

# **L'assurance indicielle paramétrique dans les pays en développement : une réflexion sur l'estimation de la prime de risque contre les pluies torrentielles**

## **Parametric index insurance in developing countries: a reflection on the estimation of the risk**

**Marie-Eliette DURY**

Université Clermont Auvergne, CNRS, CERDI, F-63000 Clermont-Ferrand, France  
[m-eliette.dury@uca.fr](mailto:m-eliette.dury@uca.fr)

**Bing XIAO**

Université Clermont Auvergne, IUT Aurillac, CLERMA EA 38 49, France  
[bing.xiao@uca.fr](mailto:bing.xiao@uca.fr)

### **Résumé**

Le développement de l'assurance indicielle s'inscrit dans le contexte des anomalies météorologiques mondiales de plus en plus fréquentes : augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes, intensification des sécheresses extrêmes ou aussi des phénomènes cycloniques. Ces différents facteurs présentent un risque de faillite trop important pour les agriculteurs. Face aux incertitudes, les assurances climatiques classiques présentent des inconvénients. Tout d'abord, le problème d'asymétrie : seul l'assuré peut connaître avec précision l'impact de l'évènement climatique sur les résultats. Ensuite, il y a le problème d'anti-sélection : ce sont les fermiers les plus exposés aux risques climatiques qui voudraient se prémunir. Enfin, comment pourrait-on contraindre les fermiers concernés à procéder en interne à la gestion de leurs risques climatiques ? Dans ce contexte, les produits dérivés climatiques ne peuvent pas se substituer aux produits d'assurance, car la gestion d'assurance des risques climatiques non catastrophiques est irréalisable, et pour cause, l'importance du volume du risque est trop élevée. Notre article a pour but d'analyser différents produits d'assurance, et notamment les produits d'assurance indicielle paramétrique, afin de proposer quelques pistes de réflexion sur la détermination de la prime d'assurance.

**Mots clés :** *Développement durable, pays en voie de développement, Agriculture, Assurance climatique indicielle, Prime d'assurance, Simulation de Monte-Carlo*

## Introduction

Le développement de l'assurance indicielle s'inscrit dans le contexte des anomalies météorologiques mondiales de plus en plus fréquentes : augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes, intensification des sécheresses extrêmes, des phénomènes cycloniques, pour ne citer que les principales anomalies. Prenons le cas de la France par exemple, on estime qu'il y a -18% de rendement pour les cultures de blé lors d'une année de sécheresse et -23% de rendement pour les cultures françaises de maïs lors d'une année de sécheresse (Sarraudy & Le Plat, 2017)<sup>1</sup>.

En même temps, l'assurance climatique classique présente des inconvénients, comme les délais d'indemnisation souvent longs, et le fait que l'assuré doit prouver que le dégât est causé par les conditions climatiques, aussi le problème de la déclaration et de l'expertise (2 visites, 1 après le sinistre, 1 après la récolte). Ces différents facteurs présentent un risque de faillite trop important pour les agriculteurs.

L'introduction de l'assurance indicielle permet de se focaliser sur le risque de base. L'assurance est liée à un indice (Pluie, température, humidité), il s'agit d'un montant forfaitaire et contractuel contre la perte réellement causée dans une assurance classique. Il représente l'avantage d'une déclaration allégée et d'une indemnisation automatique dès qu'il y a un dépassement du seuil comme défini dans le contrat.

Les domaines d'application de l'assurance indicielle sont nombreux :

- Secteur industriel : les entreprises de construction se protègent contre la perte d'exploitation par des conditions climatiques défavorables.
- Secteur des transports : retard ou annulation d'avions, fermeture des autoroutes.
- Autres secteurs tel que le secteur de la distribution, du tourisme, les stations de ski

Selon l'assurance indicielle, l'indemnisation repose uniquement sur la variation d'un indice et sans référence à un dommage.

---

<sup>1</sup> Marie-Catherine Sarraudy; Optimind Winter ; Directrice métier, membre du comité exécutif, en charge de l'actuariat conseil. Paris, Île-de-France, France

## 1 Revue de la littérature

Dans notre article, tout d'abord, nous présentons la notion de la couverture. Dans un deuxième temps, nous allons aborder la question des produits dérivés climatiques à travers la thèse d'Olivier Roustant (Roustant, Juillet 2003). Puis nous présenterons la méthodologie des produits d'assurance climatique en analysant le mémoire de Riteng et Nguyen (Ritleng & Nguyen, Juin 2014) portant sur l'assurance contre le risque de pluie torrentielle. C'est d'ailleurs le travail de Riteng et Nguyen qui se rapproche le plus du projet d'assurance indiciaire.

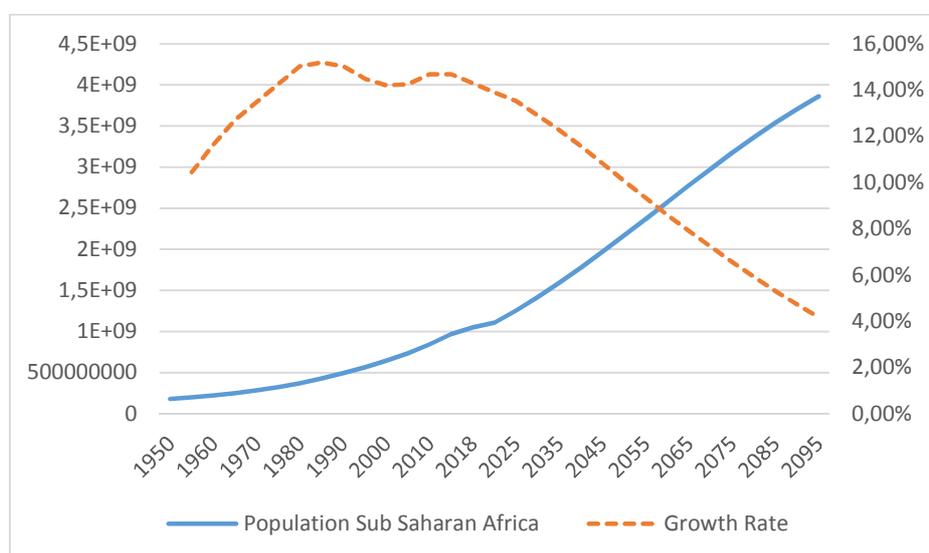
### 1.1 Contexte

Dans les pays développés, le secteur agricole a massivement recours aux stratégies de transfert de risque. Dans les pays en développement, où moins de 10% des agriculteurs bénéficient d'une couverture de risque, les assurances indiciaires suscitent de grands espoirs par leur facilité d'indemnisation. La Banque mondiale a lancé en 2011 le programme « Global Index Insurance Facility », afin de promouvoir l'assurance indiciaire ; un grand nombre de projets en cours sont soutenus par la SFI (Société Financière Internationale), qui est une entité du groupe Banque mondiale. La SFI a ensuite confié à PlaNet Guarantee la mise en place d'une stratégie régionale, intitulée Assurance Récolte Sahel (ARS), pour développer l'assurance agricole indiciaire dans cinq pays d'Afrique de l'Ouest : le Sénégal, le Mali, le Burkina-Faso, le Bénin et la Côte d'Ivoire.

L'enjeu de la sécurité alimentaire est important dans le contexte actuel : prenons l'exemple de l'Afrique subsaharienne, après des décennies de baisse de la production alimentaire par habitant, la croissance agricole et économique a dépassé la croissance démographique dans de nombreux pays. L'OCDE et la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) s'attendent à une "forte croissance de la production agricole" en Afrique subsaharienne d'ici 2027, avec une augmentation de 30% de la production agricole et de 25% de la production de viande. Selon le rapport "Perspectives agricoles 2018-2027", cette croissance s'accompagnera d'une "*expansion des superficies consacrées au maïs, au soja et à la canne à sucre*", mais est insuffisante pour la sécurité alimentaire. Le rapport "Perspectives agricoles 2018-2027" indique que l'Afrique subsaharienne connaîtra une "*augmentation*

*générale de la productivité" avec l'utilisation "d'engrais, de pesticides, de semences améliorées et de technologies de mécanisation et d'irrigation". Toutefois, cette croissance ne garantira pas la sécurité alimentaire dans la région en raison des "besoins de consommation croissants" dus à la croissance démographique. La figure 1 présente l'histoire de la population de l'Afrique subsaharienne et ses projections jusqu'en 2095. La population de l'Afrique subsaharienne devrait atteindre entre 1,5 et 2 milliards de personnes en 2050, contre 770 millions en 2005. Malgré la migration rapide des populations des zones rurales vers les villes, impliquant l'augmentation de la population urbaine, il est également probable que le nombre total de ruraux continuera à augmenter.*

*Figure 1: Population et sa projection de l'Afrique subsaharienne : 1950 à 2095*



Graphique élaboré par les auteurs sur la base de [www.worldpopulationreview.com](http://www.worldpopulationreview.com)

Le piège de la crise alimentaire qui menace les pays d'Afrique subsaharienne est principalement dû au manque d'investissement dans le secteur agricole. Moins du quart de la superficie totale potentielle des terres arables pluviales d'Afrique subsaharienne est utilisé. Selon les estimations de la FAO, une superficie supplémentaire de plus de 700 millions d'hectares pourrait également être arable. Les gains de rendement associés aux variétés à haut rendement étaient beaucoup moins importants en Afrique subsaharienne que dans d'autres régions, en raison notamment de l'insuffisance des marchés des intrants et des produits et des services de vulgarisation et des infrastructures insuffisantes. Cela a entraîné une faible utilisation de l'irrigation, des engrais, des semences améliorées et des pesticides (Kidinda, et al., 2015). En 2000, l'utilisation d'engrais n'était que de 13 kg par hectare en Afrique

subsaharienne, contre 73 kg au Moyen-Orient et en Afrique du Nord et 190 kg en Asie de l'Est et dans le Pacifique. Les rendements céréaliers ont peu augmenté et se situent toujours autour de 1,2 tonne par hectare dans la région, contre une moyenne d'environ 3 tonnes par hectare dans tous les pays en développement (FAO, 2009).

En Afrique, les dépenses de recherche-développement agricole dans les pays de la région entre 1981 et 2000 n'ont augmenté que de 0,6% en moyenne par an et ont même diminué au cours des années 90. D'énormes investissements dans les infrastructures et la technologie, ainsi que des mesures de protection appropriées pour éviter d'éventuels impacts négatifs sur l'environnement, seront nécessaires (AGRA, 2017).

## 1.2 Différentes méthodes de couverture

L'introduction de l'assurance indicielle permet de se focaliser sur le risque de base. L'assurance est liée à un indice (Pluie, température, humidité), il s'agit d'un montant forfaitaire et contractuel contre la perte réellement causée dans une assurance classique. Il représente l'avantage d'une déclaration allégée et d'une indemnisation automatique, dès qu'il y a un dépassement du seuil comme défini dans le contrat.

Traditionnellement, les chercheurs classent 3 catégories de stratégies de gestion du risque (agricole) (Cordier, 2006), (Roguet & Rieu, 2006) :

- L'évitement du risque<sup>2</sup>
- La prévention du risque<sup>3</sup>
- Le traitement du risque

La stratégie de traitement du risque est la plus répandue, elle compose par des mesures en aval du dommage, en vue de limiter les impacts. Cette stratégie est classifiée en trois catégories :

- Assumer le risque, impliquant que l'agriculteur assume seul son risque en constituant une épargne pour amortir les pertes ;
- Le filet de sécurité, supposant l'intervention des pouvoirs publics ou de la collectivité ;
- Le transfert de risque, impliquant, contre le paiement d'une prime, sa cession à un tiers pouvant être la filière agricole, le marché (contrats à terme, produit dérivés) ou un assureur.

---

<sup>2</sup> Consistant à la réduction de la production et de l'investissement limitant de facto l'ampleur des pertes probables.

<sup>3</sup> Résidant dans des techniques de réduction de l'ampleur d'un sinistre.

Dans les pays développés, le secteur agricole a massivement recours aux stratégies de transfert de risque. Dans les pays en développement, où moins de 10% des agriculteurs bénéficient d'une couverture de risque, les assurances indicielles suscitent de grands espoirs par leur facilité d'indemnisation (Diop, 2016).

Les assurances classiques, dites traditionnelles, constituent l'essentiel de l'offre assurance dans le monde agricole. Le principe d'indemnisation repose sur l'estimation des dommages subis par l'assuré. Selon l'assurance indicielle, l'indemnisation repose uniquement sur la variation d'un indice et sans référence à un dommage. Par exemple, un contrat d'assurance peut prévoir qu'un niveau de pluie inférieur à 150 millimètres dans une région sur un horizon de temps limité donnerait mécaniquement lieu à une indemnisation.

Les assurances indicielles agricoles peuvent être classées en trois catégories (Diop, 2016) :

(A) L'assurance indicielle climatique, (B) l'assurance indicielle satellitaire et (C) l'assurance indicielle basée sur un rendement moyen par zone.

- (A) L'assurance indicielle climatique : le processus d'indemnisation repose sur la variation d'un indice liée à des facteurs météorologiques censés être corrélés aux cycles de développement des cultures agricoles.
- (B) L'assurance indicielle satellitaire, à la différence de l'assurance indicielle climatique, les indices sont construits sur la base de facteurs observables par imagerie satellitaire tels que l'évapotranspiration ou l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN)<sup>4</sup>.
- (C) L'assurance indicielle basée sur un rendement moyen par zone implique la détermination d'un rendement moyen par zone considéré comme indice de référence.

---

<sup>4</sup> L'IVDN met en relief la variation de l'absorption de l'humidité des plantes mesurée par leur capacité à réaliser de la photosynthèse.

### 1.3 La définition de l'assurance climatique et quelques exemples

Le produit de l'assurance indiciaire n'est pas une assurance classique. D'une manière simplifiée, nous pouvons considérer les produits d'assurance climatique en deux catégories : les produits d'assurance pour les risques climatiques catastrophiques (Ritleng & Nguyen, Juin 2014) et les produits financiers pour les risques climatiques non catastrophiques (Roustant, Juillet 2003). Concernant les produits agricoles, un des points communs entre ces deux types de produits d'assurance est le problème d'asymétrie : seul l'assuré peut connaître avec précision l'impact de l'évènement (climat) sur les résultats.

En général, quel que soit le type de produit, les études portant sur les produits d'assurance suivent 3 étapes :

- 1) choix de l'indice (la température, la pluie, le vent entre autres),
- 2) définition de la distribution de probabilité de l'indice
- 3) et enfin tarification du produit de couverture.

On dénombre plus d'une centaine de programmes liés à l'assurance indiciaire dans plus de quarante pays ( (Diop, 2016). Le tableau ci-après (*Tableau 1*) présente quelques projets d'assurance indiciaire en-cours (Sarraud & Le Plat, 2017) (Diop, 2016).

La Banque mondiale a lancé en 2011 le programme « Global Index Insurance Facility », afin de promouvoir l'assurance indiciaire ; un grand nombre de projets en cours sont soutenus par la SFI (la Société Financière Internationale), qui est une entité du groupe Banque mondiale. La SFI a ensuite confié à PlaNet Guarantee, la mise en place d'une stratégie régionale, intitulée Assurance Récolte Sahel (ARS), pour développer l'assurance agricole indiciaire dans cinq pays d'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Mali, Burkina-Faso, Bénin, Côte d'Ivoire).

A ce titre, PlaNet Guarantee Sénégal SA a été créée en 2011 et a ouvert depuis 2012 trois filiales dans : Mali, Burkina-Faso, Bénin (Diop, 2016).

Tableau 1: Quelques projets d'assurance indicielle

Pays	Année	Nature	Partenaires
Mali	2011	Protection des champs de céréales contre la sécheresse	Etat, Allianz, Allianz Re, Africa Re
Rwanda	2010	Protection des productions agricoles de la sécheresse ou des fortes inondations	Etat, Swiss Re
Sénégal	2012	2325 agriculteurs auraient bénéficié d'une assurance en 2013, dont 73% de producteurs d'arachide et 27% de producteurs de maïs pour une couverture de 4153 hectares. <sup>5</sup>	PlaNet Guarantee L'assureur sénégalais CNAAS (Compagnie nationale d'assurance agricole du Sénégal) propose ces produits à des organisations paysannes, des coopératives et des banques (institutions de microfinance).
Sénégal	2012	Le projet de croissance économique de l'USAID sur le maïs	L'USAID
Sénégal	2012	Le projet pilote 4R de la région de Koussanar	PlaNet Guarantee CNAAS (Compagnie nationale d'assurance agricole du Sénégal)
Mali	2013	Les produits de l'assurance indicielle auraient concerné en 2013 plus de 13 000 assurés et une surface de 13 320 hectares.	L'assureur Allianz Mali
Burkina-Faso	2011	En 2012, 2332 agriculteurs avaient été assurés dont 81% de producteurs de maïs et 19% de coton.	PlaNet Guarantee

<sup>5</sup> La valeur assurée aura été de 283 500€ et 188 agriculteurs auraient eu à déplorer des sinistres (Diop, 2016).

Tableau 2: Quelques projets d'assurance indicielle (Suite)

Pays	Année	Nature	Partenaires
Bénin	2013	Les premiers projets amorcés en 2013 et proposés à seulement 48 souscripteurs.	PlaNet Guarantee
Argentine	2011	Protection des champs de coton contre la sécheresse, les fortes inondations et les nuisible	Gouvernement
Haïti	2014	Protection contre les inondations, les tempêtes et la sécheresse	Gouvernement
Uruguay	2011	Protection des champs pour le bétail contre la sécheresse	Gouvernement
Bangladesh	2015	Protection des productions agricoles. Sécheresses, inondations, vagues de chaleur et vagues de froid	Green Delta insurance
Philippines	2016	Protection des productions agricoles contre la survenance de typhon	Centre d'agriculture et du développement rural
Indonésie	2016	Protection de la capacité à prêter des banques contre une crise de liquidité après la survenance d'un earthquake	MAIPARK

## 1.4 Couverture par produits dérivés climatiques

Les premiers produits dérivés climatiques sont apparus aux Etats-Unis en 1997, à la suite de la déréglementation du marché de l'électricité, ils permettent d'apporter une protection aux producteurs d'électricité qui subissent des manques à gagner lorsque l'hiver est doux.

Les produits dérivés sont des produits financiers, construits sur des sous-jacents climatiques : tels que la température ou le niveau de pluie. Les produits dérivés climatiques ont été inventés pour se prémunir contre les risques climatiques non catastrophiques.

Les produits dérivés climatiques ne concernent pas les produits d'assurance, car la gestion d'assurance des risques climatiques non catastrophiques est irréalisable. Tout d'abord, l'importance du volume du risque est trop importante. Ensuite, il est difficile de mesurer objectivement les impacts économiques du climat sur le chiffre d'affaires des entreprises, il existe d'ailleurs un problème d'asymétrie : seul l'assuré peut connaître avec précision l'impact du climat sur les résultats. Il y a également le problème d'anti-sélection, ce sont les entreprises les plus exposées aux risques climatiques qui veulent se prémunir. Enfin, comment pourrait-on contraindre les entreprises concernées à procéder en interne à la gestion de leurs risques climatiques<sup>6</sup> ? Concernant le produit d'assurance climatique, nous nous confrontons aux mêmes difficultés, il est bien évident que les produits d'assurance classiques ne peuvent pas répondre aux besoins.

Les risques climatiques non catastrophiques sont des risques économiques que supportent les entreprises dont l'activité est sensible au climat<sup>7</sup> : l'impact du climat sur la consommation est la source de manques à gagner, citons par exemple les professionnels du tourisme, de l'énergie, de l'agroalimentaire, de l'agriculture.

Par rapport aux risques climatiques catastrophiques, les risques climatiques non catastrophiques ne présentent pas de sinistres physiquement constatables, il n'y a pas de dégâts matériels, les conséquences s'observent dans les comptes des entreprises, ce qui les rend plus difficiles à évaluer<sup>8</sup>. D'ailleurs, il existe des possibilités d'échange entre des agents

---

<sup>6</sup> Roustant 2003, page 6

<sup>7</sup> Olivier Roustant, Produits dérivés Climatiques : Aspects économétriques et financiers, Thèse Juillet 2003, HAL Id : tel-00804727, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00804747>.

<sup>8</sup> Roustant 2003, page 4

économiques exposés à des risques symétriques. Par exemple, le gérant d'un parc d'attractions et le gérant d'un complexe de cinémas ont des intérêts opposés à ce qu'il pleuve.

La possibilité de mesurer les risques climatiques non catastrophiques existe, nous pouvons relier la qualité d'une saison à des données météorologiques. Les instruments de mesure des risques climatiques peuvent être : hauteur de pluie, hauteur de neige, vitesse du vent.

Dans le cas de l'électricité, c'est la température qui dirige la consommation. Il existe des indices journaliers, dits degrés-jours - degree-day - pour mesurer le risque climatique. Ceux-ci mesurent l'écart de la température à un niveau seuil correspondant à la température ambiante. En effet, à une température donnée, la consommation est minimale :

$$DD = (18 - T_t)^+ = \max(18 - T_t; 0) \quad (1)$$

où  $T_t$  est la température à la date  $t$ , exprimée en degrés. La mesure du risque de température sur une saison est la suivante :

$$DD_{saison} = \sum_{saison} (18 - T_t)^+. \quad (2)$$

Dans la mesure où les dommages ne sont pas facilement observables, la solution est d'utiliser une fonction qui relie la mesure du risque aux conséquences : les fonctions d'endommagement. L'inconvénient est l'asymétrie de la mesure : les conséquences des risques climatiques ne peuvent être mesurées que par celui qui subit les effets.

Face à l'impossibilité de chiffrer les sinistres consécutifs aux mauvaises conditions climatiques, la solution consiste à calculer les versements en fonction de la mesure des risques climatiques et non pas selon le montant des pertes financières dues au climat (Roustant 2003, page 6). Il s'agit d'une couverture paramétrique et non plus d'une couverture indemnitaire. Concrètement, il s'agit de produits financiers construits à partir d'indices climatiques, ils se présentent sous la forme de futures (swaps), d'option, etc. Les risques climatiques ne dépendent pas du marché financier, par conséquent, les produits dérivés climatiques sont relativement décorrélés du marché financier (Dury & Xiao, 2018), c'est la raison pour laquelle les spéculateurs et les investisseurs sont intéressés par ces produits.

## 2 Méthodologie

Pour faire face à des aléas climatiques, les produits d'assurance à but non lucratif ont été proposés. En 2007, 16 pays des Caraïbes, en association avec la Banque Mondiale, ont créé pour la première fois dans le monde un pool d'assurance multi-pays : le Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility (CCRIF), c'est le premier système d'assurance qui emploie le mécanisme de couverture paramétrique. À l'inverse d'une assurance classique, les indemnités ne sont pas reversées en fonction des dégâts réels mais selon la mesure d'un indice paramétrique défini dans le contrat.

Dans leur travail de 2014, Riteng et Nguyen ont étudié un produit d'assurance paramétrique contre le risque de pluie torrentielle en Jamaïque. Le produit, nommé XSR<sup>\*</sup>, est proposé par la société Swiss Re<sup>9</sup> à la demande du CCRIF. Il s'agit d'un produit de couverture de risque de pluie extrême. Lorsque les pluies extrêmes sont détectées en fonction d'un indice agréant les précipitations sur l'ensemble du pays, le processus d'indemnisation est déclenché.

### 2.1 Méthodologie et mesure des risques

Le principal avantage de l'assurance paramétrique repose sur l'absence d'asymétrie d'information. L'assureur et l'assuré disposent de la même information mesurée par la variable météorologique. Il est possible que la variable mesurée ne reflète pas totalement les dégâts réels. Le risque de base est défini comme la différence entre le coût économique des dégâts réels au sol et l'indemnisation apportée par l'assurance. Cependant, grâce à la transparence de ce type de produit, le niveau de la réassurance et de la titrisation des produits paramétriques est bien meilleur que celui de l'assurance classique<sup>10</sup>.

Concernant les indicateurs, le Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility (CCRIF) offre trois types de produits aux 16 pays caraïbes :

- Une couverture contre les ouragans utilisant comme indice la vitesse du vent,

---

<sup>9</sup> Swiss Re (Swiss Reinsurance Company), est une société d'assurance et de réassurance fondée à Zurich en 1863. En chiffre d'affaires, elle est la deuxième société mondiale de réassurance après Munich Re. <https://www.swissre.com/>

\* Dans cette présentation, nous allons voir uniquement les aspects de détermination des primes. La partie concernant la modélisation de la pluie est très intéressante, Riteng et Nguyen ont présenté les démarches statistiques de la page 34 à la page 65 de leur mémoire.

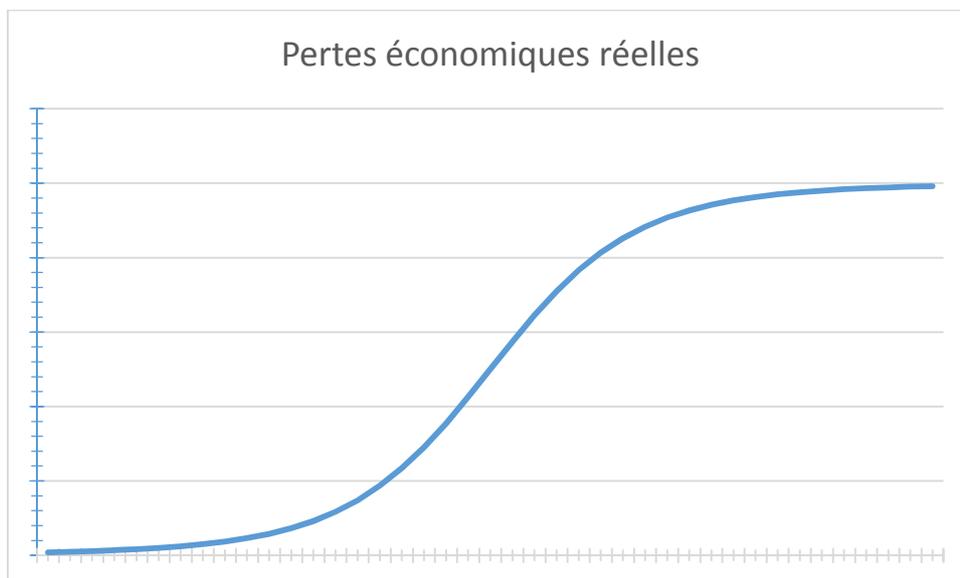
<sup>10</sup> Riteng et Nguyen 2014, page 8

- Une couverture contre les tremblements de terre utilisant comme indice la magnitude sur l'échelle de Richter,
- Une couverture (XSR) contre les pluies torrentielles, en utilisant un indice de précipitations agrégées sur différentes zones géographiques.

## 2.2 La fonction de dommage, la fonction de paiement

D'une manière générale, l'indice paramétrique doit refléter les dégâts réels causés par l'événement assuré, il faut donc établir au préalable la fonction de dommage qui relie les pertes économiques réelles aux indices paramétriques. Dans la figure ci-après, l'axe des abscisses représente l'indice paramétrique qui dépend de la facteur physique.

Figure 2: La fonction de dommage<sup>11</sup>



L'indice paramétrique<sup>12</sup> est donné par la formule ci-après, comme pour les options que nous avons présentées plus haut, un seuil est établi préalablement :

$$I_{\text{evenement}} = a \sum_{i=1}^n w_i \times \max(v_i - v_{\text{seuil}}, 0)^\beta \quad (3)$$

où, n est le nombre de station de mesure

w est le poids de la région,

$\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres d'échelle.

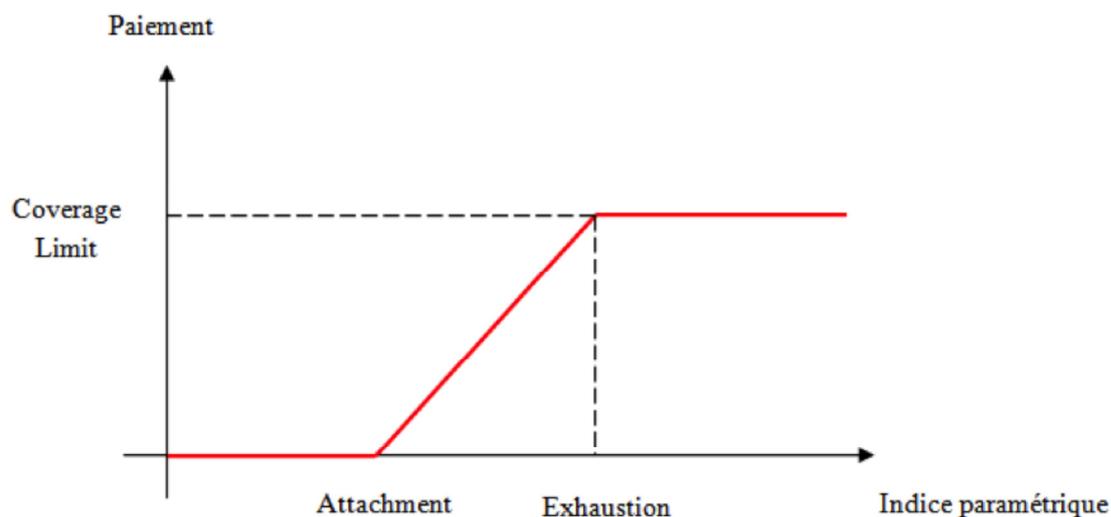
<sup>11</sup> Riteng et Nguyen (2014), page 9.

<sup>12</sup> Il s'agit d'un exemple sur la couverture contre les ouragans, Riteng et Nguyen (2014), page 10.

Une fois la fonction de dommage établie, le montant d'indemnité est déterminé par la fonction de paiement. Cette fonction relie l'indice paramétrique au paiement effectué.

Si l'indice est inférieur à une borne inférieure appelée *Attachment point*, l'assuré ne reçoit aucune indemnité. Si l'indice est supérieur à une borne supérieure appelée *Exhaustion point*, l'assuré reçoit le montant limite de couverture appelée *Coverage limit*. La configuration de fonction de paiement est similaire à la couverture par l'option.

Figure 3: Fonction de paiement<sup>13</sup>



### 2.3 Simulation de Monte-Carlo

En raison des applications à l'agriculture, l'hydrologie et l'écologie, la pluie a été davantage étudiée. Sur le plan statistique, la pluie est plus difficile à modéliser que la température, car elle suppose la connaissance de la loi jointe de deux variables aléatoires : l'occurrence de la pluie et la hauteur de pluie lorsqu'il pleut. Il y a aussi le problème de la discontinuité spatiale. Sur le plan pratique, différents produits d'assurance indicielle ont été proposés par les organismes privés ou publics avec l'aide des institutions d'assurance telles que Swiss Re, Allianz Re. Cependant, la fixation de la prime d'assurance reste un sujet d'une grande importance. Dans notre exemple, la prime est déterminée par les paramètres du contrat définis par le pays, qui correspond au montant limite de couverture - Coverage Limit, Attachment et Exhaustion. A chaque pluie torrentielle, un indice paramétrique est calculé et le montant des indemnités reversé à la Jamaïque est déduit grâce à la fonction de paiement ci-après.

<sup>13</sup> Riteng et Nguyen (2014), page 11.

### 2.3.1 Montant de couverture : la méthodologie de Riteng et Nguyen (2014)

Dans l'exemple du produit Ouragan du CCRIF, les quantiles ont été choisis tels que

$$P(\text{Indice} < \text{Attachment}) = 96,7\% \text{ et } P(\text{Indice} < \text{Exhaustion}) = 99,3\%$$

ce qui correspond à des niveaux de retours respectifs de 30 événements et de 150 événements. A titre indicatif, le montant de couverture limite était de 57 millions de dollars en 2012 pour le contrat Ouragan.

Riteng et Nguyen (2014) présentent la formule de prime pure<sup>14</sup> : soit  $N$  le nombre d'événements annuels pour lesquels le CCRIF doit indemniser la Jamaïque. La prime pure annuelle s'écrit :

$$\begin{aligned} \text{prime} &= E(\sum_{n=1}^N \text{paiement}_n) \quad (4) \\ &= E\left(E\left(\sum_{n=1}^N \text{paiement}_n \mid N\right)\right) \\ &= E(N) * E(g(X|X > 250)) \end{aligned}$$

où  $X$  désigne les pluies agrégées sur 5 jours.

$E(N)$  peut être estimé par recensement des événements historiques sur les 15 dernières années. Le calcul de la prime se résume donc au calcul de  $E[g(X|X > 250)]$ . La loi de la variable aléatoire  $g(X|X > 250)$  n'étant pas explicitement connue, Riteng et Nguyen (2014) ont utilisé des simulations de Monte-Carlo pour calculer son espérance.

La prime locale dépend essentiellement de la variable aléatoire conditionnelle  $(X|X > 250)$  où  $X$  sont les précipitations agrégées sur la cellule considérée. Sur chaque cellule, la loi de  $(X|X > 250)$  est estimée par modèle de dépassement de seuil<sup>15</sup>.

Riteng et Nguyen (2014) ont simulé 10 000 fois la variable  $(X|X > 250)$  qui suit une loi de Pareto de paramètre de forme  $k = \xi_0$  et de paramètre d'échelle  $\sigma_0 + \xi_0 \times (250 - u_0)$ <sup>16</sup>. Ceci permet d'obtenir une estimation de  $E[g(X|X > 250)]$  par cellule. Pour initialiser les calculs, Riteng et Nguyen (2014) ont utilisé dans un premier temps une limite de couverture d'un million de dollars par région. La convergence se stabilise dès 1000 simulations et le résultat des 10 000 simulations est de 1 290 180 \$.

<sup>14</sup> Riteng et Nguyen (2014), page 67.

<sup>15</sup> Le seuil de modélisation sélectionné est  $u_0 = 100 \text{ mm}$ , Riteng et Nguyen (2014), page 68.

<sup>16</sup> Riteng et Nguyen (2014), chapitre 5, pages 48, 51 et 53.

### 2.3.2 Méthode de Monte-Carlo

Pour cela, rappelons les principales étapes de la méthode théorique de simulation dite de Monte-Carlo. Pour toute quantité que l'on souhaite estimer, celle-ci, dans le cadre de cette méthode, doit être écrite sous la forme d'une espérance mathématique  $M = E(Y)$  où  $Y$  est une variable aléatoire.

On approche alors la variable aléatoire  $Y$  au moyen d'une suite de variables aléatoires  $(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$  indépendantes identiquement distribuées, c'est-à-dire mutuellement indépendantes et de même loi ou distribution de probabilité, désignées par le sigle *i.i.d.*, et intégrables, leur espérance  $E(|Z_i|) < +\infty$  est finie, que l'on sait simuler. La variable aléatoire  $Y$  est approchée par  $Y_n$  définie par :

$$Y_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i$$

lorsque  $n \rightarrow +\infty$  et par application de la loi des grands nombres. Pour cela, on utilise le théorème de Khintchine qui prouve que la moyenne empirique  $Y_n = \bar{Z}_n$  converge en probabilité vers l'espérance : pour tout  $\varepsilon > 0$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} P(|\bar{Z}_n - E(Y)| > \varepsilon) = 0$$

L'estimateur sans biais de l'espérance, qu'est cette moyenne empirique, converge donc en probabilité, on peut même prouver la convergence presque sûre, vers  $E(Y)$ . Cette démarche permet d'obtenir, par la méthode de Monte-Carlo, des simulations de  $M$ .

### 3 Simulation de prime indicielle annuelle contre les pluies torrentielles

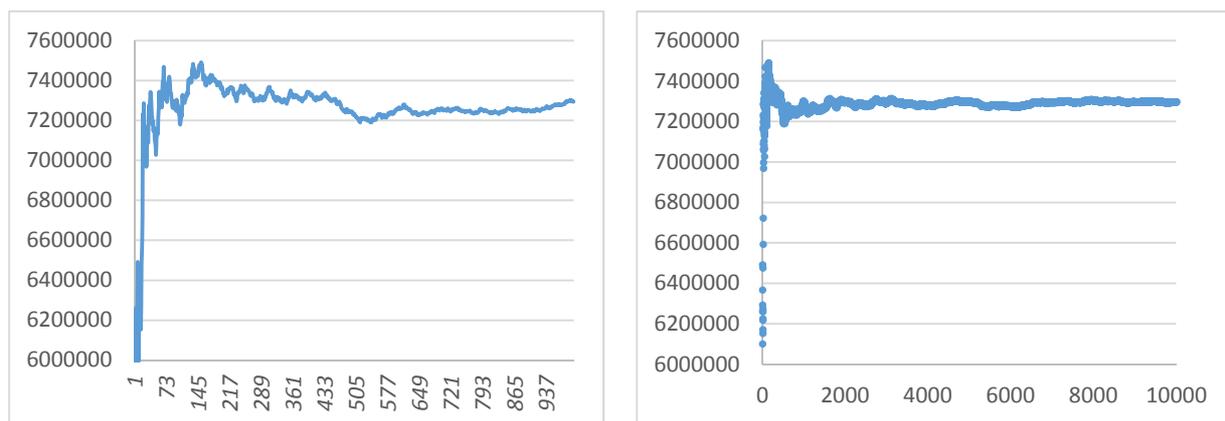
En utilisant la fonction de paiement de l'assurance (Ritleng & Nguyen, Juin 2014), nous pouvons fixer la limite inférieure et la limite supérieur d'une prime annuelle.

Tableau 3: Paramètres d'entrée pour initialiser la simulation de la prime annuelle

Attachment	0,967
Exhaustion	0,993
Maxprime	1000000€

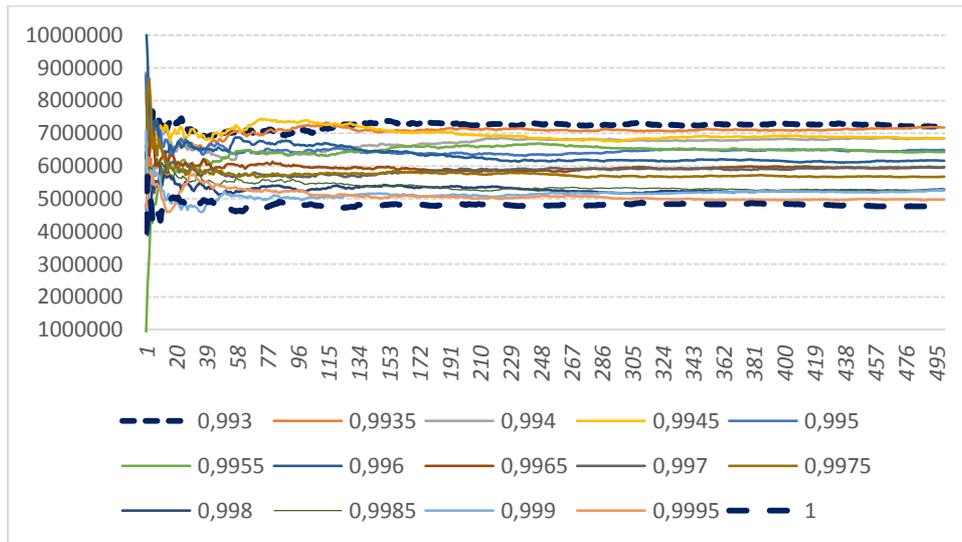
Pour donner une idée de la prime annuelle, nous disposons d'une année de 365 jours, pour chaque jour, si la possibilité de pluies agrégées > 250 mm est supérieure à 96,7%, le niveau de l'exhaustion est de 1 000 000€. Le graphique donne une idée de la convergence des primes annuelles, qui se situe aux alentours de 7 257 033,24€.

Figure 4: Prime annuelle avec 1000 pas et 10000 pas de simulation



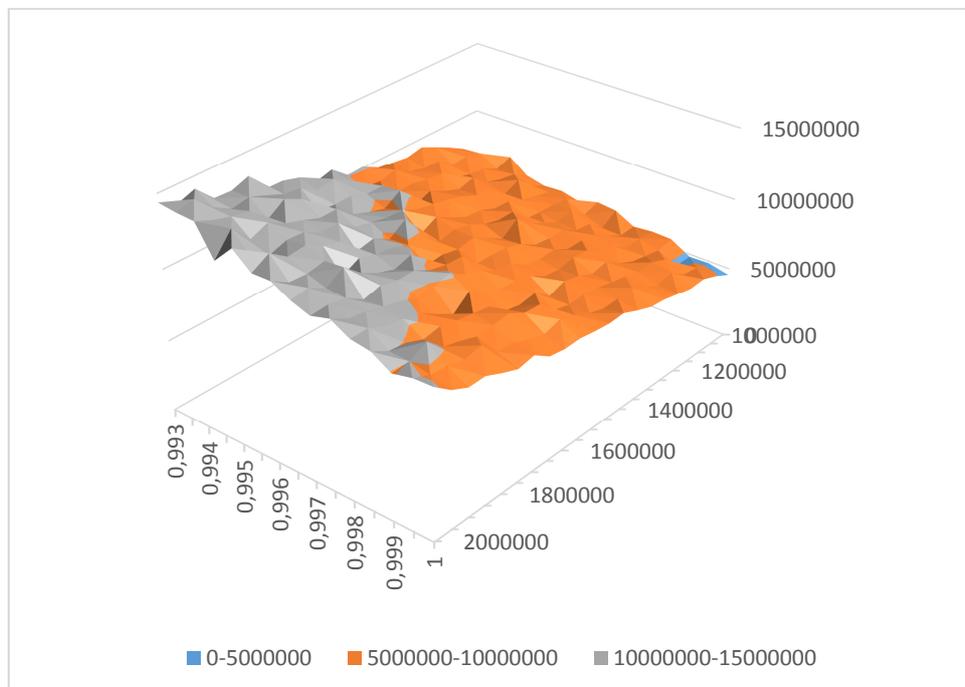
Nous constatons que la convergence se stabilise à partir de 500 simulations, comme indiqué dans la figure précédente. Lorsque nous augmentons à 10 000 le nombre de simulation, le résultat se stabilise à 7 287 432,7€. Lorsqu'on réalise une simulation en variant le seuil de déclenchement (Exhaustion), nous pouvons constater la convergence à partir de 500 pas de simulation, cependant, lorsqu'on repousse le seuil de déclenchement, le coût de la prime annuelle diminue au fur et à mesure,

Figure 5: Prime en fonction des seuils de déclenchement



Le graphique ci-après montre la simulation des primes annuelles en variant les paramètres de seuil d'exhaustion et le plafond de remboursement (entre 1 000 000€ à 2 000 000€). On constate que la prime annuelle atteint le maximum lorsque le plafond de remboursement est fixé à 2000000€ et que le seuil de déclenchement se situe à 99,3%, son coût annuel serait de 14 404 235€, contre 6 733 519€ pour un plafond de remboursement fixé à 1 000 000€

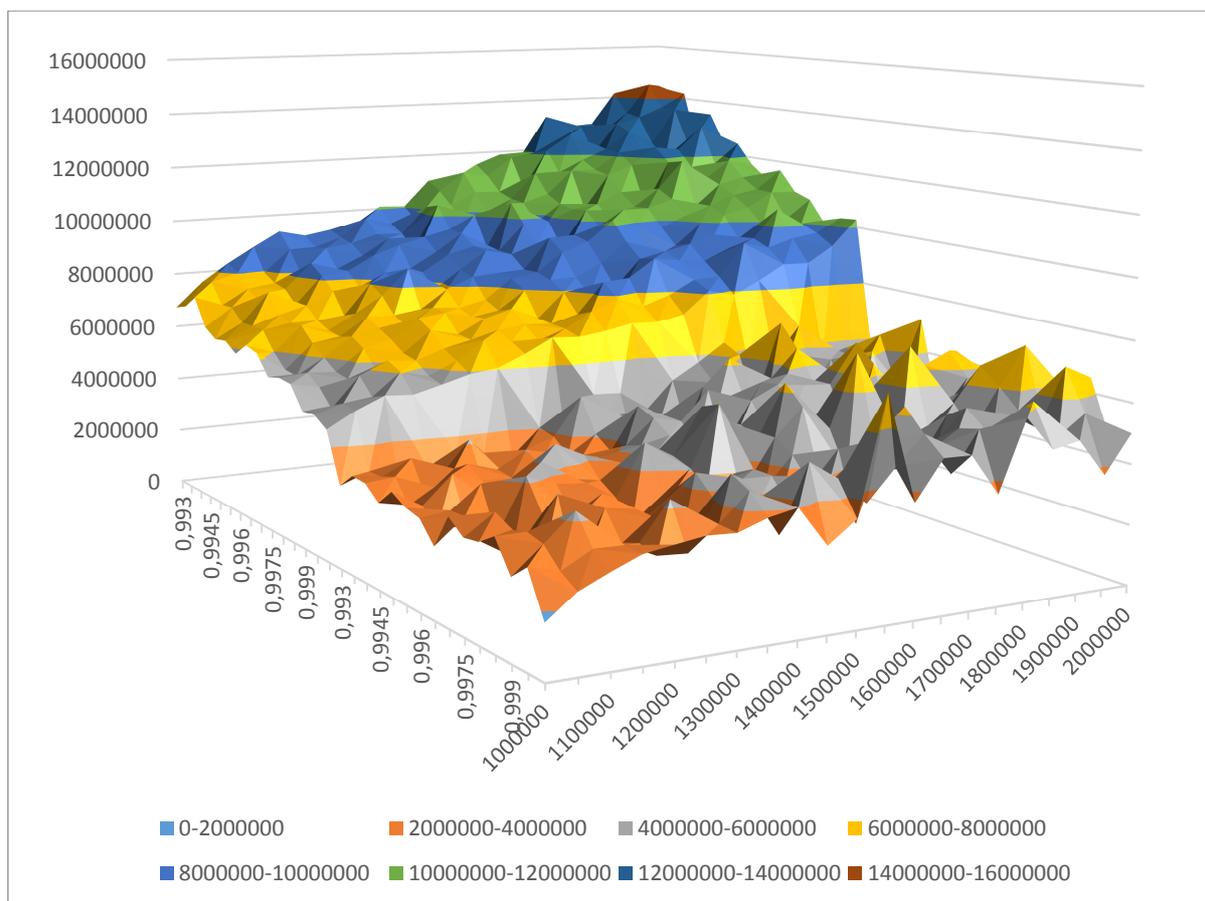
Figure 6: Prime annuelle en fonction des seuils de déclenchement et du plafond de remboursement

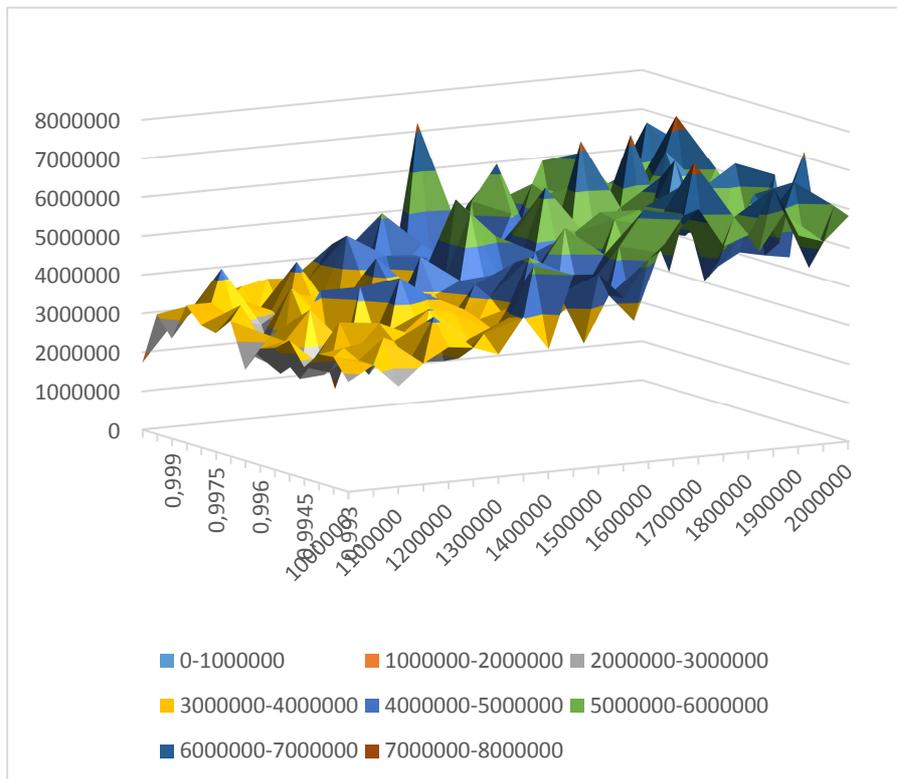


## Conclusion

Les simulations réalisées permettent de définir le coût annuel d'un contrat d'assurance indiciaire, en fonction de l'objectif de l'assureur, le contrat d'assurance peut être proposé aux particuliers ou aux organismes qui gèrent la gestion du risque climatique - les ONG, les institutions gouvernementales entre autres. Le choix des critères maximums de remboursement est défini en fonction de la situation socio-économique de la région considérée. La difficulté de l'estimation réside dans la modélisation des pluies torrentielles, en effet, l'estimation d'évènements rares influence grandement le coût total annuel de la prime d'assurance. La figure ci-après montre la simulation en fonction de la distribution selon la loi normale versus la distribution selon la loi uniforme.

Figure 7: La distribution gaussienne vs. Distribution uniforme





Nous constatons que le niveau des primes annuelles diminue rapidement par rapport à la simulation effectuée préalablement, car les évènements rares (seuil de déclenchement) sont bien moins fréquents avec la loi normale, ce qui induit une diminution du coût total de la prime d'assurance. Le coût moyen de la prime annuelle selon la distribution de la loi normale varie entre 3 999 247€ à 4 510 316€. Cependant, nous remarquons que les estimations selon la loi normale sont moins homogènes que celles de la loi uniforme, car contrairement à la loi uniforme, la fonction de répartition de la loi normale n'augmente pas d'une manière linéaire. La définition de la prime d'assurance dépend donc grandement de la loi de distribution des évènements tels pluies torrentielles, sécheresses, ouragan. La prochaine étape sera donc de décrire la loi de distribution des pluies torrentielles.

## Bibliographie

- AGRA. (2017). *Africa Agriculture Status Report 2017 – The Business of Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa*. 180 pages. Alliance for a Green Revolution in Africa (AGRA).
- Cordier, J. (2006). Proposition d'organisation des outils de gestion du risque de marché au bénéfice des filières africaines. *Agence Française de Développement*, 34.
- Diop, S. (2016). L'assurance indicielle: Un produit de gestion du risque agricole dans les pays en développement à renforcer. *Epargne sans frontière "Techniques financières et développement" N°122*, 37-47.
- Dury, M.-E., & Xiao, B. (2018). How Does Maize Market Behave in Sub-Saharan Africa? A Study with autoregressive Models, . *Conference on Development Economics, 15-16 November 2018, GDRI CERDI* . Clermont-Ferrand.
- FAO. (2009). FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Sub-Saharan Africa – Realizing the potential. *World Summit on Food Security, 16-18 November 2009*, , (p. 35). Rome.
- Kidinda, K., Kiluba, K., Tshipama, T., Kilumba, K., Mpoyo, M., Langunu, S., . . . Nyembo, K. (2015). Mise en évidence des doses de fertilisants minéraux à appliquer aux nouvelles variétés de maïs introduites dans la région de Lubumbashi (RD Congo). *International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol.12, No.1, Jul.*, 96-103.
- Ritleng, F., & Nguyen, G. ( Juin 2014). *Etude d'un produit d'assurance paramétrique contre le risque de pluie torrentielle en Jamaïque* . Mémoire présenté devant l'ENSAE Paristech pour l'obtention du diplôme de la filière Actuariat.
- Roguet, C., & Rieu, M. (2006). Gestion des risques de prix et de revenu en production porcine: situation actuelle et perspectives. *Journées recherche*, 38, 271-278.
- Roustant, O. (Juillet 2003). *Produits dérivés Climatiques : Aspects économétriques et financiers (Thèse)* . HAL Id : tel-00804727, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00804747>.
- Sarraudy, M.-C., & Le Plat, C. (2017, mai). *Le principal risque de l'assurance paramétrique*. Récupéré sur [https://www.institutdesactuaires.com/global/gene/link.php?doc\\_id=10093&fg=1](https://www.institutdesactuaires.com/global/gene/link.php?doc_id=10093&fg=1)