www.ostwind.fr/nos-projets/projets-mis-en-service/parcs-eoliens-du-canton-de-fruges/>

9. <http://www.parc-eolien-mont-des-quatre-faux.fr/2017/06/26/>

10. [https://www.edf-energies-nouvelles.com/wp-content/uploads/dp\\_1112\\_toul-rosieres\\_fr.pdf](https://www.edf-energies-nouvelles.com/wp-content/uploads/dp_1112_toul-rosieres_fr.pdf)

11. <https://www.connaissancedesenergies.org/>

# Chapitre 11

## Conception du produit de couverture indicielle multirisques

### 11.1 Identification des risques

Comme cela est souligné dans [FG11] dans le cas de l'énergie éolienne, le secteur des énergies éolienne et solaire est exposé à des incertitudes de différentes natures :

Des **risques techniques** liés à l'usure et/ou la destruction des installations (aérogénérateurs et modules photovoltaïques). Il est possible de souscrire à des contrats d'assurance dommage (indemnitaire) afin de couvrir ces différents risques.

Des **incertitudes financières liées aux volumes produits d'électricité et aux fluctuations des prix** auxquels le producteur revendra son électricité. Afin d'inciter le développement de ces nouveaux moyens de production d'énergie, des dispositifs de soutien des filières éolienne et photovoltaïque ont été mis en place par les pouvoirs publics. Ces dispositifs font appel à différents mécanismes suivant la nature et la puissance de l'installation :

1. Pour l'énergie solaire<sup>1</sup> :
  - des tarifs d'achat en guichet ouvert ajustés chaque trimestre pour les installations sur bâtiments de moins de 100 kWc.
  - des appels d'offres pour les installations de plus de 100 kWc avec un soutien attribué sous forme de tarif d'achat jusqu'à 500 kWc et des compléments de rémunération au delà.
2. Pour l'éolien<sup>2</sup> : à compter du premier janvier 2016, le soutien est aussi attribué sous forme de complément de rémunération.

Le dispositif de complément de rémunération a été mis en place par la loi relative à la transition énergétique. Dans ce mécanisme où les producteurs d'énergie commercialisent directement leur énergie sur les marchés, une prime vient compenser l'écart potentiel entre le prix de marché de l'électricité et un prix de référence fixé par la puissance publique dans le cadre d'un arrêté tarifaire ou par le producteur d'énergie dans le cas d'une procédure de mise en concurrence<sup>3</sup>. Dans le cas de l'éolien, les modalités de rémunérations sont fixés par l'arrêté tarifaire du 13 décembre 2016 qui prévoit des contrats de 15 ans et un niveau de tarif à 8.2 c€/kWh pendant 10 ans puis entre 2.8 et 8.2 c€/kWh pendant 5 ans selon les sites<sup>2</sup>.

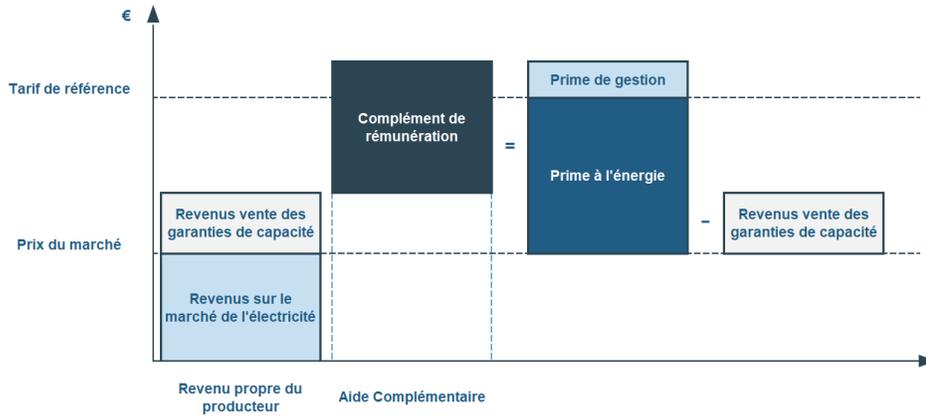
---

1. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/solaire>

2. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/eolien-terrestre>

3. <http://www.cre.fr/operateurs/producteurs/complements-de-remuneration>

Dans le cas du solaire, le prix de référence est déterminé par le candidat à l'appel d'offre lors de la remise de son dossier et est ensuite indexé sur toute la durée du contrat (application d'un coefficient multiplicateur à chaque date d'anniversaire de la prise d'effet du contrat)<sup>4</sup>. Dans le cas de la centrale de Cestas, l'électricité était, au moins jusque fin 2016, revendue à EDF au prix de 10.5c€/kWh.<sup>5</sup>



**Figure 11.1:** Schéma illustratif du fonctionnement du mécanisme de complément de rémunération (depuis Enercoop)

Ces mécanismes permettent de sécuriser les prix de vente de l'électricité que produisent les centrales solaires et éoliennes du producteur, cependant, les incertitudes financières portent aussi sur les **volumes de production** d'électricité solaire et éolienne. En effet, l'énergie solaire ou éolienne produite à un instant dépend directement des conditions de vent et d'ensoleillement. Ces variations se répercutent sur les niveaux de production annuelle et donc infine sur les revenus des propriétaires des parcs. Nous chercherons par la suite à concevoir une solution de couverture contre les événements météorologiques défavorables à la production éolienne (pas assez ou trop de vent) et solaire (pas assez d'ensoleillement) afin de garantir un niveau donné de production aux propriétaires des parcs.

Nous considérons que les événements décrits supra correspondent respectivement aux vitesses de vent (même si toutes les variations d'orientation du vent ne sont pas captées, un dispositif présent sur la nacelle permet d'orienter celle-ci) et à l'ensoleillement perpendiculaire sur chacun des sites retenus. En réalité, La production solaire varie aussi légèrement en fonction de la température mais nous considérons que celle-ci est constante dans la suite.

De même, afin de simplifier le contexte et la visualisation des résultats, les localisations retenues consisteront, pour chacun des parcs, en un unique point. Comme nous l'expliquons ci-dessous, nous utiliserons la base de données *MERRA-2* (Modern Era Reanalysis for Research and Applications) qui est organisée en forme de grilles de latitudes et longitudes; nous retiendrons alors les points de grilles respectivement les plus près de chacun des sites de production listés ci-dessus (cf. en Annexe pour le détail de ces points).

Cette base de donnée correspond à la réanalyse atmosphérique de la NASA et est issue d'une reprise de toutes les données météorologiques de diverses sources globales ou locales sur trois décennies. Cette réanalyse commence en 1980 et se poursuit jusqu'au aujourd'hui. La résolution de la grille horizontale est de 0.625° en longitude et 0.5° en latitude (ce qui correspond respectivement environ à 50 km et 45 km). Les conditions évoquées précédemment sont vérifiées par les données et leur source.

4. :<http://www.cre.fr>

5. :[www.oxygn.fr](http://www.oxygn.fr)

## 11.2 Définition des indices

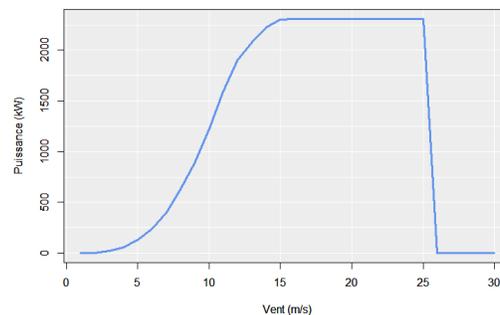
Nous avons à présent identifier quelles étaient les grandeurs météorologiques susceptibles d'influer sur les niveaux de productions des différents parcs de production, nous cherchons désormais à estimer quels indices seraient les plus à même de mesurer les variations de productions annuels en fonction de ces grandeurs météorologiques.

### 11.2.1 Production éolienne annuelle

La production d'énergie éolienne peut être représentée à l'aide d'une courbe de puissance ; cette courbe renseigne la puissance instantanée de sortie d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent instantanée. Chaque type d'éolienne dispose de sa propre courbe de puissance : cette dernière est, en général, fournie par le fabricant de l'éolienne.

Il est important de noter que cette fonction n'est en rien linéaire ; la puissance est proportionnelle à l'énergie cinétique qui est proportionnelle à la vitesse au cube (s'exprime à partir de la vitesse au carré et de la masse). Dès lors nous commettrons des erreurs dans l'estimations de l'électricité produite en utilisant les données météorologiques à disposition qui correspondent à des relevés moyennés sur des intervalles de temps réguliers (coubre localement convexe puis localement concave jusqu'à la vitesse d'arrêt ; l'utilisation de vitesses moyennes conduit à sous-estimer avant le point d'inflexion puis sur estimer la production [FG11]). Les données de vent que nous choisissons de faire passer à travers ces courbes de puissance correspondront aux données de vent disponibles à la granularité temporelle la plus fine (horaire dans notre cas) ; nous agrégerons ensuite les séries ainsi obtenues afin d'estimer le niveau de production annuel.

Nous cherchons alors à identifier quelles courbes de puissance doivent être utilisées dans le cadre de notre étude. Le parc de Fruges est équipé d'éolienne de type Enercon E70 de puissance nominale de 2.3 MW, et dont la nacelle est haute de 85 m.<sup>6</sup> . Nous observons ci-dessous la courbe de puissance associée à ces éoliennes. Concernant le futur site du Mont des 4 Faux, le type d'éolienne reste encore à déterminer selon Windvision (groupe belge à l'initiative du projet)<sup>7</sup>. Nous considérerons que celles-ci seront aussi de type Enercon E70 afin de simplifier l'étude. Nous choisissons arbitrairement que ce parc dispose de 120 de ces éoliennes de 2.3 MW afin de rester cohérent avec la puissance installée en prévision.



**Figure 11.2:** Courbe de puissance de l'éolienne Enercon E70 (depuis "Les éoliennes Enercon : La gamme")

6. [http://vttsi.free.fr/Pages/Page\\_Pratique/Infos\\_Tourisme/Infos\\_Eoliennes\\_General/documents/ENE\\_Produktuebersicht\\_franz\\_0309.pdf](http://vttsi.free.fr/Pages/Page_Pratique/Infos_Tourisme/Infos_Eoliennes_General/documents/ENE_Produktuebersicht_franz_0309.pdf)

7. [http://www.windvision.com/fr/catalogue\\_projets-en-france\\_216.aspx](http://www.windvision.com/fr/catalogue_projets-en-france_216.aspx)

Comme nous le disions ci-dessus, le moyeu du modèle d'éolienne considéré est haut de 85 m ; les données de vent *MERRA-2* au pas de temps le plus fin dont nous disposons sont les moyennes horaires de vitesse de vent aux altitudes 2 m, 10 m et 50 m. Les vitesses de vent mesurées en un point donné varient souvent avec l'altitude (cisaillement vertical du vent). Nous travaillerons avec les données à l'altitude 50 m que nous extrapolerons à l'altitude désirée grâce à la formule proposée dans [AJ05] :

$$W_{h_2} = W_{h_1} \times \frac{\ln(\frac{h_2}{\alpha})}{\ln(\frac{h_1}{\alpha})} \quad (11.1)$$

- $W_{h_1}$  et  $W_{h_2}$  correspondent aux vitesses moyennes horaires de vent aux altitudes  $h_1$  et  $h_2$
- $\alpha$  correspond à la longueur de rugosité

La longueur de rugosité est fonction des éléments de surface au niveau du site considéré. Au vu des caractéristiques topographiques des zones d'études et conseillés par des ingénieurs météorologues, nous fixons les valeurs de ce coefficient à 0.5 pour le parc de Fruges et 0.1 pour celui du Mont des 4 Faux.

En notant  $f_{pc}$  la fonction correspondant à la courbe de puissance ci-dessus, l'indice de production sera donné, pour l'année  $y$  et le parc  $i$ , par la formule :

$$I_{y,i}^{eol} = n_i \times \sum_{d \in y} f_{pc}(W_{d,85m}) \quad (11.2)$$

- $I_{y,i}^{eol}$  correspond à la production éolienne annuelle du parc  $i$  sur l'année  $y$  mesurée en kWh/an.
- $n_i$  correspond au nombre d'éoliennes dont dispose le parc  $i$ .
- $W_{d,i}$  correspond à la vitesse moyenne horaire mesurée sur l'heure  $d$  en m/s.

Considérer que la production du parc correspond à la somme des productions des éoliennes prises individuellement est une hypothèse forte ; dans le sillage des éoliennes, l'intensité des turbulences est augmentée et la vitesse du vent diminuée<sup>8</sup>. Des modèles permettant d'estimer l'influence des éoliennes sur leur environnement existent, le lecteur intéressé pourra se référer à [CAN+14].

## 11.2.2 Production photovoltaïque annuelle

Comme nous l'avons précisé précédemment, nous estimerons la production photovoltaïque annuelle seulement en fonction de l'ensoleillement perpendiculaire (température de la cellule photovoltaïque constante).

L'ensoleillement perpendiculaire mesure l'énergie reçue par une surface d'un mètre carré normale au rayonnement ; il ne correspond donc pas au rayonnement reçu par les panneaux solaires qui ne le sont pas. Cette énergie dépendra de l'orientation (point cardinal) et de l'inclinaison des panneaux photovoltaïques. En France, et plus généralement dans l'hémisphère Nord, l'orientation optimale pour les panneaux photovoltaïques sera plein Sud. Pour les latitudes françaises, qui sont comprises approximativement entre 42° et 51° Nord, l'inclinaison optimale par rapport à l'horizontale varie entre 30° et 36°<sup>9</sup>.

---

8. :<https://eolienne.f4jr.org/sillage>

9. :<http://www.photovoltaique.guidenr.fr>

À partir des données horaires d'ensoleillement perpendiculaire, nous obtiendrons le cumul d'ensoleillement sur l'année (puissance photovoltaïque posée comme fonction linéaire de l'ensoleillement) par la formule :

$$E_{y,i}^{incliné} = \lambda_i \times \sum_{d \in y} E_{d,i}^{perpendiculaire} \quad (11.3)$$

- $E_{y,i}^{incliné}$  correspond à la somme de l'ensoleillement horaire reçu par le panneau photovoltaïque sur l'année  $y$  mesurée en kWh/m<sup>2</sup>/an.
- $\lambda_i$  correspond à un coefficient de conversion
- $E_{d,i}^{perpendiculaire}$  correspond à l'ensoleillement perpendiculaire sur l'heure  $d$  mesurée en kWh/m<sup>2</sup>/h.

Nous estimerons par la suite que les panneaux photovoltaïques des différents parcs sont orientés et inclinés de façon optimale (et nous posons  $\lambda_i = 1$ ). Il existe sinon des matrices d'orientation permettant d'obtenir les valeurs du coefficient  $\lambda_i$  selon l'inclinaison par rapport à l'horizontale et l'orientation du panneau.

Nous faisons par la suite l'hypothèse que les deux parcs photovoltaïques disposent du même type d'installation. La production annuelle d'électricité des différents parcs photovoltaïques sera calculée par la formule simplifiée :

$$I_{y,i}^{sol} = E_i^{incliné} \times Pc_i \times coef f_i \quad (11.4)$$

- $I_{y,i}^{sol}$  est la production annuelle photovoltaïque du parc  $i$  sur l'année  $y$  mesurée en kWh/an.
- $E_{y,i}$  correspond à la somme de l'ensoleillement horaire reçu par le panneau photovoltaïque sur une année et est mesurée en kWh/m<sup>2</sup>/an.
- $Pc_i$  correspond à la puissance crête du parc  $i$  en kWc.
- $coef f_{y,i}$  correspond à un ratio de performance.

Ce ratio de performance correspond aux pertes dues à l'installation (système électrique, températures ...) et sa valeur se situe en général entre 0,7 et 0,8 pour des installations classiques correctement conçues<sup>10</sup>. Nous choisirons arbitrairement de le fixer à 0.75.

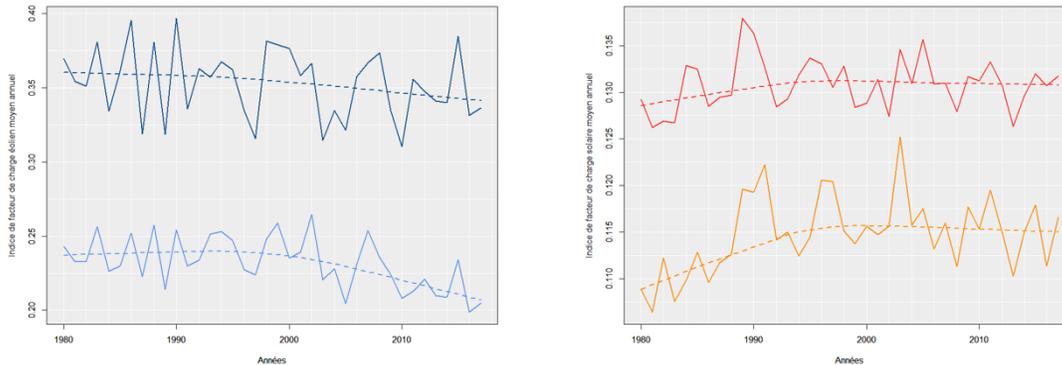
Comme précisé plus haut, la puissance crête retenue est de 115 MWc dans le cas du parc de Toul-Rosières et de 300 MWc pour le parc de Cestas.

---

10. <https://www.edfenr.com/lexique/ratio-de-performance/>

## 11.3 Analyse des risques

Les indices identifiés reflètent le niveau de production des fermes éoliennes et solaires retenues pour l'exemple. Les risques météorologiques que l'on souhaite couvrir correspondent à des pertes de production et donc à des valeurs basses de ces indices. Nous étudierons ci-dessous les variations historiques de ces différents indices. Nous diviserons les indices annuels obtenus précédemment par les niveaux théoriques optimaux de production (fonctionnement de l'unité de production sur l'année à la puissance nominale : 2.3 MW dans le cas de l'éolienne et 1 MWc dans le cas du photovoltaïque). Le rapport obtenu, exprimé en pourcentage, est appelé facteur de charge et renseigne la rentabilité de l'unité de production (généralement sur une année).



**Figure 11.3:** Facteurs de charge historiques modélisés sur les différents sites et tendances correspondantes (en pointillés) estimées par régression locale loess avec une fenêtre de lissage de 0.75. Les séries de gauches correspondent aux facteurs de charge moyens annuels associés au parc éoliens de Fruges (bleu foncé) et du Mont des 4 Faux (bleu clair); celles de droite à ceux des centrales photovoltaïques de Cestas (rouge) et de Toul (orange).

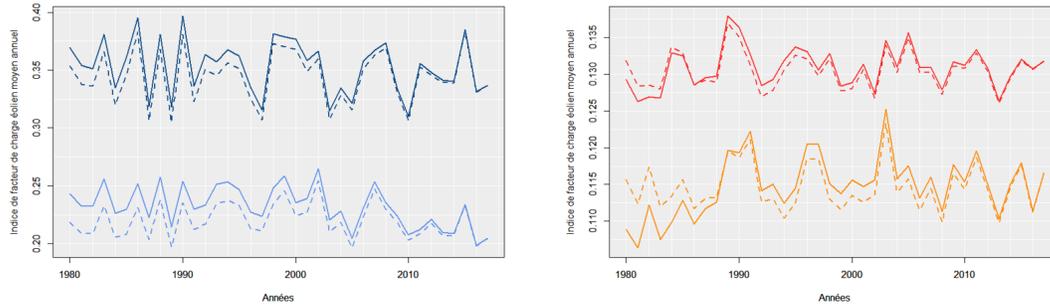
Nous observons selon les cas des comportements de hausse ou de baisse au long terme qui semblent indiquer la présence d'une tendance dans les données météorologiques sous-jacentes. Chacune de ces tendances devra être estimée; la non prise en compte de ces dernières dans la modélisation de nos indices impliquerait en effet, au long terme, une sous-tarification (tendance à la baisse) ou une sur-tarification (tendance haussière).

Nous donnons ci-dessous quelques indicateurs de dispersion des séries historiques (données non *détrendées*). Comme précisé précédemment, les risques météorologiques identifiés se réaliseront en cas de valeurs basses de nos indices. La dernière colonne renseigne l'écart entre la médiane et le premier quartile relativement à la médiane; cet indicateur nous donnera une estimation de la variabilité annuelle des séries retenues. Les variabilités annuelles des productions éoliennes estimées sont plus importantes que celles des productions solaires.

Site	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.	Sd.	(q0,5-q0,5)/q0,5
Fruges	0,310	0,335	0,356	0,353	0,369	0,397	0,024	0,061
Mont des 4 Faux	0,199	0,221	0,232	0,232	0,248	0,265	0,018	0,045
Cestas	0,126	0,129	0,131	0,131	0,133	0,138	0,003	0,015
Toul	0,106	0,112	0,115	0,115	0,117	0,125	0,004	0,024

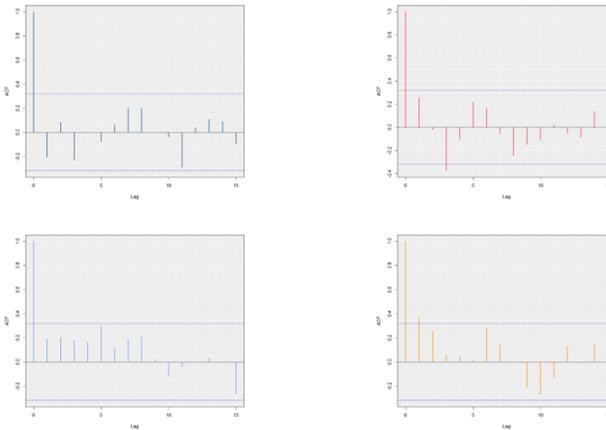
**Figure 11.4:** Quartiles, médiane, moyenne, écart-type, écart de la médiane au premier quartile relativement à la médiane des séries historiques

Ayant graphiquement identifié la présence d'une tendance dans les données sous-jacentes (hypothèse validée par l'expertise climatologique), il sera nécessaire en premier lieu de *détrender* les données météorologiques sous-jacentes. Comme nous le précisons en 6.1, il sera important de se soucier des effets de saisonnalité dans l'estimation de la tendance. La solution relativement simple que nous retiendrons consistera à estimer séparément 12 tendances sur les différents mois de l'année et à interpoler ces tendances. Au vu de l'historique de données relativement important dont nous disposons et de la non-connaissance a priori de la forme des tendances sous-jacentes, nous opterons pour une méthode d'estimation paramétrique. La tendance sera estimée sur les données météorologiques sous-jacentes par régression Loess ; nous retiendrons une fenêtre de 20 ans (équivalente à un span d'environ 0.53) et un degré de polynôme égal à 1. Nous pourrons visualiser sur les graphiques ci-dessous l'historique des facteurs de charge historiques calculés sur les données météorologiques *détrendées* comme décrit.



**Figure 11.5:** Facteurs de charge historiques (en trait plein), détrendé (en pointillé) pour les parcs de Fruges (bleu foncé), du Mont des 4 Faux (bleu clair), de Cestas (rouge) et de Toul (orange)

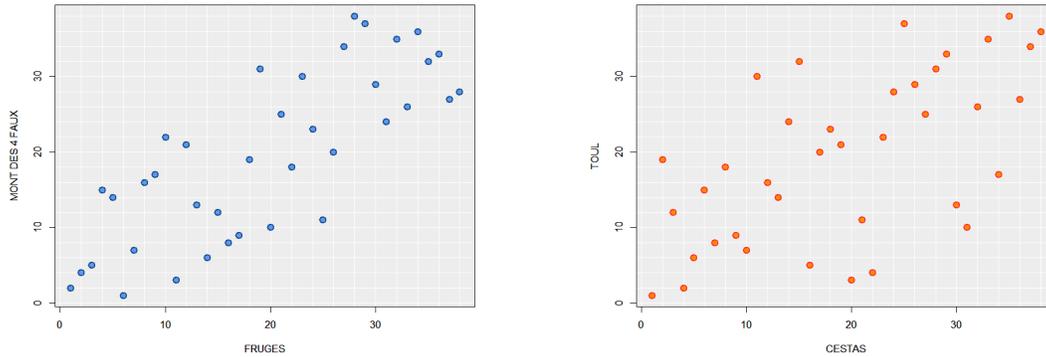
Nous nous intéressons à présent aux autocorrélations de ces différentes séries détrendées (que nous considérons stationnaires).



**Figure 11.6:** Autocorrélogrammes (de gauche à droite et bas en haut) des séries annuelles associées au parc de Fruges, de Cestas, du Mont des 4 Faux et de Toul pour des lag entre 0 et 15. Les lignes en pointillés représentent les intervalles de confiance à 95%.

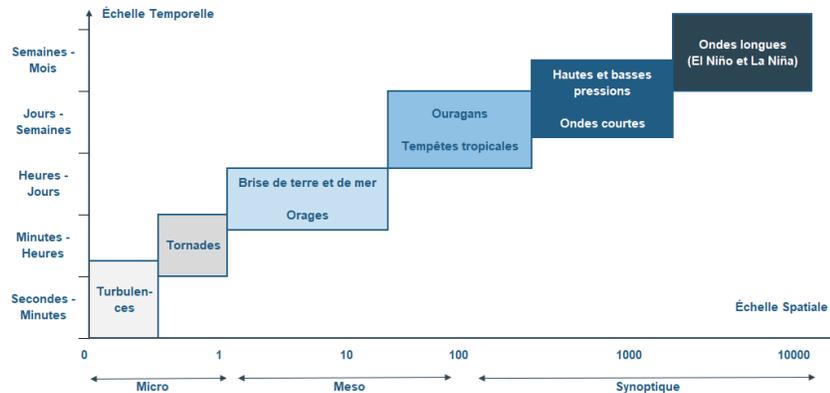
Au vu des autocorrélogrammes ci-dessus, nous décidons de poser l'hypothèse d'indépendance temporelle de ces séries annuelles. Cette hypothèse est validée par les experts météorologues (selon eux, les longueurs d'onde des phénomènes atmosphériques à moyenne altitude influençant sur le vent et l'ensoleillement sont rarement supérieures à 1 mois) et est sous-jacente à la plupart des méthodes de tarification évoquées précédemment dans le mémoire ; elle semble ici réaliste.

Après avoir étudié la corrélation des séries *détrendées* à des versions décalées d'elles même, nous nous intéressons à présent à l'étude des corrélations existant entre elles. Relativement à l'échelle des phénomènes météorologiques considérés (vitesse de vent et ensoleillement annuel), les localisations sont géographiquement proches. On s'attend ainsi à observer une relation de dépendance (spatiale) entre les séries correspondant aux mêmes grandeurs météorologiques ; ceci semble confirmé par l'étude croisée des statistiques de rang des séries d'intérêt.



**Figure 11.7:** *Rank-rank plot* des séries correspondant aux facteurs de charge historiques éoliens (à gauche) et photovoltaïques (à droite) calculées sur données *détrendées*

La structure de dépendance semble relativement symétrique dans le cas du photovoltaïque et de l'éolien. Ces corrélations identifiées à l'aide de prospection graphique semblent confirmées par les tests d'indépendance de Kendall entre ces différentes séries ; au niveau 5%, les statistiques de tests (et les *p-value* correspondantes) obtenues conduisent à rejeter l'hypothèse nulle d'indépendance (*p-values* toutes largement inférieures à 5%) entre les indices correspondant à une même grandeur météorologique. Cette corrélation ne semble cependant pas significative dans le cas des séries correspondant à des grandeurs météorologiques différentes prises deux à deux. Nous estimions a priori qu'une corrélation pouvait exister entre ces grandeurs prises à un instant  $t$  (le soleil est le moteur commun de ces processus sur des échelles étendues ; zone de basse pression-vent fort et nébulosité alors que haute pression-nébulosité et vent plus importants) mais, à l'étude des *rank-rank plot* en Annexe G.3 et des résultats des tests de corrélation, cette dépendance ne semble pas se retrouver au niveau de nos indices annuels. Nous faisons l'hypothèse par la suite que ces séries sont indépendantes deux à deux.



**Figure 11.8:** Échelle spatiale (en km) et temporelle pour certains phénomènes météorologiques (depuis <http://www.meteo.psu.edu>)

## 11.4 Agrégation des risques

Chacune des variables individuelles retenues à ce stade mesure le rendement énergétique du parc considéré (même variables d'intérêts pour différentes localisations). Comme discuté en introduction, la couverture envisagée aura pour finalité d'assurer un niveau donné aux producteurs d'électricité renouvelable. Plus concrètement, si le niveau de production tombe sous une valeur donnée, le producteur recevra de la part du preneur de risque une indemnisation censée correspondre à la perte entraînée par la chute de la production sous une valeur seuil (valeur d'entrée). Afin de couvrir cette baisse de l'indice, nous faisons le choix de retenir comme couverture l'achat d'un Put (*spread* car on précise une valeur de sortie). La fonction *payoff* d'un tel produit indiciel n'est pas linéaire en fonction du sous jacent (du fait du seuil). Il sera donc important d'agréger non pas les indices individuels de production mais, les indemnisations correspondantes afin d'assurer l'égalité entre les pertes des différents centrales de productions d'énergies et le montant agrégé. L'importance relative de chacun de ces indices individuels dépendra alors de la puissance installée du parc considéré et du prix de l'électricité de la source de production.

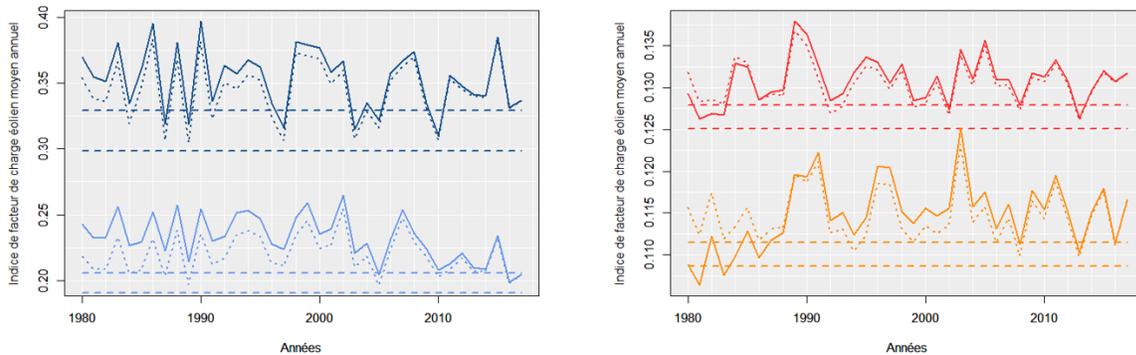
N'ayant pas de contrainte à ce niveau, les valeurs d'entrée (*Strike*) et de sortie (*Floor*) sont définies à partir de considérations statistiques sur 10 ans (historique réduit afin d'obtenir des valeurs réalistes en cas de modification au long terme du comportement des grandeurs météorologiques sous-jacentes : présence d'une tendance, hétéroscédasticité . . .) et la limite basse (valeur de sortie). Quel que soit le parc, nous choisirons arbitrairement de fixer le seuil de déclenchement et les valeurs de sortie aux niveaux  $S_{y,i}$  et  $F_{y,i}$  pour  $i \in \llbracket 1, 4 \rrbracket$  définis comme suit :

$$S_{y,i} = \mu_{y,i} - \frac{\sigma_{y,i} + m_{y,i} - q_{y,i,0.1}}{2} \quad (11.5)$$

$$F_{y,i} = \mu_{y,i} - \frac{3 \cdot \sigma_{y,i} + m_{y,i} - \min_{y,i}}{2} \quad (11.6)$$

- $\mu_{y,i}$  correspond à la moyenne 10 ans de la série de l'indice associé au parc  $i$ .
- $\sigma_{y,i}$  correspond à l'écart-type calculé sur 10 ans de cette même série.
- $m_{y,i}$  correspond à la médiane calculée sur 10 ans.
- $q_{y,i,0.1}$  correspond au premier décile sur 10 ans.
- $\min_{y,i}$  correspond au minimum sur 10 ans.

Les niveaux respectifs de ces seuils pour les différents parcs éoliens et photovoltaïques sont représentés dans les graphiques ci-dessous.



**Figure 11.9:** Facteurs de charge mensuels modélisés en (traits pleins), détrendés et structures retenues (pointillés) pour les parcs de Fruges (bleu foncé), du Mont des 4 Faux (bleu clair), de Cestas (rouge) et de Toul (orange)

Comme nous le précisons ci-dessus, la pondération retenue pour chacune des localisations dépendra de la puissance installée et de la valeur d'indemnisation par unité de l'indice entre le seuil de référence et la valeur de sortie (couramment appelé *tick*) qui, dans notre cas, correspond au tarif auquel le producteur revend son électricité. En repartant des indices liés aux facteurs de charge précédemment étudiés, les indices individuels transformés avant agrégation seront alors, pour chaque année  $y$ , donnés par la formule :

$$I_{y,i}^{ind} = \min(F_i, \max(0, S_i - I_{y,i})) \times P_i \times c_i \times n_h \quad (11.7)$$

- $I_{y,i}^{ind}$  correspond à l'indemnisation perçue par le propriétaire du parc  $i$  sur l'année  $y$  en €.
- $I_{y,i}$  correspond au facteur de charge modélisé sur l'année  $y$  pour le parc  $i$ .
- $P_i$  correspond à la puissance installée du parc  $i$  mesurée en kW.
- $c_i$  correspond au coût de l'électricité de la source d'énergie associée au parc  $i$  en €/kWh.
- $n_h$  correspond au nombre d'heures sur l'année de couverture en h.

L'indépendance des différentes centrales énergétiques fait que nous sommes dans le cas particulier où le montant de perte agrégée correspond à la somme des pertes individuelles (pas d'aggravation ou de compensation en cas de réalisation simultanée de plusieurs risques individuels). L'indice agrégé qui sera finalement retenu correspondra alors à la perte agrégée et sera simplement obtenu en sommant les indices individuels transformés obtenus ci-dessus. Cet indice sera donc, pour l'année  $y$ , donné par la formule :

$$I_y^{final} = \sum_{i \in \llbracket 1,4 \rrbracket} I_{y,i}^{ind} \quad (11.8)$$

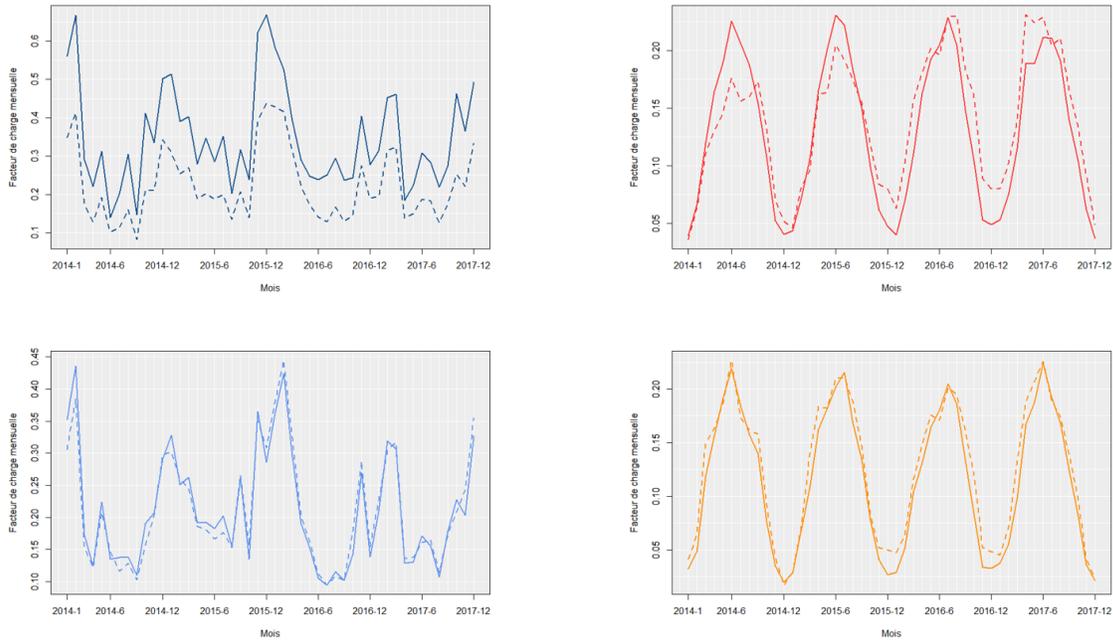
## 11.5 Validation et tarification de la couverture

Nous avons défini l'ensemble des paramètres caractérisant la solution de couverture. Nous chercherons alors à nous assurer de la pertinence de cette dernière avant d'en déterminer le prix.

### Étude du risque de base

Le contexte envisagé ayant été imaginé et défini par nos soins, il ne correspond pas à une demande réelle et nous ne disposons donc logiquement d'aucune donnée de pertes qui pourraient être utilisée dans l'étude du risque de base (comparaison des pertes réelles liées aux risques couverts et des pertes modélisées). Nous ne disposons donc pas non plus des historiques de relevés annuels de production des différents parcs qui pourraient être comparés aux indices de production modélisés. Néanmoins, nous avons accès aux historiques de facteurs de charge régionaux mensuels éoliens et solaires de janvier 2014 à décembre 2017, que RTE met à disposition sur sa plateforme Open Data<sup>11</sup>. Nous comparons alors les facteurs de charge modélisés pour chaque parc aux historiques de la région correspondant. Une telle approche admet de nombreuses limites (étendues géographiques d'une région alors que nous utilisons un unique point de grille pour chaque localisation, diversité des éoliennes ou cellule photovoltaïque au sein de la région ...) mais, comme nous l'avons déjà précisé, la présente application a pour seule vocation d'illustrer les méthodes décrites dans ce mémoire. Nous considérons par la suite que les données régionales correspondent aux relevés mensuels des différents sites. Afin de comparer nos séries sur plus de 4 points (de 2014 à 2017), nous agrégerons mensuellement les indices quotidiens modélisés et comparons les séries mensuelles ; celles-ci sont représentées dans les graphiques ci-dessous.

11. <https://rte-opendata.opendatasoft.com>



**Figure 11.10:** Comparaison des facteurs de charges mensuels réalisés régionaux (pointillés) et modélisés (traits pleins) pour les parcs de Fruges (bleu foncé), du Mont des 4 Faux (bleu clair), de Cestas (rouge) et de Toul (orange)

Les séries de facteur de charge mensuels obtenues sur RTE n'ont été utilisées à aucun moment dans la conception de nos indices ; nous pourrions sereinement utiliser les résultats de la comparaison de ces séries à nos indices modélisés comme mesure de la qualité de nos indices (sans avoir a priori à se soucier d'un risque de sur-apprentissage).

Si l'indice modélisé suit assez bien les variations du facteur de charge mensuel réalisé, nous observons que le premier surestime fortement le second dans le cas de **Fruges**. L'indice ne pourra être utilisé dans l'état ; schématiquement en surestimant la production il sous-estime le risque que l'on souhaite couvrir. Il y a de fortes chances qu'une couverture sur cet indice donne fréquemment lieu à des situations de faux négatifs (le risque se réalise mais est non capté par l'indice sous-jacent). Le risque de base porté par l'acheteur de protection serait alors important. Une solution consistera à "recalibrer" l'indice modélisé (données de vent, coefficient de rugosité, quantité de l'indice acheté par le producteur ...).

Dans le cas de la ferme éolienne du **Mont des 4 faux**, l'indice retenu semble bien suivre le niveau réalisé de production. Le risque modélisé semble correspondre au risque réel que l'on souhaite couvrir. Une solution de couverture construite sur cet indice permettrait a priori d'indemniser l'acheteur de protection si et seulement si le risque couvert se réalise (pas de situations de faux positifs ni de faux négatifs). La construction d'une solution de couverture sur cet indice semble alors pertinente.

On observe que les variations de l'indice retenu pour le parc photovoltaïque de **Cestas** ne suivent pas fidèlement celles de l'indice de référence. On observe, par exemple, que certains pics de productions ne sont pas retranscrits et que, sur les dernières années, la production hivernale est sous-estimée. Cette surestimation du risque impliquera une augmentation du prix de la couverture (indemnisation supérieure aux pertes). Si les variations sont plus fidèlement captées dans le cas de l'indice retenu pour le site de **Toul**, on retrouve cet effet pervers sur les périodes hivernales des dernières années (indice modélisé en dessous des facteurs de charge mensuels réalisés). Cet indice pourra engendrer des situations de faux positifs.

Si les séries historiques étudiées correspondaient réellement aux relevés des compteurs électriques des différents sites, il serait primordial d'identifier les raisons de ces écarts. Une fois celles-ci identifiées, nous ajusterions les indices correspondant avant de les re-comparer aux séries historiques. Ce n'est pas le cas ici (limites liées à l'utilisation de données régionales identifiées précédemment) et nous poursuivrons l'étude avec les indices dans l'état (pas de recalibrage).

## Modélisation des indices et tarification de la couverture

Dans ce paragraphe, nous proposons deux méthodes d'évaluation du niveau de la prime pure associée à la couverture envisagée :

- une approche historique (*Historical Burn Analysis*) à partir des données *détrendées*. Celle-ci ayant déjà été évoquée en 6.2, nous ne re-détaillerons pas les étapes associées.
- une approche basée sur la modélisation directe des indices sous-jacents (calculés sur les données *détrendées*). La distribution jointe (marginale et structure de dépendance) sera estimée paramétriquement.

### Estimation des marginales

Les indices individuels retenus correspondent à la somme de variables aléatoires. L'hypothèse d'indépendance et de stationnarité des données intra-annuelles de vent et d'ensoleillement ne semble ici cependant en rien réaliste ; nous ne sommes pas dans le cadre d'application du *TCL*. Cependant, nous considérons une approche simplifiée de la modélisation des indices individuels et testeront la normalité des facteurs. Nous utiliserons pour cela le test de Shapiro Wilk ; ce test est fréquemment utilisé dans la littérature pour sa puissance (probabilité de rejeter l'hypothèse nulle sachant qu'elle est incorrecte) sur les petits échantillons. Il teste l'hypothèse nulle selon laquelle l'échantillon est issu d'une population normalement distribuée. Nous détaillons ci-dessous les résultats des tests obtenus sur les facteurs de charge calculés les sur données *détrendées*.

Site	Statistic	p-value
Fruges	0,962	0,227
Mont des 4 Faux	0,955	0,126
Cestas	0,981	0,742
Toul	0,949	0,081

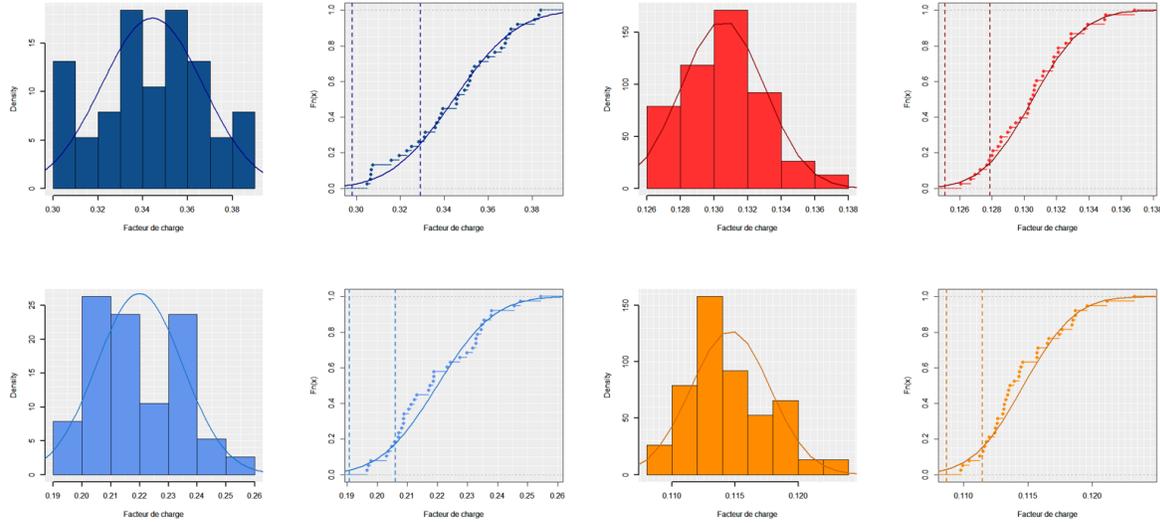
**Figure 11.11:** Statistiques de Shapiro Wilk et p-values des tests réalisés sur les séries annuelles *détrendées*

Les p-values obtenues pour chacune des localisations nous conduisent à ne pas rejeter l'hypothèse de normalité à un seuil de confiance fixé à 5%. En posant l'hypothèse que nos échantillons sont issus d'une population normale, nous estimons l'espérance et l'écart-type des chacun des indices individuels par maximum de vraisemblance. Nous renseignons ci-dessous les estimations obtenues et les intervalles de confiance à 95% obtenus par *bootstrap* (1000 ré-échantillonnages).

Site	$\hat{\mu}$	IC [2.5, 97.5]	$\hat{\sigma}$	IC [2.5, 97.5]
Fruges	0.344	[0.337, 0.351]	0.0223	[0.017, 0.028]
Mont des 4 Faux	0.22	[0.215, 0.225]	0.0149	[0.011, 0.018]
Cestas	0.131	[0.0130, 0.131]	0.002	[0.002, 0.003]
Toul	0.115	[0.114, 0.0116]	0.003	[0.002, 0.004]

**Figure 11.12:** Espérance, écart-types et intervalles de confiance estimés

Nous pouvons visionner ci-dessus les histogrammes et fonctions de répartition empiriques des indices calculés sur données *détrendées* ainsi que les densités et fonctions de répartition théorique



**Figure 11.13:** Ajustement des lois estimées aux distributions empiriques, valeurs d'entrée et de sortie (en pointillé) pour les parcs de Fruges (bleu foncé), du Mont des 4 Faux (bleu clair), de Cestas (rouge) et de Toul (orange)

des lois normales estimées. Les distributions semblent, à première vue, globalement bien s'ajuster aux séries *détrendées*; d'autres graphiques permettant de juger de la qualité d'ajustement (diagrammes de quantile et de probabilités) sont donnés en G.

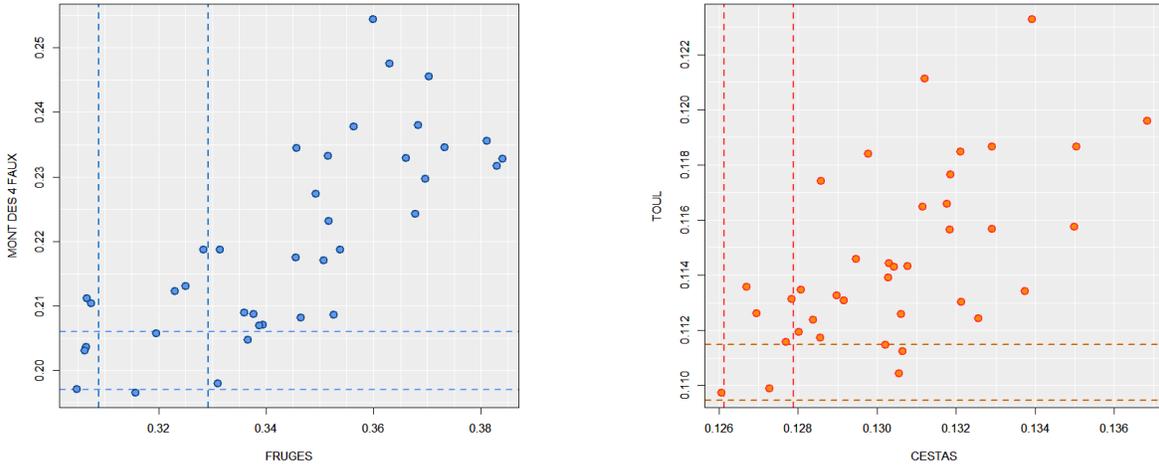
Les risques modélisés se réaliseront en cas de valeur faible de nos différents indices de production nous porterons donc une attention particulière aux queues gauches des distributions empiriques et modélisées. En effet, les méthodes de tarifications envisagées dépendront principalement des quantiles inférieurs de nos distribution (valeurs inférieures au strike retenu). Nous observons de légers écarts entre les distributions empiriques et estimées à ce niveau :

- Dans le cas de l'indice associé au parc de Fruges, certains quantiles modélisés sont supérieurs aux quantiles empiriques; cela pourra entraîner une légère sous-estimation du risque sous-jacent. Une méthode déjà évoquée en 6.3.2 permettrait de modifier le poids de la queue de distribution gauche, mais nous ne tiendrons pas compte de ce léger écart (possible sinon d'ajouter un chargement supplémentaire sur la prime).
- Dans le cas des indices associés aux parcs éoliens du Mont des 4 Faux et aux parcs photovoltaïques, cela pourra entraîner une légère surestimation du risque sous-jacent. Nous n'effectuerons pas non plus d'ajustement sur ces distributions (tarification prudente).

Les différentes loi marginales ayant été estimées, nous nous intéressons à présent aux structures de dépendance existant, respectivement, entre les deux indices de production éolienne et les deux indices de production photovoltaïque *détrendés* afin de pouvoir simuler des indices corrélés.

### Structure de dépendance

Au vu de l'échantillon restreint dont nous disposons (38 observations), de notre non connaissance a priori de la structure de dépendance et après observation des diagrammes de dispersion ci-dessous, nous choisissons de retenir une structure de dépendance simple, à savoir linéaire, entre les deux indices liés au parc de Fruges et du Mont des 4 Faux, mais aussi entre les indices des centrales de Cestas et de Toul. La mesure de corrélation (unique paramètre à estimer) que nous retiendrions sera donc le coefficient de corrélation linéaire ( $\rho$  de Pearson).



**Figure 11.14:** *Scatter-plot* des séries correspondant aux facteurs de charge historiques éoliens (à gauche) et photovoltaïques (à droite) calculés sur données détrendées

Les résultats des tests de corrélation sur le  $\rho$  de Pearson (donnés dans le tableau ci-dessous) nous conduisent, pour chacune des structures envisagées, à rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle il n'existe pas de relation linéaire (entre les variables de production éolienne et les variables de production photovoltaïque prises séparément deux à deux).

Sites	Statistic	p-value	IC [2.5, 97.5]
Fruges - Mont des 4 Faux	0,770	1,546e-8	[0.598, 0.875]
Cestas - Toul	0,619	3,46e-5	[0.373, 0.783]

**Figure 11.15:** Résultats des tests de corrélation sur le  $\rho$  de Pearson effectués sur les séries en question

Afin de modéliser les relations de dépendance linéaire retenues, nous utiliserons la décomposition de Cholesky d'un vecteur Gaussien [CHA10]. L'approche consiste à générer un vecteur Gaussien dont les composantes sont centrées, réduites et indépendantes et à les corrélérer à l'aide de la formule :

$$X = \mu + AX^{indep} \quad avec \quad \Sigma = AA^t \quad (11.9)$$

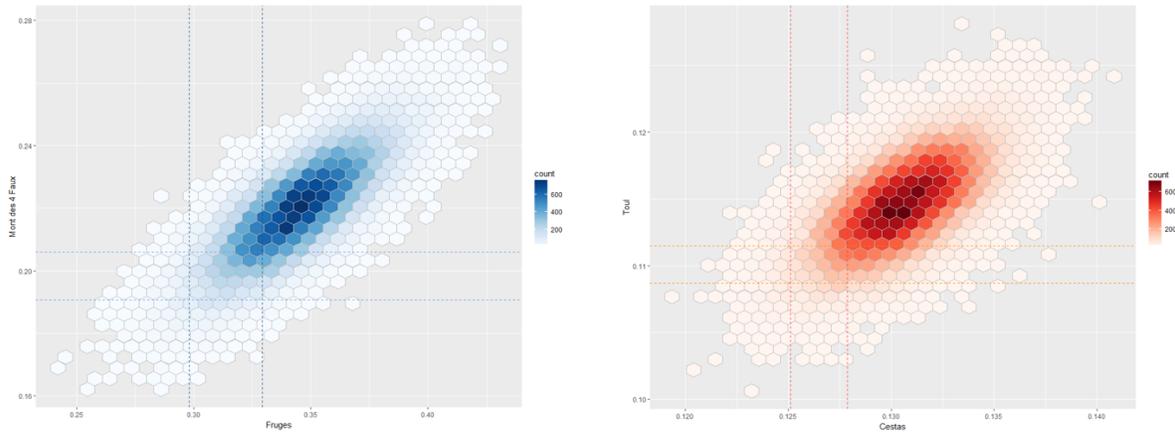
- $X^{indep}$  un vecteur Gaussien centré réduit avec composantes indépendantes
- $X$  le vecteur Gaussien que l'on cherche à modéliser (d'espérance  $\mu$  et de matrice de variance-covariance  $\Sigma$ )
- $A$  la décomposition de Cholesky de la matrice  $\Sigma$  qui est une matrice triangulaire supérieure

Nous avons fait le choix de conserver des marginales Gaussiennes et nous sommes en dimensions 2 (considérant que les indices photovoltaïques et éoliens sont indépendants, on peut modéliser séparément les deux couples dépendants); on pose alors pour chacun des vecteurs Gaussiens  $I_1$  et  $I_2$  d'espérance que nous souhaitons modéliser :

$$I_1 = X_1^{indep} \times \sigma_1 + \mu_1 \quad (11.10)$$

$$I_2 = (rX_1^{indep} + \sqrt{1-r^2}X_2^{indep}) \times \sigma_2 + \mu_2 \quad (11.11)$$

Nous sommes alors en mesure de simuler les indices d'intérêt en respectant la structure de dépendance linéaire souhaitée. Nous simulons ainsi 50000 réalisations afin d'estimer les indicateurs de dispersion nécessaires à la tarification du produit (approche de type Monte-Carlo); certains d'entre eux ainsi que les paiements calculés sur les données *détrendées* sont donnés en Annexe. Les données ainsi simulées sont représentées au moyen d'un diagramme de dispersion (points regroupés par *cluster* sur une grille hexagonale).



**Figure 11.16:** *Scatter-plot* des simulations ainsi obtenues; indices éoliens à gauche et photovoltaïques à droite

## 11.6 Recapitulatif de l'approche de modélisation des indices et de tarification

Ayant préalablement défini les indices individuels, nous calculons leurs valeurs à partir de l'historique des données météorologiques *détrendées*. Nous obtenons ainsi, pour chacun de ces indices, un échantillon de  $N$  réalisations ( $N = \text{nbre d'années}$ ). Dans le cas de la méthode *HBA*, nous calculerons directement les flux monétaires correspondant à chacune de ses réalisations dont nous déduirons les valeurs d'intérêts. Dans le cas de "la méthode paramétrique", nous faisons l'hypothèse que les valeurs prises par chacun des indices (calculés sur données *détrendées*) suivent une loi normale  $N(\mu_i, \sigma_i)$  dont les paramètres sont estimés par maximum de vraisemblance. Nous retenons une structure de dépendance linéaire et estimons la mesure de corrélation correspondante (rho de Spearman). Nous engendrons alors un grand nombre de simulations (indépendantes) et obtenons les réalisations corrélées au moyen de la décomposition de Cholesky (11.5). Pour chacune des réalisations, nous estimons les "flux monétaires individuels" à l'aide des fonctions *payoff* définies à l'équation 11.7 avant de les sommer (formule d'agrégation retenue en 11.8). Le montant de la prime pure et, selon la formule de *pricing* qui a été retenue, les autres mesures nécessaires à la tarification sont alors estimées et le prix de la couverture déterminé.

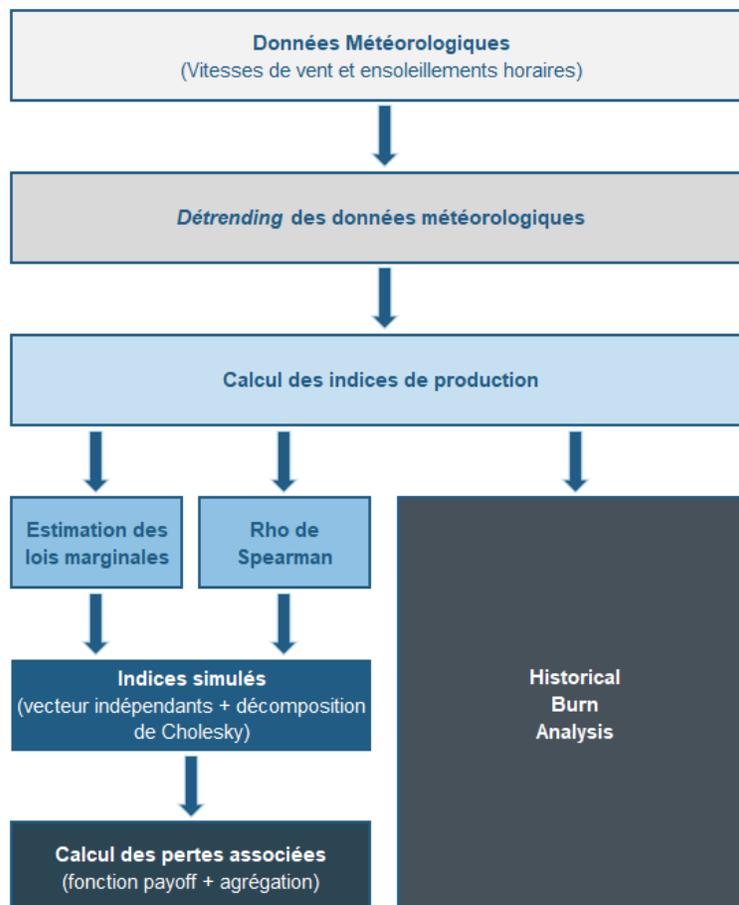


Figure 11.17: Schéma récapitulatif des approches envisagées

## 11.7 Limites

### Liées à la définition du risque

Si la présente application représente une réalité dans le monde de l'énergie (secteur particulièrement météo-sensibles), le contexte de celle-ci a été défini par notre soin et ne correspond pas à un cas concret. Certains paramètres (type d'option, structures) sont habituellement fonctions des besoins de l'acheteur de protection et ont ici été fixés arbitrairement. Concernant les indices individuels retenus :

- La formule théorique utilisée pour estimer l'électricité photovoltaïque produite en fonction de l'ensoleillement perpendiculaire est d'une grande simplicité (linéaire) et ne tient compte en aucun cas du type de panneau-photovoltaïque dont dispose le parc. De plus, le modèle ne considère pas un certain nombre de facteurs comme les variations de températures, la potentielle présence de poussières pouvant altérer les performances des cellules photovoltaïques...
- Dans le cas de l'électricité éolienne, seule la vitesse du vent sera utilisée (on ne traite pas de la direction du vent et faisons l'hypothèse forte que l'éolienne est toujours orientée de façon optimale). Nous ne considérerons pas non plus les phénomènes de turbulences se créant dans les sillages des éoliennes, or ceux-ci impliquent une réduction de la vitesse des vents dans ces zones et influencent donc les niveaux de production. La courbe de puissance utilisée pour les éoliennes du parc du Mont des 4 Faux est celle des éoliennes du parc de Fruges. De plus, les données que nous passons dans la courbe de puissance (qui est non linéaire) sont moyennées au pas de temps horaires. Enfin, la longueur de rugosité est considérée constante dans le temps pour les deux parcs alors que celle-ci est fonction des éléments de surfaces et variera généralement au cours des saisons (du fait de la végétation par exemple).

Une autre limitation provient de la définition des localisations ; pour des raisons de visualisation des résultats, nous retenons un unique point de grille pour chaque parc de production alors que certains de ces parcs sont relativement étendus. De plus, la disparité de la maille *MERRA-2* implique parfois des distances importantes entre les parcs et les points de grille correspondants (risque de base spatial). Une solution envisageable serait, si celles-ci sont disponibles, d'utiliser les données de vent et d'ensoleillement mesurées sur les sites (des anémomètres des éoliennes par exemple) afin de calibrer a priori le modèle.

### Liées aux données utilisées

Les données météorologiques utilisées proviennent de la réanalyse de données in-situ (stations ou satellites) ; certains filtres sont appliqués à ces données afin qu'elles restent cohérentes avec le modèle physique de réanalyse sous-jacent. Certaines observations (extrêmes entre autres) pourraient ainsi être corrigées à tort par des méthodes statistiques. Un autre facteur d'erreur provient de la résolution de la grille du modèle (environ 50 km \* 50 km). Certains phénomènes localisés et ayant une échelle horizontale inférieure à la maille ne seront pas résolus explicitement (équations physiques) sur une maille aussi disparate et seront schématiquement approximatés (paramétrisation impliquant une perte d'information). Ces limites pourront se traduire par une sous-estimation de la variabilité des séries sous-jacentes qui n'est pas souhaitable ici. Si *MERRA-2* reproduit assez fidèlement les variations du vent à grande échelle (spatiale), il semblerait selon [CAN+14] que la variabilité du vent sur des périodes courtes et des zones plus localisées n'est pas fidèlement reproduite.

L'historique de données (facteurs de charge régionaux mensuels obtenus sur RTE) que nous utilisons pour la validation de la couverture est trop court et non approprié (données régionales incluant d'autres parcs de productions que ceux que nous étudions). Les relevés historiques des compteurs liés aux parcs seront généralement communiqués par l'acheteur de protection et très utiles dans la définition de l'indice.

### **Liées à la modélisation des indices**

La méthode de *détrending* des données météorologiques n'a pas été sélectionnée sur la base de considérations météorologiques ou climatiques liées aux grandeurs en présence mais uniquement en fonction des données dont nous disposons. Enfin, les techniques de modélisations envisagées sont relativement simples (normalité des indices, structures de dépendance linéaire ...). Une alternative plus fine consisterait à modéliser les séries quotidiennes des grandeurs météorologiques sous-jacentes. La modélisation de ces dernières, des structures de dépendance et les modèles envisageables seront cependant bien plus complexes ; cette approche impliquerait de plus un risque de modèle beaucoup plus importants. Ces différents pistes de réflexions mériteraient d'être approfondies, mais ne constituent pas les points centraux de cette application ; comme nous l'avons précisé précédemment celle-ci a seulement vocation à illustrer les différentes méthodes évoquées dans ce mémoire.

Cinquième partie

**CONCLUSION GÉNÉRALE :  
LIMITES, APPORTS ET  
PERSPECTIVES**

Le présent mémoire introduit différents aspects et problématiques liés à la gestion indicielle du risque (météorologique) ; ce modèle d'assurance engendre des paiements dont le niveau est entièrement déterminé par la valeur d'un indice sous-jacent. Dans une première partie, nous traitons du risque météorologique, de ses particularités ainsi que des solutions qui permettent aujourd'hui de le gérer. Parmi elles, nous nous attardons plus longuement sur les couvertures indicielles, leur fonctionnement, leur histoire, leurs avantages et inconvénients. Ce type de produit est particulièrement adapté à la gestion des risques climatiques non-catastrophiques, risques pour lesquels le modèle classique (~indemnitaire) admet certaines limites. Ces solutions de couverture offrent, entre autres, des perspectives intéressantes pour certains individus particulièrement exposés aux risques météorologiques leur permettant de diminuer leur exposition à ces risques. Nous traitons, dans la deuxième partie de ce mémoire, respectivement des méthodes permettant la modélisation des indices météorologiques et la tarification des produits indiciels construits sur les premiers. Le manque de liquidité de ces produits et la non répliquabilité des indices sous-jacents rendent inopérantes les méthodes financières classiques de tarification (reposant, entre autres, sur l'hypothèse d'absence d'arbitrage et la possibilité de répliquer le portefeuille considéré). Dans ce contexte d'incomplétude du marché, les techniques assurantielles reposant sur la modélisation statistique des séries ou des indices sous-jacents revêtent une grande importance. Nous proposons, dans un second temps, un cadre d'évaluation des différentes méthodes de tarification (par *backtesting*) particulièrement adapté à la gestion d'un portefeuille de risques météorologiques. Nous soulignons, dans une troisième partie, le fait que de nombreux agents économiques sont exposés simultanément à plusieurs risques météorologiques ; nous apportons alors les premiers éléments nécessaires à la définition d'un cadre formel permettant de concevoir des couvertures indicielles multirisques. La démarche offre, en particulier, des perspectives intéressantes en termes de développement d'outils de transfert du risque météorologique pour les secteurs agricole et de l'énergie, mais aussi d'autres secteurs d'activité (construction, transport, loisirs ...). Enfin, les outils de gestion indicielle des risques détaillés plus tôt et la méthode proposée dans la partie précédente sont illustrés au moyen d'une application dans le cas du secteur de l'énergie renouvelable ; les produits envisagés ont pour finalité de garantir le revenu des producteurs d'électricité éolienne et photovoltaïque qui est particulièrement dépendant des conditions météorologiques.

Les résultats de ce mémoire d'actuariat constituent les bases d'un travail de recherche à poursuivre par la suite. Il serait ainsi intéressant de vérifier l'hypothèse formulée concernant la hausse de la demande des produits indiciels que pourraient engendrer ces structures multirisques (en menant par exemple des expériences similaires à celles évoquées en 8.1 avec les potentiels acheteurs de protection afin de juger de leur intérêt selon les produits envisagés). Nous ne pouvons en effet être certains que la demande pour ce genre de produit sera supérieure à celle que l'on constate actuellement pour les produits existants. La complexité qu'impliquent ces produits multirisques relativement aux structures plus classiques, n'aura pas forcément vocation à rassurer l'acheteur de protection perplexe. De plus, cette complexité relative impliquera potentiellement un risque de modèle et un risque de base plus important. Nous pourrions également nous intéresser à la faisabilité de produits de couverture indicielle à double *trigger* utilisant d'une part un indice similaire à ceux détaillés et d'autre part des indices économiques.

S'il est difficile d'estimer avec précision quels seront demain les impacts du changement climatique sur les différentes populations et les différents secteurs économiques, nous pensons que le secteur des assurances sera fortement impacté par les conséquences de ces changements et qu'il devrait être notablement et durablement modifié. Le changement climatique et les problématiques qui en découlent représentent aujourd'hui d'importants enjeux et un défi de taille pour le secteur de l'assurance dont le rôle est économique et social ; cela se traduit par la nécessité de prévenir et sensibiliser les sociétés quant aux répercussions futures que pourraient avoir ces changements et de mettre en place des outils efficaces permettant le transfert des risques météorologiques impliqués par ces changements.

Comme nous l'avons montré, le modèle indiciel présente de nombreux avantages pour l'utilisateur final (délai avant l'indemnisation raccourci, flexibilité dans la définition du produit, niveaux des primes . . .) mais aussi pour le preneur de risques (suppression des phénomènes d'aléa moral et d'anti-sélection, réduction du coût de gestion des sinistres, meilleure connaissance a priori de son risque . . .). Il constitue une alternative intéressante au modèle indemnitaire dans de nombreux cas où ce dernier est inefficace. Alors que nous observons que les anomalies météorologiques sont de plus en plus fréquentes, nous constatons un intérêt croissant des différents acteurs du marché pour les produits indiciels. Néanmoins, leur développement est encore freiné par certaines problématiques.

La principale limite impliquée par les produits indiciels est liée au risque de base ; ce risque, et la perception qu'en a l'acheteur de protection, nuisent encore à l'attractivité des couvertures indicielles. La connaissance, dans certaines situations encore limitée, des risques météorologiques sous-jacents ne permet pas de réduire suffisamment le risque de base rendant alors les couvertures indicielles inopérantes. Une autre problématique est liée aux prix, parfois encore relativement importants, de ces solutions de couverture ; du point de vue des preneurs de risques ces couvertures sont synonymes de quelques limitations (risques non assurables au sens de la définition donnée en 3.2 car non mutualisables, risque de modèle et d'image importants. . .) qui se traduisent parfois par des niveaux de chargement très importants.

Une des conditions premières au bon développement de ces produits consistera en un changement de paradigme dans la gestion du risque météorologique ; ses conséquences sont parfois perçues, à tort, comme inévitables et non-assurables. Si beaucoup d'agents économiques météo-sensibles sont aujourd'hui en capacité d'autogérer ce risque, rien ne nous assure qu'ils le seront encore demain dans un contexte de variabilité climatique accrue. La réponse est malheureusement plus évidente dans le cas de certaines populations particulièrement exposées à ces risques et sur qui les changements climatiques font peser des menaces qui ne peuvent et ne doivent être ignorées ; les couvertures indicielles revêtent une importance particulière pour ces populations en permettant de lutter contre la précarité. Seule la sensibilisation à ces risques des différents acteurs en présence et des discussions interdisciplinaires permettront demain d'augmenter le nombre de souscriptions à de tels produits et *in fine* d'augmenter la résilience de ces acteurs aux événements météorologiques dommageables. Étant donné qu'ils permettent aujourd'hui de repousser la frontière de l'assurabilité, nous estimons que ces outils de transfert du risque météorologique devraient être promis à un bel avenir. Cependant, nous pensons qu'une meilleure compréhension de la part des différents partis quant au fonctionnement et aux implications des couvertures indicielles favorisera le développement de ces outils de transfert alternatif des risques.

# Bibliographie

- [Aa98] Philippe ARTZNER et AL. “Coherent Measures of Risk”. In : (1998).
- [act+17] Institut canadien des ACTUAIRES et al. *L’indice Actuariel Climatique, Développement et Conception*. Rapp. tech. 2017.
- [AD13] Antonis K. ALEXANDRIRIS et ZAPRANIS Achilleas D. *Weather Derivatives : Modeling and Pricing Weather-Related Risk*. Springer, 2013.
- [ADS02] Peter ALATON, Boualem DJEHICHE et David STILLBERGER. *On Modelling and Pricing Weather Derivatives*. Rapp. tech. 2002.
- [AJ05] Cristina ARCHER L. et MARK JACOBSON Z. *Evaluation of global wind power*. Rapp. tech. 2005.
- [alt13] Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies ALTERNATIVES. *Le Climat*. Rapp. tech. 2013.
- [ART] ARTEMIS. *Catastrophe bonds, insurance linked securities, reinsurance capital and investment, risk transfer intelligence*.
- [BAR02] Pauline BARRIEU. “Produits dérivés météorologiques et environnement”. Thèse de doct. 2002.
- [BE04] Pauline BARRIEU et Nicole EL KAROUI. *Présentation générale des dérivés climatiques*. 2004.
- [BÉL16] Philippe BÉLISLE. “Changements climatiques : un déficit de communication”. In : (2016).
- [BOU16] Victor BOUTON. “Solutions indicielles de protection du revenu agricole - Modélisation et Tarification”. Thèse de doct. 2016.
- [BSZ02] Dorje C BRODY, Joanna SYROKA et Mihail ZERVOS. *Dynamical pricing of weather*. Rapp. tech. 2002.
- [CAN+14] D. J. CANNON et al. *Using reanalysis data to quantify extreme wind power generation statistics : A 33 year case study in Great Britain*. Rapp. tech. 2014.
- [CD05] Arthur CHARPENTIER et Michel DENUIT. *Mathématiques de l’Assurance Non Vie Tome 2*. Economica, 2005.
- [Cel] CELSIUSPRO. *Brochures CelsiusPro*.
- [CHA10] Arthur CHARPENTIER. *Copules et risques corrélés*. 2010.
- [CHA17] Arthur CHARPENTIER. *C’est normal ! (Partie 1) Et si la normalité n’existait pas ?* 2017.
- [CHE+11] Annes CHETAILLE et al. *Gestion des risques agricoles par les petits producteurs Focus sur l’assurance récolte indicielle et le warrantage*. Rapp. tech. 2011.
- [CLA11] Daniel J CLARKE. *A theory of rational demand for index insurance*. Rapp. tech. 2011.
- [CW01] Melanie CAO et Jason WEI. *Equilibrium Valuation of Weather Derivatives*. Rapp. tech. 2001.

- [DEF04] Christophe DEFEUILLEY. *Le secteur électrique aux États-Unis*. Rapp. tech. 2004.
- [DM13] Alexander V. DOBROVIDOV et Liubov A MARKOVICH. *Nonparametric gamma kernel estimators of density derivatives on positive semi-axis*. Rapp. tech. 2013.
- [EB08] Fred ESPEN BENTH et Jurate BENTH SALTYTE. *Dynamic pricing of wind futures*. Rapp. tech. 2008.
- [FAL14] FALLDIA. “Ces mots qui dérangent et qui hantent : la normalité”. In : (2014).
- [FG11] Bernard FINAS et Sébastien GILLES. *La gestion indicielle du risque climatique*. 2011.
- [GEM05] Hélyette GEMAN. *Commodities and commodity derivatives : Modeling and Pricing for Agriculturals, Metals and Energy*. Wiley Finance, 2005.
- [GLL15] Stéphane GODIER, Joan LANZAGORTA et Madeleine LATAPIE. “PARAMETRIC INSURANCE : A fitting solution for the weather-sensitive”. In : (2015).
- [HAM09] Hélène HAMISULTANE. *Which Method for Pricing Weather Derivatives ?* Rapp. tech. 2009.
- [ind] Mécanisme mondial pour l’assurance INDICIELLE. *Réalisations du Mécanisme mondial pour l’assurance indicielle (GIIF) dans les pays de l’ACP, Phase 1 (2010-2015)*.
- [Ins17] International Association of INSURANCE SUPERVISORS. *Issues Paper on Index Based Insurance*. Rapp. tech. 2017.
- [JAL] Pierre JAL. *Cours de réassurance*.
- [JB05] Stephen JEWSON et Anders BIRX. *Weather Derivative Valuation : The Meteorological, Statistical, Financial and Mathematical Foundations*. Cambridge University Press, 2005.
- [JC03] Stephen JEWSON et Rodrigo CABALLERO. *The use of weather forecasts in the pricing of weather derivatives*. Rapp. tech. 2003.
- [JP06] Stephen JEWSON et Jeremy PENZER. “Estimating Trends in Weather Series : Consequences for Pricing Derivatives”. In : (2006).
- [KOC11] Erwan KOCH. “Étude de faisabilité d’une assurance rendement basée sur indice climatique”. Thèse de doct. 2011.
- [KT79] Daniel KAHNEMAN et Amos TVERSKY. *Prospect Theory : An Analysis of Decision under Risk*. Rapp. tech. 1979.
- [LAL+14] Thomas LALLEMENT et al. *Le risque de modèle*. Rapp. tech. 2014.
- [LOI] Stéphane LOISEL. *Cours de Modélisation Charges Sinistres*.
- [MAS] Esterina MASIELLO. *Cours d’estimation de copules*.
- [MM09] Didier MARTEAU et PAscal MORAND. *Normes comptables et crise financière*. Rapp. tech. 2009.
- [MOR16] Alexandre MORNET. “Contributions à l’évaluation des risques en assurance tempête et automobile”. Thèse de doct. 2016.
- [MPS16] Craig MCINTOSH, Felix POVEL et Elisabeth SADOULET. *Utility, Risk, and Demand for Incomplete Insurance : Lab Experiments with Guatemalan Cooperatives*. Rapp. tech. 2016.
- [MRA13] Mohammed MRAOUA. “Gestion du risque climatique par l’utilisation des produits dérivés d’assurance”. Thèse de doct. 2013.
- [Nata] Organisation des NATIONS UNIES POUR L’ALIMENTATION ET L’AGRICULTURE. *Changements climatiques et sécurité alimentaire*.
- [Natb] Organisation des NATIONS UNIES POUR L’ALIMENTATION ET L’AGRICULTURE. *L’état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde*.

- [OEC08] OECD. *Handbook on Constructing Composite Indicators METHODOLOGY AND USER GUIDE*. Rapp. tech. 2008.
- [PIC05] Pierre PICARD. *Risques d'assurance et risques financiers*. Rapp. tech. 2005.
- [PIE15] Pierrick PIETTE. *Assurance agricole et images satellites : produit d'assurance et arbitrage financier*. 2015.
- [RMO10] Matthias RITTLER, MUSSHOF et Martin OLIVER ET ODENING. *Meteorological forecasts and the pricing of weather derivatives*. Rapp. tech. 2010.
- [RN14] Florent RITLÉNG et Cuong NGUYEN. *Étude d'un produit déassurance paramétrique contre le risque de pluie torrentielle en Jamaïque*. 2014.
- [ROU07] Olivier ROUSTANT. "Produits dérivés climatiques : aspects économétriques et financiers". Thèse de doct. 2007.
- [SAU15] Simon SAUVAGE. "Quelle protections face aux aléas climatiques?" In : (2015).
- [Sol12] Solterra SOLUTIONS. "Déterminer les répercussions du changement climatique sur le risque d'assurance mondiale". In : (2012).
- [SSW12] Frank SCHILLER, Gerold SEIDLER et Maximilian WIMMER. *Temperature Models for Pricing Weather Derivatives*. Rapp. tech. 2012.
- [Ste06] STERN. *Stern review : the economics of climate change*. Rapp. tech. 2006.
- [STO11] Markus STOWASSER. *Modelling rain risk : a multi order Markov chain model approach*. Rapp. tech. 2011.
- [TOM14] Julien TOMAS. *Gestion des risques naturels et changement climatique : les challenges des actuaires*. Rapp. tech. 2014.
- [VEN05] Pierre VENDÉ. *Modeling and Forecasting Average Temperature for Weather Derivative Pricing*. 2005.
- [WJ95] M.P. WAND et M.C JONES. *Kernel Smoothing*. Rapp. tech. 1995.
- [WTT97] Peter WALKER P., Richard THALER H. et Amos TVERSKY. *Probabilistic Insurance*. Rapp. tech. 1997.
- [Za15] Wang ZHILIANG et AL. *Modeling and Forecasting Average Temperature for Weather Derivative Pricing*. Rapp. tech. 2015.

# Table des figures

2.1	Températures moyennes annuelles calculées sur l'année 2016 relativement à la période 1981-2010 (source : NOAA, Climate at a Glance) . . . . .	9
2.2	Anomalie des températures moyennes annuelles de 1880 à 2016 à la surface des continents à gauche et des océans à droite; normales calculées sur 1910-2000 (données : NOAA, Climate at a Glance) . . . . .	10
3.1	Exemples de risques météorologiques selon le secteurs d'activité considéré et la grandeur retenue (sources données : [SAU15], [Cel]) . . . . .	13
4.1	<b>En haut</b> : paramètres dans le cas simple d'un cumul de HDD <b>À gauche</b> : résultat en fonction de la valeur de l'indice . . . . .	20
4.2	<b>À gauche</b> : Valeurs des contrats négociés de 2000 à 2008 sur les marchés des dérivés climatiques en milliers de dollars <b>À droite</b> : Répartition des paramètres météorologiques utilisés comme sous-jacent des contrats. (source : [FG11] depuis Weather risk derivative survey 2009) . . . . .	21
4.3	Écart envisageables entre le risque réel et le risque couvert dans le cas d'un risque croissant avec la valeur de l'indice. Les valeurs de E et de S représentent respectivement les points d'entrées et de sorties; l'assuré est indemnisé si la valeur de l'indice appartient à cet intervalle. (depuis [BOU16]) . . . . .	23
6.1	<b>a)</b> Tendance estimée sur indice sur données quotidiennes selon la tendance linéaire estimée . . . . .	32
	<b>b)</b> Tendance estimée <b>c)</b> Indices obtenus	
6.2	Schéma explicatif de la méthode HBA . . . . .	33
6.3	Illustration de la méthode d'estimation par noyau . . . . .	34
6.4	Influence du choix du noyau et de la taille de fenêtre. Fenêtre en orange définie via la règle de Silverman : $f_{\text{fenetre}} = 0.9 \cdot \min(\text{std}, Q_3 - Q_1) \cdot \left(\frac{1.34}{\text{taille,echantillon}}\right)^{\frac{1}{5}}$ (fenêtre 2 fois plus grande en bleu et 2 fois plus petite en rouge) dans le cas de 1000 réalisations indépendantes de $N(0,1)$ . . . . .	35
6.5	Utilisation d'un noyau gamma (asymétrique) dans le cas d'une densité à support positif . . . . .	35
7.1	Tableau récapitulatif des méthodes de détermination de la prime pure . . . . .	38
7.2	À gauche : schéma descriptif de la méthode. À droite : résultats obtenus en sortie	41
7.3	Carte obtenue en sortie des backtests sur les méthodes de détrending (cf. §) . . . . .	41
8.1	Interactions entre les principaux moteurs du climat. Source : [BÉL16] depuis Secrétariat du Global Climate Observation System (GCOS) . . . . .	46
9.1	Schéma récapitulatif de la démarche générale envisagée pour la conception de couvertures indicelles multirisques . . . . .	53

10.1	Évolution de la puissance raccordée au réseau français à gauche : on observe une hausse importante du solaire et de l'éolien depuis le début des années 2000. Répartition du parc renouvelable français au 31 décembre 2017 à droite, l'hydraulique représente encore plus de la moitié du parc renouvelable (source : RTE - Panorama de l'électricité renouvelable en 2017) . . . . .	55
10.2	Schéma explicatif du fonctionnement d'une éolienne (source : Connaissance des Énergies 2013) . . . . .	56
10.3	Évolution à la hausse de la puissance éolienne raccordée au réseau français de 2001 à 2017 (source : bilan électrique 2017 RTE) . . . . .	57
10.4	Production éolienne française en forte hausse depuis le début des années 2000 (source : bilan électrique 2017 RTE) . . . . .	57
10.5	Schéma de coupe d'une cellule illustrant la production d'électricité à partir de l'énergie solaire (source : Engie) . . . . .	57
10.6	Évolution à la hausse de la puissance solaire raccordée au réseau français (en haut) et de la production solaire depuis 2006. La 1ère atteint 7660 MW en 2017. Valeur record en 2017 pour la 2nde liée aux bonnes conditions météorologiques et à la hausse de la 1ère (source : bilan électrique 2017 RTE) . . . . .	58
10.7	Capacités solaires (à g.) et éoliennes (à d.) installées dans les régions françaises. Trois de ces dernières (Nouvelle-Aquitaine, Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur) disposent d'un parc de production solaire supérieur à 1000 MW et deux (Grand-Est et Hauts-de-France) d'un parc de production éolien supérieur à 3000 MW. (source : bilan électrique 2017 RTE) . . . . .	58
10.8	Localisations des parcs de production retenus et nouvelles régions correspondantes coloriées. . . . .	59
11.1	Schéma illustratif du fonctionnement du mécanisme de complément de rémunération (depuis Enercoop) . . . . .	61
11.2	Courbe de puissance de l'éolienne Enercon E70 (depuis "Les éoliennes Enercon : La gamme") . . . . .	62
11.3	Facteurs de charge historiques modélisés sur les différents sites et tendances correspondantes (en pointillés) estimées par régression locale loess avec une fenêtre de lissage de 0.75. Les séries de gauches correspondent aux facteurs de charge moyens annuels associés au parc éoliens de Fruges (bleu foncé) et du Mont des 4 Faux (bleu clair) ; celles de droite à ceux des centrales photovoltaïques de Cestas (rouge) et de Toul (orange). . . . .	65
11.4	Quartiles, médiane, moyenne, écart-type, écart de la médiane au premier quartile relativement à la médiane des séries historiques . . . . .	65
11.5	Facteurs de charge historiques (en trait plein), détrendé (en pointillé) pour les parcs de Fruges (bleu foncé), du Mont des 4 Faux (bleu clair), de Cestas (rouge) et de Toul (orange) . . . . .	66
11.6	Autocorrélogrammes (de gauche à droite et bas en haut) des séries annuelles associées au parc de Fruges, de Cestas, du Mont des 4 Faux et de Toul pour des lag entre 0 et 15. Les lignes en pointillés représentent les intervalles de confiance à 95%. . . . .	66
11.7	<i>Rank-rank plot</i> des séries correspondant aux facteurs de charge historiques éoliens (à gauche) et photovoltaïques (à droite) calculées sur données détrendées . . . . .	67
11.8	Échelle spatiale (en km) et temporelle pour certains phénomènes météorologiques (depuis <a href="http://www.meteo.psu.edu">http://www.meteo.psu.edu</a> ) . . . . .	67
11.9	Facteurs de charge mensuels modélisés en (traits pleins), détrendés et structures retenues (pointillés) pour les parcs de Fruges (bleu foncé), du Mont des 4 Faux (bleu clair), de Cestas (rouge) et de Toul (orange) . . . . .	68
11.10	Comparaison des facteurs de charges mensuels réalisés régionaux (pointillés) et modélisés (traits pleins) pour les parcs de Fruges (bleu foncé), du Mont des 4 Faux (bleu clair), de Cestas (rouge) et de Toul (orange) . . . . .	70

11.11	Statistiques de Shapiro Wilk et p-values des tests réalisés sur les séries annuelles <i>détrendées</i> . . . . .	71
11.12	Espérance, écart-types et intervalles de confiance estimés . . . . .	71
11.13	Ajustement des lois estimées aux distributions empiriques, valeurs d'entrée et de sortie (en pointillé) pour les parcs de Fruges (bleu foncé), du Mont des 4 Faux (bleu clair), de Cestas (rouge) et de Toul (orange) . . . . .	72
11.14	<i>Scatter-plot</i> des séries correspondant aux facteurs de charge historiques éoliens (à gauche) et photovoltaïques (à droite) calculés sur données <i>détrendées</i> . . . . .	73
11.15	Résultats des tests de corrélation sur le $\rho$ de Pearson effectués sur les séries en question . . . . .	73
11.16	<i>Scatter-plot</i> des simulations ainsi obtenues; indices éoliens à gauche et photovoltaïques à droite . . . . .	74
11.17	Schéma récapitulatif des approches envisagées . . . . .	75
B.1	Catastrophes naturelles dans le monde entre 1980 et 2014 (source : Munich Re) .	89
B.2	ILS et Cat-Bonds émis et en circulation entre 2006 et 2014 (source : Munich Re)	90
B.3	Fonctionnement général d'un Cat-Bond (source : [LOI] depuis Guy Carpenter) .	91
C.1	Historique des rendements moyens sur l'ensemble du territoire français pour quatre des principales cultures de céréales en France en q/ha entre 1862 et 2007 (source : Agreste) . . . . .	92
C.2	<b>À gauche</b> : Historique des rendements moyens sur l'ensemble du territoire français pour quatre des principales cultures de céréales en France exprimés en q/ha (données : Agreste) <b>À droite</b> : Historique des cotations FranceAgriMer pour le blé tendre et l'orge d'hiver, exprimées en base juillet et en rendu port d'embarquement, en €/t (données : FranceAgriMer) . . . . .	93
E.1	Illustration du passage au cas bidimensionnel puis tridimensionnel dans le cas de mille réalisations de loi normale multivariée $N_3(0_3, \mathbf{I}_3)$ (dimension 3). . . . .	100
E.2	Frontières de normalité définies de sortes à avoir 85% d'individus normaux pour différentes normes dans le cas de mille réalisations de loi normale multivariée $N_2(0_2, \mathbf{I}_2)$ . . . . .	100
F.1	Calcul des probabilités associées aux différents scénarios de "période normale" (hypothèse d'indépendance entre les indices) . . . . .	105
F.2	Exemple de règle donnant lieu à une indemnisation progressive; chacun des niveaux d'anormalité globale est déclenché si au moins une des conditions sur les différentes classes est vérifiée . . . . .	105
F.3	Exemples de méthodes de définition du jour critique et fonctions correspondantes	107
G.1	Indicateurs de météo-sensibilité pour différents secteurs (source meteosensibilité.com) . . . . .	109
G.2	Carte détaillée en 7.3 observée sur l'ensemble de la grille retenue . . . . .	109
G.3	<i>Rank-Rank plot</i> des facteurs de charges moyens annuels historiques modélisés éoliens et solaires . . . . .	110
G.4	Loi normale estimée sur les données <i>détrendées</i> pour le Parc de Fruges . . . . .	110
G.5	Loi normale estimée sur les données <i>détrendées</i> pour le Parc du Mont des 4 Faux	111
G.6	Loi normale estimée sur les données <i>détrendées</i> pour le Parc de Cestas . . . . .	111
G.7	Loi normale estimée sur les données <i>détrendées</i> pour le Parc de Toul . . . . .	112
G.8	Indicateurs de dispersion obtenues par les deux approches (HBA et paramétriques). Le kWh a été fixé à 10c€ pour tous les parcs et la puissance installée du parc des Mont des 4 Faux à 300 MW. . . . .	113

Sixième partie

**ANNEXE**

## Annexe A

# Définitions supplémentaires

**Définition 7 (SPV).** *Entités légales créées par une autre entité le "Sponsor" ou l'"Initiateur" en transférant un ou plusieurs actifs dans le SPV. Le special purpose vehicle est établi afin d'exécuter un ou plusieurs objectif(s) précis et/ou restreint(s).*<sup>1</sup>

**Définition 8 (Stratégie "buy and hold").** *Stratégie passive d'investissement qui consiste à bien choisir ses placements, et à les conserver à long terme.*<sup>2</sup>

**Définition 9 (Coverholder).** *Intermédiaire spécialisé en (ré)assurance auquel certains syndicats Lloyd's ont accordé une délégation de souscription (binder).*<sup>3</sup>

**Définition 10 (Managing General Agent).** *Mandataire d'assurance souscrivant pour le compte d'un syndicat à 100% dans le cadre d'une délégation de souscription (binder). S'apparente à un intermédiaire grossiste.*<sup>4</sup>

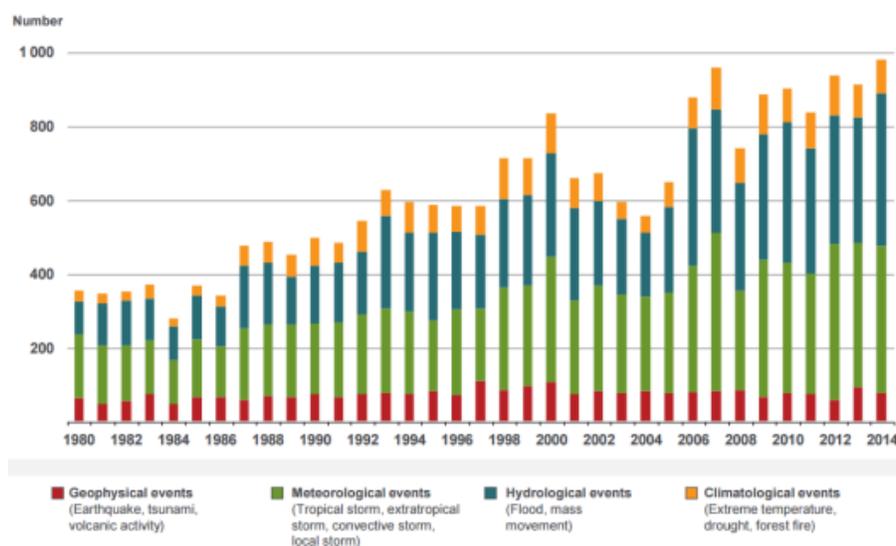
---

1. [:https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonds\\_commun\\_de\\_créances](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonds_commun_de_créances)  
2. [:https://fr.wikipedia.org/wiki/Acheter\\_et\\_conserver](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acheter_et_conserver)  
3. [:https://www.lloyds.com/~media/files/lloyds/offices/french/2015/mtm-2015-devenir-partenaire-du-lloyds.pdf?la=en](https://www.lloyds.com/~media/files/lloyds/offices/french/2015/mtm-2015-devenir-partenaire-du-lloyds.pdf?la=en)  
4. [:https://www.lloyds.com/~media/files/lloyds/offices/french/2015/mtm-2015-devenir-partenaire-du-lloyds.pdf?la=en](https://www.lloyds.com/~media/files/lloyds/offices/french/2015/mtm-2015-devenir-partenaire-du-lloyds.pdf?la=en)

## Annexe B

# Insurance Linked Securities

Au milieu des années 90, une série de sinistres de grande ampleur frappa le territoire américain : le cyclone Andrew en 1992 devenant à l'époque le cyclone le plus coûteux de l'histoire, mais aussi dans la même décennie les tempêtes Daria, Vivian, Wiebke et Herta qui montrèrent l'insuffisance des protections tempêtes de la plupart des assureurs et enfin le séisme de 1994 à Northridge, près de Los Angeles qui engendra environ 15 milliards de dollars de pertes assurées. Confrontés à ces catastrophes de fréquence (cf. Figure B.3) et de sévérité grandissantes (pertes économiques parfois bien supérieures à leurs capacités de couverture), les assureurs prirent alors conscience de la nécessité de transférer certains de leurs risques. La réglementation prudentielle se durcissant (capital minimum requis, niveau de liquidité...), transférer le risque à des agents inscrits dans un contexte prudentiel différent permettait de créer de la valeur (si le coût de transaction est inférieur aux avantages obtenus grâce à l'allègement réglementaire). Les assureurs se tournèrent vers les marchés financiers et leur large capacité permettant d'absorber plus facilement l'impact d'une perte lourde ; la titrisation était née. Le développement important des marchés de capitaux à cette époque renforça l'intérêt des assureurs pour de telles solutions alternatives de transfert de risques



**Figure B.1:** Catastrophes naturelles dans le monde entre 1980 et 2014 (source : Munich Re)

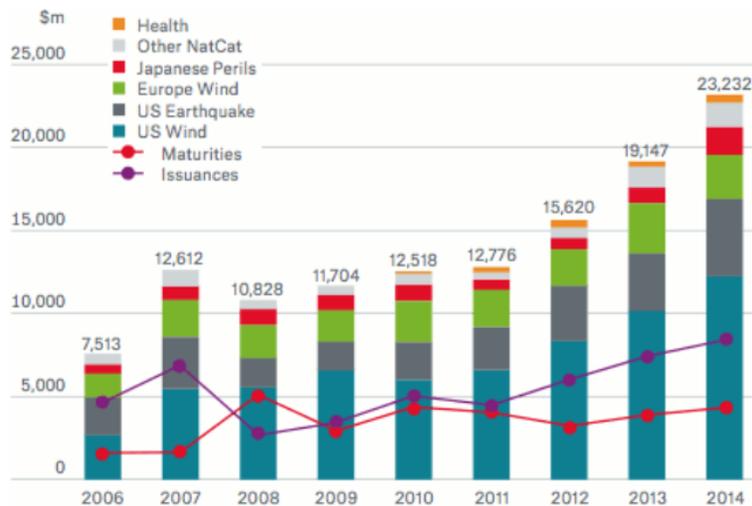
C'est dans ce contexte qu'apparurent les premiers ILS : les *Insurance Linked Securities* sont des titres qu'émettent les assureurs ou réassureurs afin de transférer certains de leurs risques aux investisseurs des marchés financiers.

Ils présentent divers **avantages pour les assureurs**<sup>1</sup> :

- Comme précisé ci-dessus, ils permettent aux assureurs d'**augmenter leur capacité** sans avoir à entamer leur solvabilité.
- Ils présentent une **solution alternative à la réassurance** pour la couverture des risques extrêmes.
- Ils sont souvent **très liquides** et permettent de **réduire le risque de contrepartie**

Du point de vue des **investisseurs**<sup>1</sup> :

- Ils représentent un **outil efficace de diversification** et permettent ainsi de réduire le risque (volatilité) d'un portefeuille.
- Ils présentent un **potentiel de rendements élevés** et un risque spécifique relativement faible.



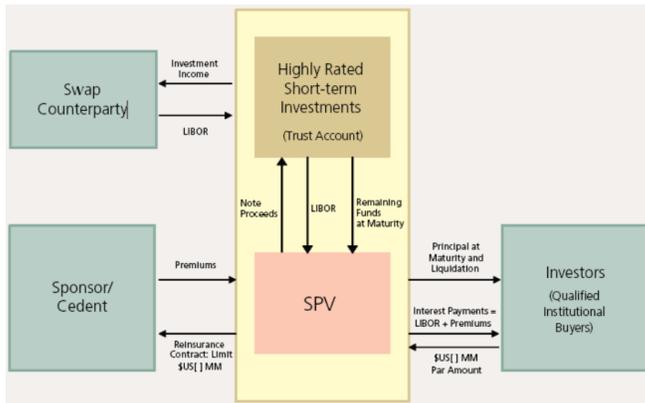
**Figure B.2:** ILS et Cat-Bonds émis et en circulation entre 2006 et 2014 (source : Munich Re)

Le marché ILS spécialisé dans les catastrophes de biens immobiliers est constitué, à hauteur d'environ 30%, du marché des Cat-Bonds (22,4 milliards de dollars d'encours à l'émission des titres à fin 2016)<sup>2</sup>. Les Cat-Bonds (pour *Catastrophe Bonds*) sont des produits financiers qu'émettent les assureurs ou réassureurs et qui leur permettent de couvrir une partie de leur perte financière en cas de réalisation d'une catastrophe naturelle (périmètre et période de couverture prédéfinis).

En pratique, l'assureur ou réassureur émet des titres de dettes. Les investisseurs qui les achètent reçoivent en échange du risque supporté des intérêts et des primes de risque de la part de l'émetteur. Pour des raisons fiscales, la structuration de ce produit passe souvent par une entité ad hoc appelée *Special Purpose Vehicle*. Le SPV reçoit le capital apporté par les investisseurs et les primes versées par l'assureur ; ces fonds sont déposés dans une trust qui les investit dans des titres sûrs à titre de collatéral [FG11]. En contrepartie, les investisseurs perçoivent un coupon annuel (rémunération du placement + prime de risque).

1. :<https://www.insurancespeaker-wavestone.com/>

2. :<https://www.letemps.ch/economie/2017/05/14/lattrait-insurancelinkedsecuriies-investisseurs>



**Figure B.3:** Fonctionnement général d'un Cat-Bond  
(source : [LOI] depuis Guy Carpenter)

Deux cas de figures peuvent alors se présenter :

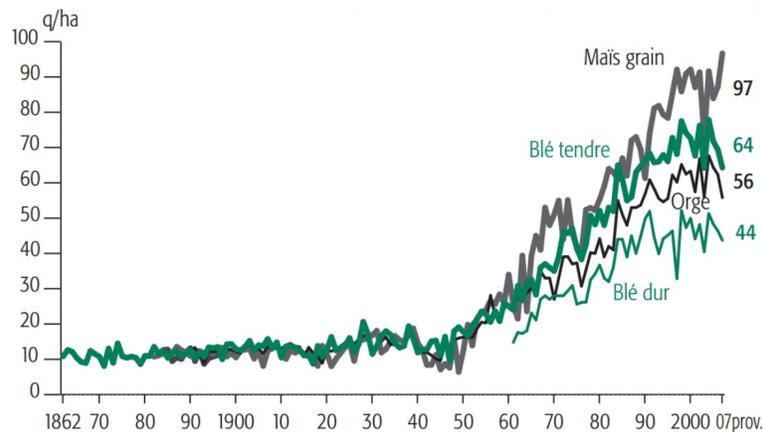
- L'évènement déclencheur survient avant la maturité : une partie ou l'ensemble des fonds déposés dans le Trust est alors débloqué au profit de l'assureur.
- Dans le cas contraire, l'ensemble des fonds est reversé à l'investisseur.

## Annexe C

# INDICES NON MÉTÉOROLOGIQUES

### C.1 Indices Agricoles

L'ensemble des innovations agricoles survenues au cours des deux derniers siècles (parmi lesquelles nous retrouvons entre autres la sélection des semences, la spécialisation des aires de cultures, l'essor du machinisme agricole, mais surtout la création et l'utilisation de pesticides et de fertilisants chimiques) ont permis d'augmenter de façon considérable la production agricole mondiale. Ainsi, nous observons logiquement à partir des années 50 une explosion des niveaux de rendements agricoles moyens (ces derniers furent multipliés par 10 en à peine un demi-siècle) [BOU16].

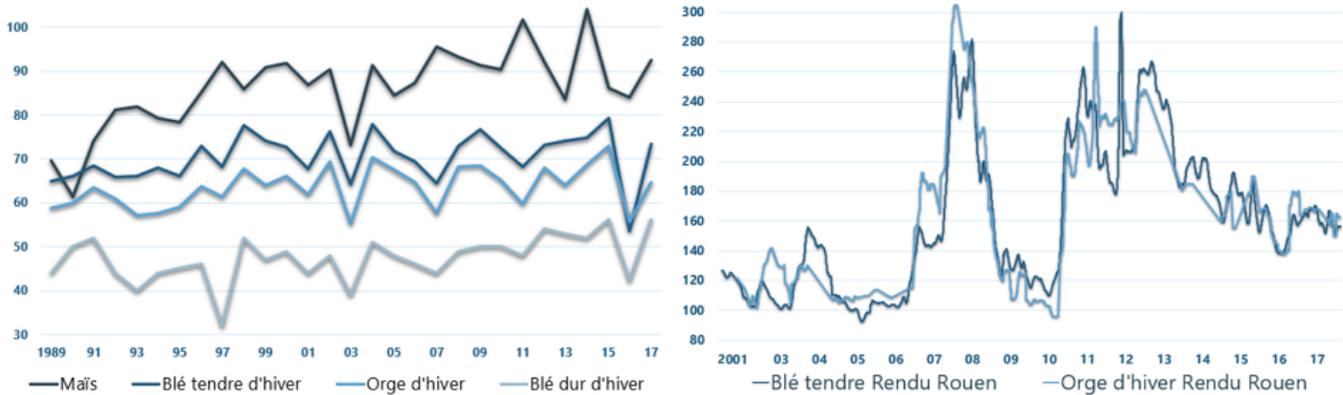


**Figure C.1:** Historique des rendements moyens sur l'ensemble du territoire français pour quatre des principales cultures de céréales en France en q/ha entre 1862 et 2007 (source : Agreste)

Cependant, si la révolution agricole entraîne une hausse importante du niveau moyen des rendements agricoles jusque dans les années 95, cette dernière montre de signes d'essoufflement depuis une vingtaine d'années pour de nombreuses grandes cultures. Si les progrès génétique ont continué, nous observons une réduction dans l'utilisation d'intrants et une simplification des rotations culturales qui ne semblent être responsables de ce plafonnement. La réduction de la capacité de production des sols (impactée par l'effondrement des taux de matières organiques, le travail mécanique profond, l'irrigation, les compactations de plus en plus fortes) et la variabilité

climatique accrue expliquent en grande partie ce phénomène<sup>1</sup>. S'ajoute à cette stagnation des rendements un accroissement de leur volatilité du fait d'anomalies météorologiques plus fréquentes (déjà évoquées dans la première partie).

Ces variations dans les niveaux de rendements se répercutent sur les marchés financiers et nous retrouvons cet accroissement de la variabilité au niveau des indices de prix des différentes commodities agricoles. Ceci est accentué par le développement des moyens de transports et des bourses de commerces qui contribuent à faciliter les échanges entre les différentes zones de cultures et donc la spécialisation géographique de ces dernières (atténuation des effets de diversification et augmentation du risque systémique) [BOU16].



**Figure C.2:**

**À gauche :** Historique des rendements moyens sur l'ensemble du territoire français pour quatre des principales cultures de céréales en France exprimés en q/ha (données : Agreste)

**À droite :** Historique des cotations FranceAgriMer pour le blé tendre et l'orge d'hiver, exprimées en base juillet et en rendu port d'embarquement, en €/t (données : FranceAgriMer)

Il est intéressant de noter que le risque de prix et celui de rendement (deux des principaux risques agricoles avec les risques de qualité et de coût de production) se compensent parfois partiellement. En effet, il existe généralement une corrélation négative entre ces deux risques (récoltes mauvaises-prix élevés et inversement en grande partie conséquences de la dépendance existant entre les rendements d'une même zone géographique) jouant le rôle "d'assurance naturelle" pour les producteurs. Cependant, la compensation est rarement suffisante, et l'instabilité grandissante des récoltes et des prix génère une variabilité importante des revenus du producteur agricole [CHE+11].

### C.1.1 Indice Rendement

Les points développés ci-dessus expliquent le fait que les rendements agricoles soient fréquemment utilisés comme sous-jacents de produits indiciels. Une couverture indicielle sur ces indices permet à l'agriculteur de se couvrir contre une "carence d'apport" (risque rendement), autrement dit, contre la réalisation de rendements trop faibles pour une culture donnée (les solutions envisagées consisteront souvent en une couverture sur baisse de l'indice, les indemnités seront proportionnelles à la surface cultivée et au rendement observé). L'utilisation de tels indices implique parfois une réduction du risque de base de modélisation porté par l'agriculteur, relativement à une solution construite sur un indice météorologique (en effet, il y a un plus

1. [http://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/TCS\\_53\\_edito.pdf](http://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/TCS_53_edito.pdf)

grand risque dans ce dernier cas que l'indemnisation versée, fonction des niveaux des grandeurs météorologiques, s'éloigne du sinistre réellement subi). Les données de rendement utilisées pour ces indices proviennent, dans la majeure partie des cas, des services nationaux de statistiques et leur fréquence de publication est souvent annuelle. En France, ces statistiques sont le résultats de recensements et/ou d'enquête et sont disponibles gratuitement sur le site "Disar" (Diffusion Interactive des Statistiques Agricoles de Référence). Ces données sont disponibles aux échelles nationale, régionale et départementale. Utiliser ces données comme rendement de référence permet d'une part de faciliter la gestion du sinistre (données facilement accessibles et objectives) et d'autre part de réduire le risque d'aléa moral relativement à une couverture indemnitaire. Cependant de telles échelles peuvent impliquer une hausse du risque de base spatiale, particulièrement dans le cas de risques très localisés comme ceux liés aux précipitations. Notons que, dans certains cas, ces couvertures sont achetées par des coopératives représentant une part suffisamment importante de la production départementale ou régionale pour pouvoir agir sur ces indices de références ; ce qu'ils pourraient être tentés de faire si ils ont a priori des raisons de penser que les récoltes seront mauvaises. Comme suggéré dans [PIE15], l'utilisation de données de référence sur une zone administrative plus étendue et/ou le recours à une franchise permettent de réduire ce risque d'aléa moral.

La qualité des données utilisées, leur disponibilité (existence, longueur de l'historique...), la confiance des preneurs de risques dans les instituts qui les récoltent et les fournissent peuvent, dans certain cas, influencer sur la volonté du preneur de risque à accepter le contrat. Comme cela est souligné dans [PIE15], un autre élément pouvant influencer sur l'acceptation de ce transfert de risque est la nature de la culture concernée. Il est en effet important de dissocier deux cas :

- Les cultures de plantes dites "annuelles" ne vivant qu'une année. Autrement, dit le cycle de la plante (de la germination à la maturation) est inférieur à un an. C'est par exemple le cas du blé et du maïs (cultures les plus importantes en terme de surfaces développées et de production en France). Si la rotation culturale (~ suite de cultures échelonnées au fil des années sur une même parcelle ; élément important de la gestion de la fertilité des sols et des bioagresseurs<sup>2</sup>) est bien gérée, l'hypothèse de dépendance inter-annuelle sous-jacente aux méthodes de tarification historiques reste réaliste.
- Les cultures de plantes dites "pérennes" pouvant vivre plusieurs années. Les récoltes sont effectuées d'année en année sur la même plante et peuvent alors difficilement être considérées comme indépendantes. C'est par exemple le cas d'une grande partie des cultures fruitières en France (arboriculture fruitière par définition sur arbre donc pérenne) mais aussi des cultures viticoles pour lesquelles la demande en assurance est relativement importante (ces dernières sont, entre autres, particulièrement sensibles aux conditions météorologiques). Pour ces cultures, les méthodes historiques de modélisation de l'indice sont à proscrire. Il sera en effet important dans ce cas de s'intéresser la relation de dépendance inter-annuelle.

Concernant la modélisation de ces indices rendements (comprenant le choix d'une méthode de détrending), les méthodes envisageables sont les mêmes que dans le cas des indices météorologiques. Cependant les historiques de données de rendements disponibles sont souvent encore plus court que dans le cas des données météorologiques (rarement supérieures à 30 ans). Dès lors, nous préférons souvent les méthodes paramétriques aux méthodes non paramétriques. Ces méthodes permettront de plus d'intégrer des considérations agronomiques dans le choix du modèles. Celles ci pourront être utiles dans le choix de la tendance mais aussi de la distribution utilisée. Notons, entre autres, que nous préférons utiliser des distributions ayant un coefficient d'asymétrie négatif (distribution décalée à droite de la médiane) ; en effet les productions à l'hectare, et donc les rendements, sont limités à la hausse alors qu'ils peuvent avoisiner 0 dans des conditions leur étant particulièrement adverses. Si l'utilisation de la loi normale dans la modélisation fut largement étudiée dans la littérature, cette dernière ne semble pas adaptée.

---

2. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rotation\\_culturale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rotation_culturale)

D'autres études se sont alors attachées à étudier le *fitting* d'autres distributions, parmi lesquelles la loi Bêta à 4 paramètres (obtenue par transformation affine d'une loi Beta classique) semble particulièrement intéressante [BOU16].

### C.1.2 Indices obtenus à partir du traitement d'images satellitaires

Comme nous l'avons souligné dans le paragraphe précédent, il est parfois difficile pour les preneurs de risque de se procurer un historique suffisamment long de données de rendement fiables. Cela est particulièrement le cas dans de nombreux pays en développement où, souvent de par le manque de moyen, les instituts chargés de recueillir cette donnée sont dans l'incapacité de le faire. Cependant, c'est bien souvent dans ces pays, que, compte tenu de la situation précaire dans laquelle se trouve de nombreux agriculteurs, le besoin en assurance agricole se fait justement le plus sentir. Une alternative permettant de réduire le risque lié à la fiabilité des données (pour le preneur de risque) est d'utiliser des données satellitaires dans la structuration du produit. Le lecteur intéressé par ce sujet pourra se référer à [PIE15]; mémoire étudiant l'apport potentiel des données satellitaires de la NASA (et plus spécifiquement de l'indice NDVI cf. ci dessous) à l'assurance agricole et dont ce chapitre est en grande partie tiré.

L'utilisation de données satellitaires permet au preneur de risque de transférer le risque (lié à la non fiabilité des données) à l'assuré sous forme de risque de base; en effet si les données de rendement sont peu fiables, le modèle d'estimation du rendement par données satellitaires le sera lui aussi et l'indemnisation versée au final peut ne pas refléter le risque subi. Pour réduire ce risque de base, il est possible d'utiliser des données satellitaires d'un champ en particulier (1 pixel de l'image satellitaire correspond à 250 mètres de cotés) et de les confronter à un historique de rendement propre au champ pouvant être connu par le client (risque de base réduit si plus forte corrélations entre ces indices qu'entre les indices initiaux). Cependant cette réduction du risque de base s'accompagne d'une hausse du risque d'aléa moral (le comportement de l'agriculteur peut influencer sur le niveau de l'indice retenu). L'utilisation d'une franchise permet de partiellement résoudre ce problème. Notons de plus que les images satellitaires seront souvent disponibles avant même que les récoltes et par conséquent avant les données officielles publiées par les instituts nationaux. Dès lors, dans le cas où l'assurance est construite sur cet indice, l'indemnisation sera versée plus rapidement à l'assuré. Dans le cas d'une assurance construite sur les données de rendements "officielles", ces données satellitaires pourront être utilisées dans l'estimation des rendements finaux, et donc de l'indemnisation finale. À l'image des prévisions dans le cas d'un produit indicé sur des données météorologiques, les données satellitaires pourront être utilisées dans le calcul des provisions.

Parmi les nombreux indices construits à partir d'images satellitaires permettant de contrôler la production agricole, il est important de citer l'indice *Normalized Difference Vegetation Index*. Ce dernier est particulièrement utilisé à travers le monde pour prévoir et contrôler la production agricole (il est particulièrement apprécié car il permet de compenser les changements dus à des facteurs exogènes tels que les conditions d'éclairage). Cet indice fournit des renseignements quant à la croissance végétale en mesurant le réflectivité spectrale du rayonnement solaire sur ces plantes. Pour rappel le mémoire dont s'inspire ce paragraphe traitait justement de cet indice NDVI (le consulter pour plus de détails sur la construction de cet indice ou informations disponible ici<sup>3</sup>). Nous pourrions aussi citer le *Fraction of green Vegetation Cover* (FCOVER) qui correspond lui à la proportion du sol couverte par de la végétation sur une surface donnée. Comme nous l'avons dit précédemment, de nombreux autres indices construits à partir d'images satellitaires existent<sup>4</sup>; les historiques sont disponibles gratuitement pour certains d'entre eux.

---

3. <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm>

4. <http://land.copernicus.eu/global/products/fcover>

## C.2 Indices de Prix

Comme nous l'avons précisé dans la première partie, le risque météo est principalement un risque de volume (volume de vente ou de production selon le cas). Cependant, il peut aussi être la cause de variation dans les coûts; en effet les variations qu'il implique dans l'offre et la demande se répercutent sur les marchés et les niveaux de prix. Une vague de froid en hiver par exemple aura pour conséquence d'augmenter la demande en électricité, la demande augmente alors et avec elle les prix de l'électricité. Pour le secteur agricole et une culture donnée (le blé par exemple), des conditions météorologiques défavorables à une échelle suffisamment importante pourront entraîner de mauvaises récoltes. L'offre se trouvant alors réduite, le coût du blé augmentera.

Il peut donc s'avérer intéressant de coupler un indice de prix à l'indice météorologique (ou autre) retenu afin de couvrir de façon plus complète le risque de perte ou d'insuffisance de revenu.

Les processus de marché sous-jacents des indices de prix ne sont pas, à l'inverse des grandeurs météorologiques issus de processus physiques. L'analyse rétrograde des réalisations passées (approche backward) ne sera alors pas toujours la meilleure des approches envisageables pour analyser ce genre d'indice dont le comportement peut très rapidement changer (volatilité passée parfois peu représentative de la volatilité future; en effet il sera souvent dur d'anticiper la volatilité future sur les seules considérations de la volatilité passée dans le cas de variables financières). Il sera alors souvent plus pertinent d'opter pour des approches prospectives (forward looking) pour estimer les volatilités futures. Au lieu de nous intéresser aux historiques des séries concernées, nous nous intéresserons aux "attentes" du marché en utilisant par exemple les prix forward concerné afin de dériver les volatilités implicites des indices d'intérêt. Le lecteur intéressé par ces sujets. pourra se référer au manuel [GEM05].

## Annexe D

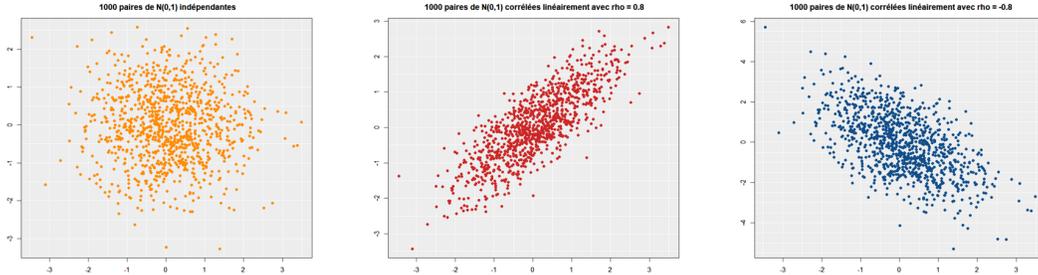
# Méthode de détection de dépendance

### 1. Prospection graphique

Afin de simplifier les notations, nous considérons le cas  $N = 2$  et nous notons :  $I_1 = X$  et  $I_2 = Y$ .

- Diagramme de corrélation/dispersion

On porte sur un graphique les points  $(X_i, Y_i); \forall i \in \{1, \dots, n\}$



- Chi-plots

Soit  $(X_i, Y_i); i \in \{1, \dots, n\}$  où  $n$  est le nombre d'observations. On pose :

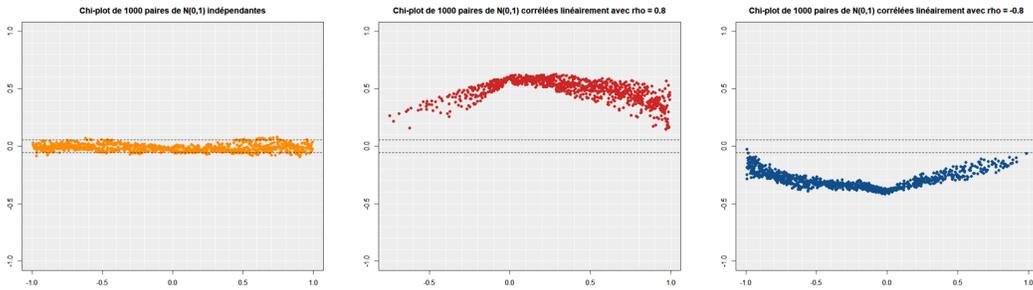
- $H_i = \frac{1}{n-1} \text{Card}\{j \neq i, X_j \leq X_i, Y_j \leq Y_i\}$
- $F_i = \frac{1}{n-1} \text{Card}\{j \neq i, X_j \leq X_i\}$
- $G_i = \frac{1}{n-1} \text{Card}\{j \neq i, Y_j \leq Y_i\}$

Sous l'hypothèse d'indépendance, nous attendons :

$$H_i = F_i \cdot G_i, \forall i \in \{1, \dots, n\} \text{ Avec : } \tilde{F}_i = F_i - 0.5 \text{ et } \tilde{G}_i = G_i - 0.5$$

On porte ensuite sur un graphique les points  $(\lambda_i, \chi_i)$  où :

- $\lambda_i = \frac{H_i - F_i \cdot G_i}{\sqrt{F_i \cdot (1-F_i) \cdot G_i \cdot (1-G_i)}}$
- $\chi_i = 4 \cdot \text{signe}(\tilde{F}_i \cdot \tilde{G}_i) \cdot \max(\tilde{F}_i^2, \tilde{G}_i^2)$



■ K-plots

- Nous ordonnons les  $H_i$  calculés avec la formule ci-dessus :  $H_{(1)}, \dots, H_{(n)}$
  - Nous portons sur le graphique les points :  $(W_{i,n}, H_{(i)})$
- où pour  $i \in \{1, \dots, n\}$ ,  $W_{i,n}$  représente l'espérance de la  $i^{\text{ème}}$  statistique d'ordre dans un échantillon aléatoire de taille  $n$  de  $K_0$ .  $K_0$  est ici la fonction de répartition de la variable :

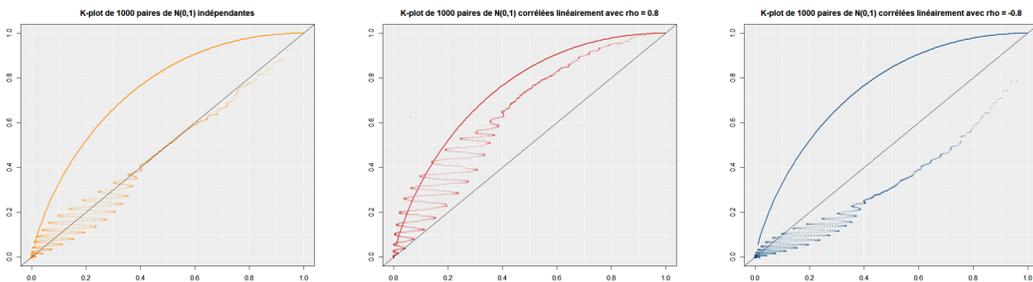
$$H = H(X, Y) = C\{F(X), F(Y)\} = C\{U, V\}$$

Sous l'hypothèse d'indépendance :

$$K(w) = P(UV \leq w) = w - \log(w)$$

NB : la  $i^{\text{ème}}$  statistique d'ordre :

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, W_{i,n} = n \binom{n-1}{i-1} \int_0^1 w K_0(w)^{i-1} \{1 - K_0(w)\}^{n-1} dK_0(w)$$



## 2. Test d'indépendance

- Test basé sur le coefficient de corrélation empirique (mauvaise mesure de dépendance).
- Test de Spearman (sur les rangs)
- Test de Kendall (idem)

## Annexe E

# L'anormalité et la normalité

**Définition 11 (Anormalité).** *Caractère ou état de ce qui est anormal, par référence à un groupe déterminé et à une moyenne préalablement établie.*<sup>1</sup>

**Définition 12 (Anormal).** *Contraire à l'ordre habituel des choses ; non conforme au modèle courant ; irrégulier, inhabituel.*<sup>2</sup>

Chacune des définitions précédentes établissent la notion indissociable de normalité définie au préalable, seul référentiel possible pour définir et quantifier l'anormalité. L'anormalité peut en effet être envisagée comme une déviation, un écart à cette normalité. Cette notion de normalité, bien que nous étant familière, n'est pas aisée à définir du fait de son caractère à la fois objectif (notion statistique et empirique : ce qui est le plus fréquent) et subjectif (dimension normative ; la norme n'est non plus définie empiriquement mais à partir de "croyances", devient fonction de l'observateur et donc de l'espace et du temps).

Nous traiterons ici du caractère statistique de la normalité. Il s'agit alors de définir l'anormalité de façon factuelle et empirique à partir des modalités ou des valeurs les plus fréquemment observées dans une population. L'anormalité peut alors être quantifiée par l'écart (notion de distance) à cette norme (de façon équivalente à cette moyenne) ou par le "niveau de rareté" d'un événement (faible fréquence d'occurrence de modalité pour une variable qualitative ou de dépassement de seuil dans le cas quantitatif). Il faudra fixer dans le premier cas, une certaine distance (pouvant par exemple être une distance à la moyenne mesurée en écart-type) et dans le second cas des seuils de fréquences ( de façon équivalente des temps de retour) en deçà (au-delà pour périodes de retour) desquelles les observations seront qualifiées d'anormales à un niveau donné.

Les considérations précédentes permettent d'appréhender le concept d'anormalité dans un contexte univarié cependant ce concept doit être défini avec plus de prudence dans le contexte multivarié. Si l'on caractérise le fait d'être normal pour une modalité comme le fait "d'être moyen", nous observons qu'il est "anormal d'être partout normal". En fait, pour un même nombre de points d'observation, le volume de l'espace considéré croît fortement (et avec lui la dispersion des points) lorsque l'on rajoute des dimensions supplémentaires. Ce phénomène est qualifié de "fléau de la dimension" et a été introduit en 1961 par Richard Bellman.<sup>3</sup>

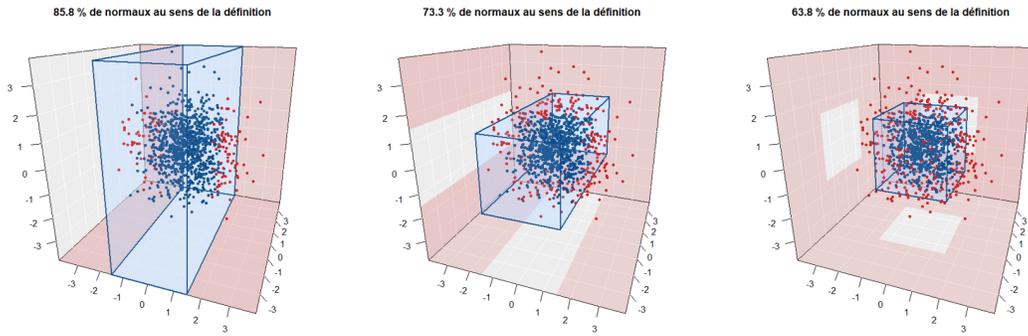
---

1. Sill. 1965, [:http://www.cnrtl.fr/definition](http://www.cnrtl.fr/definition)

2. [:http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/anormal\\_anormale\\_anormaux/3750](http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/anormal_anormale_anormaux/3750)

3. [:https://fr.wikipedia.org/wiki/Fléau\\_de\\_la\\_dimension](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fléau_de_la_dimension)

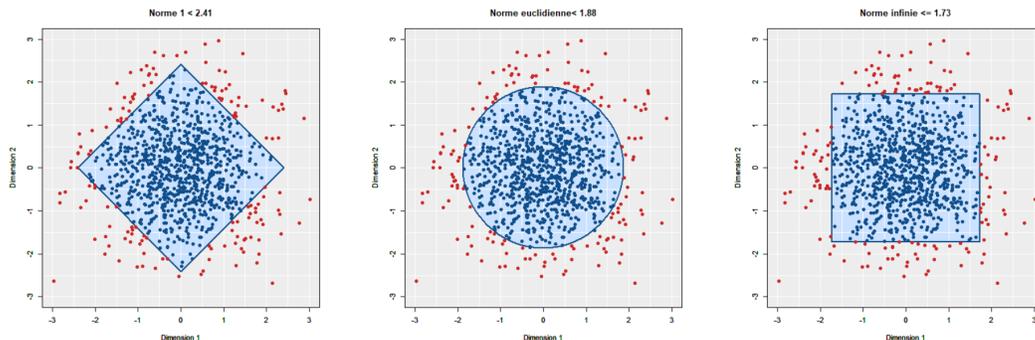
Bien qu'assez intuitif, nous illustrerons ce concept à l'aide d'un exemple tiré de [CHA17]. Considérons une variable aléatoire suivant la loi normale centrée réduite  $N(\mu, \sigma)$ . Nous définissons le critère de normalité comme le fait d'appartenir à l'intervalle  $[\mu \pm 1.5 \times \sigma]$ ; de façon équivalente, il s'agit des points dont la distance de Tchebychev à l'origine (norme infinie) est inférieure à 1.5. Dans le cas univarié, cela survient dans approximativement 85% des cas. En dimension 2, en considérant que les variables sont indépendantes, la probabilité d'être normale ( $\sim$  appartenir aux intervalles de normalité sur chaque dimension) n'est plus que de 75% (cf. graphique ci-dessous). Ainsi cette probabilité décroît avec le nombre de dimensions pour devenir inférieure à 50% en dimension 5. Une telle définition du critère de normalité montre donc ses limites alors qu'en dimension 5, la probabilité d'être anormal est supérieure à celle d'être normal.



**Figure E.1:** Illustration du passage au cas bidimensionnel puis tridimensionnel dans le cas de mille réalisations de loi normale multivariée  $N_3(0_3, \mathbf{I}_3)$  (dimension 3).

À l'inverse, notons que si l'on avait défini la normalité en dimension 2 comme le fait d'appartenir à l'un OU l'autre des intervalles, la probabilité d'être normal aurait été d'environ 98% au lieu de 75% et aurait continué à croître en dimension supérieure (en notant  $E_n$  l'ensemble des individus normaux pour  $n$  dimensions nous avons trivialement  $E_1 \subset E_2 \subset E_3 \subset \dots$ ). Encore une fois, le critère de normalité n'aurait pas été des plus cohérent ("tout devient normal").

La méthode d'agrégation des "anormalités unidimensionnelles" joue alors un rôle fondamental dans la définition du critère ou de la mesure du niveau d'anormalité et se doit d'être cohérente avec les définitions données précédemment. Afin d'assurer cette cohérence, il peut être intéressant de définir le critère d'anormalité après agrégation. Cela reviendrait, dans l'exemple précédent, à définir le seuil caractérisant la normalité en fonction du nombre de dimensions considérées (ou de la mesure retenue cf. Figure ci-dessous) de sorte à conserver la proportion désirée d'individus normaux ou anormaux.



**Figure E.2:** Frontières de normalité définies de sortes à avoir 85% d'individus normaux pour différentes normes dans le cas de mille réalisations de loi normale multivariée  $N_2(0_2, \mathbf{I}_2)$ .

# Annexe F

## Exemples de solutions multirisques

### F.1 Anormalité des séries quotidiennes

Nous cherchons ici à construire des indices d'anormalité à partir des séries quotidiennes des différents paramètres météorologiques sur une période donnée. Ce genre d'indice permettra de se couvrir contre des niveaux anormaux de ces séries. Selon l'activité considérée, il sera donc nécessaire de sélectionner un ou plusieurs paramètres météorologiques auxquels nous savons que cette dernière est sensible (par exemple la température minimale, maximale ou moyenne, les précipitations, le vent, l'humidité relative, l'ensoleillement...) et pour chacun d'entre eux :

- Associer un poids
- Définir des niveaux d'anormalité
- Si le risque correspond à des valeurs élevées ou basses de la série (déficit/excès)

Une solution, inspirée de l'indice actuariel climatique [act+17] (IAC)<sup>1</sup>, consiste à s'intéresser pour un paramètre donné aux fréquences de dépassement ou de déficit par rapport à un niveau de quantile calculé sur une période de référence.

Nous choisissons une longueur d'historique  $T$  et partons donc des séries quotidiennes (de-trendées ou non). Pour chaque jour de la période de couverture, nous retenons les données de l'intervalle  $\pm 15$  jours (naturellement possible d'utiliser une fenêtre d'une autre longueur). Nous disposons alors de  $T \times 31$  points d'observations pour chaque jour de la période considérée. À partir de ces points, nous déterminons les quantiles empiriques  $(Q_{day})_{1 \leq day \leq 31}$  au niveau désiré  $q$  pour chaque jour. Nous calculons ensuite sur l'ensemble de la période la fréquence d'observations supérieures/inférieures au quantile considéré. Enfin, nous calculons la différence entre cette fréquence empirique et la fréquence théorique fonction du niveau de quantile choisi.

Illustrons cela à l'aide d'un exemple, nous choisissons de travailler avec un risque :

- Correspondant à des valeurs élevées de la série (par exemple excès thermique ou de précipitations)
- Un quantile de niveau 80

---

1. Développé par l'Institut canadien des actuaires, la Society of Actuaries, la Casualty Actuarial Society et l'American Academy of Actuaries afin de renseigner et sensibiliser la communauté actuarielle au sujet des phénomènes météorologiques extrêmes et aux risques associés

Nous disposons initialement de l'échantillon de données météorologiques quotidiennes  $E$  défini par :

$$E = \{ M_{i,y,k} ; i \in \text{période de couverture} ; y \in \text{historique} ; k \in \llbracket 1; N \rrbracket \} \in \mathbb{R}^{D \times T \times N} \quad (\text{F.1})$$

- $\mathbf{i}$  le jour d'observation
- $\mathbf{y}$  l'année d'observation
- $\mathbf{D}$  le nombre de jour de la période
- $\mathbf{T}$  la longueur de l'historique
- $\mathbf{N}$  le nombre de paramètres météorologiques retenus
- $\mathbf{M}$  l'observation correspondante

Nous commençons par quantifier "les niveaux d'anormalité individuelle" comme suit :

1. Pour chaque jour de la période, nous **calculons les quantiles**  $Q_{I,K}^{80\%}$  (de niveau 80%) de l'échantillon :

$$\{ M_{i,y,k} ; i \in \llbracket I - 15; I + 15 \rrbracket ; y \in \text{historique} \} \in \mathbb{R}^{31 \times T \times N} \quad (\text{F.2})$$

2. Nous nous intéressons ensuite pour une année donnée  $y$  à la **fréquence de dépassement** donnée par la formule :

$$F_{y,n} = \frac{\text{Card}\{ M_{i,y,k} ; i \in \text{période de couverture} ; M_{i,y,k} > Q_{I,K}^{80\%} \}}{\text{Card}\{ M_{i,y,k} ; i \in \text{période de couverture} \}} \quad (\text{F.3})$$

3. Nous calculons ensuite pour chaque indice  $k$  la **différence entre la fréquence empirique obtenue et la fréquence théorique de dépassement** (20% dans ce cas) afin de déterminer le niveau d'anormalité de l'indice :

$$I_{y,k} = (F_{y,k} - 20\%)_+ \quad (\text{F.4})$$

Nous obtenons ainsi un indice pour chacun des paramètres météorologiques retenus. Ils peuvent alors être agrégés sur une dimension à l'aide, par exemple, d'anomalies standardisées. Autrement dit, pour chaque année  $y$  nous définissons :

$$Idx_y = \sum_{k=1}^N \frac{(I_{y,k} - \mu_k)}{\sigma_k} \times \omega_k \quad (\text{F.5})$$

- $\mu_k$  la moyenne de l'indice  $k$  calculée sur les  $T$  années
- $\sigma_k$  l'écart type de l'indice  $k$  calculé sur les  $T$  années
- $\omega_k$  le poids associé à l'indice  $k$

Il sera aussi possible de définir le degré d'anormalité en fonction de la probabilité d'observer une année au moins aussi défavorable au sens de l'indice (fréquence d'occurrence ou de manière équivalente temps de retour). Pour chaque année  $y$ , nous définissons :

$$\text{Prob}_y = \mathbb{P}(Idx > Idx_y) = 1 - F_{Idx}(Idx_y) \quad (\text{F.6})$$

**Notes :**

- Notons que par construction, les indices individuels obtenus devraient être centrés.
- Il est intéressant de noter que si les températures sont généralement distribuées de façon relativement symétrique, il n'en est pas de même pour les niveaux de précipitations et les vitesses de vent quotidiennes qui sont asymétriques à droite (skewness positif) et bornées à gauche. Ainsi l'approche développée ci-dessus est à proscrire pour ces deux grandeurs dans le cas d'un risque correspondant à un déficit de vent ou de précipitations ; il sera dans ce cas souvent plus intéressant de définir des indices individuels pour ces risques (nombre de jours critiques sous un seuil, consécutifs ou non par exemple).
- Il est aussi possible de travailler à partir des séries quotidiennes différenciées : l'anormalité sera alors fonction des écarts quotidiens des différentes séries.
- En ce qui concerne le vent, il pourra être intéressant d'utiliser la puissance éolienne qui est plus corrélée à l'impact des vents forts que la vitesse moyenne [Sol12].

## F.2 Anormalité d'indices prédéfinis

Nous cherchons ici à construire des indices d'anormalité à partir des indices météorologiques préalablement définis. Ce genre d'indice permettra de se couvrir contre des valeurs anormales des indices en question.

En plus des paramètres propres à la définition de l'indice, nous pourrions (comme dans le premier cas) :

- Définir différents niveaux d'anormalité.
- Définir différents poids à associer à chaque indice.
- Préciser si le risque est croissant ou décroissant avec la valeur de l'indice.

Pour une longueur d'historique donnée nous partons cette fois-ci directement de l'échantillon :

$$E_3 = \{ I_{y,k}; y \in \text{historique}; k \in \llbracket 1; N \rrbracket \} \in \mathbb{R}^{T \times N} \quad (\text{F.7})$$

Une première méthode consisterait à définir les niveaux d'anormalité en fonction des quantiles de cet échantillon pour chaque indice. Nous définissons des classes d'anormalité, qui sont utilisées comme support d'une nouvelle variable aléatoire discrète) et dont nous connaissons les probabilités associées (fixées par les niveaux de quantile choisis). Autrement dit pour un indice donné  $k$  (croissant avec le risque sous-jacent) :

1. **On définit** un certain nombre de "**classes d'anormalité**" : météo normale, anormalité modérée, élevée, importante, ...
2. **On définit différents niveaux de quantiles**  $q_{1,k}, q_{2,k}, q_{3,k}, \dots$  définissant l'ensemble des frontières  $Q_{1,k} < Q_{2,k} < Q_{3,k} < \dots$  des différentes "classes d'anormalité".
3. **On associe** à chaque valeur de l'indice  $k$  un **niveau d'anormalité en fonction de la classe** à laquelle il appartient.

À partir des différentes classes d'anormalités de chaque indice individuel, plusieurs règles peuvent être définies afin de **caractériser l'anormalité globale de la période**.

Nous pourrions par exemple qualifier une période d'anormal (sans quantifier son degré d'anormalité) si sur les  $N$  indices individuels :

- Au moins  $n_1$  appartiennent à la classe 1.
- Au moins  $n_2$  appartiennent à la classe 2.
- Au moins  $n_3$  appartiennent à la classe 3.
- ...

Nous définissons alors les classes "normales" et "anormales" utilisées à leur tour comme support d'une nouvelle variable aléatoire discrète (suivant une loi de Bernoulli).

Dans le cas de périls météo indépendants (impliquant l'indépendance des variables discrètes précédemment construites), une telle approche présenterait l'avantage de permettre le calcul de la probabilité de réalisation de l'anormalité pour une période donnée (événement A : période anormal au sens du modèle).

Prenons un exemple afin d'illustrer cela. Nous choisissons de façon arbitraire :

- $N = 4$ ; soit 4 indices individuels
- 3 classes d'anormalité (une classe normale : classe 0)
- $n_1 = 3, n_2 = 2, n_3 = 1$ , les seuils de déclenchement associés aux différents niveaux
- Les mêmes niveaux d'anormalité pour chaque indice

{Niveaux}	Probabilité si ordonné	Cardinal	Probabilité
{0,0,0,0}	$(q_1)^4$	1	$p_1$
{0,0,0,1}	$(q_1)^3 \cdot (q_2 - q_1)$	$C_4^1 = 4$	$p_2$
{0,0,0,2}	$(q_1)^3 \cdot (q_3 - q_1)$	4	$p_3$
{0,0,1,1}	$(q_1)^2 \cdot (q_2 - q_1)^2$	$C_4^2 = 6$	$p_4$
{0,0,1,2}	$(q_1)^2 \cdot (q_2 - q_1) \cdot (q_3 - q_1)$	$C_4^1 \cdot C_3^1 = 12$	$p_5$

**Figure F.1:** Calcul des probabilités associées aux différents scénarios de "période normale" (hypothèse d'indépendance entre les indices)

$$P(\bar{A}) = \sum_{i=1}^5 p_i$$

La probabilité  $P(\bar{A})$  ainsi calculée correspond alors au paramètre de la variable de Bernoulli ( $\sim$  son espérance) pour laquelle le "succès" est défini comme la réalisation d'une période normale et dont nous pouvons facilement calculer la variance :  $P(\bar{A}) \cdot P(A)$ .

#### Notes :

- D'autres méthodes permettant de créer des classes (d'anormalité dans notre cas) au sein d'une distribution peuvent être utilisées. Si certaines méthodes moins triviales sont à proscrire pour des raisons commerciales (méthode de Jenks, K-means ...) la définition de classes en fonction de la distance à la moyenne mesurée en écart-type est envisageable. Si l'utilisation de quantile est moins efficace en présence de valeurs discontinues, les frontières des classes définies à partir de la moyenne et de l'écart-type seront plus sensibles aux potentielles valeurs extrêmes.
- Le produit construit sur un l'indice de l'exemple précédent donnerait lieu à indemnisation dans le cas de la réalisation d'une période anormale; le montant de cette indemnisation sera fixe ( $\sim$  option digitale). Une multitude d'autres règles est envisageable parmi lesquelles certaines permettraient de définir différents niveaux "d'anormalité globale" et donc différents niveaux d'indemnisation (nous donnons un exemple ci-dessous dans le cas de 4 indices individuels).

Premier niveau d'anormalité globale		Deuxième niveau d'anormalité globale		Troisième niveau d'anormalité globale	
Classe 1	2	Classe 1	3	Classe 1	4
Classe 2	1	Classe 2	2	Classe 2	Au moins 3
Classe 3	0	Classe 3	1	Classe 3	Au moins 2

**Figure F.2:** Exemple de règle donnant lieu à une indemnisation progressive; chacun des niveaux d'anormalité globale est déclenché si au moins une des conditions sur les différentes classes est vérifiée

### F.3 Autres exemples

Il s'agira dans cette partie de construire des indices composites à partir d'indices prédéfinis pour lesquels les seuils et l'ensemble des autres paramètres sont fixés à l'avance. Ce genre d'indices permettra de se couvrir contre plusieurs risques identifiés auquel nous associerons des indices individuels pour lesquels, selon les cas, des valeurs inférieures ou supérieures aux seuils choisis correspondront à la réalisation du risque. La définition de tels seuils à partir de considérations sur le risque sous-jacent ( $\sim$  le risque se réalise pour des valeurs supérieures ou inférieures au seuil choisi) présentera l'avantage de réduire le risque de base par rapport aux indices d'anormalités pour lesquels les seuils sont définis statistiquement (risque alors plus important que l'indemnisation s'éloigne de la perte subie).

Il est aussi possible de construire un "indice multirisques" directement à partir des séries quotidiennes (brutes ou transformées). Nous décrivons ci-dessous une première solution de ce genre envisagée chez Meteo Protect consistant à définir un indice de comptage de jours critiques sur plusieurs paramètres météorologiques.

#### Premier exemple

En considérant qu'un jour critique correspond à un jour où nous observons une valeur supérieure au seuil quotidien défini, nous disposons de l'échantillon  $E$  (on garde les mêmes notations que précédemment) :

$$E = \{ M_{i,y,k} ; i \in \text{période de couverture} ; y \in \text{historique} ; k \in \llbracket 1; N \rrbracket \} \in \mathbb{R}^{D \times T \times N} \quad (\text{F.8})$$

1. Pour chaque indice **on définit un seuil quotidien critique**  $s_k$  (un jour est considéré comme critique pour un paramètre donné si la valeur du paramètre est au-delà ou en dessous de ce seuil selon la définition qui est donnée). Cela revient à définir une fonction  $f_{critical}$  telle que :

$$f_{critical} : \left| \begin{array}{l} \mathbb{R}^{D \times T \times N^2} \longrightarrow \{0, 1\}^{D \times T \times N} \\ E \times \{s_k, k \in \llbracket 1; N \rrbracket\} \longmapsto C_1 \end{array} \right. \quad (\text{F.9})$$

- $C_1 = \{ Critical_{i,y,k} ; i \in \text{période de couverture} ; y \in \text{historique} ; k \in \llbracket 1; N \rrbracket \}$
- $Critical_{i,y,k} = \begin{cases} 1 \text{ si le le jour } i \text{ de l'année } y \text{ est critique au sens du paramètre } k \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$

2. **On précise alors une fonction d'agrégation** définissant ce qu'est un jour critique au sens de l'ensemble des paramètres. Cela peut être fait de façon relativement simple à l'aide d'un opérateur booléen (conjonction "ET", "OU"), ou en caractérisant un jour critique comme un jour où au moins  $n$  paramètres sont critiques par exemple.

$$f_{agreg} : \left| \begin{array}{l} \{0, 1\}^{D \times T \times N} \longrightarrow \{0, 1\}^{D \times T} \\ C_1 \longmapsto C_2 \end{array} \right. \quad (\text{F.10})$$

- $C_2 = \{ Critical_{i,y} ; i \in \text{période de couverture} ; y \in \text{historique} \}$
- $Critical_{i,y,k} = \begin{cases} 1 \text{ si le le jour } i \text{ de l'année } y \text{ est critique} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$

3. Enfin, il est nécessaire de **préciser une fonction "d'agrégation temporelle"** pour obtenir la valeur de l'indice sur chaque période. Nous pouvons retenir la somme, le nombre maximal de jours critiques consécutifs ou définir une "période critique" ...

$$f_{temp} : \begin{cases} \{0,1\}^{D \times T} & \longrightarrow \mathbb{R}^T \\ C_2 & \longmapsto \{I_y; y \in \text{historique}\} \end{cases} \quad (\text{F.11})$$

Avec  $I_y$  la valeur de l'indice sur l'année  $y$

Méthode d'agrégation	Intersection (« ET »)	Union (« OU »)	Au moins $n$ critiques	...
$Critical_{i,y}$	$\prod_{k=1}^N Critical_{i,y,k}$	$\max_{k \in \llbracket 1, N \rrbracket} \{Critical_{i,y,k}\}$	$\left\{ \sum_{k=1}^N Critical_{i,y,k} \geq n \right\}$	...

**Figure F.3:** Exemples de méthodes de définition du jour critique et fonctions correspondantes

### Deuxième exemple

Il est possible, à partir de différents produits de couverture (et indices) prédéfinis, de construire un nouveau produit dont les *payoffs* correspondront à la somme des "*payoffs* individuels". Selon la méthode de chargement utilisée, un produit de ce genre pourra avoir un coût inférieur à la somme des coûts des produits pris individuellement (cf. Chapitre 9), en offrant cependant le même niveau de couverture.

Les indices ayant été définis à l'avance, nous disposons de l'échantillon :

$$E_3 = \{I_{y,k}; y \in \text{historique}; k \in \llbracket 1; N \rrbracket\} \in \mathbb{R}^{T \times N} \quad (\text{F.12})$$

1. La structure ayant été préalablement définie pour chaque indice, il est possible de **calculer les *payoffs*** correspondants (fonction de la valeur des indices).

$$\{S_{y,k}; y \in \text{historique}; k \in \llbracket 1; N \rrbracket\} \in \mathbb{R}^{T \times N} \quad (\text{F.13})$$

2. **On somme sur chaque année les *payoffs*** trouvés pour obtenir les *payoffs* du nouveau produit.

$$S_y = \sum_{k=1}^N S_{y,k} \quad (\text{F.14})$$

### Notes :

S'il est envisageable de définir une pondération afin de donner plus ou moins d'importance aux différents produits, cela peut être fait directement en choisissant des structure appropriées (par exemple, en utilisant pour les différents indices, une indemnisation par unité d'indice au-delà du seuil de déclenchement proportionnelle à la pondération désirée).

### Troisième exemple

Nous pouvons aussi envisager de construire des indices composites calculés à partir des indices individuels. Nous présentons ci-dessous une des nombreuses méthodes permettant de construire de tels indices.

Nous disposons, comme dans l'exemple précédent, de l'échantillon :

$$E_3 = \{I_{y,k}; y \in \text{historique}; k \in \llbracket 1; N \rrbracket\} \in \mathbb{R}^{T \times N} \quad (\text{F.15})$$

1. On définit pour chacun des indices  $k$  :

- Un seuil de déclenchement  $s_k$  en deçà/au-dessus duquel l'indice est nul.
- Si le risque est croissant ou décroissant avec la valeur de celui-ci.

2. On calcule alors, pour chaque année, la partie positive de la différence entre la valeur de l'indice et ce seuil dans le cas d'un risque croissant avec la valeur de l'indice (différence entre seuil et valeur de l'indice si risque décroissant avec l'indice)

$$f_{\text{écart}} : \begin{cases} \mathbb{R}^{D \times T} & \longrightarrow \mathbb{R}^{T \times N} \\ E_3 & \longmapsto \{diff_{y,k}^+; y \in \text{historique}; k \in \llbracket 1; N \rrbracket\} \end{cases} \quad (\text{F.16})$$

$$\text{Avec } diff_{y,k}^+ = \begin{cases} (I_{y,k} - s_k)^+ & \text{si le risque est croissant avec l'indice} \\ (s_k - I_{y,k})^+ & \text{si le risque est décroissant avec l'indice} \end{cases}$$

3. On agrège, pour chaque année, les différences trouvées. Cela peut être fait, ici aussi, en sommant les anomalies standardisées. Dans ce cas, nous définissons pour chaque année  $y$  :

$$Idx_y = \sum_{k=1}^N \frac{(diff_{y,k}^+ - \mu_k)}{\sigma_k} \times \omega_k \quad (\text{F.17})$$

- $\mu_k$  la moyenne des différences positives de l'indice  $k$ .
- $\sigma_k$  l'écart type des différences positives de l'indice  $k$ .
- $\omega_k$  le poids associé à l'indice  $k$ .

### Notes :

Les poids associés aux différents indices retenus peuvent être choisis a priori à partir de considérations sur le risque sous-jacent ou par le biais d'un examen plus approfondi de ce dernier. Il peut être intéressant, si l'on dispose de données permettant de quantifier le niveau de réalisation du risque pour les années passées (données économiques de l'entreprise, du secteur, rendement dans le cas de l'agriculture ...), de définir les poids associés aux différents indices en utilisant ces données (poids fonctions des niveaux de corrélation entre ces données et les différents indices, régression de ces données sur les différents indices et définition de poids fonctions des coefficients ...).

# Annexe G

## Figures Supplémentaires

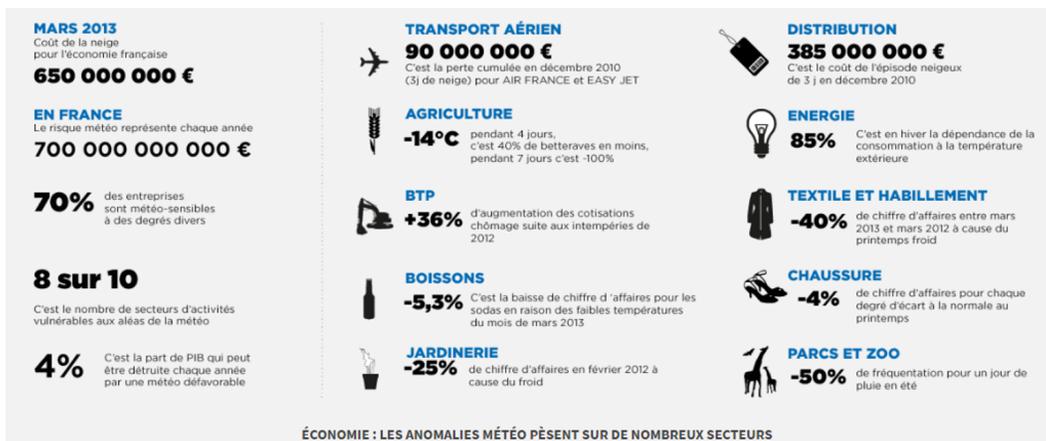


Figure G.1: Indicateurs de météo-sensibilité pour différents secteurs (source meteosensibilité.com)

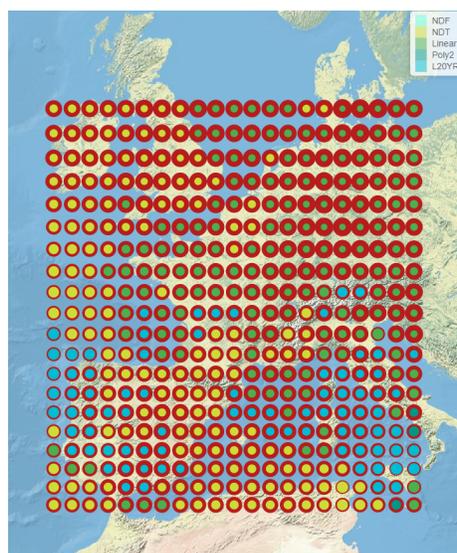
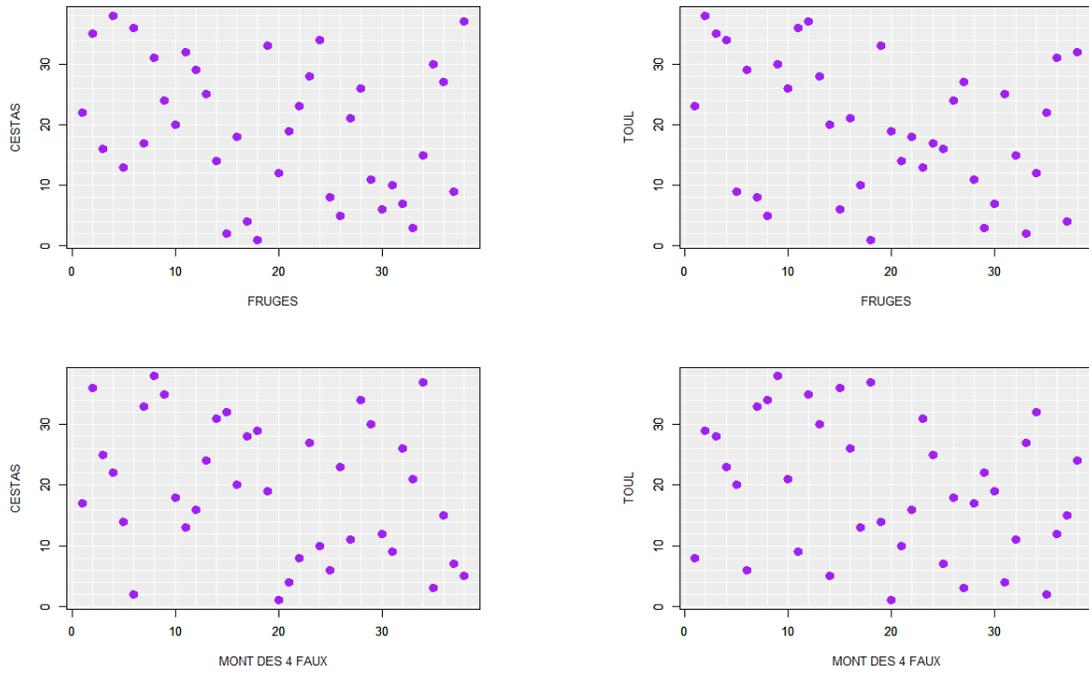
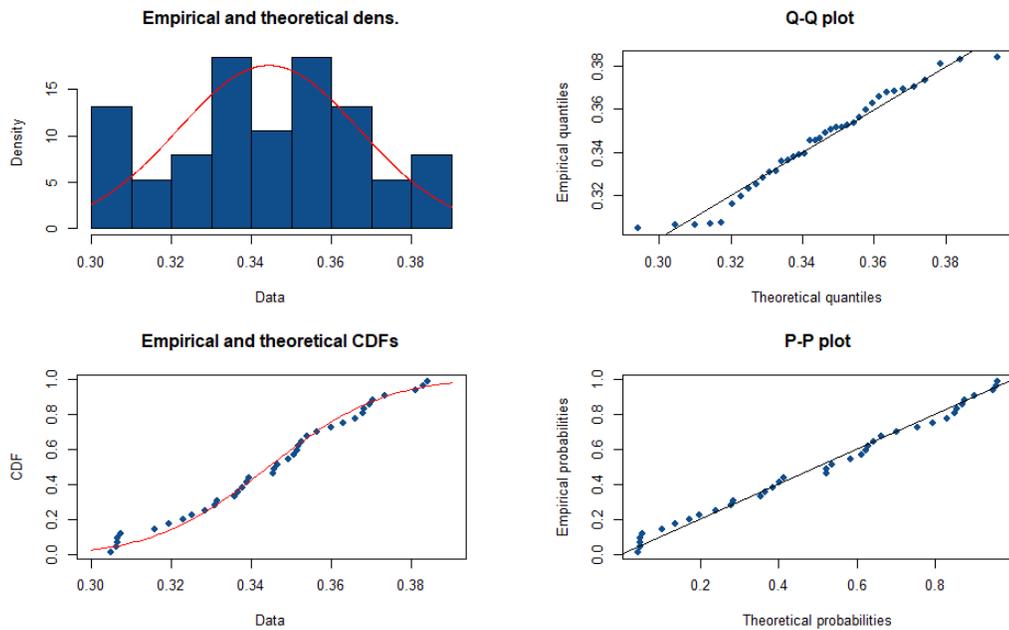


Figure G.2: Carte détaillée en 7.3 observée sur l'ensemble de la grille retenue



**Figure G.3:** Rank-Rank plot des facteurs de charges moyens annuels historiques modélisés éoliens et solaires



**Figure G.4:** Loi normale estimée sur les données *détrendées* pour le Parc de Fruges

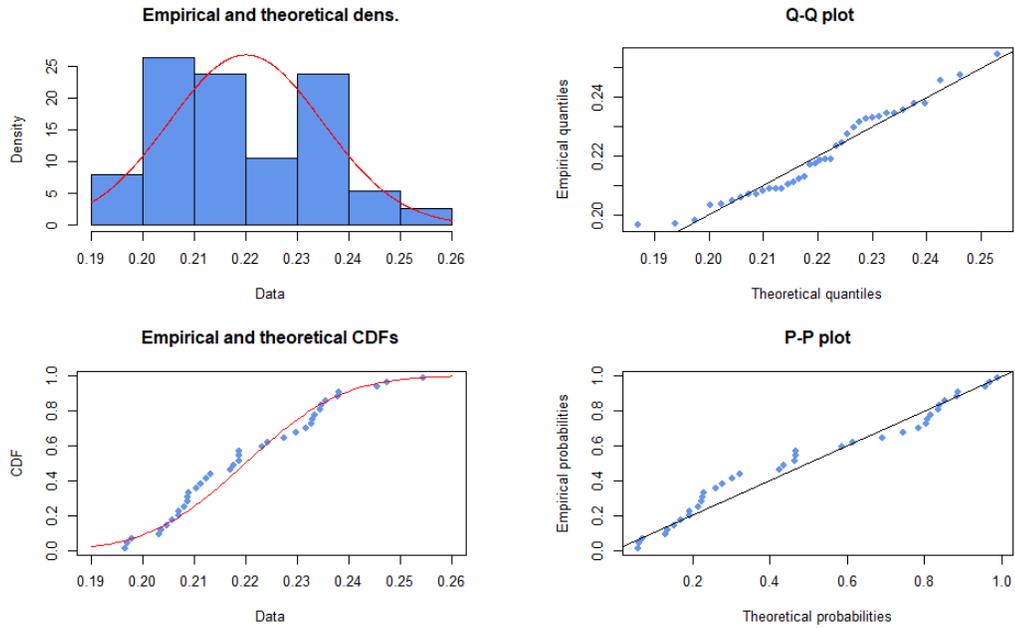


Figure G.5: Loi normale estimée sur les données *détrendées* pour le Parc du Mont des 4 Faux

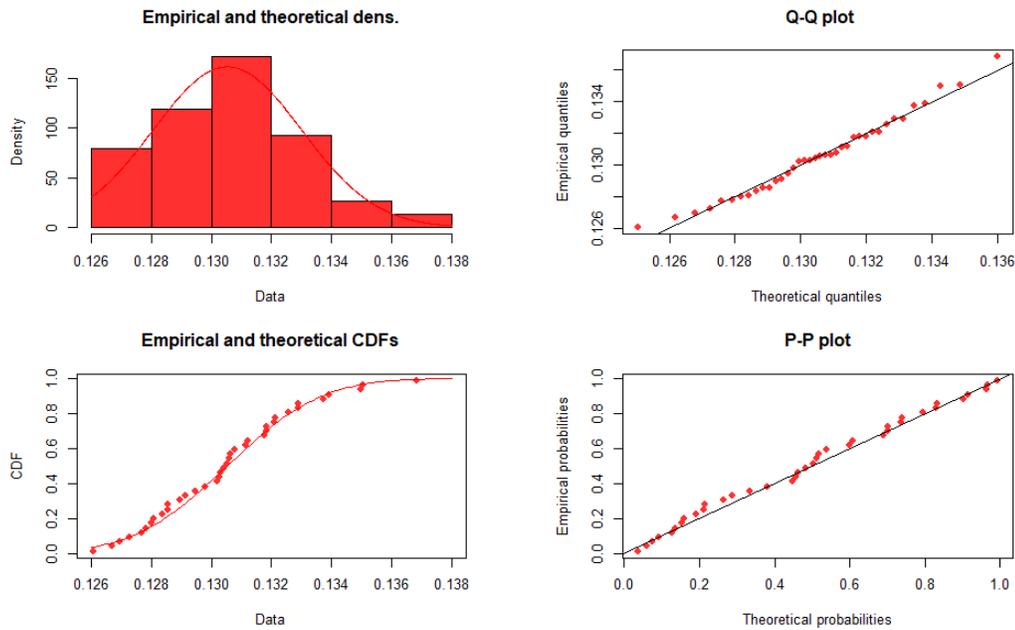
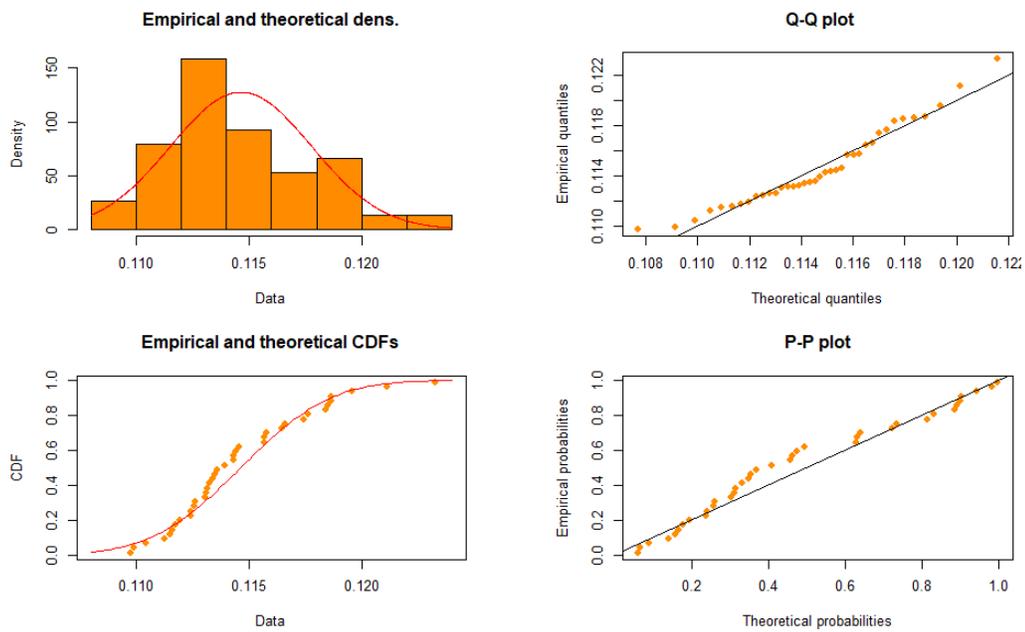


Figure G.6: Loi normale estimée sur les données *détrendées* pour le Parc de Cestas



**Figure G.7:** Loi normale estimée sur les données *détrendées* pour le Parc de Toul

Site	Fruges	Mont des 4 Faux	Cestas	Toul	Agrégé
Puissance Installée	140 MW	300 MW	300 MW	115 MW	855 MW
Prix du kWh en Euro	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101

PARAMÉTRIQUE					
EL	401716	330821	46529	22675	1205342
SD	900686	911695	152096	64896	2106959
Max	3807118	4011620	1032840	281571	9133149
Max Théorique	3807118	4011620	1032840	281571	9133149

HBA					
EL	481151	228488	33123	12034	754796
SD	982407	631195	98935	39961	1383578
Max	3000413	100263	476049	1032840	5338179
Max Théorique	3807118	4011620	1032840	281571	9133149

Années	PAIEMENTS HISTO				
1980	0	0	0	0	0
1981	0	0	0	0	0
1982	0	0	0	0	0
1983	0	0	0	0	0
1984	1194473	65837	0	0	1260310
1985	0	0	0	0	0
1986	0	0	0	0	0
1987	2783303	619572	0	0	3402875
1988	0	0	0	0	0
1989	3000413	2337766	0	0	5338179
1990	0	0	0	0	0
1991	768740	0	0	0	768740
1992	0	0	245903	0	245903
1993	0	0	14195	0	14195
1994	0	0	0	103700	103700
1995	0	0	0	0	0
1996	516741	0	0	0	516741
1997	2766935	0	0	0	2766935
1998	0	0	0	0	0
1999	0	0	47849	0	47849
2000	0	0	0	0	0
2001	0	0	0	0	0
2002	0	0	312844	0	312844
2003	2671085	0	0	0	2671085
2004	110420	0	0	0	110420
2005	1656085	2477882	0	0	4133967
2006	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0
2008	0	0	161827	157672	319499
2009	0	0	0	0	0
2010	2815559	748465	0	0	3564024
2011	0	0	0	0	0
2012	0	0	0	0	0
2013	0	0	476048	173381	649429
2014	0	0	0	0	0
2015	0	0	0	0	0
2016	0	2113746	0	22547	2136293
2017	0	319259	0	0	319259

**Figure G.8:** Indicateurs de dispersion obtenues par les deux approches (HBA et paramétriques). Le kWh a été fixé à 10c€ pour tous les parcs et la puissance installée du parc des Mont des 4 Faux à 300 MW.