

Enrichissement de scénarios CAT-NAT RGA avec des indicateurs de vulnérabilité



Tanguy Aucoin
Responsable d'étude d'actuariat
Generali Climate Lab



Nina Guérin
Consultante senior
Galea & Associés



Etienne Raynal
Consultant senior
Galea & Associés

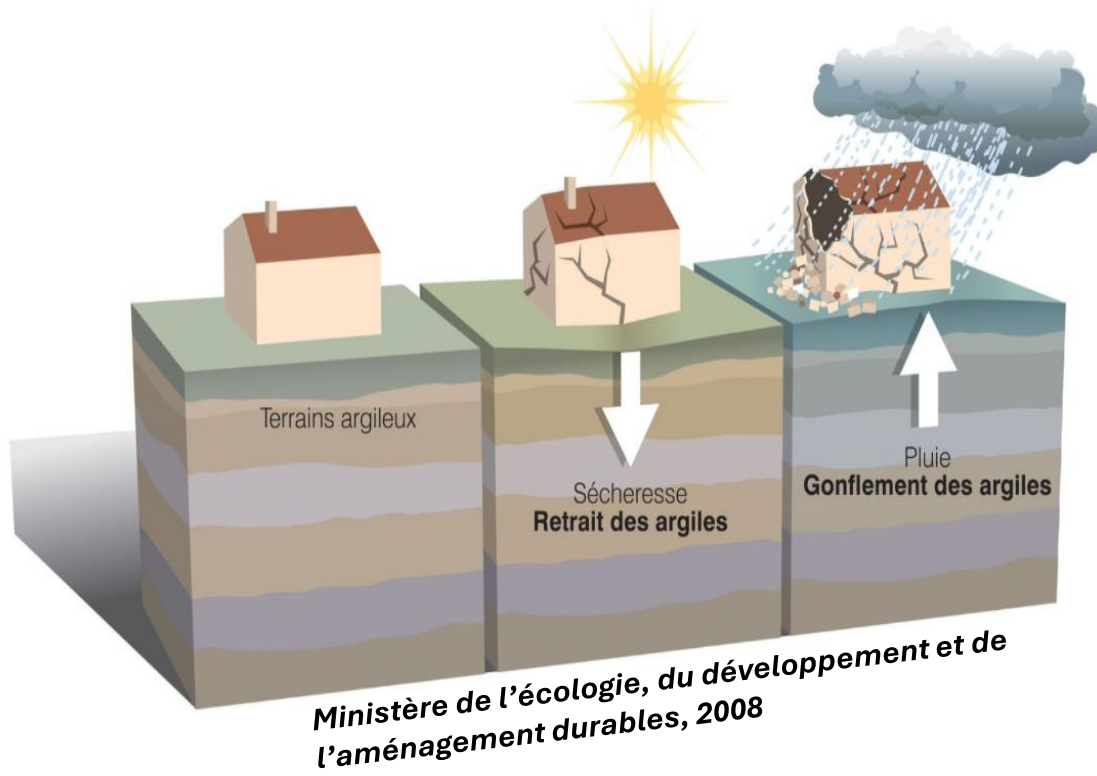


SOMMAIRE

1. Présentation et contexte du RGA
2. Intégration du risque CatNat dans la révision Solvabilité II
3. Modélisation de l'aléa : du SWI à l'éligibilité au régime CAT-NAT
4. Caractérisation de la vulnérabilité et de la prévention du bâti
5. Conclusion : gouvernance adaptée et nouvelles pratiques actuarielles

La caractérisation du risque

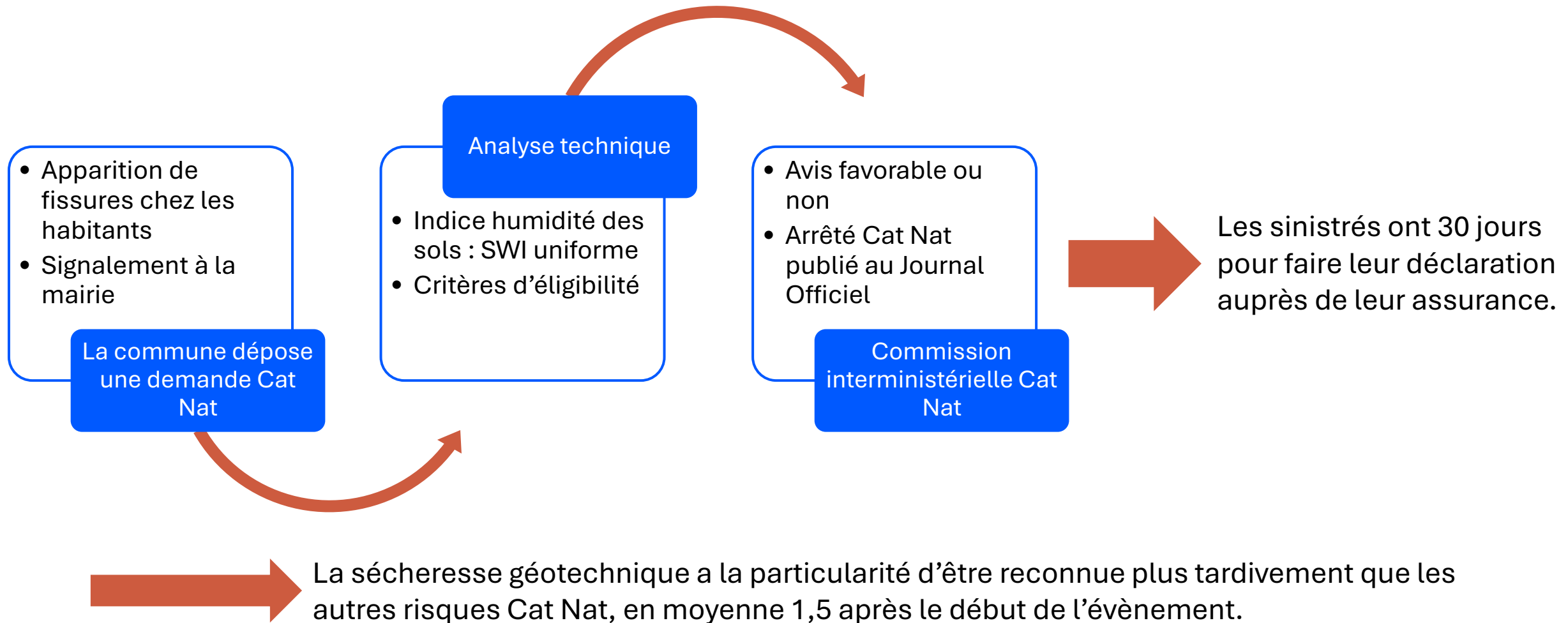
C'est quoi le retrait-gonflement des argiles (RGA) ?



Plusieurs facteurs de fragilité sont responsables de l'apparition de ce phénomène

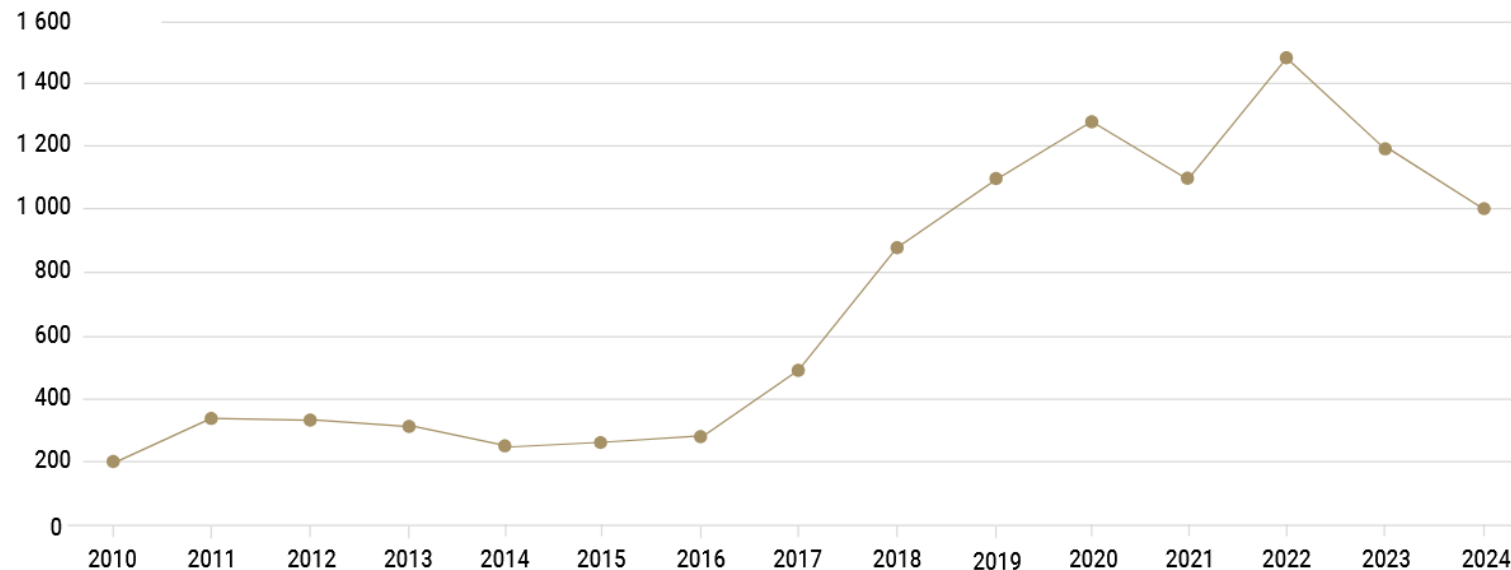
- **Facteur de prédisposition** : La nature du sol.
- **Facteurs déclenchants** : Les éléments liés aux conditions météorologiques : succession de périodes sèches et humides.
- **Facteurs aggravants** : Les actions humaines (les travaux d'aménagement) et les influences environnementales.

Le régime Cat Nat du RGA

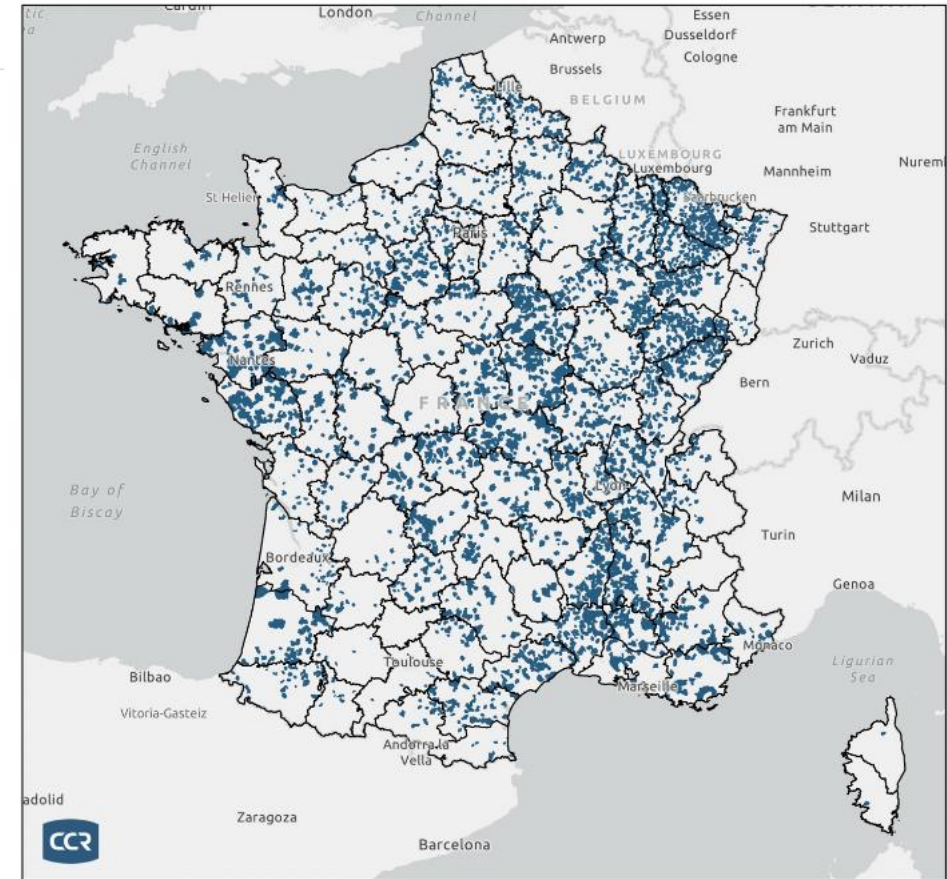


Une aggravation du risque du risque

Coût moyen sécheresse sur une période glissante
de 5 années (en millions d'euros 2024)



carte des communes primo-demandeuses de
reconnaissance CATNAT RGA entre 2017 et 2022



Mesure du risque

Risque

Aléa

×

Exposition

×

Vulnérabilité

Indice d'humidité du sol :
SWI (*Soil Wetness Index*) et SWI uniforme

Localisation des polices d'un portefeuille :
coordonnées et type de sol

De nombreux critères liés au bâti, à la végétation, ...

L'exposition au risque en France

Une donnée fondamentale pour la caractérisation du RGA

Le RGA en chiffres (France Hexagonale)

Exposition :

- 48 % du territoire français est exposé à cet aléa (moyen et fort)
- 10,5 M (54%) de maisons individuelles implantées sur sols argileux de susceptibilité moyenne ou forte

Coût moyen annuel croissant :

Sur les 20 principales catastrophes naturelles depuis 1989, 12 sont liées à la sécheresse dont 5 des 6 premières.

- 424 M€/an entre 1989 et 2015
- 1,1 Md€/an entre 2016 et 2021
- 3,5 Mds€ pour 2022

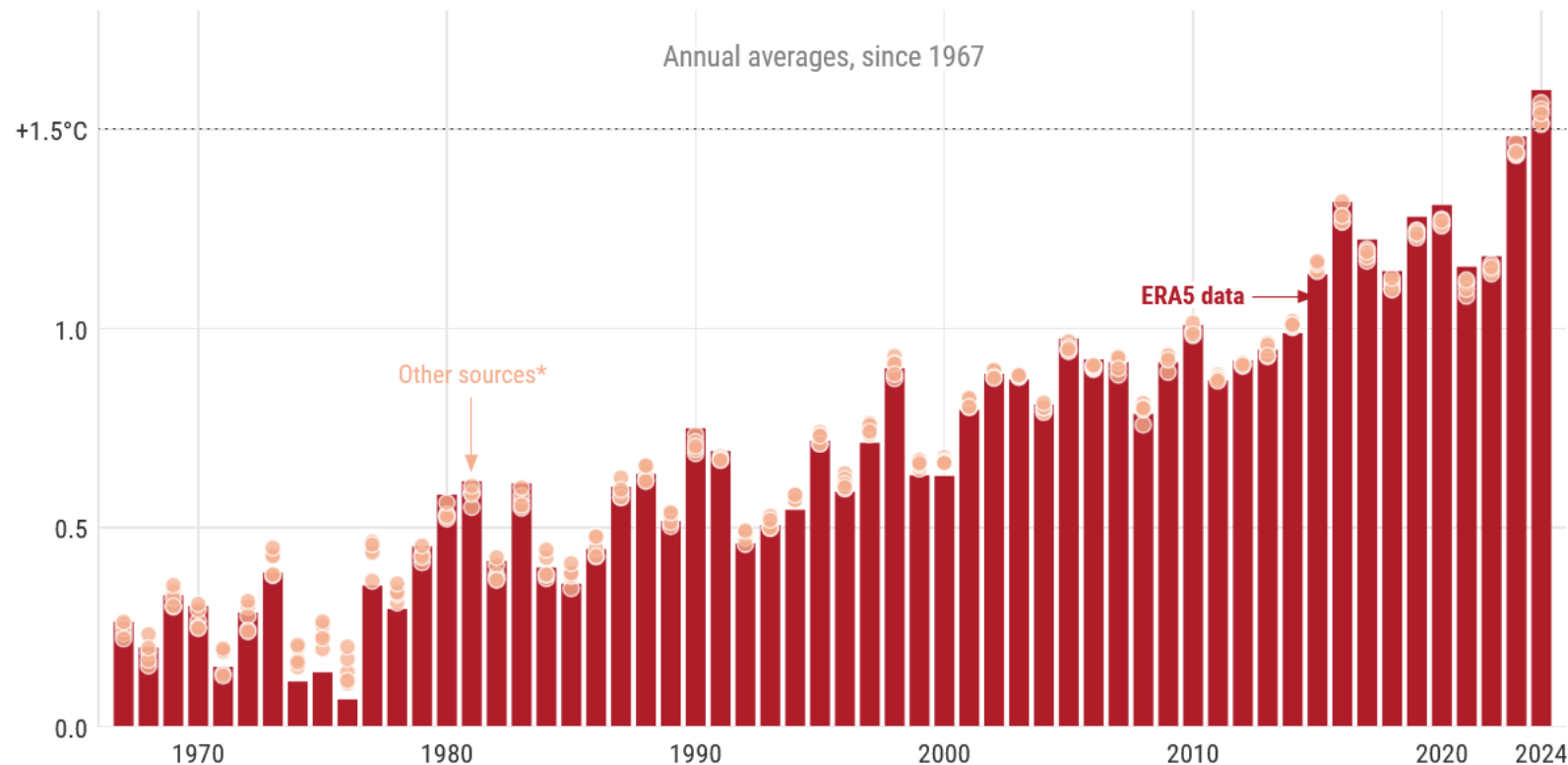
Source : BRGM, Exposition au phénomène de RGA, 2019

Gestion du risque en environnement non-stationnaire : un climat qui évolue



Global surface temperature: increase above pre-industrial

Reference period: pre-industrial (1850–1900) • Credit: C3S/ECMWF



Gestion du risque en environnement non-stationnaire : aspects réglementaires

La Directive (UE) 2025/2 intègre une définition du « risque en matière de durabilité ».

“Risque en matière de durabilité”: un événement ou un état de fait dans le domaine **environnemental, social** ou de la **gouvernance** qui, s’il survenait, pourrait avoir une incidence négative réelle ou potentielle sur la valeur de l’investissement ou de l’engagement.

Principales évolutions du cadre réglementaire (Directive (UE) 2025/2) :

Intégration des risques **climatiques et systémiques** dans l’analyse de solvabilité.



Le « **changement climatique, les pandémies, les autres événements de masse** » doivent être analysés au même titre que le niveau des taux d’intérêt ou l’inflation.

Les entreprises doivent identifier, évaluer **et quantifier l’impact potentiel des facteurs ESG** sur leur **profil de risque**, leur **solvabilité** et leur **stratégie** à long terme.

Gestion du risque en environnement non-stationnaire : aspects réglementaires

L'ORSA doit désormais prendre en compte les risques **environnementaux, sociaux et de gouvernance**.

Les entreprises doivent analyser **des scénarios de changement climatique à long terme**, mis à jour régulièrement (au minimum tous les trois ans). Ces scénarios incluent au minimum :

-  < 2°C : scénario de transition réussie.
-  > 2°C : scénario de réchauffement élevé.

L'ORSA devient d'autant plus un outil **prospectif et stratégique**, reliant les risques ESG aux besoins en capital et aux décisions de gestion.

Cela doit conduire à une adaptation des **modèles actuariels** pour évaluer l'impact des événements ESG sur les engagements et provisions techniques.

La chaîne de modélisation



Question de recherche : comment se caractériserait une année particulièrement sèche dans le climat actuel ?

Objectif : Déterminer des **années sèches extrêmes** mais **plausible** du risque RGA en cherchant à déterminer le SWI Uniforme pour chaque maille.

L'évolution de la sécheresse des sols

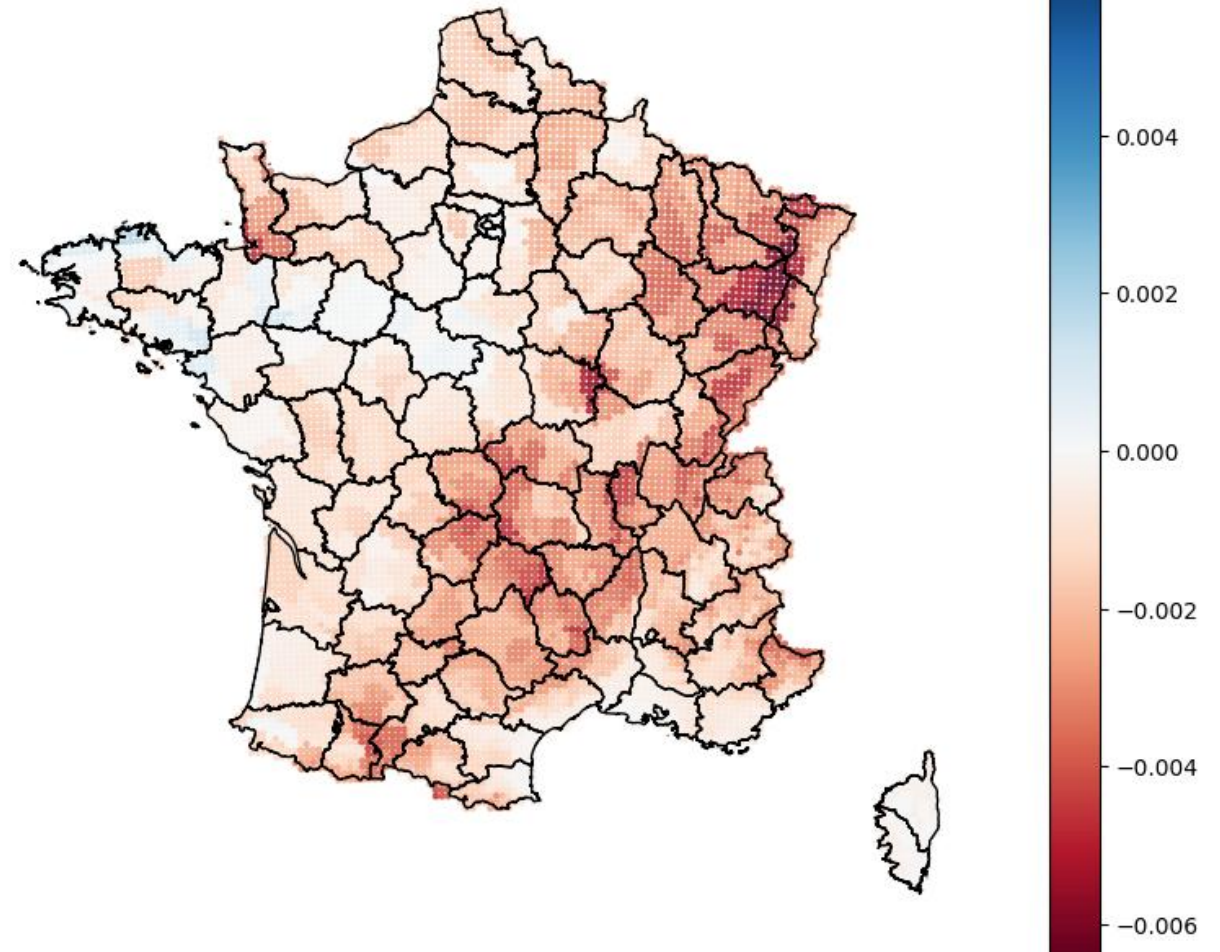
Tendance confirmée avec l'indicateur **SWI (Soil Wetness Index) Uniforme** utilisé pour la reconnaissance Cat Nat.

Définition : Indice d'humidité des sols superficiels (SWI) issu du **modèle SIM**, avec **caractéristiques** géologiques et végétales **uniformes** sur la France.

Mesure : **Mensuelle**, à une maille **SAFRAN** de 8 km². La valeur **minimale** de l'année calendaire est utilisée pour représenter la sécheresse annuelle (pic de sécheresse).

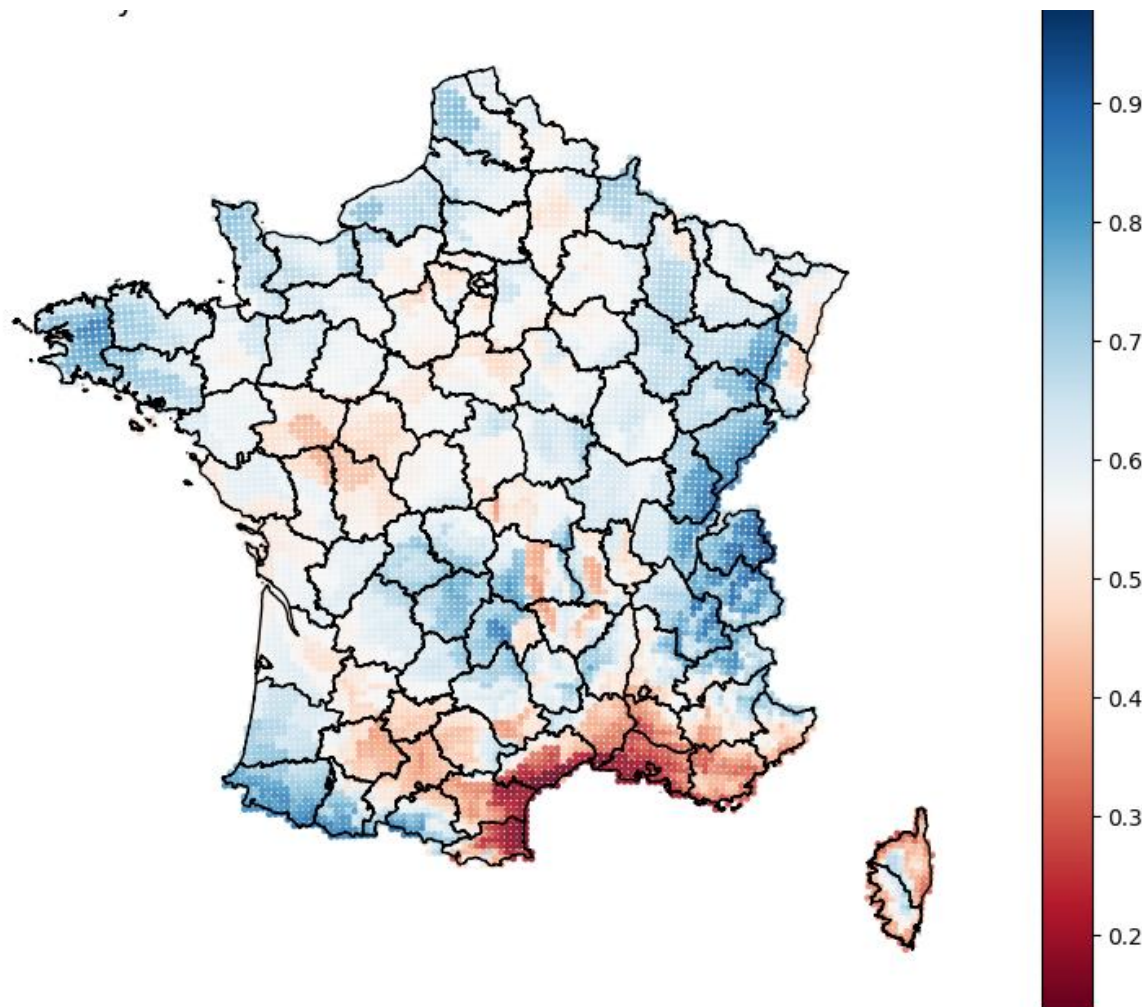
Observation : L'indicateur se **dégrade** globalement sur tout le territoire, mais de **manière inégale**.

Tendance de variation annuelle du SWI
uniforme (1960 à 2024)

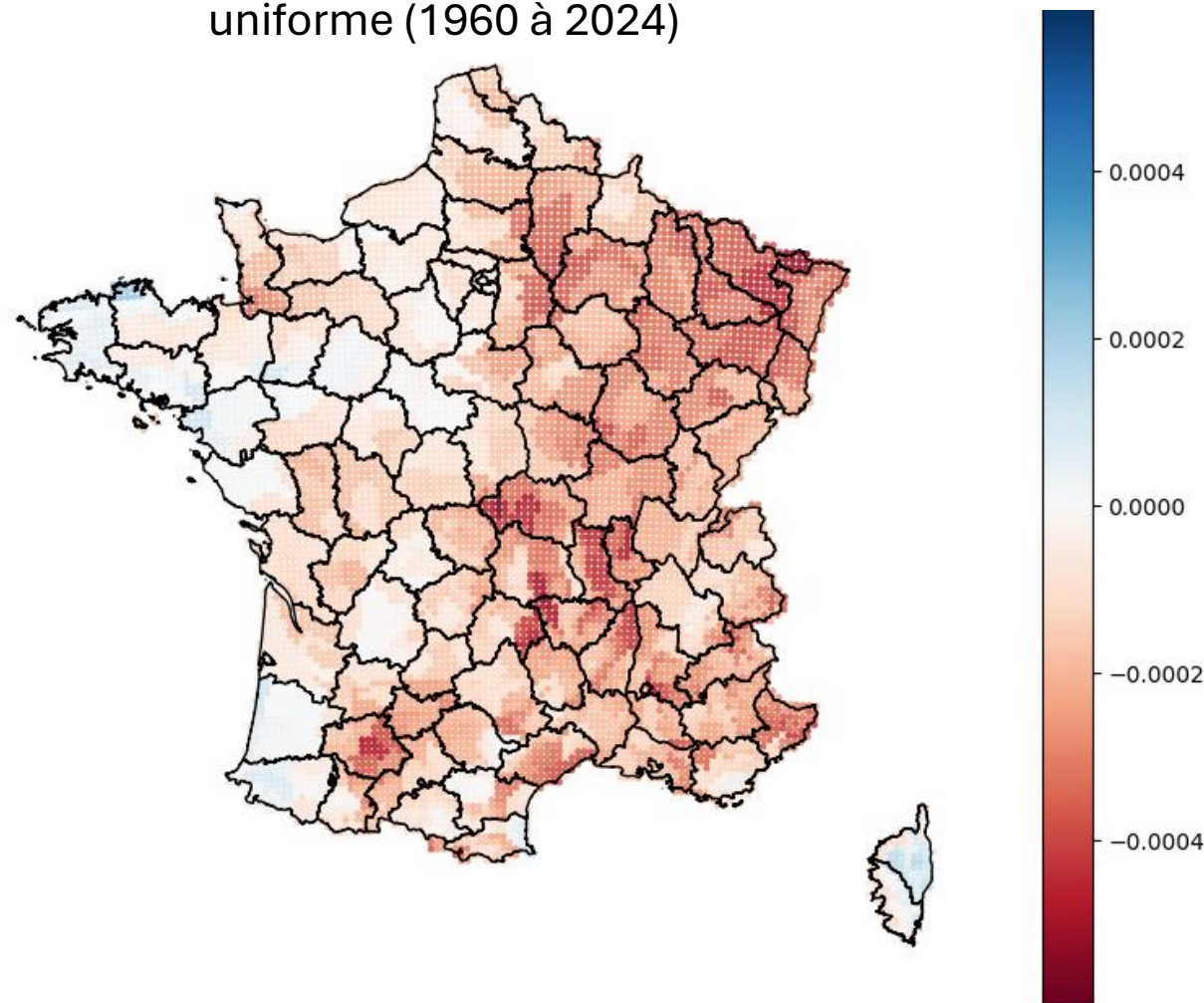


L'évolution de la sécheresse des sols

Moyenne du SWI uniforme sur les 5 dernières années



Tendance de variation annuelle du SWI
uniforme (1960 à 2024)



Risque Centennale de la CCR

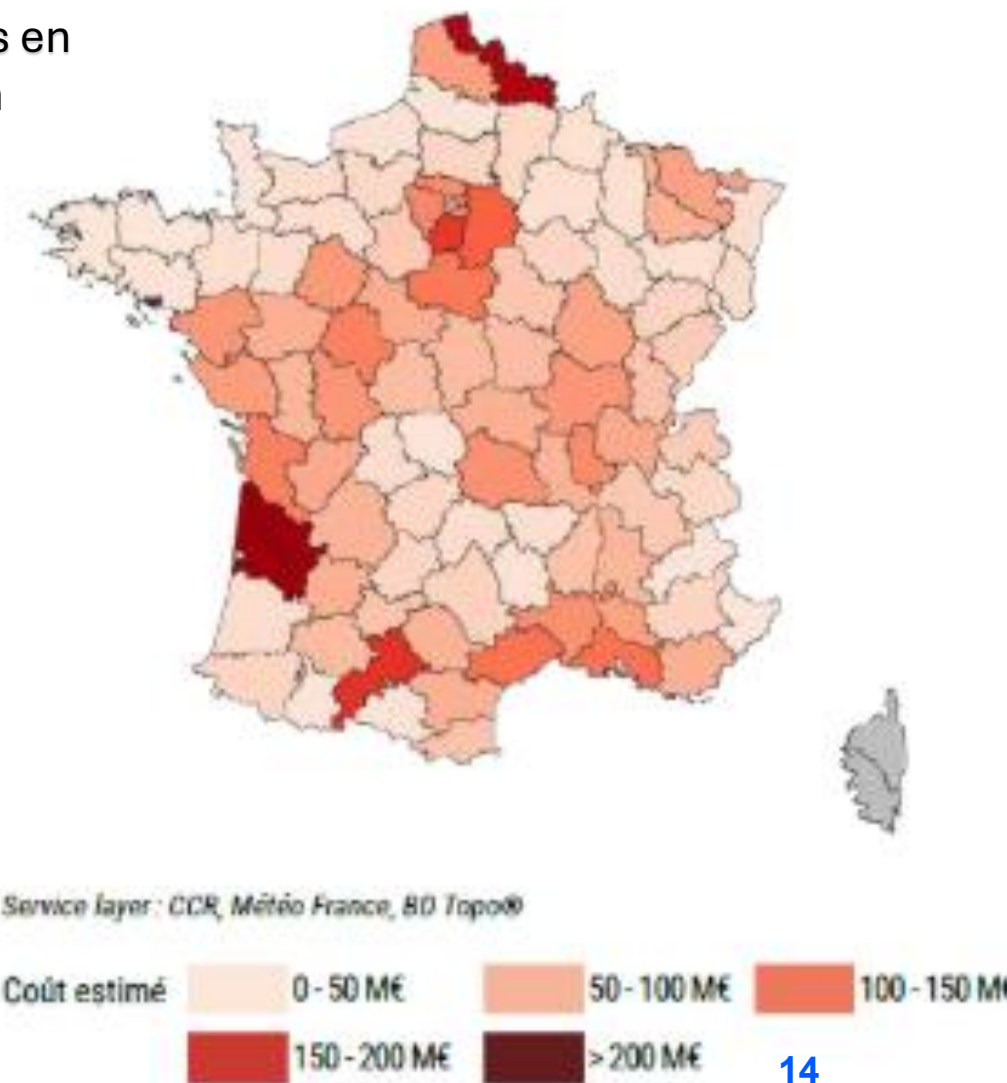
La CCR a réalisé en 2024 un scénario d'estimation des pertes assurées en prenant en compte les nouveaux critères au titre du régime Cat Nat, en **conditions extrêmes**, pour un phénomène **affectant tout le territoire métropolitain**.

Modélisation probabiliste réalisée à partir de données **SWI** avec l'utilisation d'un **générateur stochastique** pour obtenir des données réalistes de sécheresse sur chaque maille SAFRAN.

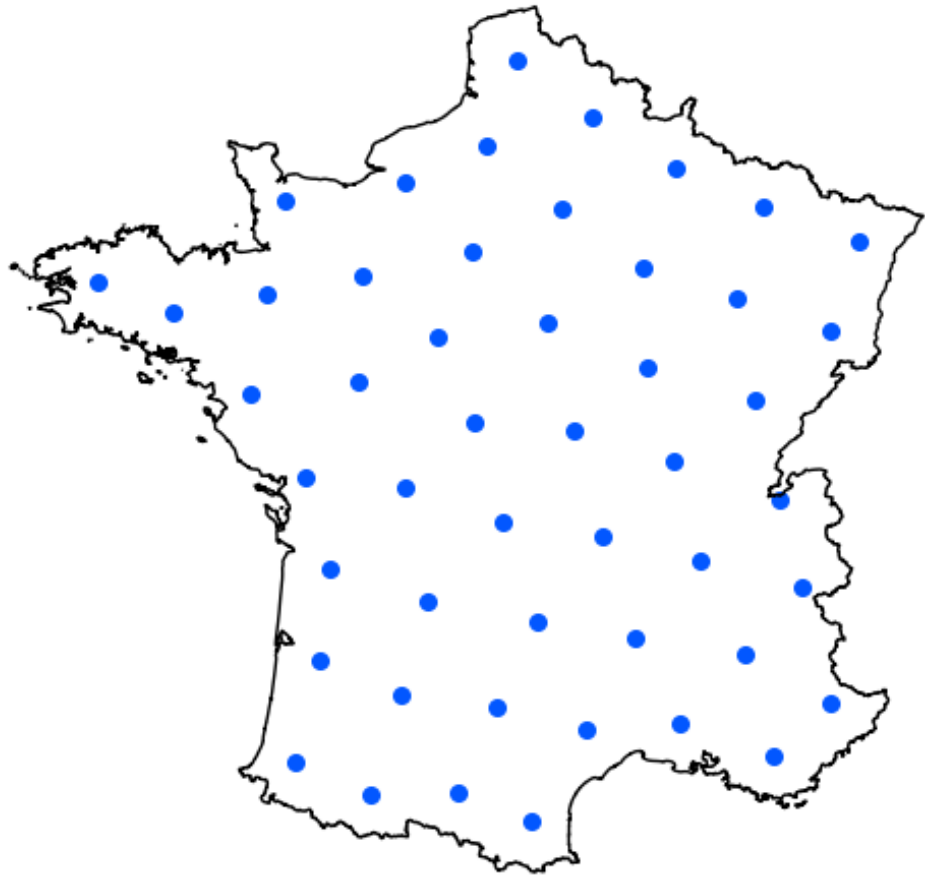
Résultats de la simulation :

- Nombre de communes **éligibles** Cat Nat : **33 170**
- Nombre de communes **reconnues** (estimées) : **12 902**
- Montant estimé des **dommages** assurés : entre **5,5 et 6 Mds €**

Les départements les plus touchés : Le Nord, l'Essonne, la Gironde et la Haute-Garonne.



Modélisation du SWI à partir des données DRIAS et d'un générateur de scénarios



Idée de base adaptée de : A spatio-temporal weather generator for the temperature over France (Cognot et al. 2025)

Position s à la date t

$$SWI(s, t) = S_m(s, t) + \sqrt{S_{\sigma^2}(m, t)} Z(s, t)$$

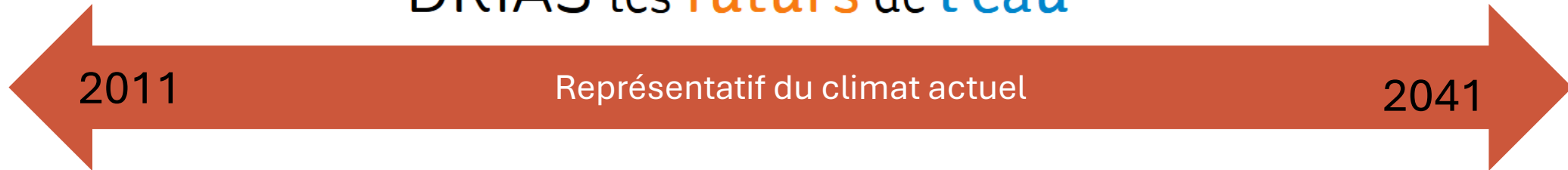
$Z(s, t)$ est un champ aléatoire gaussien (Cressie et Wikle, 2015) avec une moyenne nulle, stationnaire et isotropique.

$Z(s, t)$ est décrit par la matrice de covariance



Modélisation du SWI à partir des données DRIAS et d'un générateur de scénarios

DRIAS les **futurs** de l'eau

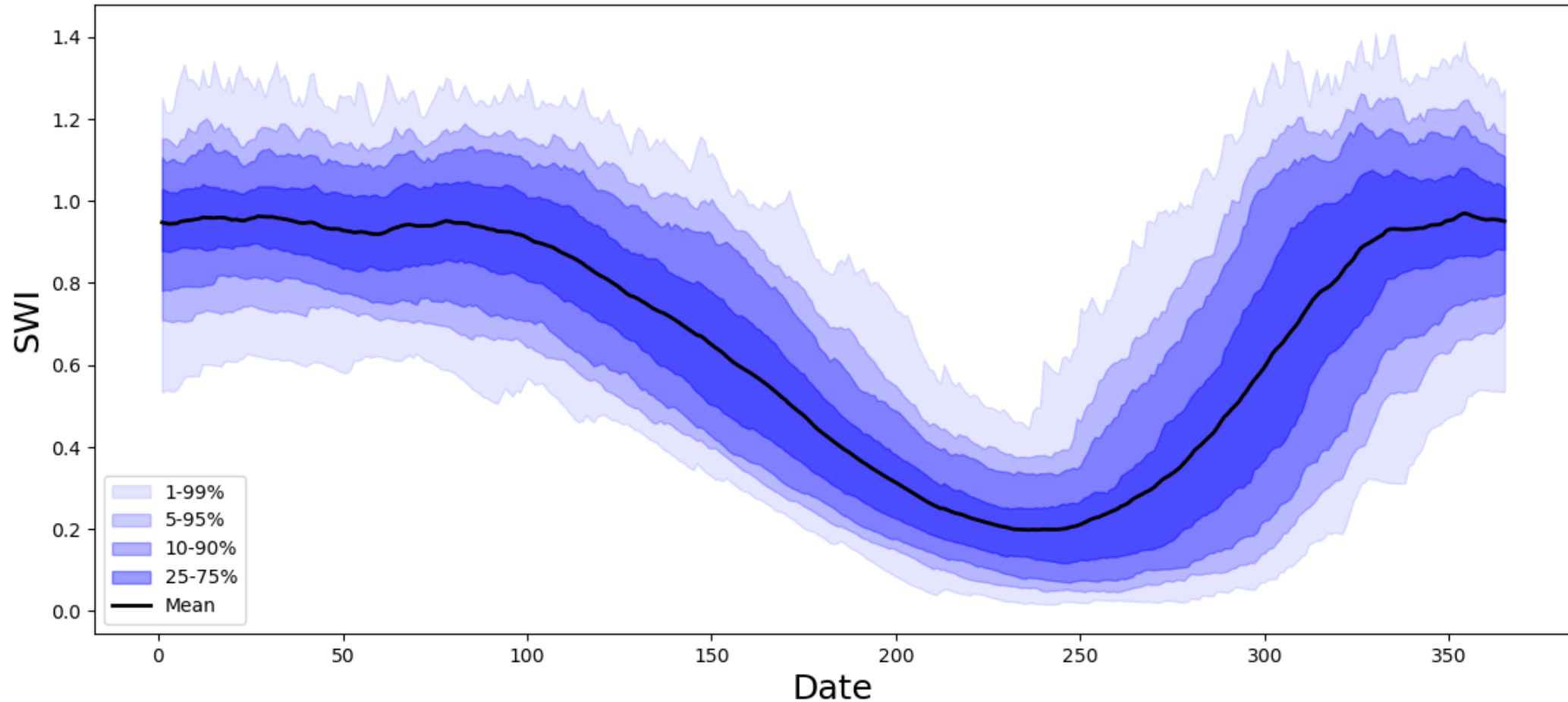


30 années x 17 modélisations = 510 années

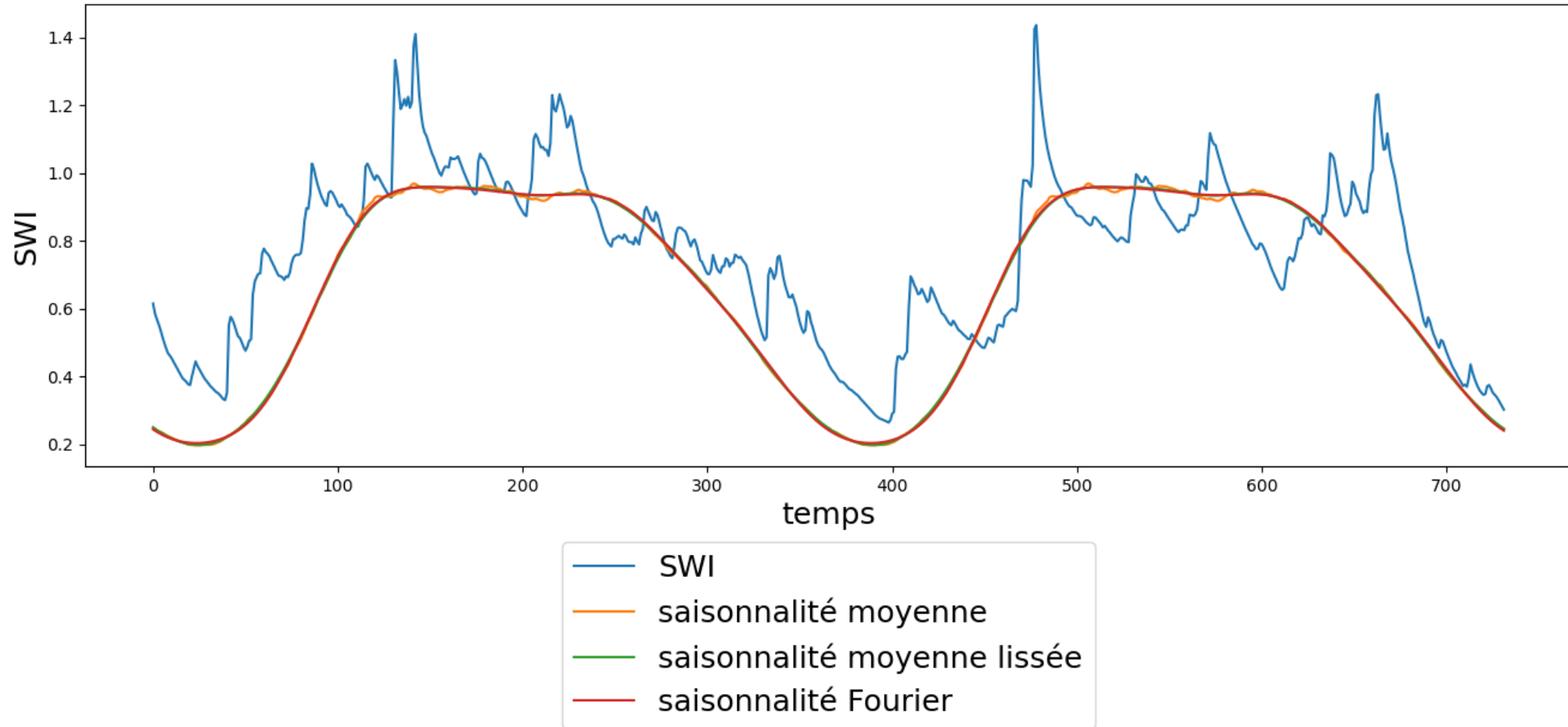
510 années x 365 jours x 50 stations = 9 307 500 de points de données

Modélisation du SWI à partir des données DRIAS et d'un générateur de scénarios

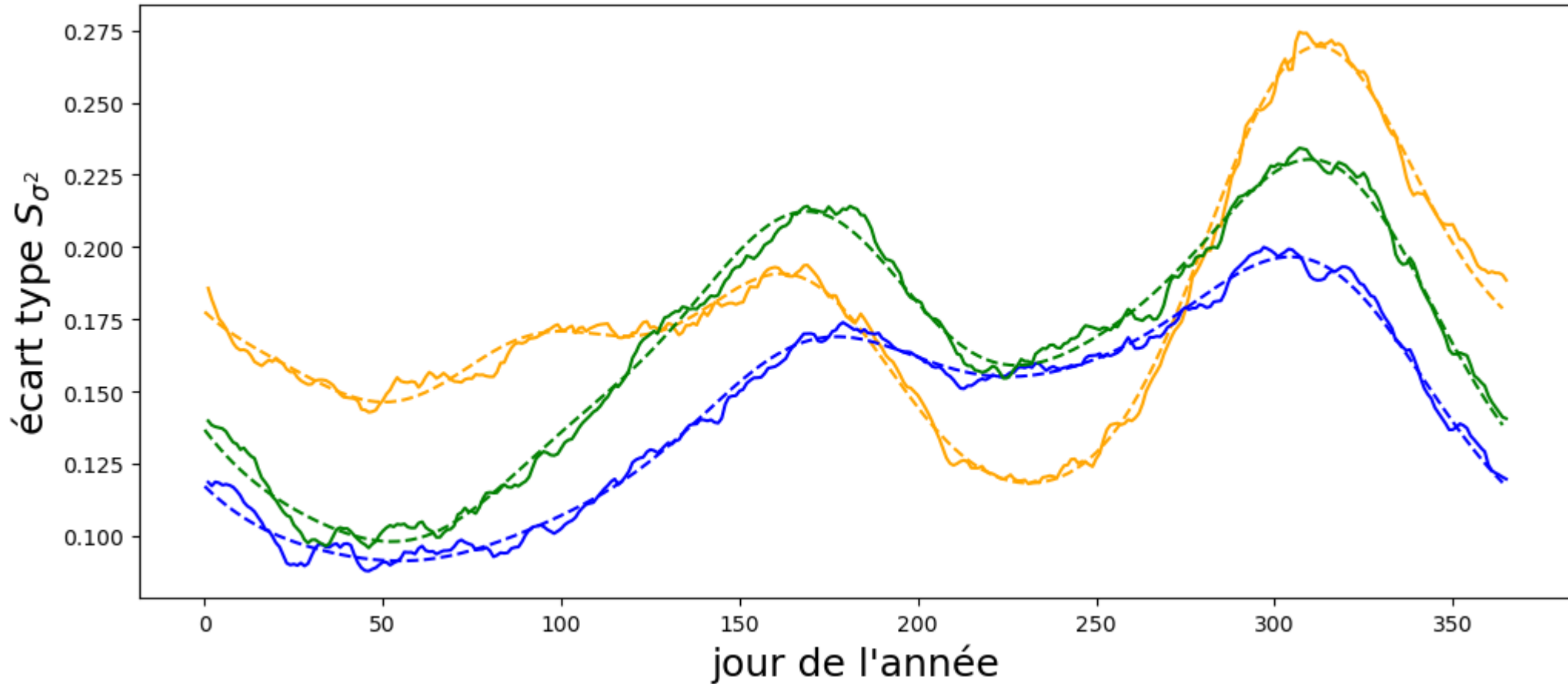
SWI Fan Plot (Quantiles en fonction du jour de l'année)



Modélisation du SWI à partir des données DRIAS et d'un générateur de scénarios



Modélisation du SWI à partir des données DRIAS et d'un générateur de scénarios



Modélisation du SWI à partir des données DRIAS et d'un générateur de scénarios

Le modèle de covariance de Gneiting-Matern (Gneiting (2002, Eq. 16))

$$C(h, u) = \text{Cov}(Z(s + h, t + u), Z(s, t)),$$

$$h \in \mathbb{R}^+, u \in \mathbb{R}^+,$$

$$C_{GM}(h, u) = \frac{\sigma^2(1 - \eta^2)}{\left(\left(\frac{u}{a}\right)^{2\alpha} + 1\right)^\tau} \mathcal{M}\left(\frac{h}{\sqrt{\left(\left(\frac{u}{a}\right)^{2\alpha} + 1\right)^b}}; r; v\right) + \sigma^2 \eta^2 1_{h=0, u=0}$$
$$a > 0, b \in [0, 1], \alpha \in [0, 1]$$

Contrairement aux modèles séparables (covariance = produit d'une structure spatiale et d'une structure temporelle), le modèle de Gneiting permet une interaction flexible entre la distance spatiale et temporelle.

Modélisation du SWI à partir des données DRIAS et d'un générateur de scénarios

| Paramètre | Rôle | Interprétation |
|------------|------------------------------------|---|
| σ^2 | Variance totale | Échelle globale de la variabilité du champ |
| η^2 | Nugget fractionnel | Proportion de variance non corrélée (bruit microscopique ou erreur de mesure) |
| a | Échelle temporelle | Contrôle à quelle vitesse la corrélation diminue avec le temps |
| α | Lissage temporel | Détermine la forme de la décroissance temporelle : $0 < \alpha \leq 1$ |
| τ | Décroissance spatiale via le temps | Influence la vitesse à laquelle la corrélation spatiale diminue quand u augmente |
| b | Couplage espace-temps | Ajuste comment la distance spatiale effective est dilatée selon la distance temporelle |
| r | Portée spatiale du Matérn | Distance spatiale à laquelle la corrélation diminue fortement pour $u = 0$ |
| ν | Lissage du Matérn | Contrôle la régularité/lissité du champ spatial (plus ν grand \rightarrow champ plus lisse) |

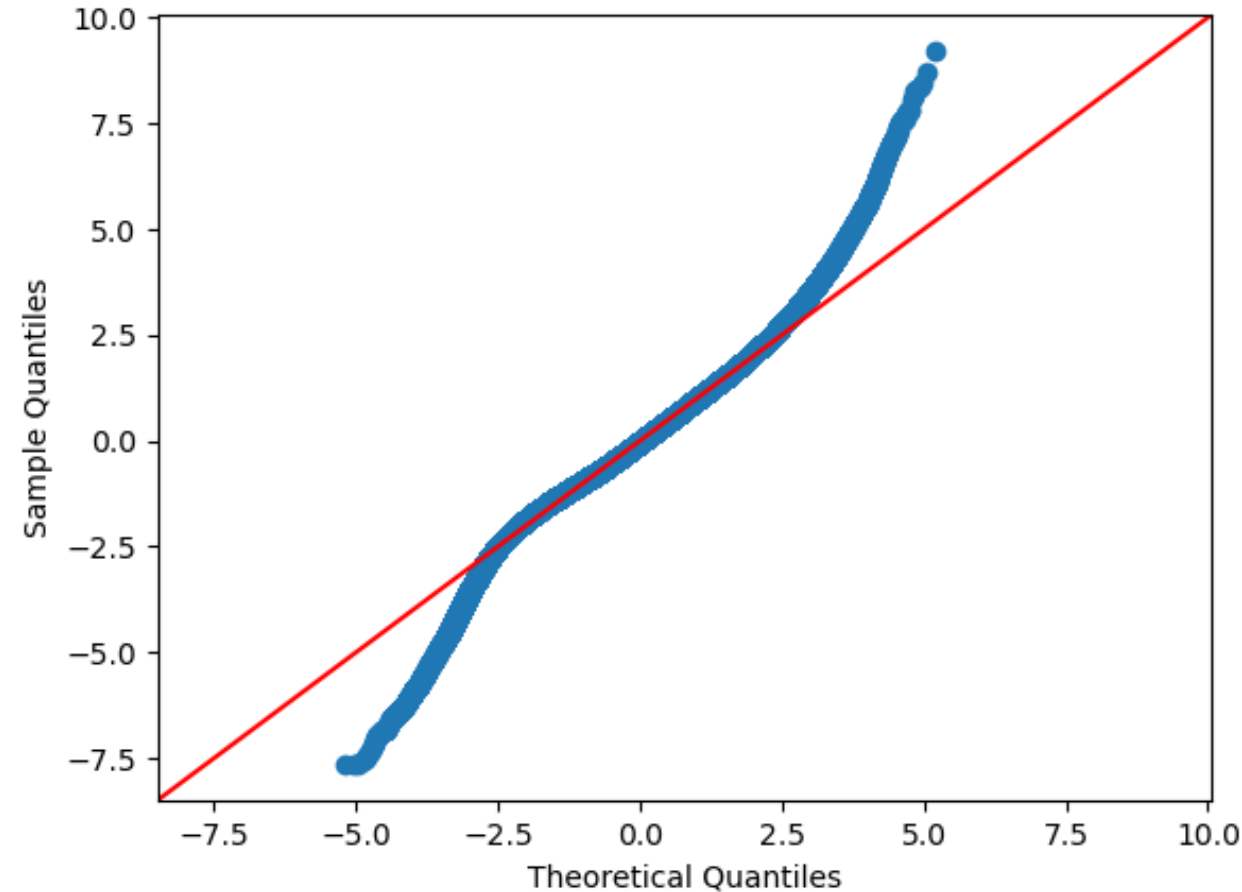
Modélisation du SWI à partir des données DRIAS et d'un générateur de scénarios

Limites du modèle :

- Un champ gaussien n'est pas la meilleure représentation.
- Modèle très gourmand en calcul : pour l'estimation et pour la génération de scénarios

Perspectives :

- Conditionner le champ de SWI par les champs de température et de précipitations. (Pour les précipitations (Gobet et al, 2025)).
- Utiliser d'autres indices : *A new approach for drought index adjustment to clay-shrinkage-induced subsidence over France: advantages of the interactive leaf area index* (Barthelemy et al. 2024)



Passage au SWI Uniforme

Définition : Indice d'humidité des sols superficiels (SWI) issu du **modèle SIM**, avec **caractéristiques** géologiques et végétales **uniformes** sur la France.

Utilisation de l'Open Data :

- SWI par maille SAFRAN (Modèle SIM)
- Exposition BRGM
- CORINE Land Cover
- Intégration des données topologiques de sol de la BDGSF
- SWI Uniforme mensuels par maille SAFRAN



Feature engineering :

- Variables lags (cible et SWI physique)

Jeu de données final :

- Une ligne par maille par mois
- Jeu d'entraînement de 1990 à 2018
- Jeu de test de 2019 à 2024

RSME : 0,001 pour des y dans [-0,2, 0,2]

Du risque à la reconnaissance Cat Nat

Depuis la circulaire du 29 avril 2024, les **critères d'éligibilité ont été modifiés** à partir de la survenance 2024. Pour chaque commune 2 critères sont identifiés :

- 1. Critère géotechnique** : au moins 3% de la commune exposée au risque RGA (étude BRGM),
- 2. Critère météorologique** basé sur la **période de retour** du minimum annuel du **SWI (Soil Wetness Index) Uniforme**. 3 seuils sont établis et cumulatifs :
 - une période de retour \geq **10 ans** pour l'année en cours ;
 - une période de retour \geq **5 ans** pour l'année en cours et pour au moins **2 des 4 années antérieures** ;
 - une période de retour \geq **5 ans** pour l'année en cours et la **commune** est **limitrophe** à une commune satisfaisant les critères **Cat Nat**.

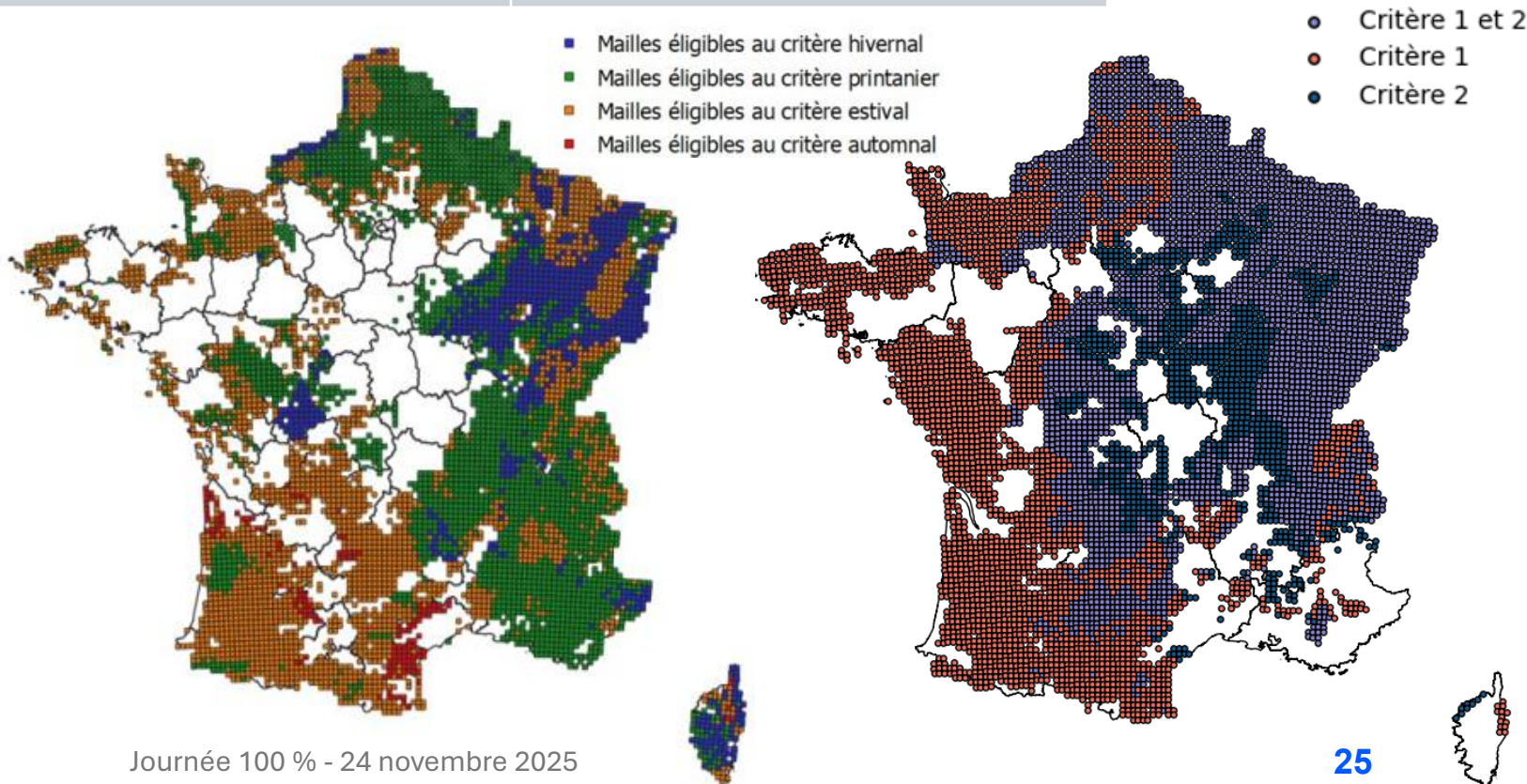
Chaque commune de France est **couverte** par **une** ou **plusieurs mailles** géographiques en fonction de sa superficie. Il **suffit** que le critère météorologique soit rempli pour **une maille** couvrant une partie de la commune pour qu'il soit considéré comme rempli pour toute la commune pour la période concernée.

Du risque à la reconnaissance Cat Nat

| Principaux changements | Avant 2024 | Depuis 2024 |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Indicateur calculé | Moyenne mobile 3 mois des SWI | Moyenne mensuelle des SWI |
| Période de retour | 25 ans | 10 ans |
| Indicateur retenu | Minimum par saison | Minimum annuel |

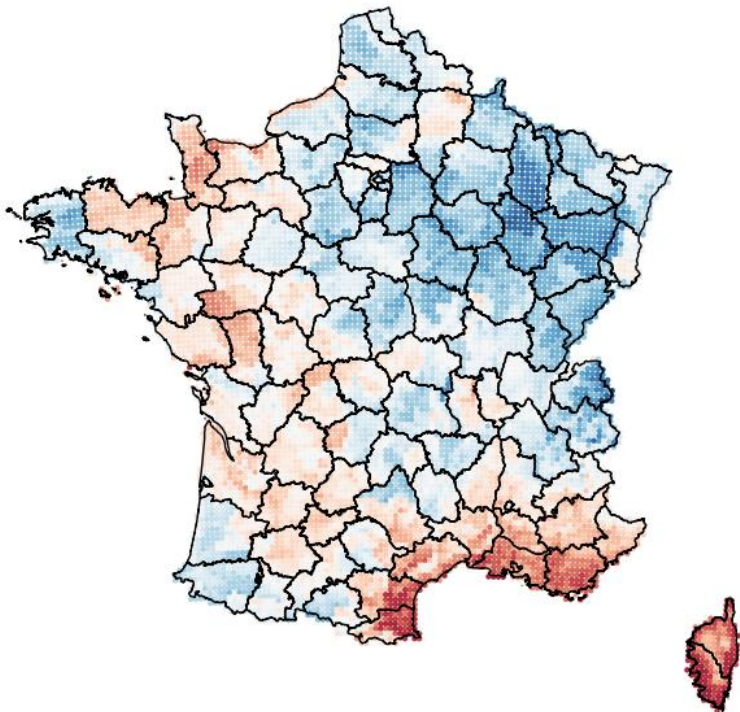
Impacts du changement des critères d'éligibilité – Survenance 2022 :

- **Abaissment de la période de retour** → plus de mailles éligibles.
- **Prise en compte du minimum annuel** → limite la reconnaissance dans le Sud-Est, où le printemps était très sec mais l'été moins extrême.

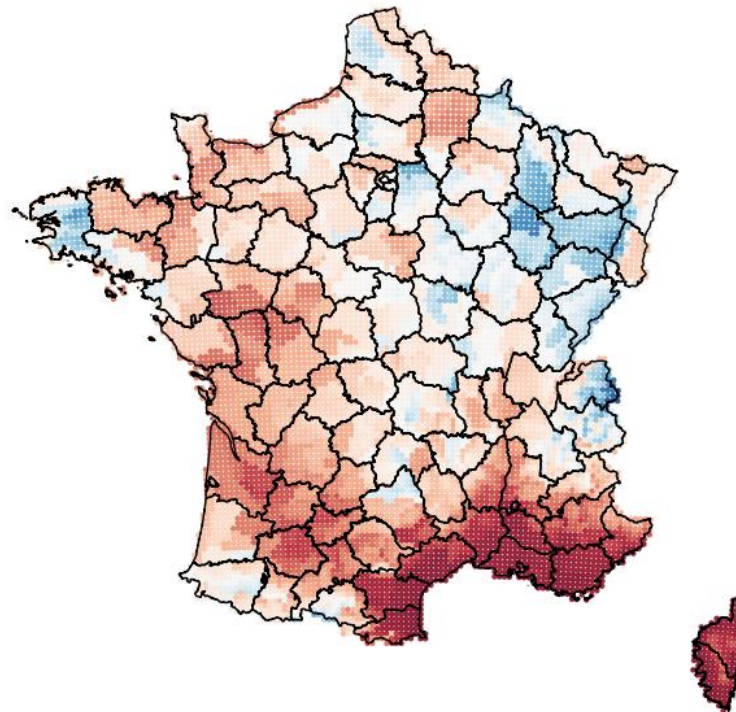


Passage au SWI Uniforme

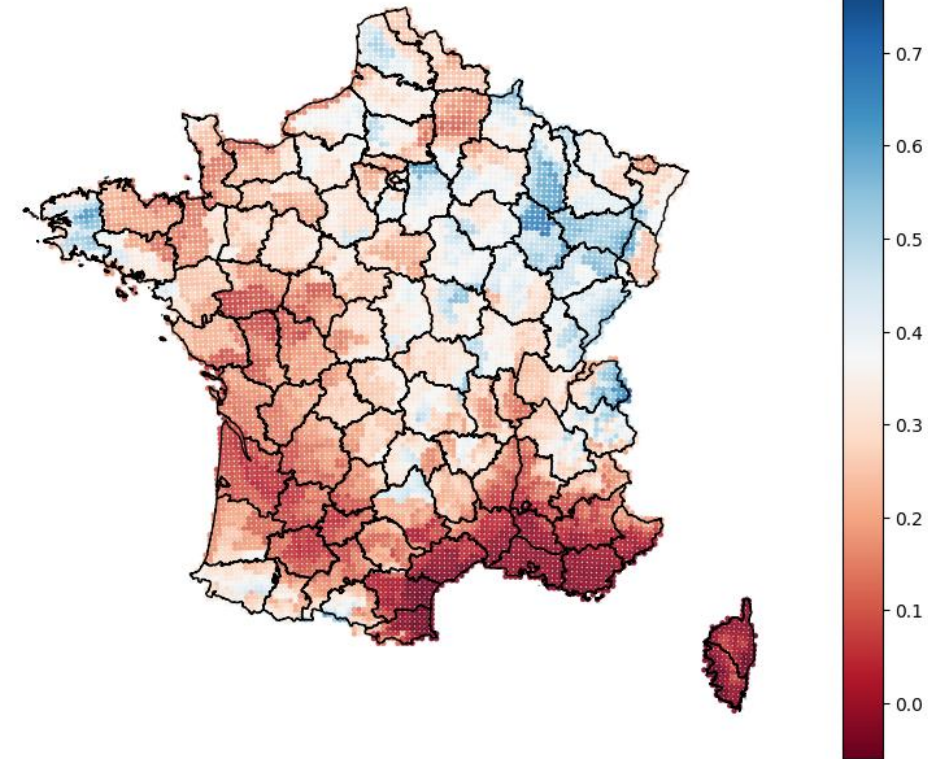
Minimum du SWI Physique 2024



Minimum du SWI Uniforme 2024

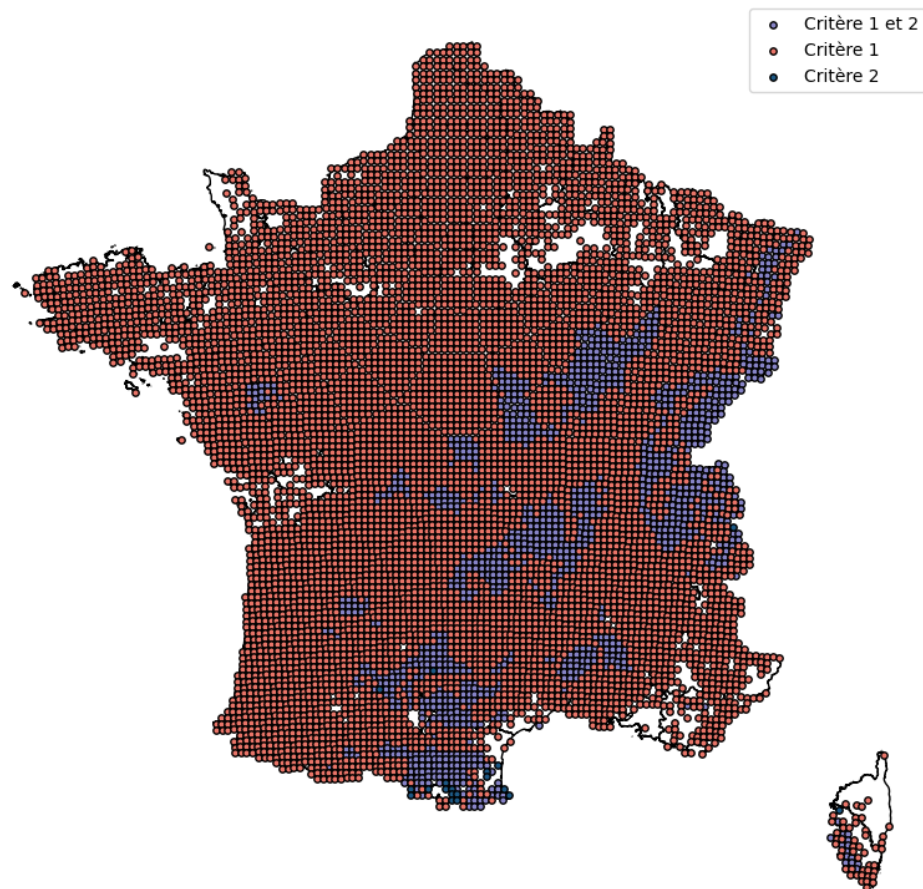


Minimum du SWI Uniforme prédit 2024



Mesure du quantile du risque en 2026

Mailles éligibles dans un scénario bicentenaire du risque



Une sécheresse globale sur tout le territoire

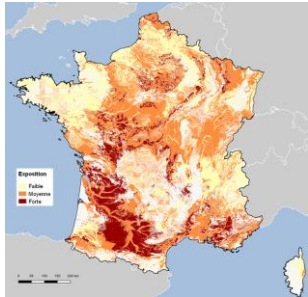
- Plus de **8000 mailles éligibles** soit près de **90% du territoire**
- Dans un **climat actuel**, la sécheresse de 2022 a une période de retour de **20 ans**.
- Dans un **climat** à horizon **2050**, une sécheresse comme 2022 a une période de retour de **4 ans**.

Vue d'ensemble des travaux

Contexte et enjeux

Score d'aléa : 1,2,3

Score Vulnérabilité : ?



+



👉 3.5 Mds€ de dégâts en 2022

👉 Une expertise sur l'aléa mais aucune sur la **vulnérabilité** des bâtis...



Résultats



Solution : L'IA au service de la data

10K rapports de sinistre
(2000-2021)



100 champs

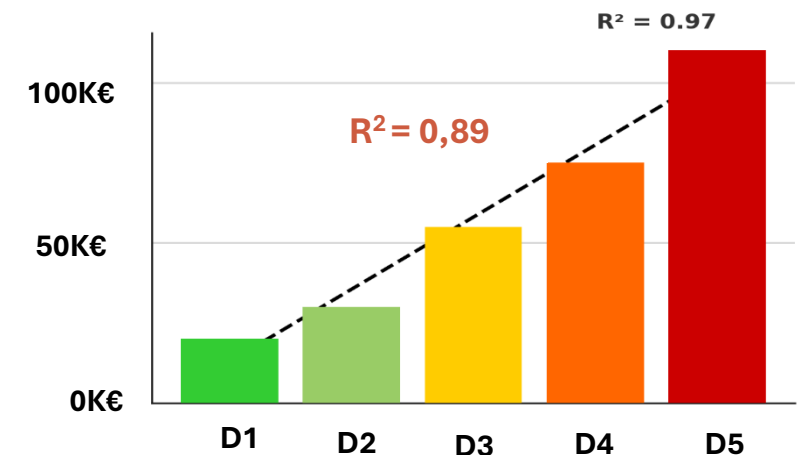


- 👉 Caractéristique du bâti
- 👉 Environnement
- 👉 Dommages

10K lignes

Échelle de dommage basée sur..

- Largeur de la fissure
- Cinétique de la fissure
- Forme de la fissure
- Position de la fissure



Modélisation

TANH paramétrique

La prise en compte de la vulnérabilité



Question principale :

Vulnérabilité du bâti à l'aléa RGA : comment la caractériser ?

- Q1. Exploiter les **rapports d'expertise**.
- Q2. Créer une **échelle de sévérité** des dommages à partir des **descriptions textuelles**.
- Q3. Identifier et **modéliser les facteurs de vulnérabilité** du bâti.
- Q4. Quantification des mesures préventives

Angle de recherche

Prime de risque = Fréquence × Coût



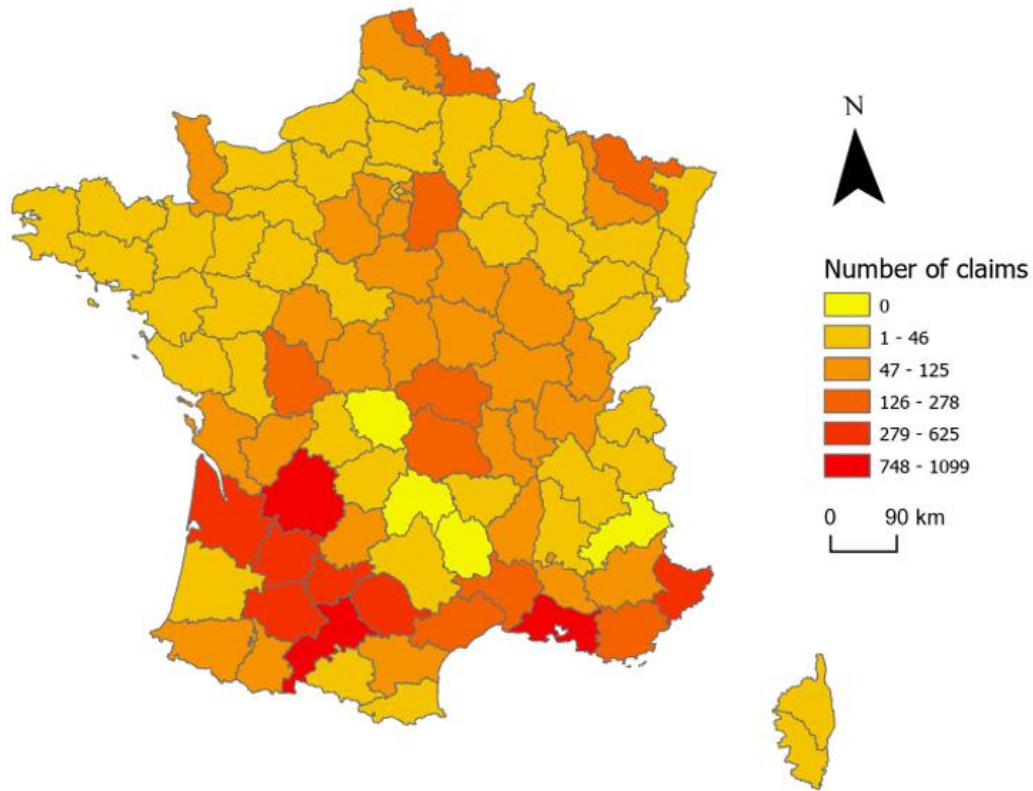
Le coût ne reflète pas toujours les dommages réels

Prime de risque = Fréquence × [dommage physique]

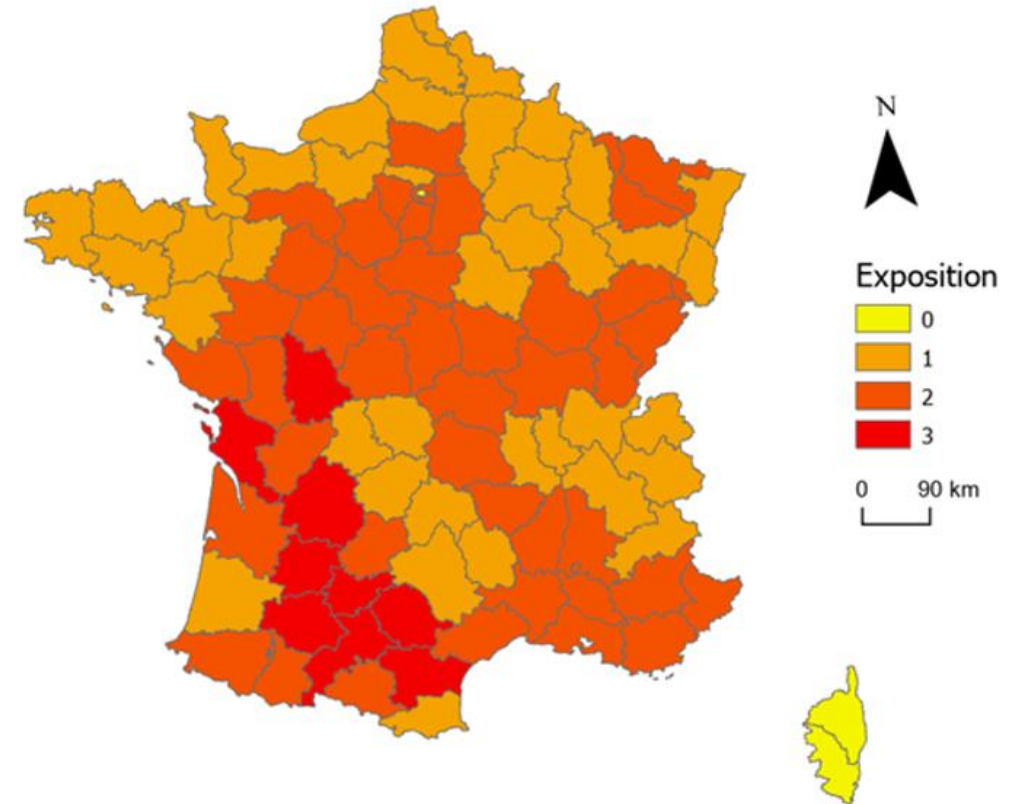
Hypothèse :

→ La partie « **Coût** » reflète le **dommage physique** subi aux bâtiments

Les Données disponibles



**Répartition départementale des sinistres RGA
extraits des rapports d'expertise (2000–2021)**



**Carte départementale d'exposition au retrait-
gonflement des argiles (BRGM, 2019)**

Définition des classes Aléa / Vulnérabilité

Aléa

Objectif : se concentrer sur la vulnérabilité, sans réévaluer l'aléa.

- **EXPO_19 (BRGM) et le zonier interne Generali incluent les sinistres** → forts gradients, mais sont liés au coût
- **Solution :** Caractéristiques du sol* (classification CART) pour reconstruire des classes physiques

✓ **Résultat :** 3 classes physiquement interprétables, monotones et indépendantes des données de coût

Vulnérabilité





| Classe | Typologie simplifiée du bâti | Vulnérabilité |
|--------|---|---------------|
| A | Bâtiments avec des fondations profondes, robustes et renforcées. | Faible |
| B | Bâtiments de faible hauteur sur une fondation profonde unique. | Modérée |
| C | Bâtiments (plain-pied ou R+1) avec des fondations profondes, mais moins homogène. | Élevée |
| D | Maisons de plain-pied avec des fondations multiples et peu profondes. | Très Élevée |

Ajout de l'indice de vulnérabilité

Matrice de probabilité de dommage par classe d'aléa et degré de dommage, par vulnérabilité

| Hazard classes (I) | Vulnerability class (V) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Total | Mean Damage degree | Std Damage degree |
|----------------------|---------------------------|------|------|-----|-----|----|-------|--------------------|-------------------|
| A | A | 125 | 13 | 10 | 3 | 5 | 156 | 1.397436 | 0.931497 |
| B | | 312 | 272 | 90 | 44 | 6 | 724 | 1.839779 | 0.920466 |
| C | | 108 | 135 | 76 | 34 | 5 | 358 | 2.142458 | 0.999629 |
| A | B | 286 | 32 | 44 | 19 | 36 | 417 | 1.769784 | 1.30292 |
| B | | 1007 | 1232 | 490 | 236 | 45 | 3010 | 2.0299 | 0.971916 |
| C | | 425 | 637 | 281 | 188 | 29 | 1560 | 2.204487 | 1.029615 |
| A | C | 86 | 9 | 10 | 5 | 21 | 131 | 1.977099 | 1.525687 |
| B | | 321 | 272 | 153 | 84 | 95 | 925 | 2.308108 | 1.305783 |
| C | | 155 | 157 | 106 | 82 | 48 | 548 | 2.472628 | 1.280532 |
| A | D | 5 | 3 | 6 | 1 | 9 | 24 | 3.25 | 1.561249 |
| B | | 29 | 52 | 33 | 32 | 16 | 162 | 2.716049 | 1.244589 |
| C | | 15 | 34 | 23 | 28 | 12 | 112 | 2.892857 | 1.227346 |
| | | | | | | | 8127 | | |

Choix de la fonction aléa-dommage

-  **Tendance observée** : le dommage moyen augmente régulièrement avec l'intensité de l'aléa.
-  **Objectif** : calibrer des fonctions continues et lissées afin de formaliser cette relation.
-  **Méthode** : pondération inverse des écarts-types pour limiter l'effet des incertitudes.
-  **Souplesse** : test de modèles alternatifs (logistique, spline) pour ajuster la courbe de tendance :

| Modèle | Forme | Avantage principal |
|------------------------------------|--|--|
| 1. Logistique | $f(I) = \frac{a}{1+e^{-\frac{(I-b)}{c}}}$ | Courbe sigmoïde classique, souvent plus lisse que <i>tanh</i> . |
| 2. Exponentielle saturée | $f(I) = a(1 - e^{-bI}) + c$ | Croissance rapide vers un plateau. |
| 3. Puissance | $f(I) = a \cdot I^b + c$ | Adaptée aux croissances non saturées. |
| 4. Polynomiale | $f(I) = aI^2 + bI + c$ | Simple à ajuster, mais sensible aux oscillations hors domaine. |
| 5. Spline lissée | <i>Interpolation souple (pas de formule fermée)</i> | Suit les données avec flexibilité, idéale pour petits jeux de données. |
| 6. Arctangente | $f(I) = a \cdot \arctan\left(\frac{I-b}{c}\right) + d$ | Forme en S plus douce aux extrémités que <i>tanh</i> . |
| 7. Gompertz (triple exponentielle) | $f(I) = a \cdot e^{-b \cdot e^{-cI}}$ | Modèle asymétrique : croissance lente puis saturation rapide. |

Retenue 

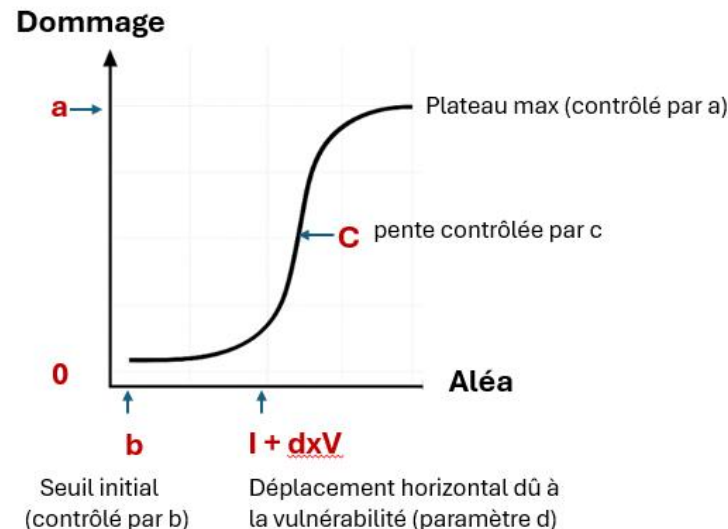
Calibration du modèle tanh

Le modèle tanh relie l'intensité de l'aléa au degré moyen de dommage

$$y(I, V) = a \times \left(1 + \tanh \left(\frac{I + d \times V - b}{c} \right) \right)$$

- Pour chaque classe de vulnérabilité (A, B, C, D), un indice de vulnérabilité $V \in [0, 1]$ est défini.
- Cet indice déplace la courbe horizontalement afin de refléter la sensibilité structurelle.

Objectif : obtenir un modèle unique décrivant la **progression du dommage** en fonction de **l'aléa** et de **la vulnérabilité**



Où :

- ➔ **I** : intensité du phénomène, liée aux trois classes d'aléa.
- ➔ **a, b, c, d** : paramètres globaux communs à toutes les classes de vulnérabilité.
- ➔ **V** : indice de vulnérabilité.

Calibration via *Gridsearch*

Minimisation $\Sigma(\mu D_{\text{mod}} - \mu D_{\text{obs}})^2$

- ➔ Paramètres globaux retenus :
 - ➔ **a = 3, b = 8, c = 11, d = 7**
- ➔ Indices de vulnérabilité associés aux classes **A-D** :
 - ➔ **V = [0.19, 0.31, 0.46, 0.83]**

Facteurs aggravants

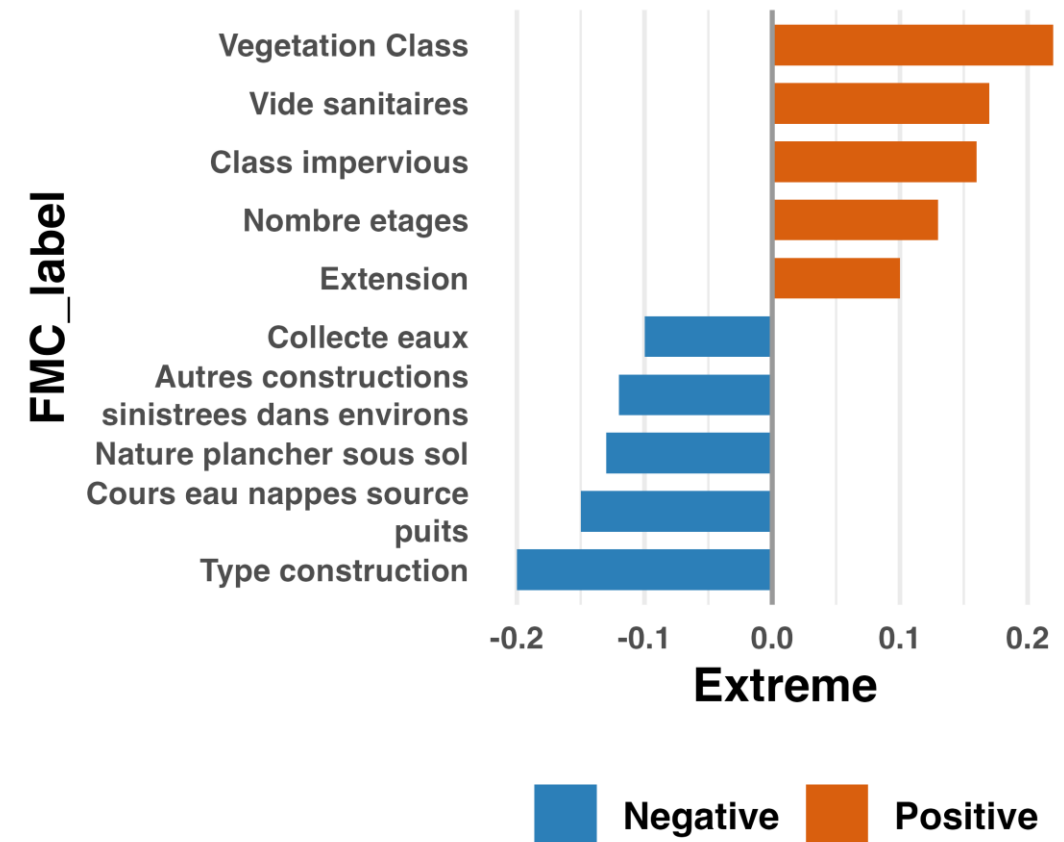
Pour aller plus loin dans la caractérisation de la vulnérabilité, on souhaite explorer de potentiels caractéristiques aggravantes dans les dommages. On teste par *gridsearch* indépendamment. On en tire un facteur d'aggravation sur le degré moyen de dommages.

Facteurs principaux :

- *Vegetation_Class* : nombre arbre et ratio distance/hauteur
- *Vide sanitaire oui / non*
- *Class imperviousness* : perméable, semiperméable, ou impermeable
- *Cours_eau_nappes_source_puits à proximité* : oui / non
- *Type construction (mitoyenneté : oui / non)*

Facteurs secondaires :

- *Collecte_eaux* : oui / non
- *Autres_constructions_sinistrees_dans_environs* : oui / non
- *Bâtiment avec sous-sol (présent ou absent)*
- *Nombre étages* : 0, 1, 2, 3, >3
- *Bâtiment avec extensions (garage, véranda) : oui / non*



Conclusion : gouvernance adaptée et nouvelles pratiques actuarielles

Risques, Souscription, Prévention : pour une vision intégrée



Un enjeu sociétal devenu prioritaire

- Les pouvoirs publics renforcent leur engagement face à la montée des risques
- Importance d'intégrer ces dynamiques dans la gouvernance assurantielle

La prévention comme levier de stabilisation

- Les mesures de prévention réduisent la dispersion des scénarios RGA
- Meilleure articulation entre souscription, gestion des risques et pilotage stratégique

Management actions & résilience du portefeuille

- Initiatives opérationnelles : initiative sécheresse, gestion des expositions, adaptation territoriale
- Mobilisation des dispositifs existants (ex. fonds Barnier)