

# Modélisation et projection du risque sécheresse : Etude de soutenabilité à horizon 2050

Thomas KERMORVANT

# INTRODUCTION

Contexte et motivations

## INTRODUCTION

### 1 • Péril sécheresse : un risque en pleine croissance

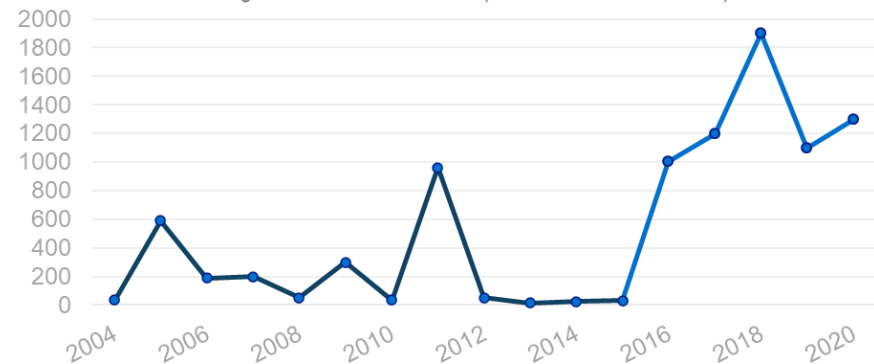
#### Une accélération des sinistres

- 6 des 9 années les plus sinistrées sont **post-2015**.
- 400 M d'euros par an en moyenne sur la période 1989-2015.
- **1 Md d'euros par an en moyenne sur la période 2016-2020**.

Année de survenance	Coût (en M€ constants 2022)
<b>2022</b>	<b>3 500</b>
2003	2 050
<b>2018</b>	<b>1 900</b>
<b>2020</b>	<b>1 300</b>
<b>2017</b>	<b>1200</b>

Source : France Assureurs, CCR

Charge sinistre sécheresse (en M€ constants 2022)



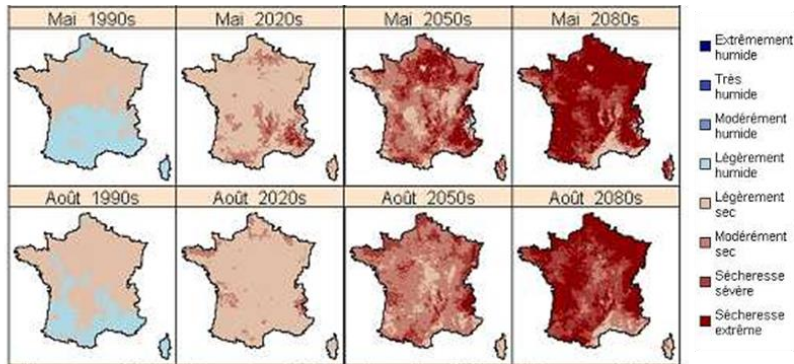
Source : France Assureurs, CCR

#### Une sécheresse record

- L'année **2022** explose le précédent **record** (2003) au regard du coût engendré.
- Le risque sécheresse représente une **part croissante de la sinistralité Cat Nat** : **60%** sur la période 2016-2022 contre **37%** sur la période 1989-2015.

## INTRODUCTION

### 2 • Péril sécheresse : une progression annoncée au regard du dérèglement climatique



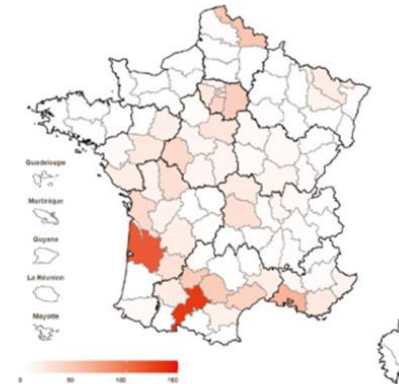
Evolution temporelle des sécheresses au cours du XXIème siècle  
Source : Projet CLIMSEC

### Etudes actuarielles

- France Assureurs (2021), la CCR (2015, 2018, 2023), l'ACPR (2021) et COVEA (2022) se sont penchés sur les conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles
- Selon les hypothèses retenues pour l'étude, le **montant des dommages** en lien avec la sécheresse augmenterait entre **44%** et **162%**.
- La CCR (2023) qualifie le péril sécheresse de « **péril le plus préoccupant à horizon futur** »

### Etudes climatiques

- En France, le projet CLIMSEC (*Soubeyrou et al.(2011)*), et en Europe les travaux de *Spinoni et al. (2015)* apportent la preuve scientifique de l'influence du changement climatique sur la manifestation des épisodes de sécheresse.
- Ces études prévoient la **dégradation** des conditions de sécheresse **tout au long du XXIè siècle**.



Charge sécheresse annuelle moyenne (en M euros) projetée en 2050  
Source : France Assureurs

## INTRODUCTION

### 3 • Péril sécheresse : vers une explosion des primes ?

#### Un premier constat de l'ACPR

- L'ACPR réalise un premier exercice pilote climatique en 2021.
- A rentabilité constante, la croissance des sinistres climatiques conduirait à une **augmentation des primes** d'assurance entre **130% et 200%** à horizon 2050.

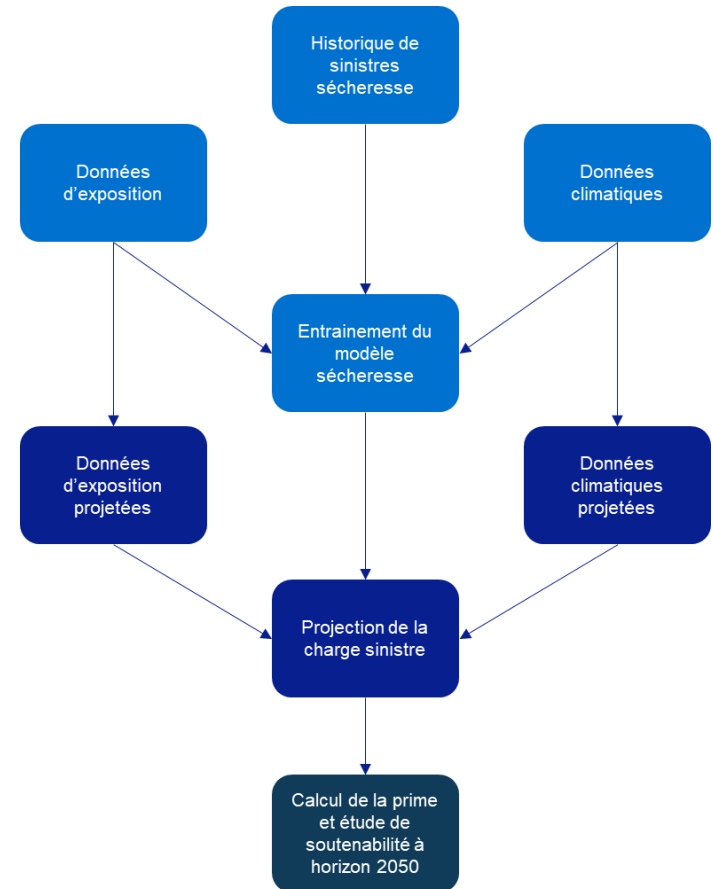
#### La question de soutenabilité de la prime

- **Les primes peuvent devenir inabordables** pour un certain nombre de ménages.
- Dans son deuxième exercice pilote de 2023, l'ACPR intègre dans ses projections **le comportement des assurés face à une augmentation significative de la prime.**

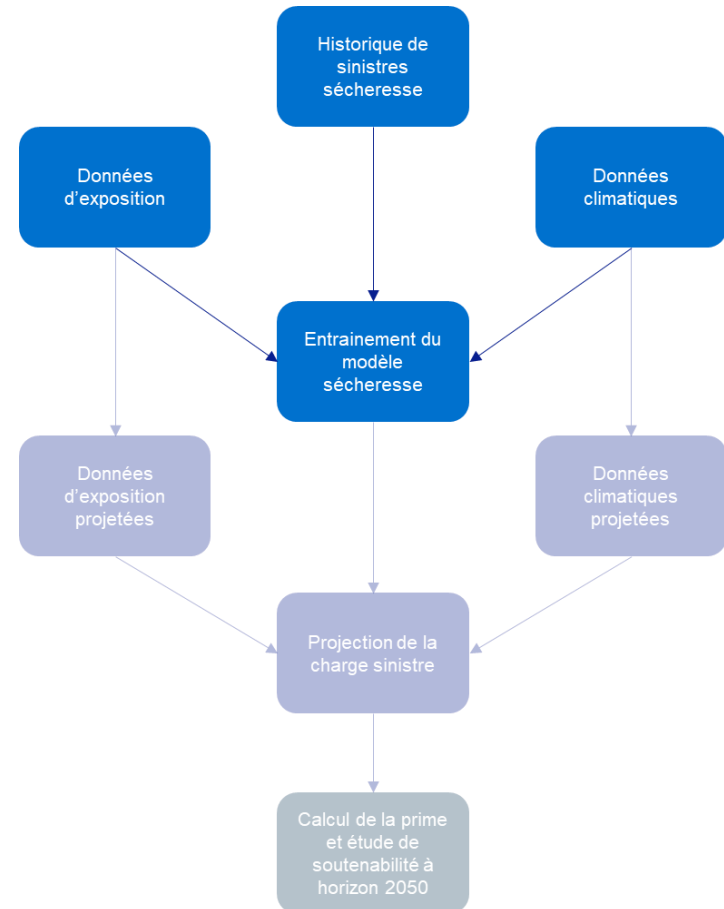
#### Objectif du mémoire

Etudier la soutenabilité de la prime MRH à horizon 2050 à travers le péril sécheresse.

1. Modélisation du risque sécheresse
2. Projection du risque
3. Soutenabilité à horizon 2050

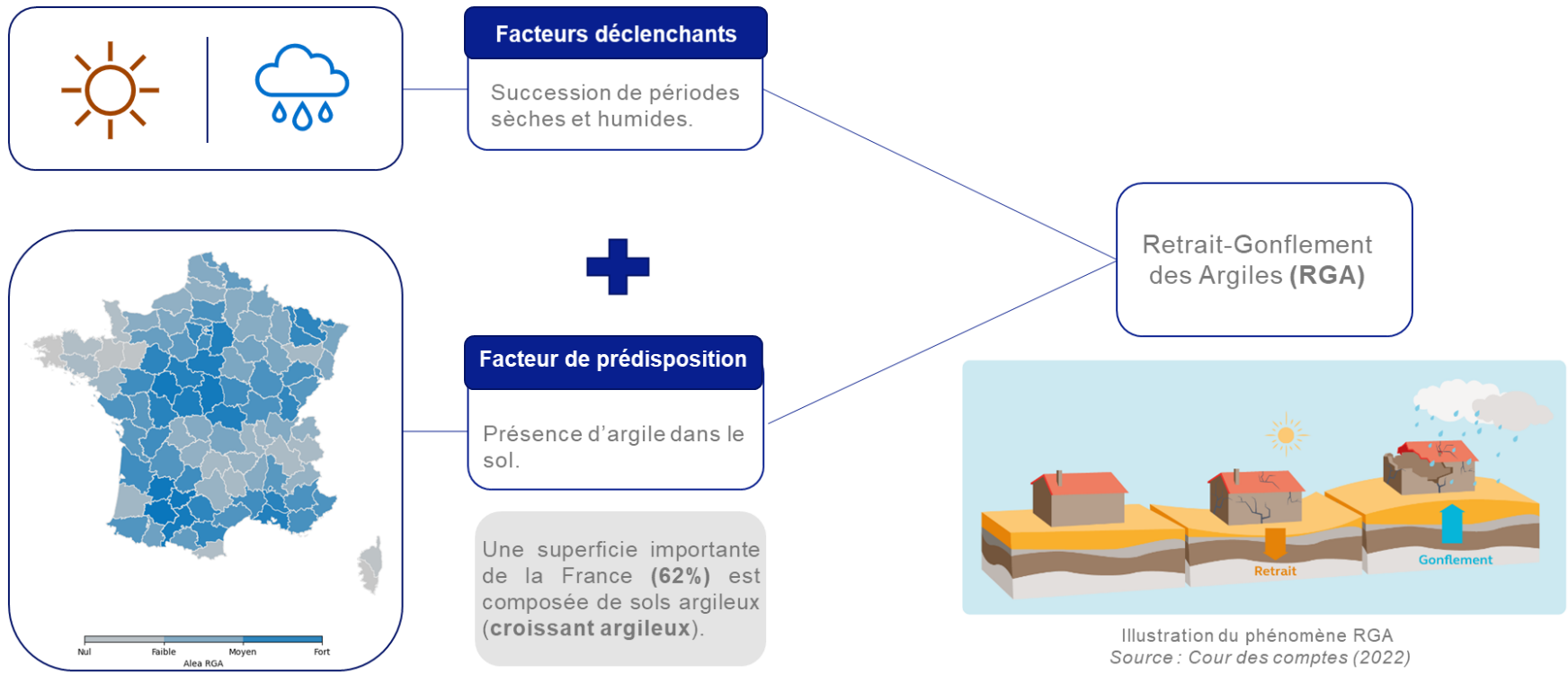


# 1 • MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE



## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 1 • Présentation du phénomène de retrait-gonflement des argiles (RGA)





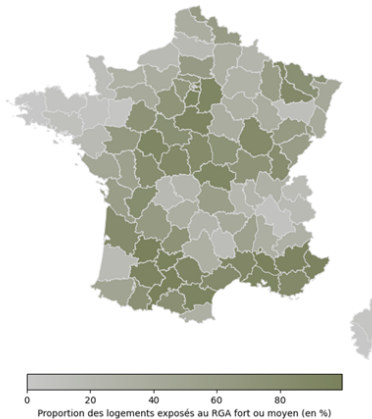
## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 2 • Données d'exposition : susceptibilité RGA et type de logements

**Objectif** : Obtenir des données **relatives à l'exposition** du portefeuille au **risque sécheresse** pour les intégrer au modèle.

#### Données d'exposition au RGA

- Proportion de la **surface** départementale exposée au risque RGA (Georisque).
- Proportion de **logements** par département se situant dans des zones d'exposition à risque (Service des données et études statistiques, SDES).



#### Données sur le type de logements

- Nombre de maisons / appartements assurés par département.



La **nature du sol** et le **type de logements** permettent de caractériser la **susceptibilité** d'un département à déclencher un phénomène RGA.

## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 3 • Indice de sécheresse : SPEI-3 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)

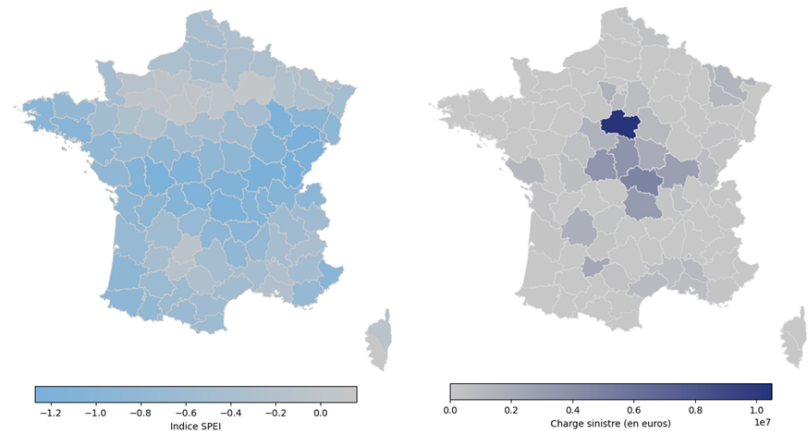
#### Données utilisées

- Température et précipitations (*Météo France*).
- L'indice dépend uniquement de la **température**, de la durée d'**ensoleillement** et des **précipitations (P)**.

#### Principe et calcul

- Calcul de l'**évapotranspiration ETP**.
- Calibration d'une loi log-logistique sur **les précipitations nettes**  
 $D = P - ETP$ .
- **Normalisation** de la distribution et calcul du SPEI (*Vicente-Serrano et al, 2010*).

#### Analyse spatiale



Comparaison spatiale de la charge sinistre et l'indice SPEI - 2018

	SPEI H	SPEI P	SPEI E	SPEI A
Charge sinistre	-0.21	-0.29	-0.34	-0.19

$\tau$  de Kendall des SPEI saisonniers

## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 4 • Indice de sécheresse : Magnitude SWI (Soil Wetness Index)

#### Données utilisées

- SWI uniforme (*Météo France*).
- L'indice dépend uniquement du niveau **d'humidité du sol**.

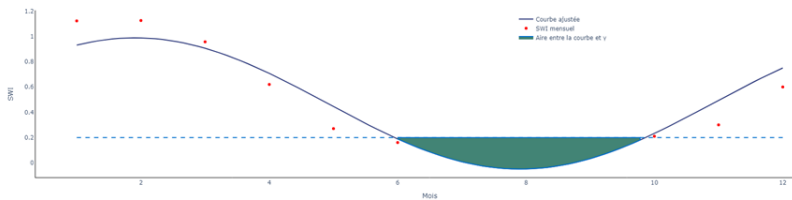
#### Principe et calcul

- Ajustement d'une courbe sinusoïdale sur les SWI mensuels :

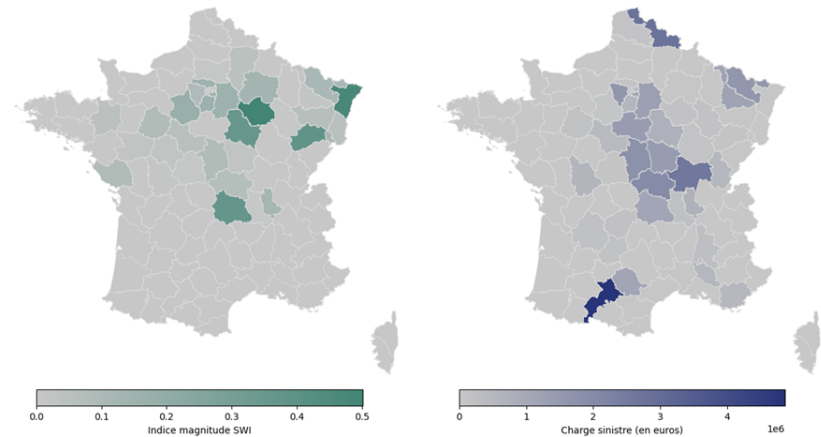
$$\min_{\theta} \sum_{i=1}^{12} (SWI - f_{\theta}(x))^2.$$

- Définition du seuil  $\gamma$  et calcul de l'intégrale sous cette valeur seuil :

$$SWI(\gamma) = \int \max(0, \gamma - f_{\theta}(x)) dx.$$



#### Analyse spatiale



Comparaison spatiale de la charge sinistre et l'indice SWI - 2020

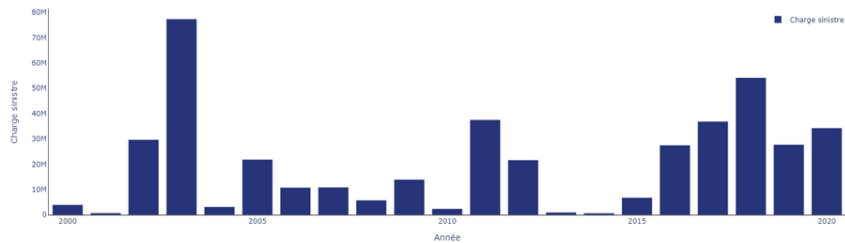
	SWI( $\gamma$ )
Charge sinistre	0.57

$\tau$  de Kendall

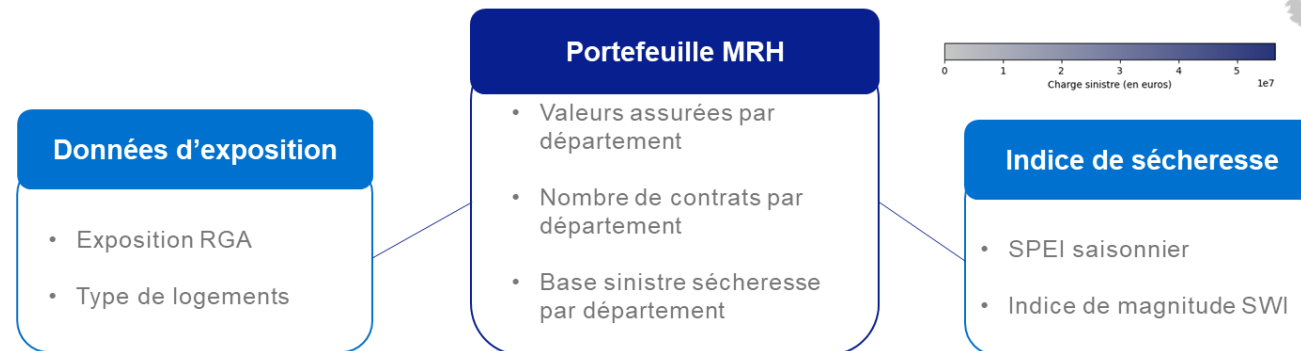
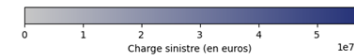
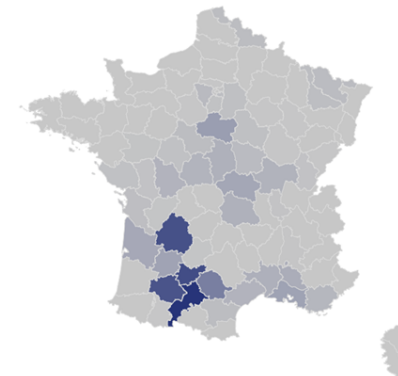
## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 5 • Construction d'une base d'entraînement

Charge sinistre historique retraitée (2000-2020)



Répartition géographique de la charge cumulée des sinistres sur la période



## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 6 • Modèle sécheresse : Objectif et cadre théorique

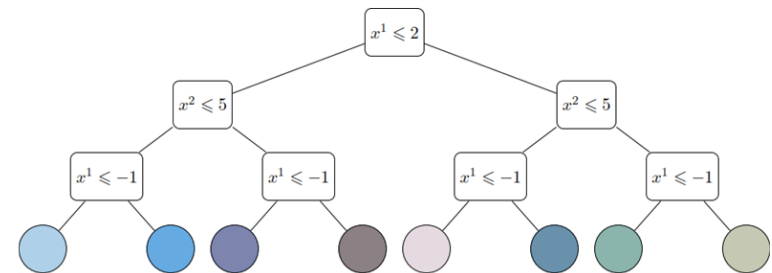
**Objectif** : Estimer la **charge sinistre sécheresse annuelle par département**, notée  $Y$ , à l'aide de variables explicatives telles que les données climatiques (indices de sécheresse) et les données d'exposition (logements en RGA, type de logement, valeurs assurées).

**Méthode d'apprentissage supervisé** : Soit  $(x_i, y_i)$  une suite d'observations avec  $x_i$  le vecteur des variables explicatives et  $y_i$  la réalisation de la variable cible  $Y$ . A partir de ces **observations** et d'une **fonction de perte  $l$** , l'objectif est de construire la **fonction de prédiction  $f$**  qui minimise le risque empirique (l'erreur du modèle)

$$R_n(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l(y_i, f(x_i)).$$

#### Méthode de *Gradient Tree Boosting*

Pour approcher la fonction  $f^*$  qui minimise le risque empirique, l'algorithme de **boosting Catboost (2018)** a été utilisé. Ce dernier repose sur les **arbres de décision** et exploite le principe de **descente de gradient**.



Arbres symétriques employés par l'algorithme *Catboost*

## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 6 • Modèle sécheresse : méthodes de validation

**Objectif** : Définir des **méthodes de validation** en accord avec la problématique qui prennent en compte le **caractère spatio-temporel** des données utilisées.

#### Métriques de validation

##### Métrique statistique

$$R^2 = 1 - \frac{MSE}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

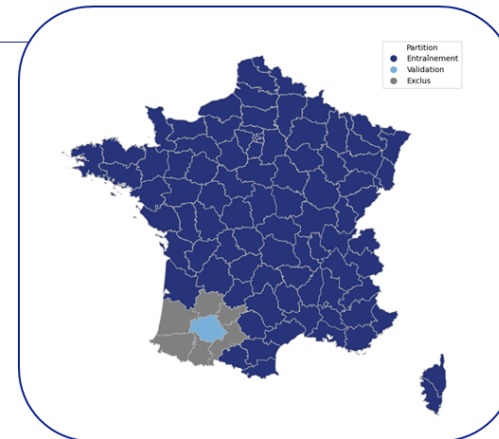
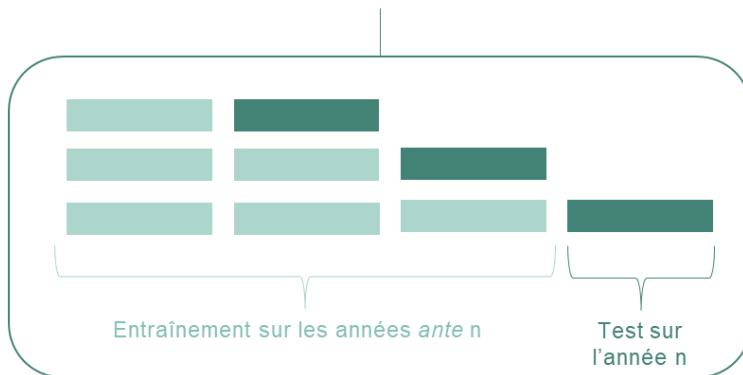
##### Métrique métier interprétable

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{f}(x_i)|$$

##### Métrique pour valeurs extrêmes

$$MAPEX(q) = \frac{100}{|V(q)|} \sum_{(x,y) \in V(q)} \frac{|y - \hat{f}(x)|}{y}, \quad V(q) = \{(x,y) \in V \mid y \geq q\}$$

#### Validation croisée **temporelle** et **spatiale**



## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 6 • Modèle sécheresse : optimisation du modèle

#### Une variable cible déséquilibrée

- 70% des observations ne présentent aucune charge sinistre.

#### Lacunes du modèle

- Sous-estimation de la charge sinistre.
- Mauvaise détection des événements extrêmes.

Optimisation →

Pénalisation de la fonction de perte  $MSE$

$$MSE(w) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}(x_i))^2 w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Ajout d'un poids  $w$  pour pénaliser les erreurs commises sur les charges importantes durant l'entraînement.

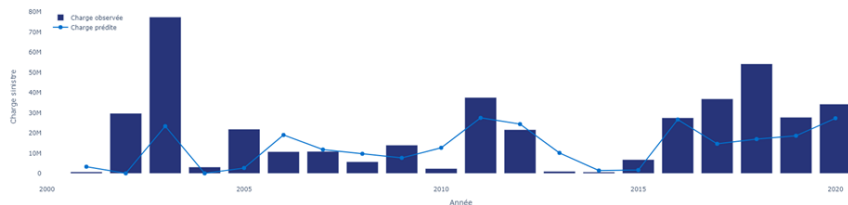
- **Pondération** des variables explicatives et application de contraintes de monotonie.
- **Optimisation des hyperparamètres** (nombre d'arbres, profondeur maximale, pas de la descente de gradient).

## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 7 • Résultat du modèle optimisé

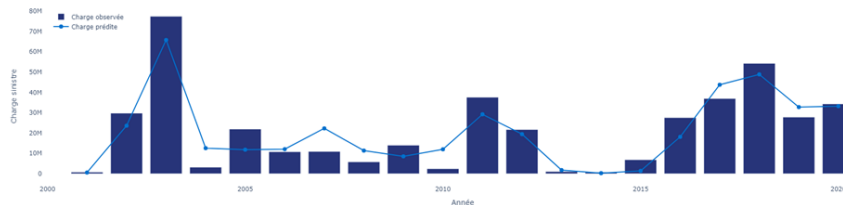
#### Analyse temporelle

Modèle de référence



Comparaison temporelle de la charge sinistre annuelle observée et prédite

Modèle optimisé



Comparaison temporelle de la charge sinistre annuelle observée et prédite

#### Résultats de l'optimisation

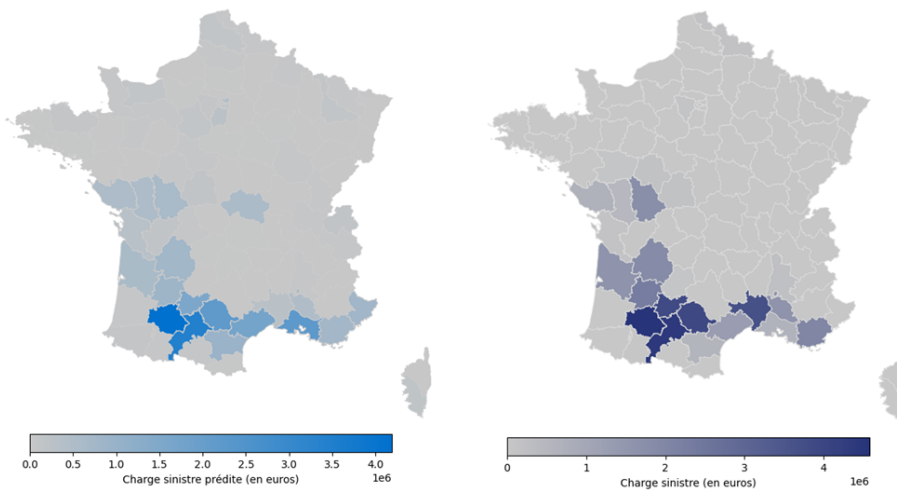
- Meilleure **reproduction des tendances** de sinistralité.
- Meilleure **détection des événements majeurs** de sinistralité (2003, 2017 et 2018)



## PARTIE 1 : MODÉLISATION DU RISQUE SÉCHERESSE

### 7 • Résultat du modèle optimisé

#### Analyse spatiale



Comparaison spatiale de la charge sinistre annuelle observée et prédite - 2017

Modèle	$R^2$	MAE	MAPEX
Référence	0.51	$170 \times 10^3$	21%
Optimisé	0.55	$140 \times 10^3$	12%

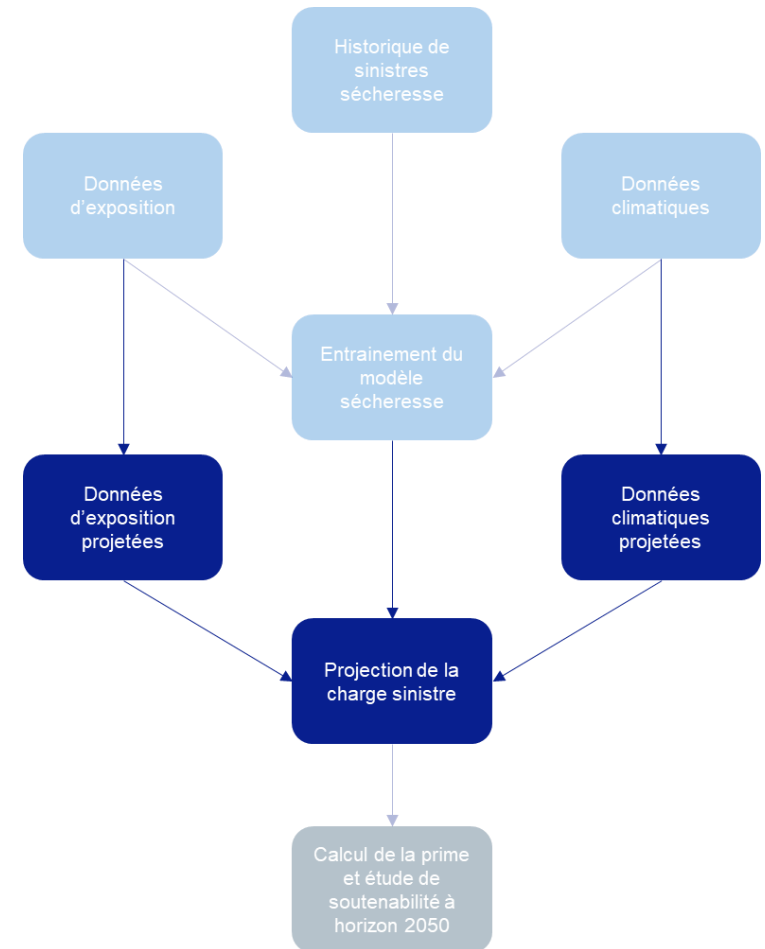
Comparaison des métriques entre le modèle de référence et le modèle optimisé

#### Résultats de l'optimisation

- L'optimisation conduit à une **amélioration des métriques** par rapport au modèle de référence.
- Réduction de l'erreur dans **les zones à risques (MAPEX)**.
- **Surestimation** de la charge sinistre dans certains départements.

Dans **une logique prudentielle**, les résultats du modèle optimisé demeurent préférables à ceux du modèle de référence

## 2 • PROJECTION DU RISQUE

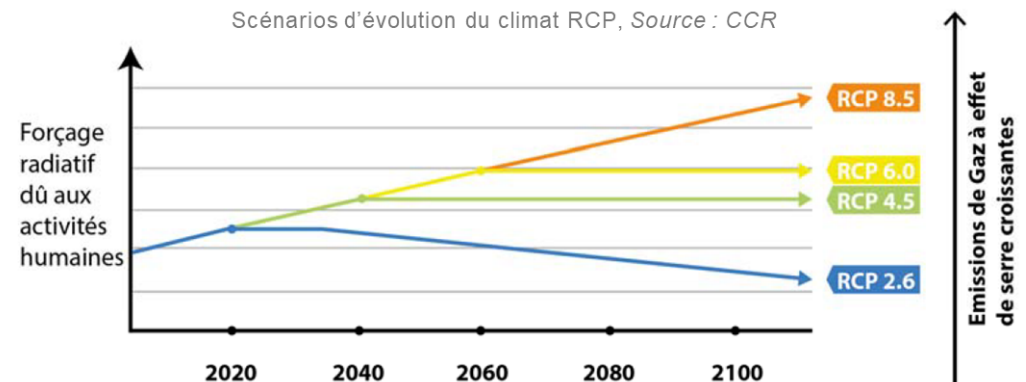


## PARTIE 2 : PROJECTION DU RISQUE

### 1 • Scénario RCP (Representative Concentration Pathways)

#### Scénarios RCP

- Les **scénarios RCP** (Representative Concentration Pathways) correspondent à des scénarios socio-économiques associés à **des trajectoires de forçage radiatif** s'étendant de 2006 à 2300.
- **4 trajectoires** ont été définies par le GIEC :
  - **RCP 2.6** : Scénario le plus optimiste avec diminution des émissions.
  - **RCP 4.5 et 6.0** : Scénarios intermédiaires avec stabilisation des émissions.
  - **RCP 8.5** : Scénario le plus pessimiste avec augmentation des émissions au rythme actuel (« *Business as usual* »).



#### Choix de la trajectoire 4.5

- **Remise en question** de la pertinence du **scénario RCP 8.5**.
- Pas de différence majeure avec le scénario RCP 8.5 pour l'horizon considéré.
- Permet d'être cohérent avec les hypothèses du nouvel exercice de l'ACPR.

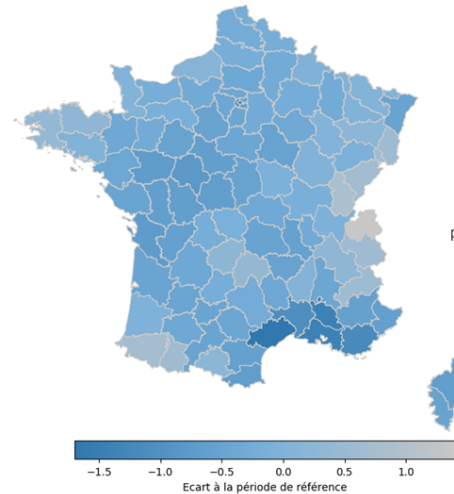
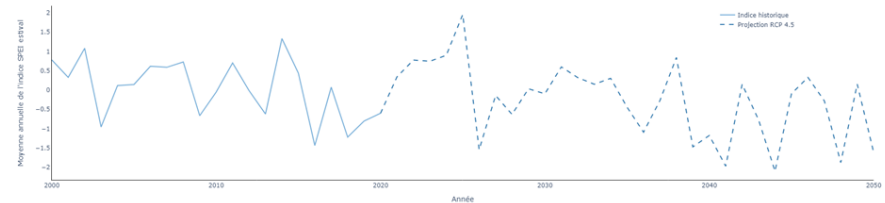
## PARTIE 2 : PROJECTION DU RISQUE

### 2 • Projection des indices de sécheresse

#### Récupération des variables climatiques

Les variables climatiques brutes (**températures, précipitations et SWI**) sont récupérées sur la plateforme DRIAS et projetées à travers le scénario **RCP 4.5** défini par le **GIEC**.

Construction et projection  
des indices de  
sécheresse



Ecart moyen annuel entre la  
période de référence (2000-2020)  
et la période 2041-2050 pour le  
SPEI estival

#### Analyse des indices projetés

- Pour l'indice SPEI, l'indice **SPEI estival** présente la **plus significative variation** par rapport à la période de référence.
- L'indice SPEI estival se dégrade sur la majorité de l'hexagone passant d'une moyenne annuelle de **0.02** sur la période de référence à **-0.95** sur la période 2041-2050.
- L'indice de magnitude SWI voit sa moyenne annuelle de la période de référence **tripler** entre 2041-2050.

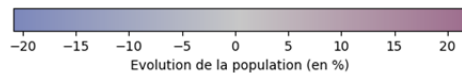
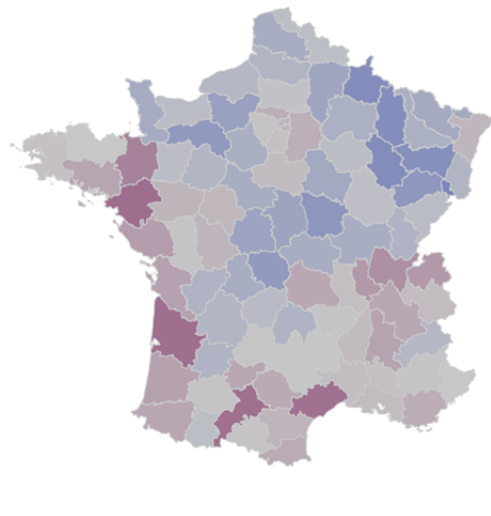
## PARTIE 2 : PROJECTION DU RISQUE

### 3 • Projection des enjeux assurés

#### Projection démographique

Scénario de projection démographique **central** de l'INSEE (modèle Omphale)

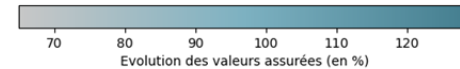
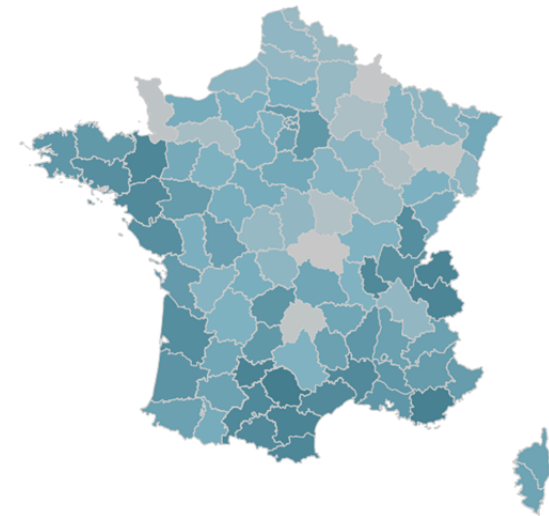
- Application de taux d'émigration, de fécondité et de mortalité à l'échelle départementale.



#### Projection des valeurs assurées

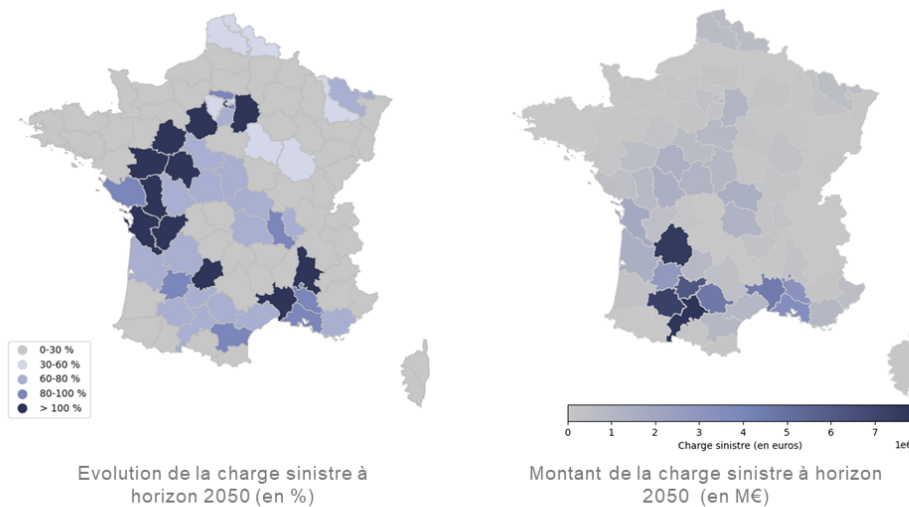
Projection selon deux éléments d'inflation :

- L'**indice du coût de la construction (ICC)**
- Un **indice d'enrichissement** spécifique à chaque département (basé sur les valeurs assurées historiques)



## PARTIE 2 : PROJECTION DU RISQUE

### 4 • Projection de la sinistralité : analyse à exposition constante (effet climat)



### Résultats

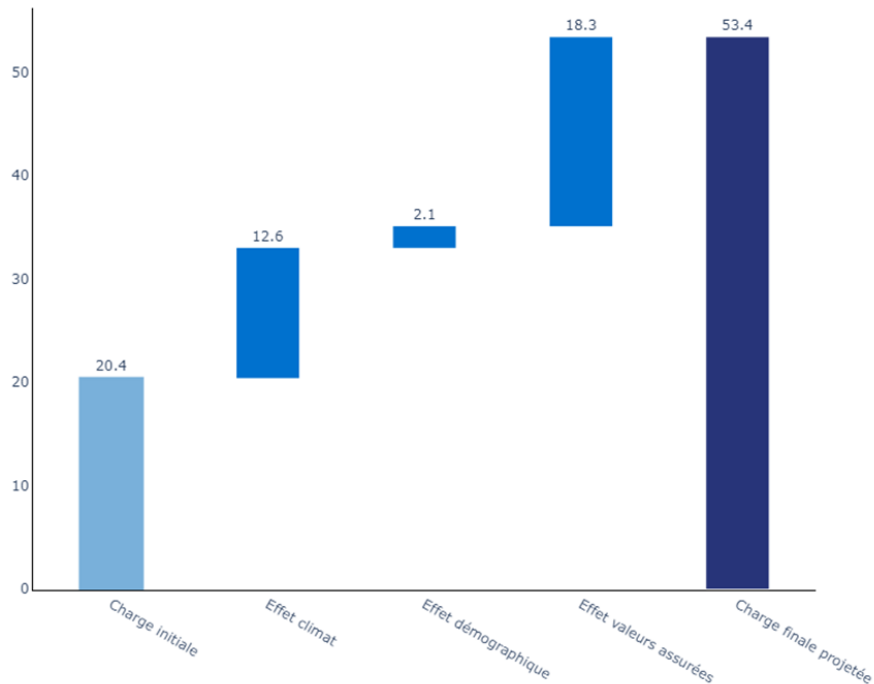
- Augmentation de **61%** de la perte moyenne annuelle à horizon 2050 sous scénario RCP 4.5.
- **Forte évolution** du risque le long du croissant argileux, au niveau du Bassin parisien, du nord des Hauts-de-France et de l'Auvergne.
- La Haute-Garonne, le Tarn-et-Garonne, la Dordogne, le Gers, le Vaucluse et le Gard regroupent **60% de la charge sinistre future**.

	Charge sinistre (en M€)	Période de retour - Référence	Période de retour – RCP 4.5
Sécheresse 2003	80	20 ans	9 ans
Sécheresse 2018	55	10 ans	4 ans
Sécheresse 2011	40	4 ans	2 ans

Sous le scénario RCP 4.5, les **périodes de retour** des événements de sécheresse extrême sont **divisées par deux à horizon 2050**.

## PARTIE 2 : PROJECTION DU RISQUE

### 4 • Projection de la sinistralité : décomposition de la charge sinistre

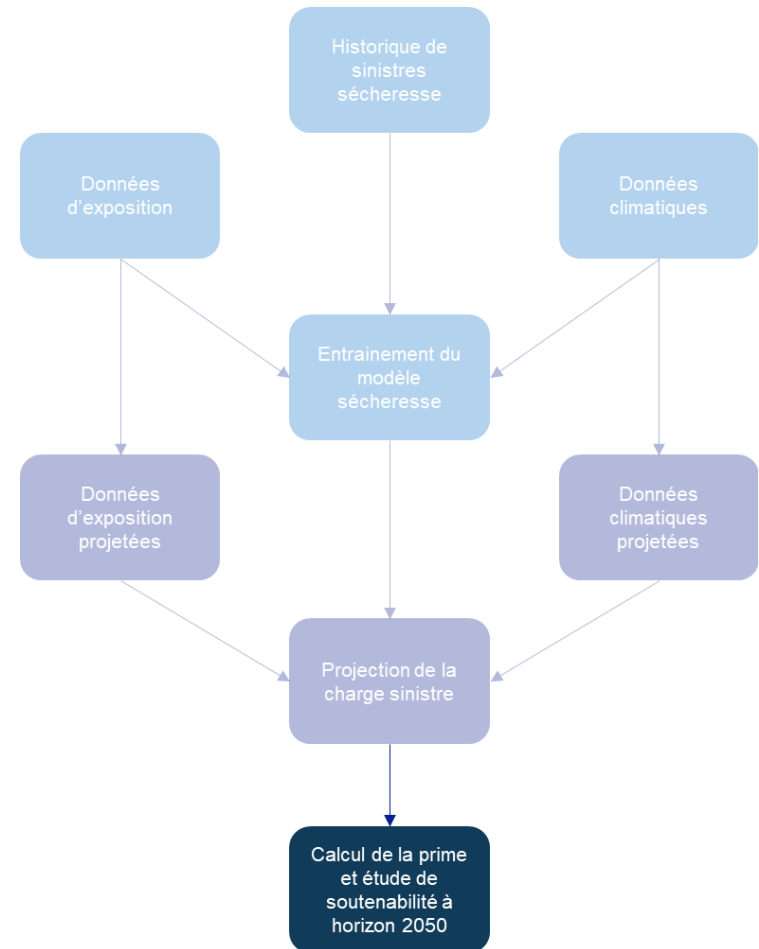


Décomposition de la charge sinistre annuelle moyenne pour la période 2041-2050

### Résultats

- La charge finale projetée correspond à une **augmentation de 160% de la charge initiale.**
- L'augmentation de la valeur des biens assurés représente le premier facteur inflationniste (> **90%**)
- **L'effet du changement climatique** arrive en deuxième position avec une augmentation de **61%**.
- **L'effet démographique** a un impact relativement modéré avec une hausse de seulement **10%**.

# 3 • SOUTENABILITÉ À HORIZON 2050

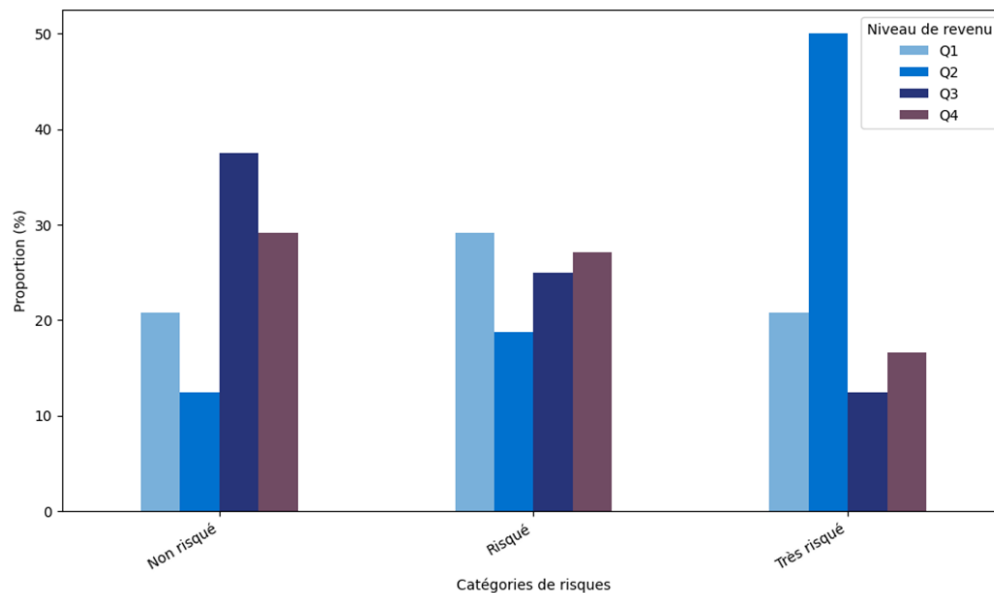




## PARTIE 3 : SOUTENABILITÉ À HORIZON 2050

### 1 • Risque sécheresse et richesse

Récupération du **revenu médian** départemental à partir des bases de données FILOSOFI de l'INSEE et **projection** des revenus à horizon 2050.



Distribution des départements en fonction de leur catégorie de risque et leur niveau de richesse à horizon 2050

### Constats

- Les départements à sinistralité élevée sont associés à des revenus médians plus bas. Pour les départements très risqués, **49%** appartiennent à Q1 et **20 %** à Q2.
- Un **test d'indépendance du  $\chi^2$**  présente une **p-valeur de  $10^{-12}$** , qui rend difficile l'acceptation de l'hypothèse d'indépendance entre le niveau de richesse et le niveau de risque ( $H_0$ ).

## PARTIE 3 : SOUTENABILITÉ À HORIZON 2050

### 2 • Mesurer la soutenabilité

**Objectif** : Construire une mesure de **soutenabilité de la prime MRH** à partir des informations sur le **revenu médian** départemental

#### Définition du **ratio de soutenabilité** $\kappa$

$$\kappa_{d,n} = \frac{Prime_{d,n}}{Revenu_{d,n}} \times 100$$

Une **augmentation** du ratio indique que **la prime augmente plus vite que le revenu**.

Etude du ratio relativement à l'année de référence 2020



#### Calcul de la **dévi**ation du ratio de soutenabilité $\Delta\kappa_d$

$$\Delta\kappa_d = (\kappa_{d,2050} - \kappa_{d,2020}) \times 100$$

Une **dévi**ation positive du ratio indique une **dégradation de la soutenabilité** de la prime à horizon 2050.

Ces quantités permettent de mettre en évidence les départements fortement exposés au risque sécheresse dont l'augmentation significative de la prime MRH conduirait à un **risque d'insoutenabilité** chez les assurés

## PARTIE 3 : SOUTENABILITÉ À HORIZON 2050

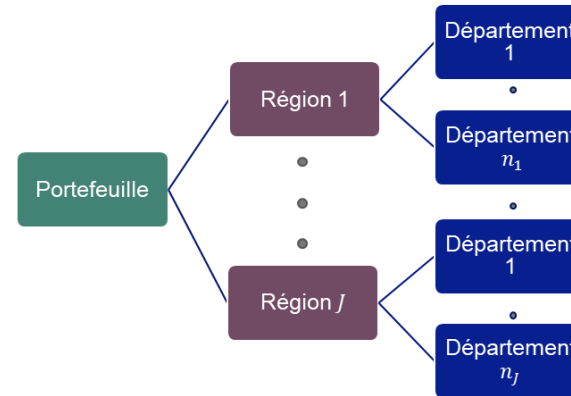
### 3 • Tarification de la prime MRH par département

#### Hypothèses de projection des sinistres

- La charge sinistre « hors sécheresse » couverte par la garantie MRH évolue au taux annuel de l'indice du coût de la construction (ICC).
- La charge sinistre sécheresse est estimée à l'aide du modèle sécheresse présenté précédemment.

#### Méthode de tarification

- Modèle de **crédibilité hiérarchique de Jewell (1975)** (modèle de crédibilité à deux niveaux).
- Le portefeuille est segmenté par **région (premier niveau)** elle-même divisée par **département (deuxième niveau)**.
- La **prime de crédibilité départementale** correspond à une **pondération (facteur de crédibilité)** de l'expérience du portefeuille, de la région et du département en question.



Segmentation du portefeuille en plusieurs niveaux

$$\begin{aligned}
 & \text{Prime de crédibilité départementale} \quad \hat{\pi}_{ij}^H = z_{ij} Y_{ijw} + (1 - z_{ij}) \hat{\pi}_i^H \\
 & \text{Prime de crédibilité régionale} \quad \hat{\pi}_i^H = z_i Y_{izw} + (1 - z_i) m
 \end{aligned}$$

Expérience du département (pointe vers  $Y_{ijw}$ )  
 Expérience de la région (pointe vers  $Y_{izw}$ )  
 Expérience du portefeuille (pointe vers  $m$ )

## PARTIE 3 : SOUTENABILITÉ À HORIZON 2050

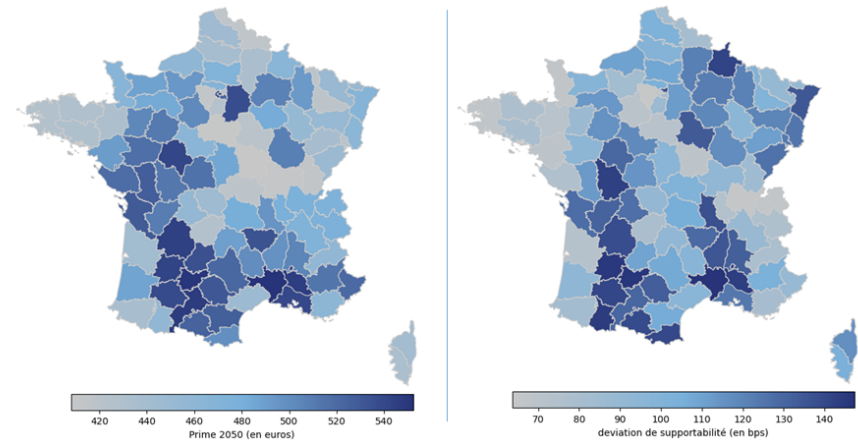
### 4 • Tarification de la prime MRH par département

#### Hypothèses de tarification

- Application du **modèle hiérarchique de Jewell**.
- Les pondérations (facteurs de crédibilité) des primes de crédibilité sont obtenues à partir du **calcul des variances inter et intra départementales et régionales** afin d'aboutir à une prime actuariellement juste au sens de la théorie de la crédibilité.
- La tarification de la prime est **basée sur le risque**.

#### Résultats

- Une **augmentation** de la prime moyenne MRH du portefeuille de **82%** à horizon 2050 par rapport à l'année de référence. La croissance dépasse **130%** dans certains départements.
- **Un accroissement du ratio de soutenabilité** moyen passant de **1.01%** à **1.89%** à horizon 2050.
- Les départements du Gard, du Tarn-et-Garonne, du Lot-et-Garonne, du Vaucluse, du Gers et de la Dordogne connaissent une **forte déviation de soutenabilité**.



Département	Prime 2050	$\Delta\kappa$
Gard	552 (+132%)	147
Tarn-et-Garonne	523 (+109%)	130
Lot-et-Garonne	484 (+98%)	118
Vaucluse	493 (+86%)	111

## PARTIE 3 : SOUTENABILITÉ À HORIZON 2050

### 5 • Tarification de la prime MRH avec solidarité paramétrique

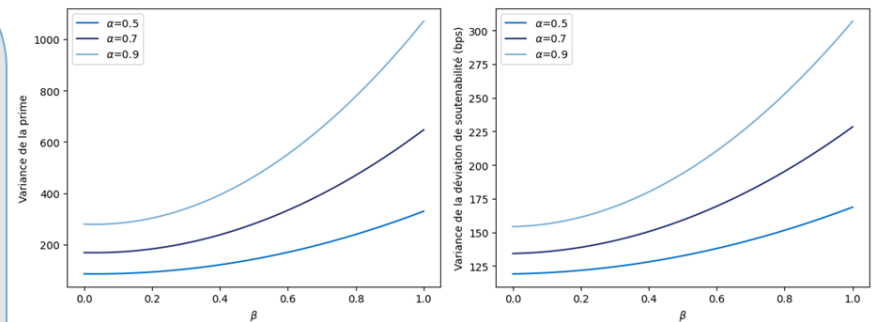
**Objectif** : Paramétrer la prime hiérarchique selon différents niveaux de solidarité afin d'identifier la susceptibilité de certains départements au risque d'insoutenabilité.

- Conservation du modèle hiérarchique avec introduction des paramètres  $(\alpha, \beta) \in [0,1]^2$ , qui correspondent au niveau de solidarité respectivement à l'échelle nationale et à l'échelle régionale :

$$\pi_{2050}(\alpha, \beta) = \underbrace{(1 - \alpha)\pi_{N,2050}}_{\text{Part de solidarité nationale}} + \alpha \left[ \underbrace{(1 - \beta)\pi_{R,2050}}_{\text{Part de solidarité régionale}} + \beta\pi_{D,2050} \right]$$

avec  $\pi_{N,2050}$  la prime collective du portefeuille,  $\pi_{R,2050}$  la prime régionale,  $\pi_{D,2050}$  la prime départementale.

- La tarification est **basée sur la solidarité**.



La variance est une fonction croissante de  $\alpha$  et  $\beta$ .

En l'absence de solidarité, les primes présentent une forte disparité.

## PARTIE 3 : SOUTENABILITÉ À HORIZON 2050

### 6 • Tarification de la prime MRH avec solidarité paramétrique

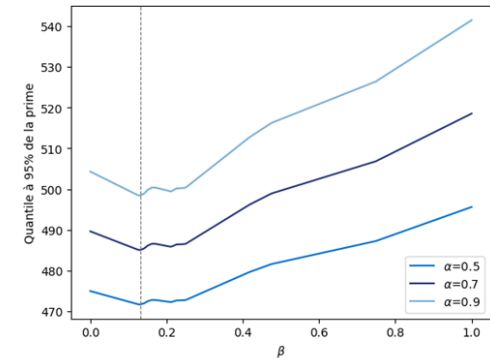
**Objectif** : Etudier les niveaux de solidarité qui permettent de minimiser les quantiles extrêmes de la distribution des primes

#### Partage optimal

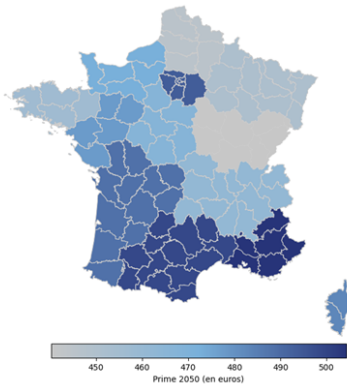
En présence d'hétérogénéité dans le portefeuille, il existe un **niveau de partage optimal** qui permet de se rapprocher d'une prime équitable tout en minimisant le quantile à 95%.

Le niveau de solidarité  $\beta = 0.14$  fait baisser la prime des départements qui payent injustement trop cher sans faire exploser celles de ceux fortement exposés.

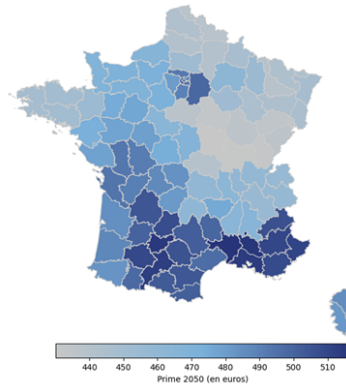
Un résultat analogue est obtenu pour la déviation du ratio de soutenabilité.



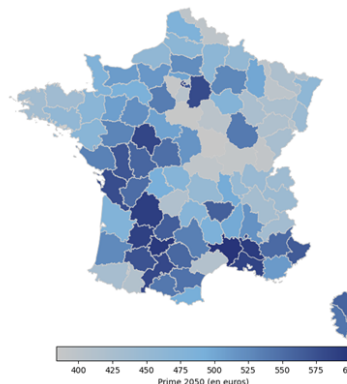
Cas solidarité maximale :  $\beta = 0$



Cas optimal :  $\beta = 0.14$



Cas pathologique :  $\beta = 1$



L'absence de solidarité conduit à une **augmentation drastique de la prime MRH**

Un **risque d'insoutenabilité** est identifié pour de nombreux départements en Occitanie, en Nouvelle Aquitaine, en PACA et dans les Pays de la Loire.

## PARTIE 3 : SOUTENABILITÉ À HORIZON 2050

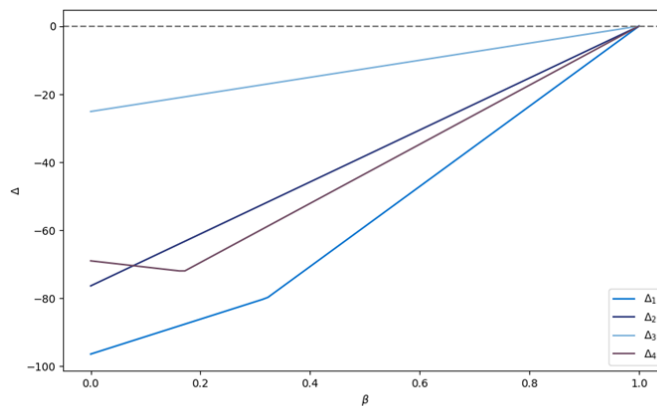
### 7 • Tarification de la prime MRH avec solidarité paramétrique

**Objectif :** Etudier l'impact de la solidarité sur la prime moyenne MRH en fonction du niveau de revenu

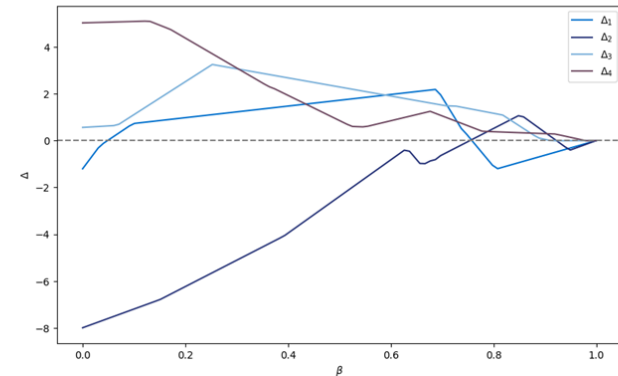
#### Solidarité et niveau de revenu

Comparaison de la prime payée en présence de solidarité et la prime payée basée sur le risque en fonction du niveau de revenu:

- **Gain moyen** sur la prime MRH par niveau de revenu en fonction du niveau de solidarité
- **Gain maximal** sur la prime MRH par niveau de revenu en fonction du niveau de solidarité



Gain maximal sur la prime MRH



Gain moyen sur la prime MRH

#### Résultats

Un niveau de solidarité élevé profite davantage au département au niveau de revenu Q2 avec un gain moyen de 8 euros sur la prime MRH.

Dans une tarification avec solidarité, les départements les plus riches contribuent en moyenne à payer le coût du risque sécheresse.

En présence de solidarité, le gain maximal est de 100 euros pour un département appartenant à Q1.

# CONCLUSION

Résultats, apports et limites



## CONCLUSION

### 1 • Résultats, apports et limites

#### Principaux résultats

- La charge sinistre annuelle moyenne liée au phénomène RGA augmente de 61% à horizon 2050 sous le scénario RCP 4.5, confirmant la tendance haussière annoncée par d'autres études. (CCR 2018 : 75%, COVEA 2022 : 60%, CCR 2023 : 59%)
- Les événements de sécheresse extrême voient leur période de retour divisée par 2 à horizon 2050.
- Les départements qui pèsent le plus dans la sinistralité à horizon 2050 se situent le long du croissant argileux et les départements sur des zones à risque RGA moyen connaissent de fortes évolutions.
- La croissance des sinistres sécheresse conduit à une augmentation de 82% en moyenne des primes MRH à horizon 2050, avec des évolutions de primes supérieures à 130% dans certains départements.
- La comparaison des niveaux de richesse et de risque sécheresse révèle que la progression des primes provoque un risque d'insoutenabilité à horizon 2050 dans les départements du Gard, du Tarn-et-Garonne, du Lot-et-Garonne, du Vaucluse et du Gers.
- La soutenabilité des territoires les plus exposés repose sur la solidarité, qui bénéficie le plus aux départements caractérisés par de bas niveaux de revenus.

#### Apports

- Mise en place d'une nouvelle mesure de sécheresse : **indice de magnitude SWI**.
- Proposition d'une métrique en lien avec le niveau de richesse afin d'**intégrer la notion de soutenabilité (vision assurée)**.

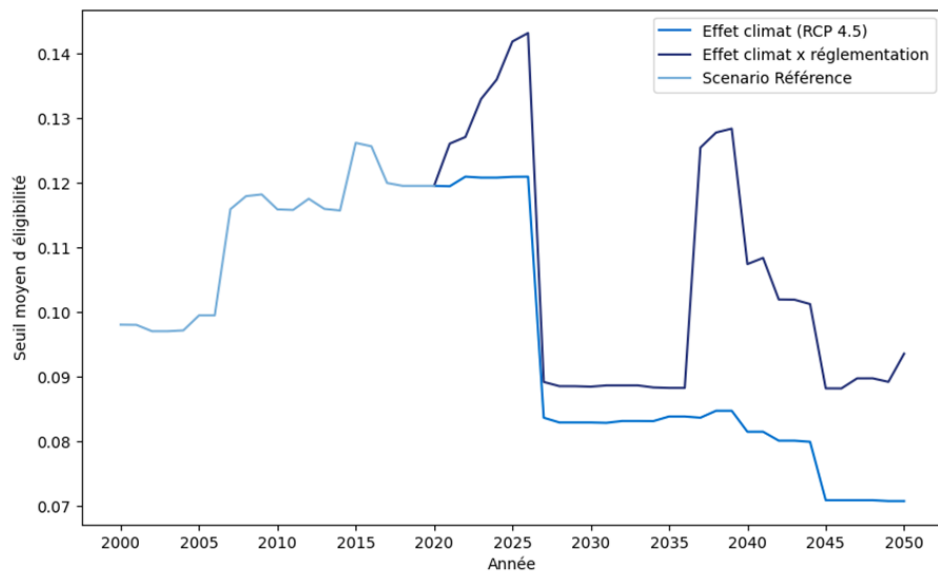
#### Limites et ouverture

- Considérer une **maille plus fine** : maille communale ou infra-communale.
- Intégrer la modification des **critères d'éligibilité** dans le modèle.
- Prendre en compte l'**ensemble des risques climatiques physiques** pour enrichir l'étude de soutenabilité.

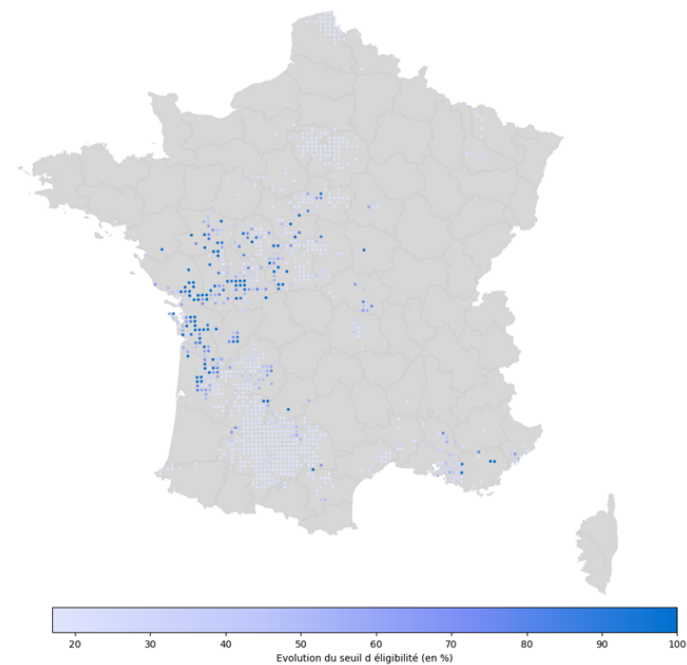
# ANNEXES

**ANNEXES**

1 • Evolution des critères d'éligibilité : Projection du seuil d'éligibilité



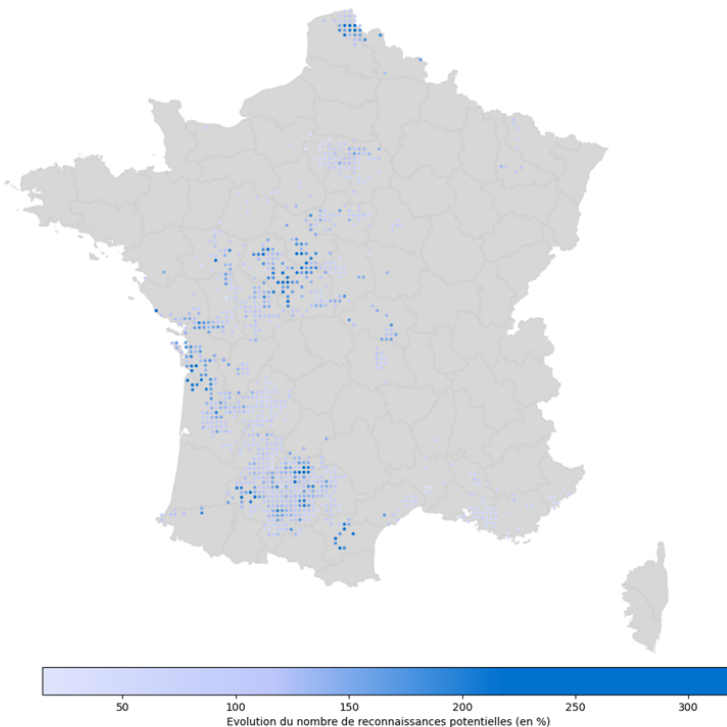
Projection du seuil moyen d'éligibilité avec effet climat et réglementation à horizon 2050



Evolution du seuil d'éligibilité à horizon 2050 sous la nouvelle réglementation

## ANNEXES

### 2 • Evolution des critères d'éligibilité : Impact sur le nombre de reconnaissances potentielles



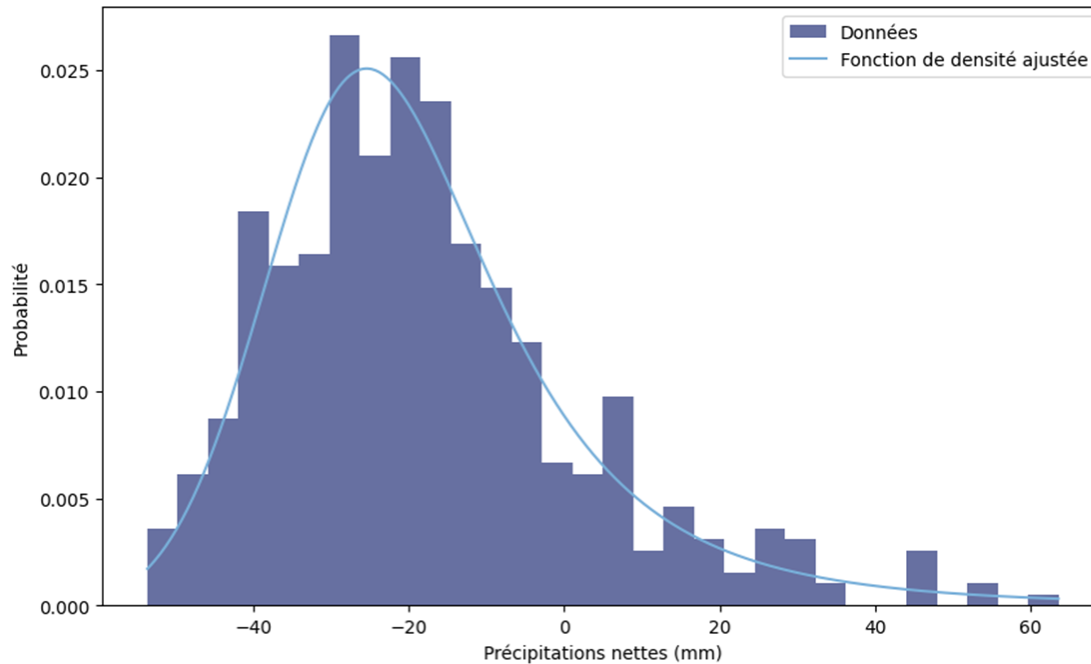
Evolution du nombre de reconnaissances potentielles à horizon 2050 sous la nouvelle réglementation

$$\Delta(n_i) = \frac{n_i^* - n_i}{n_i} \times 100$$

Avec  $n_i^*$  le nombre de reconnaissances potentielles sous la nouvelle réglementation de la commune  $i$  sur la période projetée et  $n_i$ , le nombre de reconnaissances sous la réglementation actuelle de cette même commune.

**ANNEXES**

3 • Calcul du SPEI-3 : Ajustement de la loi log-logistique



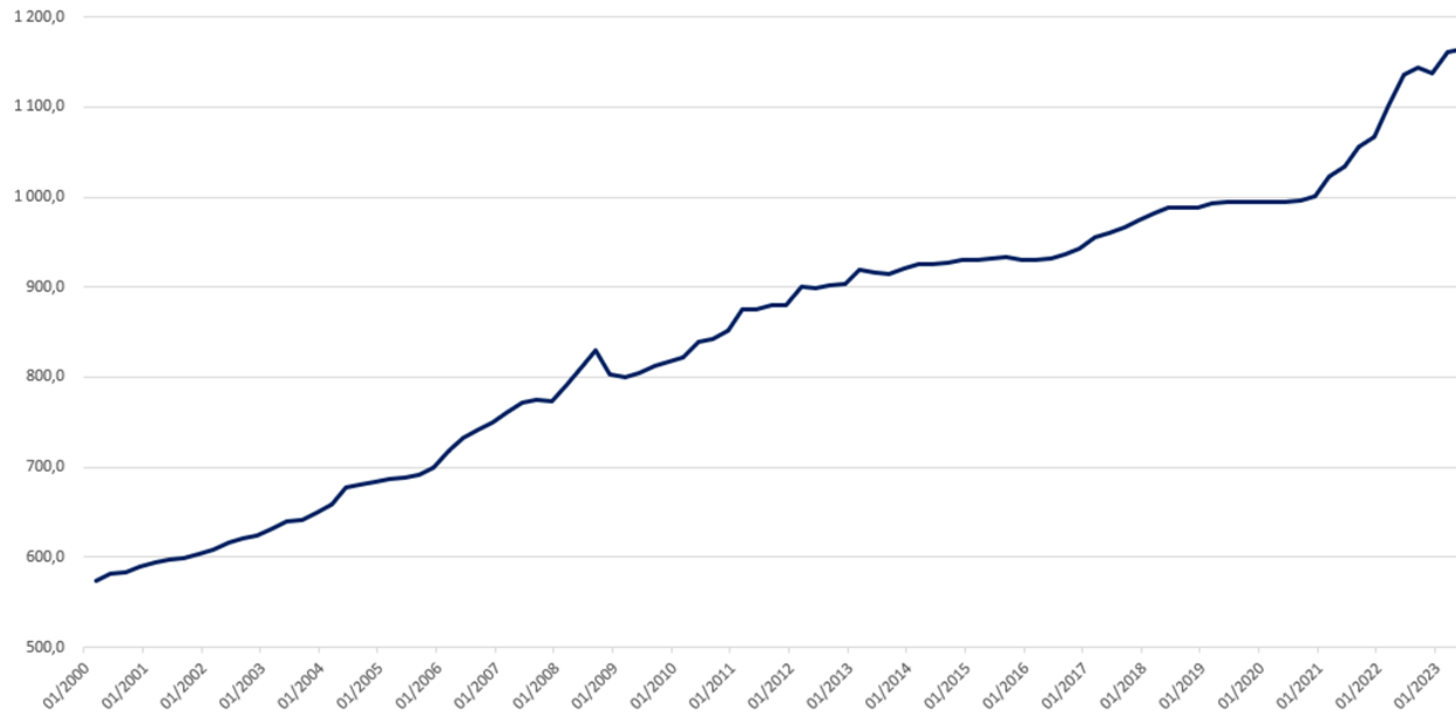
Ajustement de la fonction de densité de la loi log-logistique pour le calcul du SPEI estival du département du Gers

Le calcul de l'indice SPEI-3 fait intervenir la calibration sur les données de précipitations nettes d'une loi log-logistique dont la densité s'écrit

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2}.$$

**ANNEXES**

4 • Traitement « *as-if* » du portefeuille : valeurs historiques de l'indice FFB



Valeurs historiques trimestrielles de l'indice FFB du coût de la construction (base 1941)

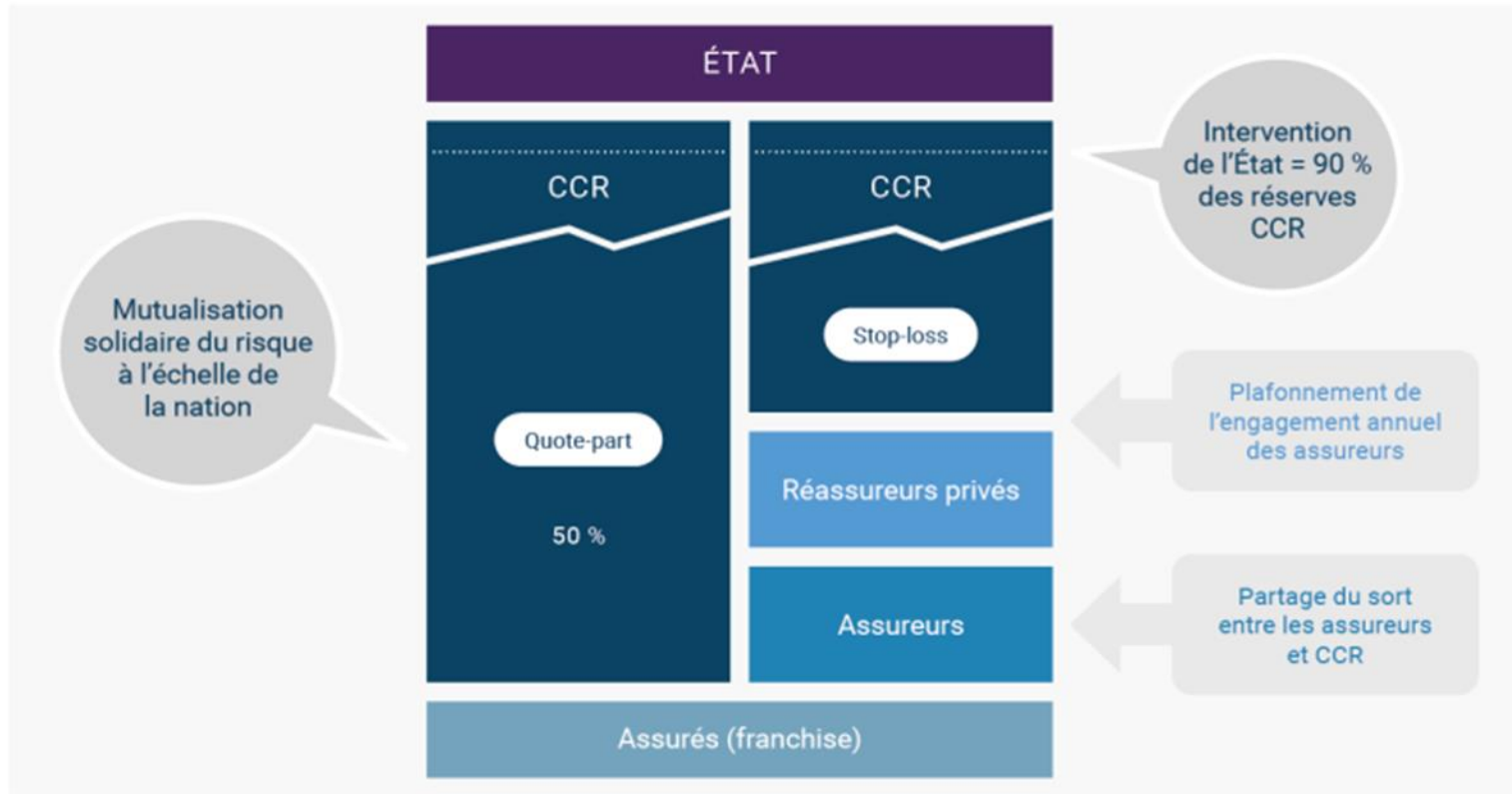
**ANNEXES**

5 • Synthèse des indices de sécheresse

	<b>SPEI</b>	<b>Magnitude SWI</b>
<b>Catégorie</b>	Météorologique	Hydrologique
<b>Données d'entrée</b>	Température et précipitations	SWI (teneur en eau du sol)
<b>Points forts</b>	Indice normalisé qui s'adapte à tous les modèles climatiques.	Prend en compte les échanges en eau entre sol et atmosphère. Modulable avec un seuil
<b>Points faibles</b>	Nécessite une longue série chronologique	Nécessite une modélisation numérique complexe
<b>Interprétation</b>	Une sécheresse débute lorsque l'indice est inférieur à -1	L'indice est positif et est synonymes de sécheresse en cas de valeur élevée

**ANNEXES**

6 • Régime Cat Nat : mécanisme d'indemnisation





**ANNEXES**

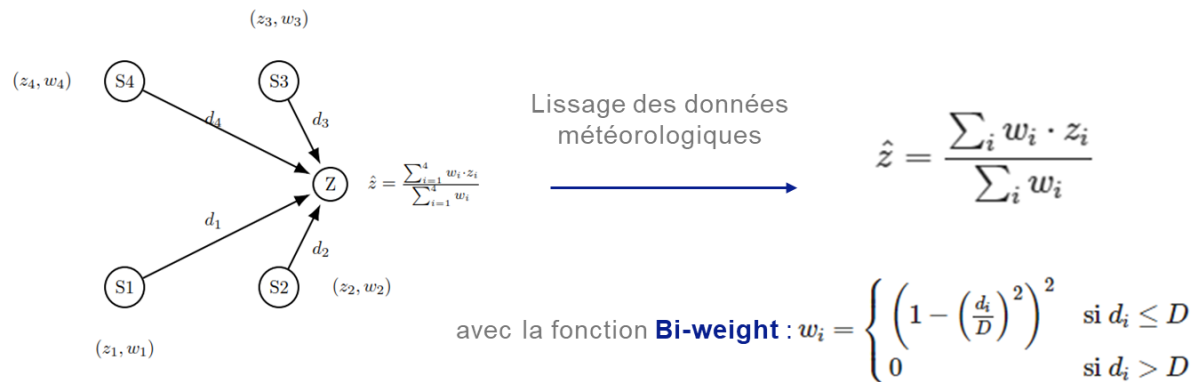
7 • Traitement des données climatiques

1) Récupération des données de températures et précipitations à partir des stations Météo France

2) Calcul des distances géodésiques entre les stations et une localisation z

$$d(x, z) = R \cdot \arccos(\sin(\varphi_x) \cdot \sin(\varphi_z) + \cos(\varphi_x) \cdot \cos(\varphi_z) \cdot \cos(\Delta\lambda))$$

3) Lissage géospatial pour disposer de données météo mensuelles sur la période 2000-2020



## EXEMPLE DE PRESENTATION

### Lorem Ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet  
par un [consectetur adipiscing](#) elit.  
Sed non risus

ON PEUT METTRE LA  
CONCLUSION EN MAJUSCULE

### Lorem ipsum



LEGENDE



LEGENDE

### Lorem ipsum



Légende

Légende

### Lorem Ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Sed non risus. Suspendisse lectus tortor, dignissim sit amet, adipiscing nec, ultricies sed, dolor. Cras elementum ultrices diam. Maecenas ligula massa, varius a...