

Modélisation de séries temporelles et mesure de l'incertitude liée à l'impact du risque climatique sur la mortalité

Ael TREIGNER

1 • Introduction

- Les nouveaux risques challengent les actuaires dans leurs **modélisations aux horizons lointains**.
- Les **superviseurs** émettent de **nouvelles demandes**, qui pourraient devenir régulières et obligatoires.
- L'objectif des **stress tests climatiques** est de quantifier les impacts liés au changement climatique.



Proposer une réponse méthodologique à l'évaluation du risque climatique sur la mortalité à long terme

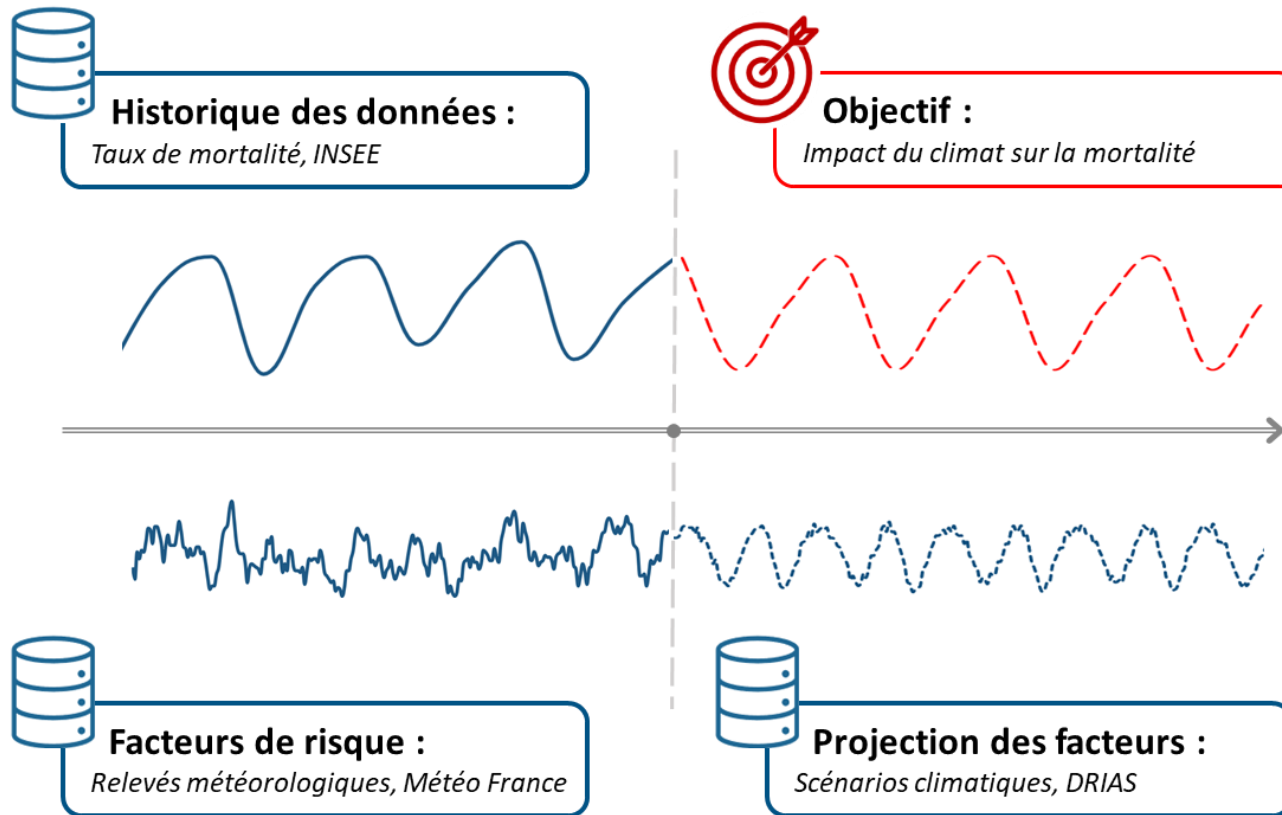
Sommaire

- Données
- Etudes préalables
- Modélisation
- Projections
- Mesures de l'incertitude
- Conclusion

Sommaire

- **Données**
- **Etudes préalables**
- **Modélisation**
- **Projections**
- **Mesures de l'incertitude**
- **Conclusion**

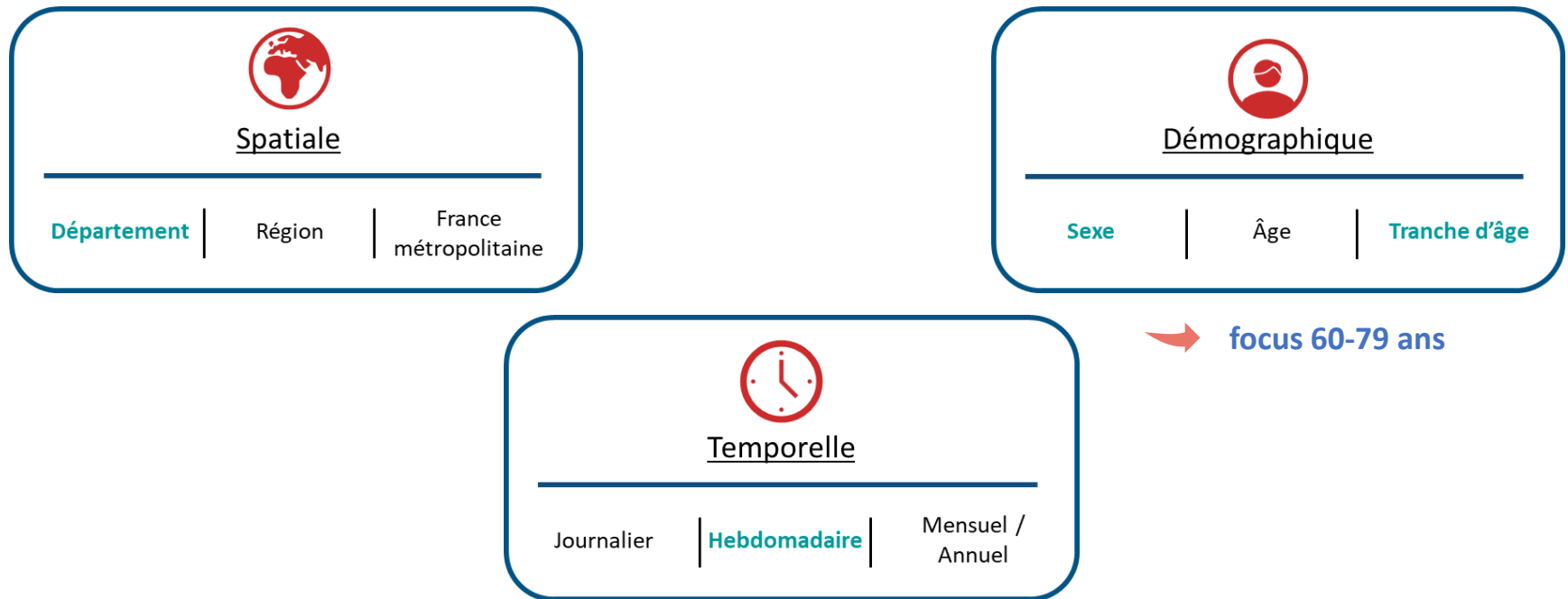
2 • Données



➡ Etude réalisée uniquement à partir d'*open-data*

2 • Données - Maille

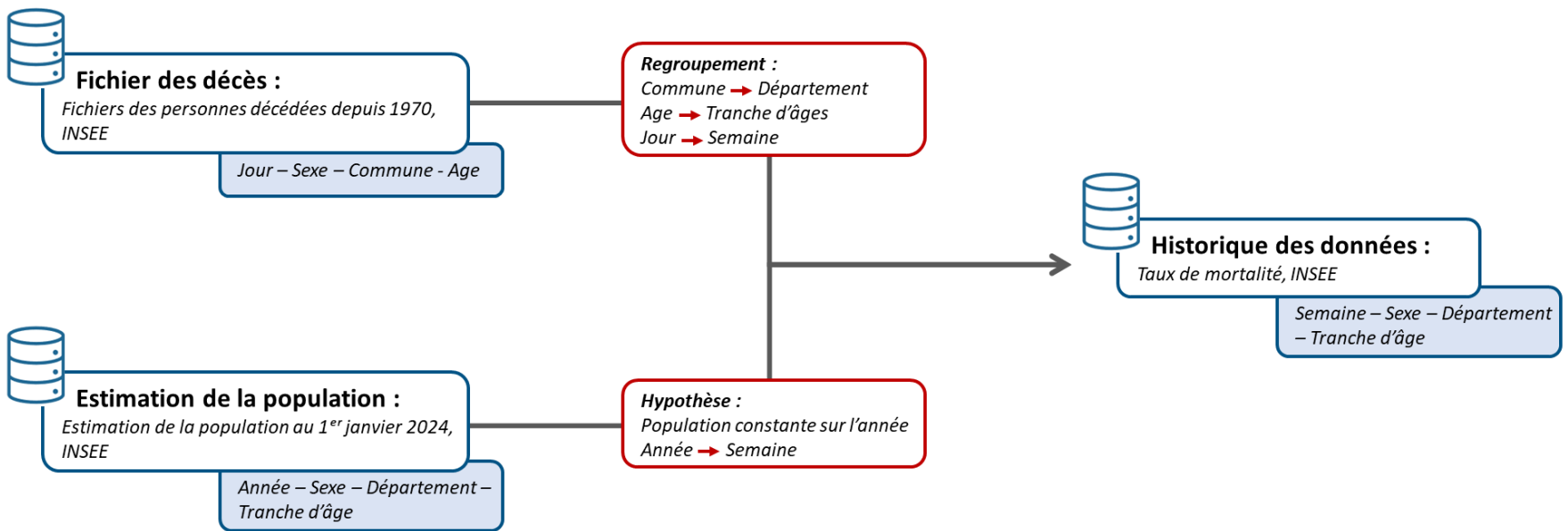
- Les différentes sources de données doivent prendre en compte plusieurs **contraintes** définissant la **maille**.



➡ Compromis entre **biais** des données climatiques et **variance** des taux de mortalité

2 • Données - INSEE

- Calcul des taux de mortalité avec 2 bases de données open-source :



➔ Création d'une base de **taux de mortalité historiques** à la maille **semaine – sexe – département – tranches d'âges**

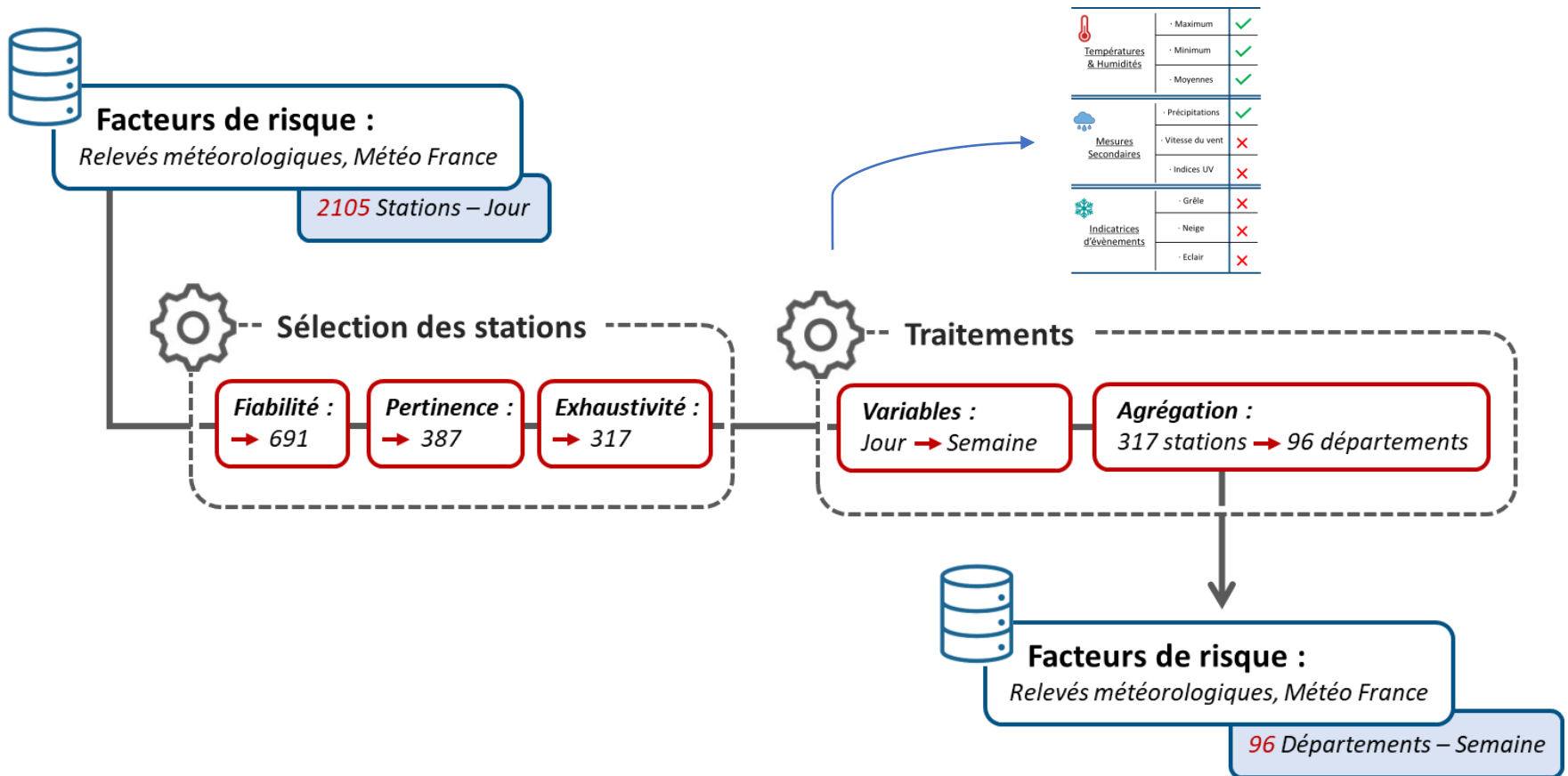
2 • Données – Météo France : présentation

- Des **nouveaux relevés** de stations météorologiques sont disponibles en open-source depuis le 1er janvier 2024.
- Au total, **2105 stations** mesurent près de **70 variables climatiques**.

 <u>Températures & Humidités</u>	· Maximum
	· Minimum
	· Moyennes
 <u>Mesures Secondaires</u>	· Précipitations
	· Vitesse du vent
	· Indices UV
 <u>Indicatrices d'évènements</u>	· Grêle
	· Neige
	· Eclair

➔ Utilisation de **nouvelles données météorologiques** open-source

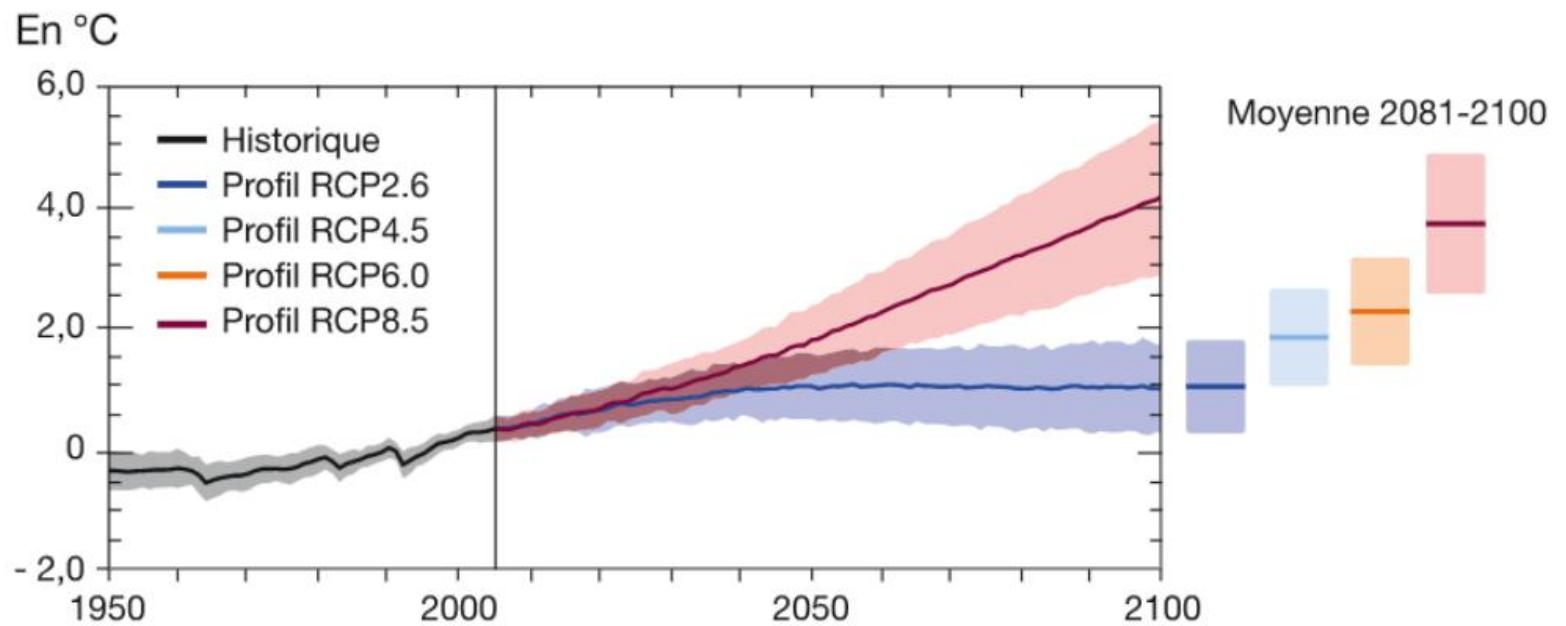
2 • Données – Météo France : traitements



➡ Création d'une base de **facteurs de risque historiques** à la maille **semaine – département**

2 • Données – DRIAS : scénarios RCP

- Des **projections** de variables météorologiques sont mises à disposition sur la plateforme DRIAS.
- Elles sont créées avec des **scénarios RCP** et des **modèles climatiques**.

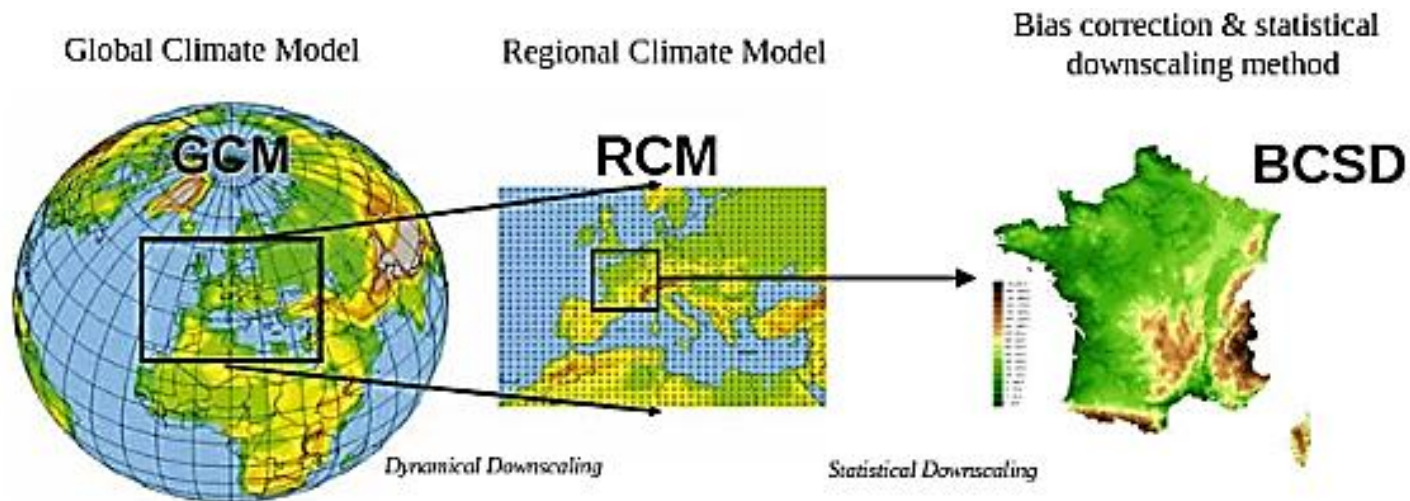


Trajectoires des scénarios RCP sélectionnés par le GIEC

GIEC, 5^{ème} rapport, 2014

2 • Données – DRIAS : modèles climatiques

- Les **modèles climatiques** se basent sur les scénarios RCP pour simuler des **évolutions plausibles de paramètres** atmosphériques.

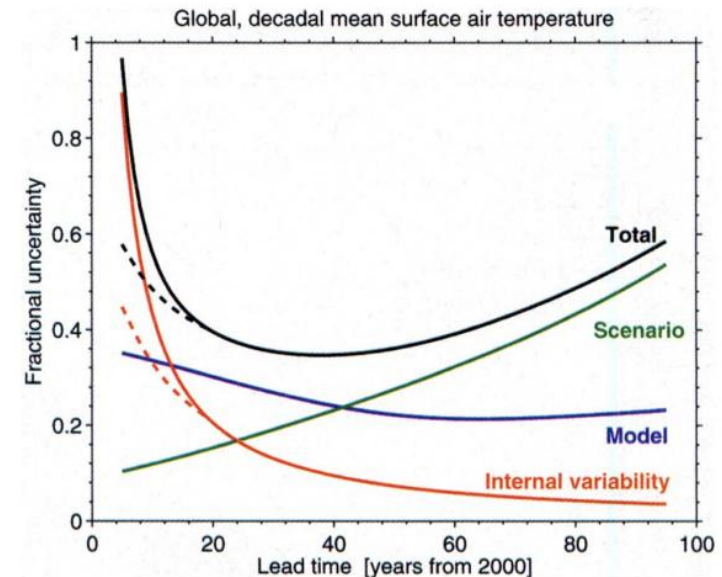


Étapes de construction d'un modèle climatique

GIEC, 5^{ème} rapport, 2014

2 • Données – DRIAS : incertitude

- Une **incertitude** importante est associée à ces simulations, due aux différentes étapes de construction :
 - L'incertitude des scénarios RCP (**Scenario**)
 - Les erreurs des modèles climatiques (**Model**)
 - La variabilité naturelle des paramètres climatiques (**Internal variability**)
- Cette incertitude peut être estimée en utilisant plusieurs simulations.



Estimation de l'incertitude des simulations

E. Hawkins & R. Sutton, "The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions", 2009



Sélection de deux simulations : 1 créée avec **RCP2.6**, 1 créée avec **RCP8.5**

2 • Données – DRIAS : incertitude

- Des **extractions** sont réalisées pour chaque simulation, à partir de 96 points de coordonnées, soit 1 par département.
- Les variables créées lors du traitement des données Météo-France sont **recrées à l'identique**.

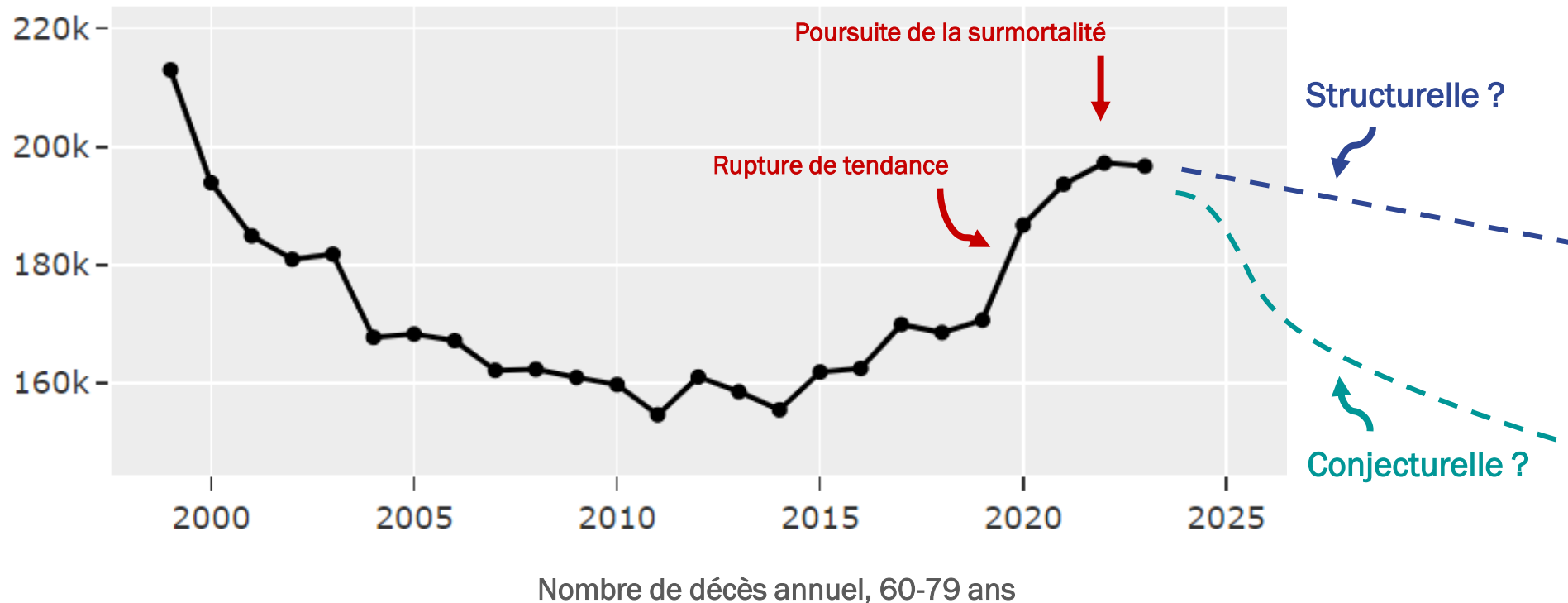
		Traitement Météo-Fr	Accès DRIAS
 <u>Températures & Humidités</u>	· Maximum	✓	✓
	· Minimum	✓	✓
	· Moyennes	✓	✓
 <u>Mesures Secondaires</u>	· Précipitations	✓	✓
	· Vitesse du vent	✗	✓
	· Indices UV	✗	✓
 <u>Indicatrices d'évènements</u>	· Grêle	✗	✗
	· Neige	✗	✓
	· Eclair	✗	✗

→ Création de bases de **projections des facteurs de risque** à la maille **semaine – département**

Sommaire

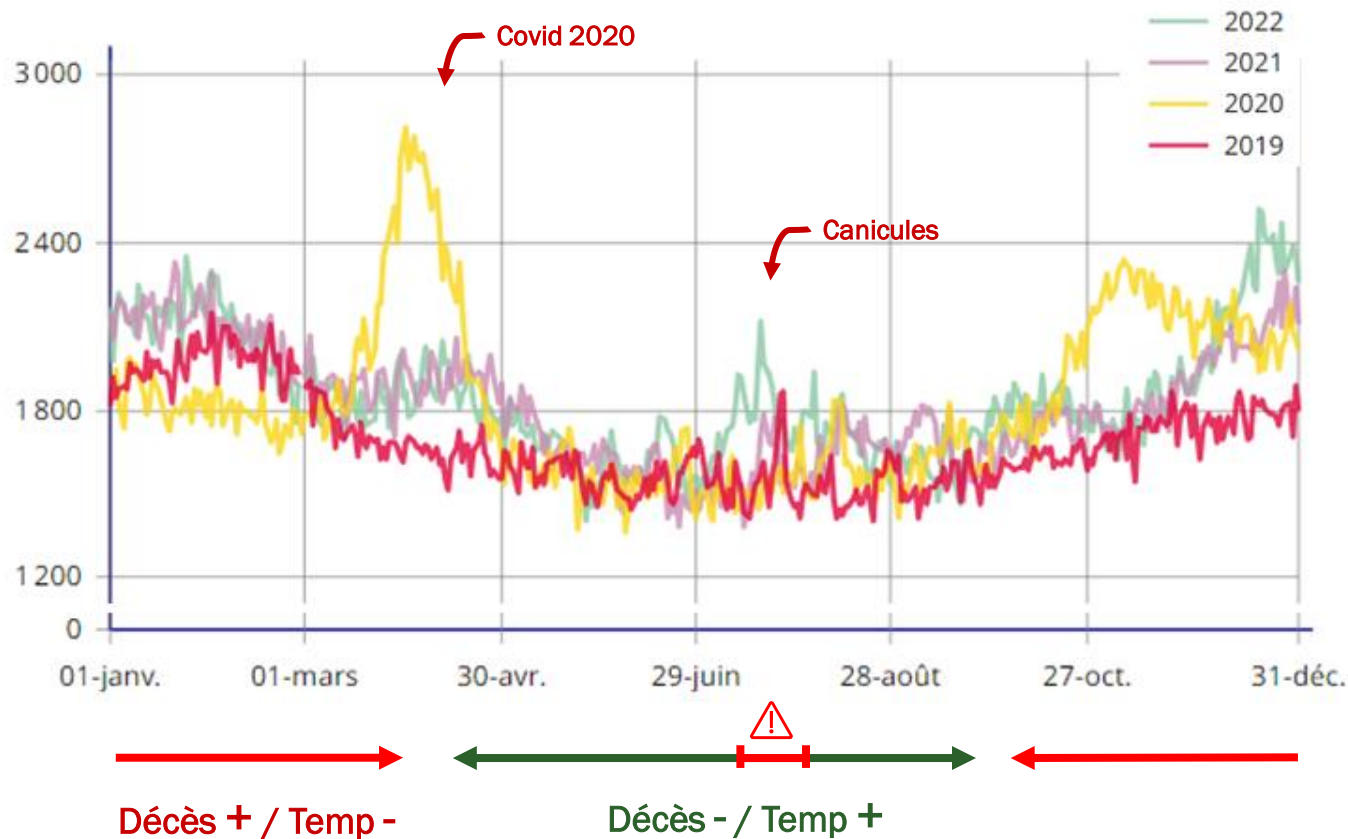
- Données
- **Etudes préalables**
- Modélisation
- Projections
- Mesures de l'incertitude
- Conclusion

3 • Etudes Préalables – Rupture de tendance



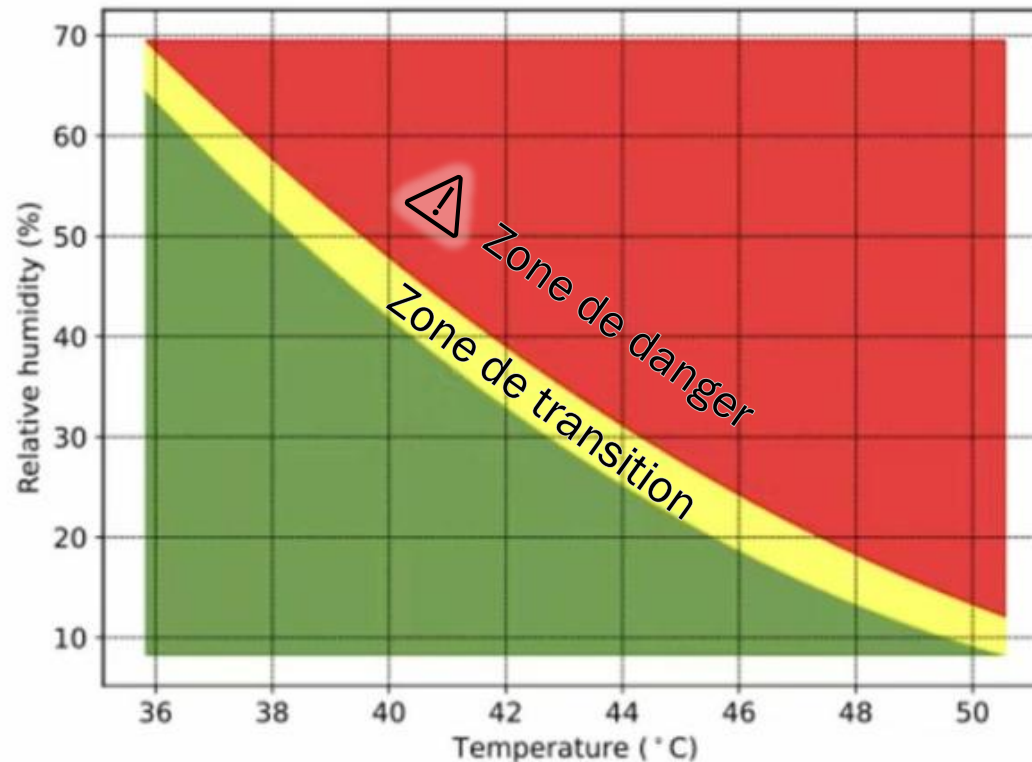
➡ Rupture plutôt **conjecturelle** attendue lors des projections

3 • Etudes Préalables – Saisonnalité



➡ Les températures et la mortalité ont une **corrélation négative forte**

3 • Etudes Préalables – Température Humide



W. Larry Kenney, CC BY-ND

Limite critique du couple température-humidité



L'introduction de la **température humide** aidera les modèles à identifier les canicules

Sommaire

- Données
- Etudes préalables
- **Modélisation**
- Projections
- Mesures de l'incertitude
- Conclusion

4 • Modélisation– Modèles

- Décomposition additive « Classique » :

- T_t tendance, S_t saisonnalité
- X_t processus stationnaire

$$Y_t = \underbrace{T_t + S_t}_{(1)} + X_t$$

- Modèle Prophet :

- H_t jours fériés
- X_t variables explicatives : régresseurs

$$Y_t = (1) + H_t + \underbrace{\sum_{i=1}^k \beta_i X_{i,t}}_{(2)} + \epsilon_t$$

- Modèle Neural Prophet :

- $AR_t(p)$ auto-régressif d'ordre p

$$Y_t = (1) + (2) + AR_t(p) + \epsilon_t$$



Prise en compte des variables explicatives avec le modèle **Prophet**

4 • Modélisation – Contraintes

- Une modélisation locale, avec une série temporelle par couple *sexe – tranche d'âge – département*, soit **768 modèles**.

- Paramétrer les modèles :
 - Hyperparamétrage
 - Sélection des régresseurs
 - Sélection des modèles en fonction de la rupture de tendance

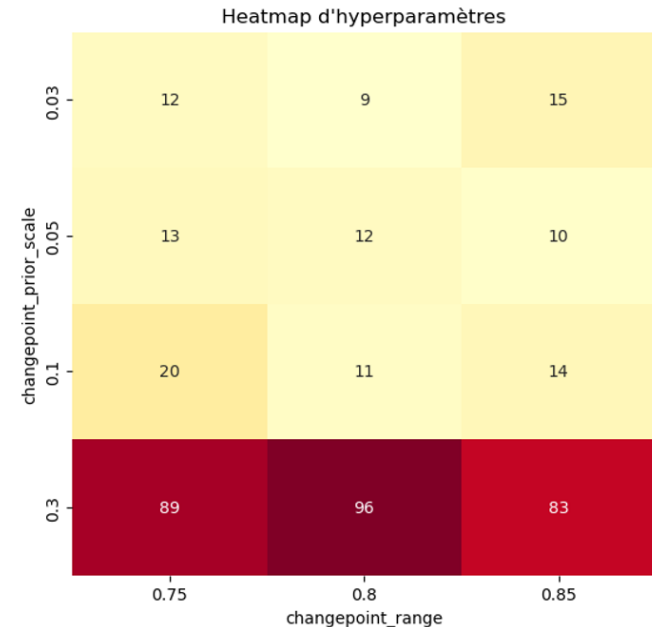


Paramétrage des modèles à réaliser sous contraintes de **temps de calcul**

4 • Modélisation– Hyperparamètres

Hyperparamètres :

- Tendence : linéaire / **logistique**
- Saisonnalité : additive / **multiplicative**
- Points de rupture (changepoint) :
 - Amplitude (prior_scale)
 - Placement (range)



Heatmap de couples d'hyperparamètres optimaux, pour 384 modèles

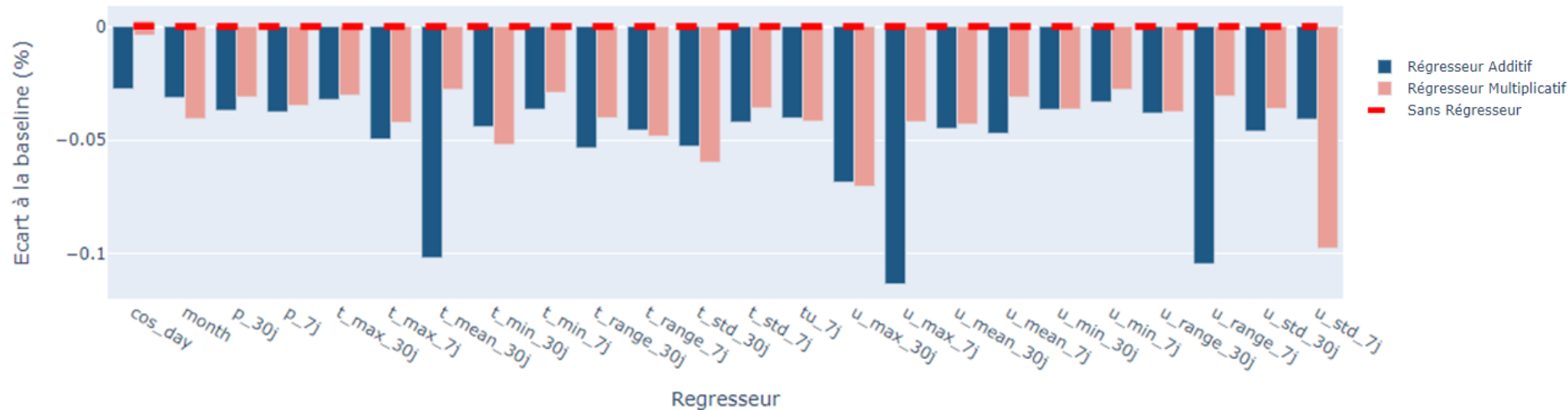


Première sélection d'hyperparamètres

4 • Modélisation- Régresseurs : évaluation

- La **pertinence des régresseurs** est évaluée individuellement, en calculant **l'amélioration de la RMSE** par rapport à un modèle sans régresseurs.

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$



➡ Méthode pour **mesurer l'apport des régresseurs** aux modèles

4 • Modélisation– Régresseurs : sélection

- Deux **ensembles de régresseurs** sont sélectionnés.
 - v1 : 5 régresseurs pertinents et non-redondants
 - v2 : v1 + température humide

Variable	Add (+)	Mltip (x)	Ensemble 'v1'	Ensemble 'v2'	Signification
<i>t_max_7j</i>	×		×	×	Température maximum sur les 7 derniers jours
<i>t_mean_30j</i>	×		×	×	Température moyenne sur les 30 derniers jours
<i>u_max_7j</i>	×		×	×	Maximum de l'humidité quotidienne moyenne sur les 7 derniers jours
<i>u_max_30j</i>		×	×	×	Maximum de l'humidité quotidienne moyenne sur les 30 derniers jours
<i>u_std_7j</i>		×	×	×	Ecart-type de l'humidité quotidienne moyenne sur les 7 derniers jours
<i>tu_7j</i>	×			×	Température humide, approximée à partir de <i>t_mean_7j</i> et <i>u_mean_7j</i>

➡ Sélection d'**ensembles de régresseurs** représentant les facteurs de risque

4 • Modélisation– Modèles : sélection

- Différents **paramètres et hypothèses** sont testés et évalués, afin de trouver un modèle **minimisant la RMSE**, tout en considérant que la rupture de tendance serait plutôt **conjecturelle**.

période observation	période obs. tendance (<i>changepoint range</i>)	traitement Covid	régresseurs	RMSE
1999 - 2019	1999 – 2019 (0,99)	Non	v1	0,1799
			v2	0,1799
1999 - 2023	1999 – 2019 (0,8)	Oui	v1	0,1786
			v2	0,1785
1999 - 2023	1999 – 2019 (0,8)	Non	v1	0,1788
			v2	0,1788
1999 - 2023	1999 – 2023 (0,99)	Non	v1	0,1786
			v2	0,1786

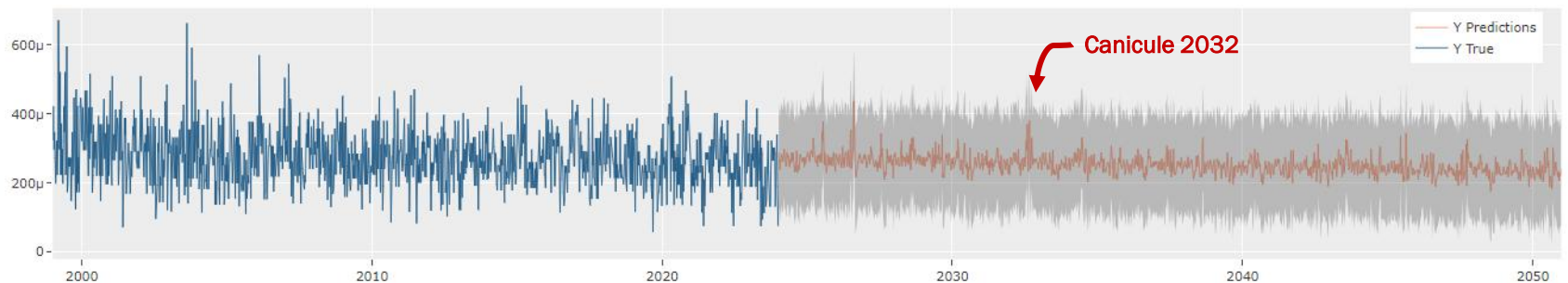
➔ Sélection des **paramètres optimaux** des modèles individuels

Sommaire

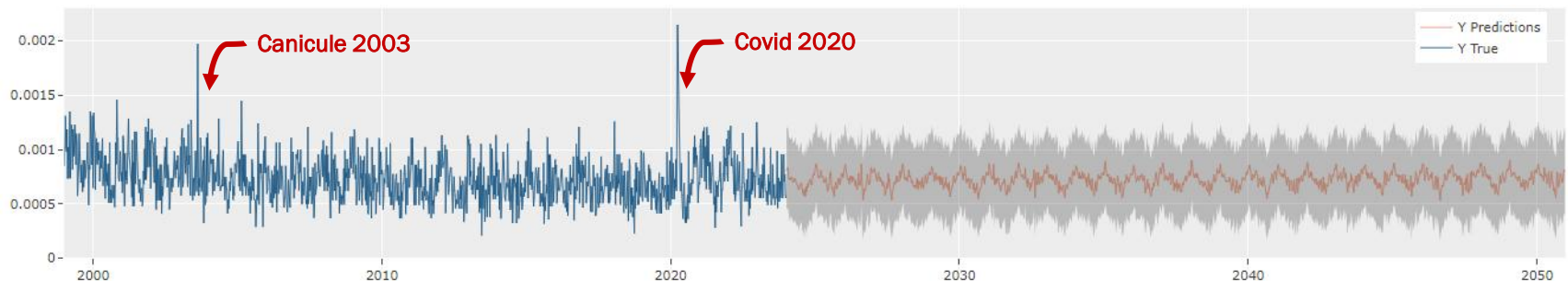
- Données
- Etudes préalables
- Modélisation
- **Projections**
- Mesures de l'incertitude
- Conclusion

5 • Projections– Modèles Individuels

- On retiendra deux points de référence : la canicule de 2032 de la simulation RCP2.6, et celle de 2027 du RCP8.5.



Projections des taux de mortalité, Hommes, 60-64 ans, Département 75, RCP2.6



Projections des taux de mortalité, Hommes, 75-79 ans, Département 75, RCP2.6

➡ Effets attendus reproduits (saisonnalité, canicules, tendance)

5 • Projections– Impact climatique - Méthode

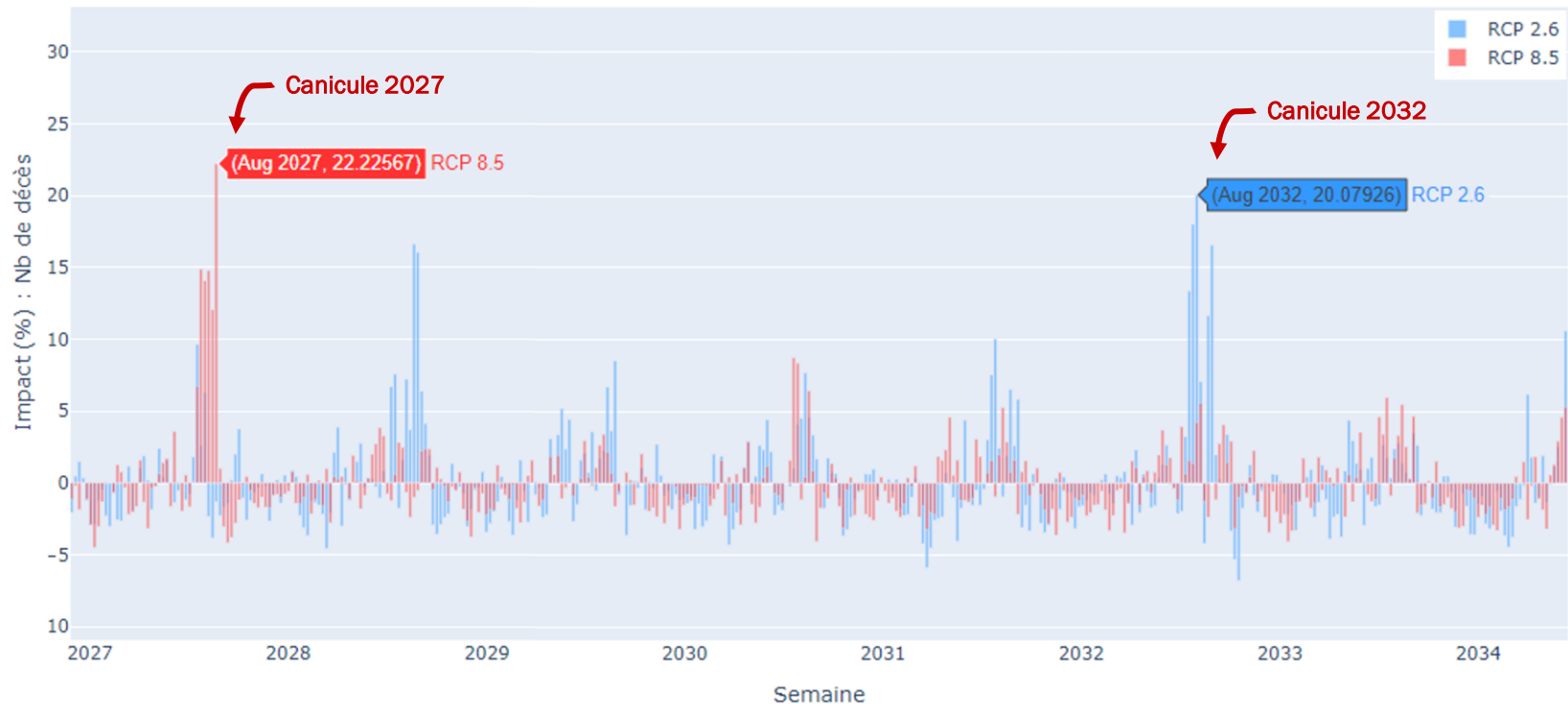
- A partir des modèles individuels et des estimations d'**évolution de la population** de l'INSEE, il est possible de passer de taux de mortalité à un nombre de décès.
 - ➔ Taux de mortalité → Nombre de Décès

- Ainsi, les départements, sexes et tranches d'âges peuvent être **regroupés** pour avoir un nombre de décès à la maille semaine – France pour toute la population de la tranche 60-79 ans.
 - ➔ Elargissement de la maille → semaine - France

- L'**impact des régresseurs** est alors calculable par **différence** avec les résultats issus des mêmes modèles sans régresseurs.
 - ➔ Mesure de l'impact climatique

5 • Projections– Impact climatique - Hebdomadaire

- Les canicules de références sont bien répliquées, et provoquent environ **2 700 décès** supplémentaires.

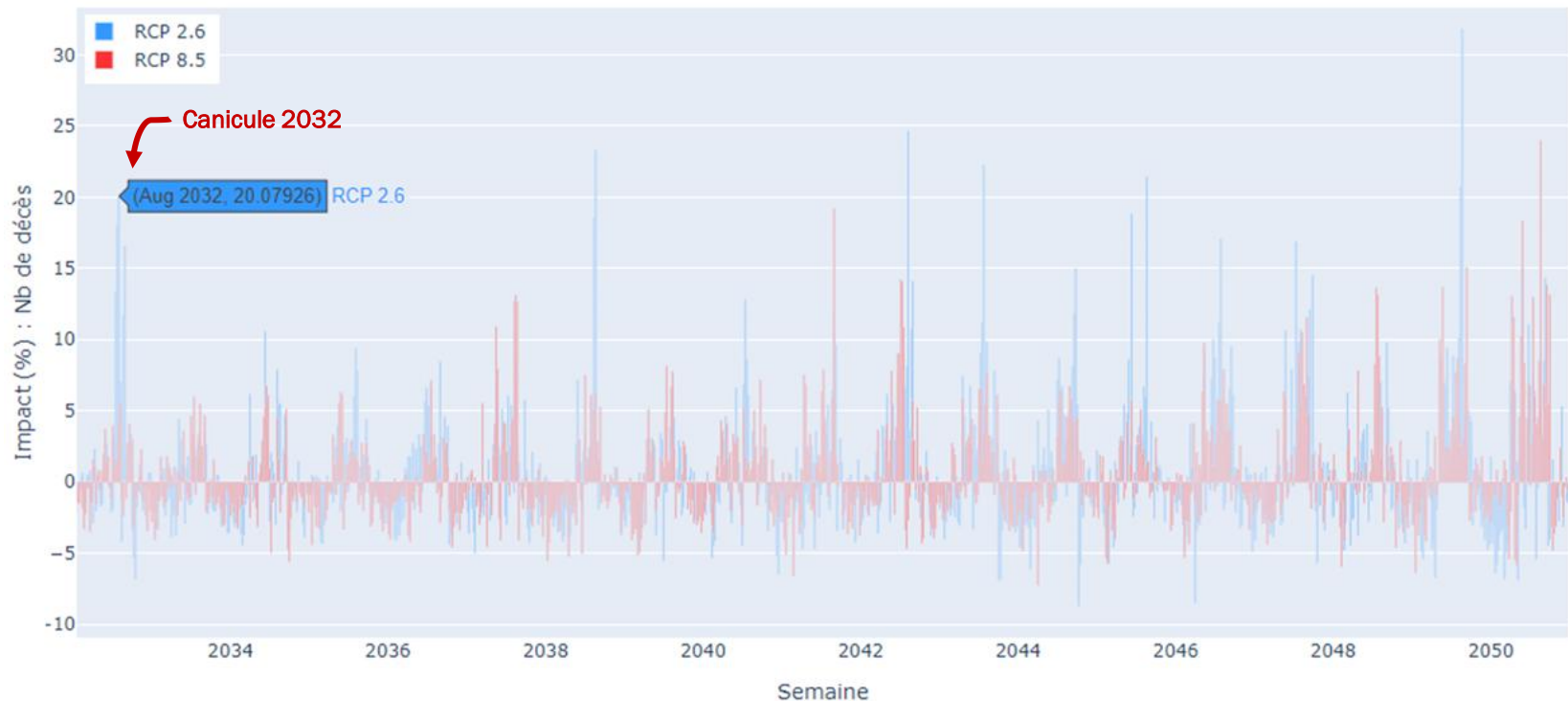


Impact hebdomadaire des régresseurs, 2027-2034, 60-79 ans

➡ Impact des canicules quantifiable

5 • Projections– Impact climatique - Hebdomadaire

- La surmortalité moyenne hebdomadaire de +6,0 décès pour le RCP8.5 et +10,1 pour le RCP2.6.

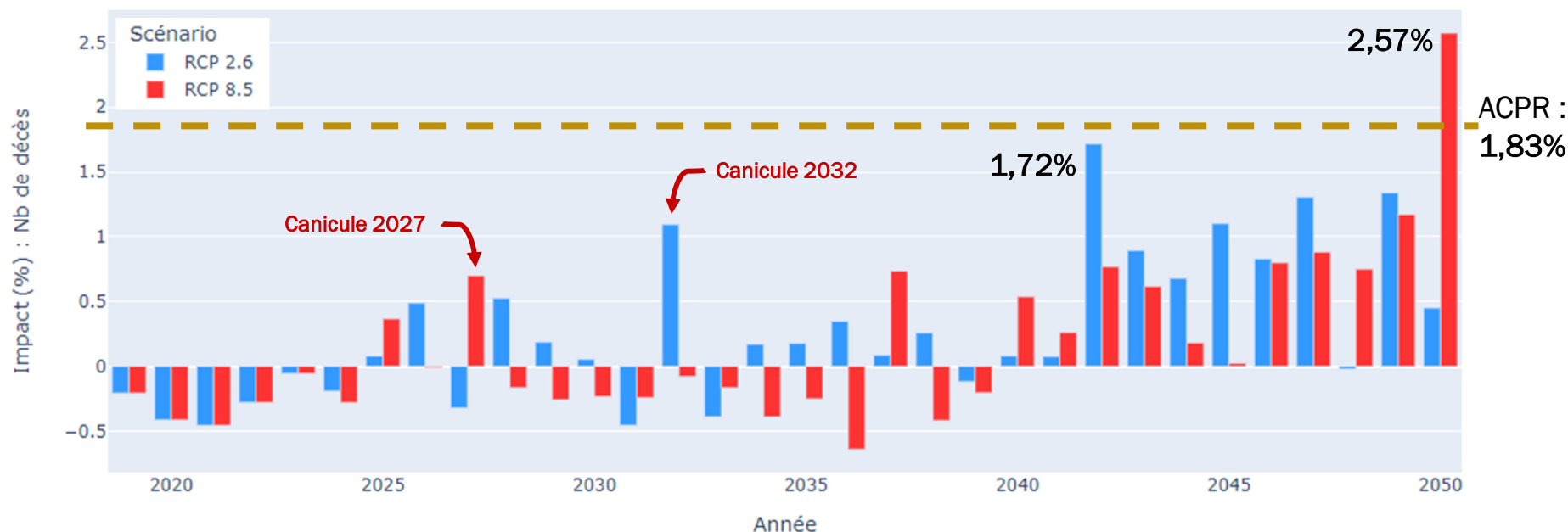


Impact hebdomadaire des régresseurs, 2034-2050, 60-79 ans

➡ **Surmortalité moyenne hebdomadaire** calculable

5 • Projections– Impact climatique - Annuel

- L'agrégation à une maille *annuelle* permet de comparer les résultats aux chocs des superviseurs.



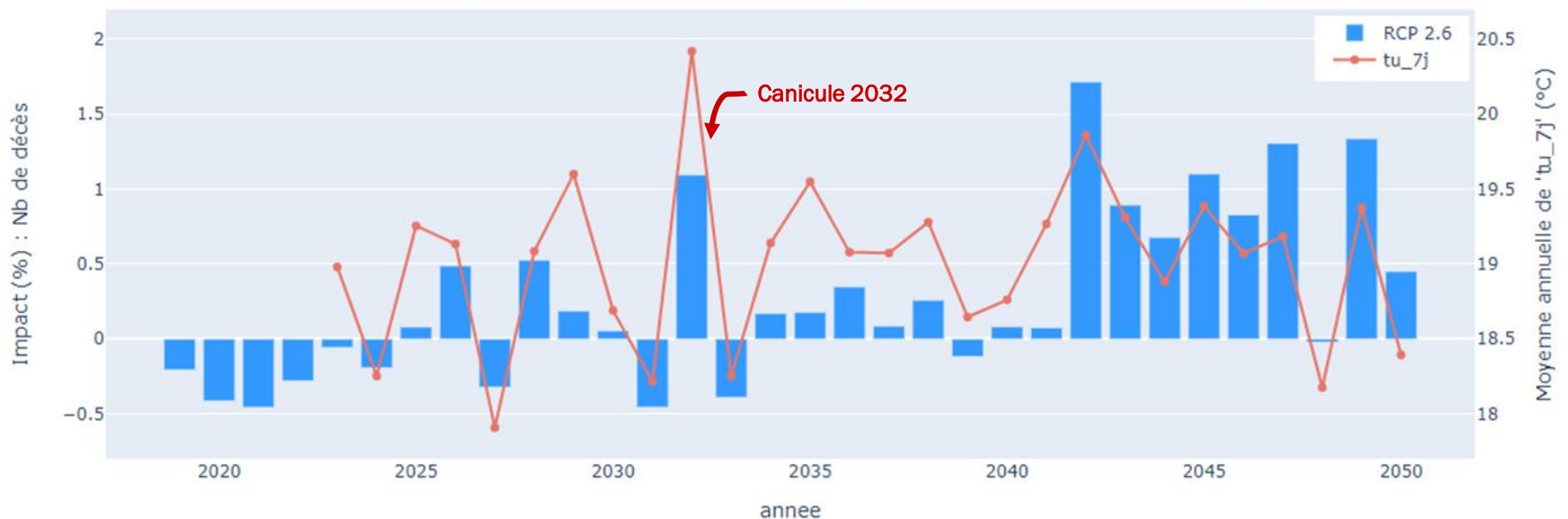
Impact annuel des régresseurs, 60-79 ans



Canicules répliquées, impact annuel mesuré et cohérent

5 • Projections– Impact climatique - Température Humide

- La comparaison de l'impact climatique et de la **température humide** valide la pertinence de la variable.

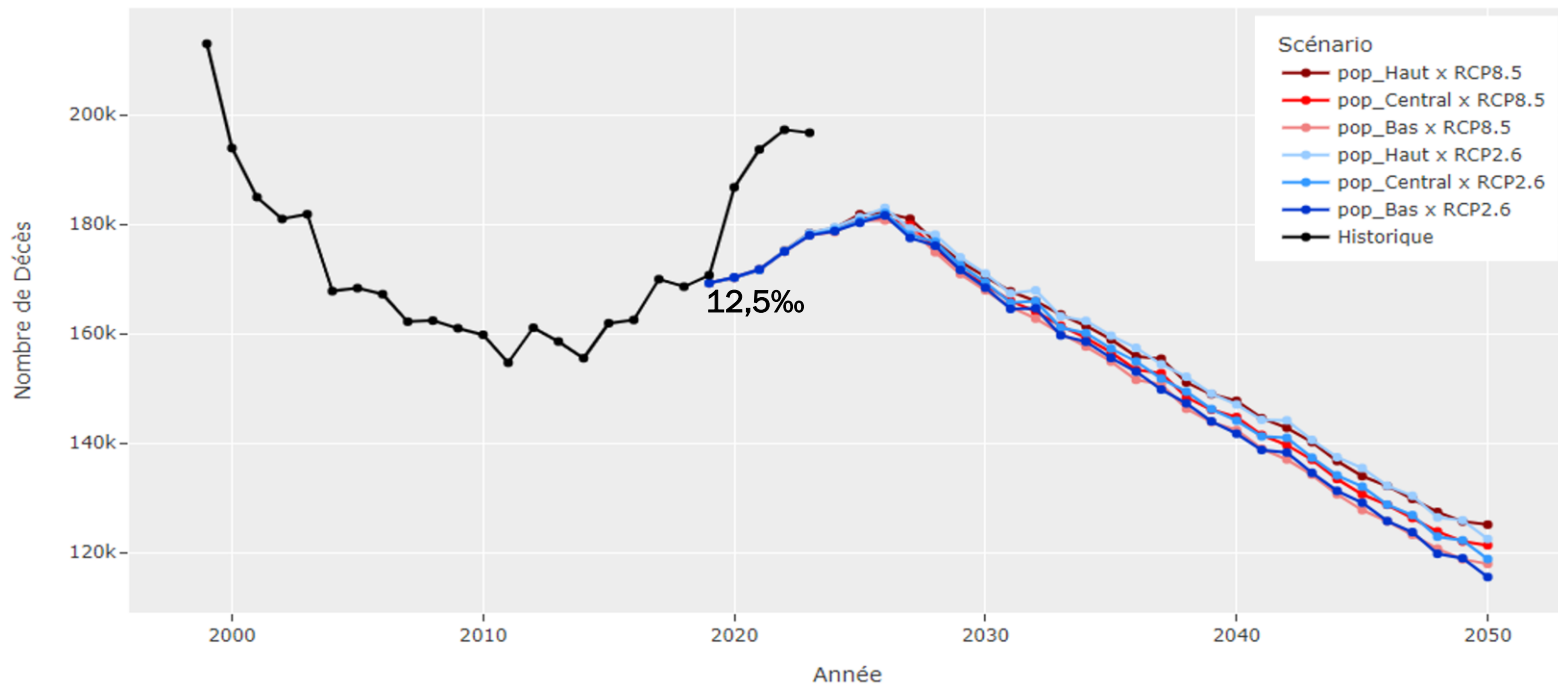


Impact annuel des régresseurs et température humide moyenne

➡ Apport de la température humide confirmé

5 • Projections– Scénarios

- Les projections permettent d'observer la rupture de **tendance conjecturelle** et de mesurer l'incertitude liée aux **scénarios**.

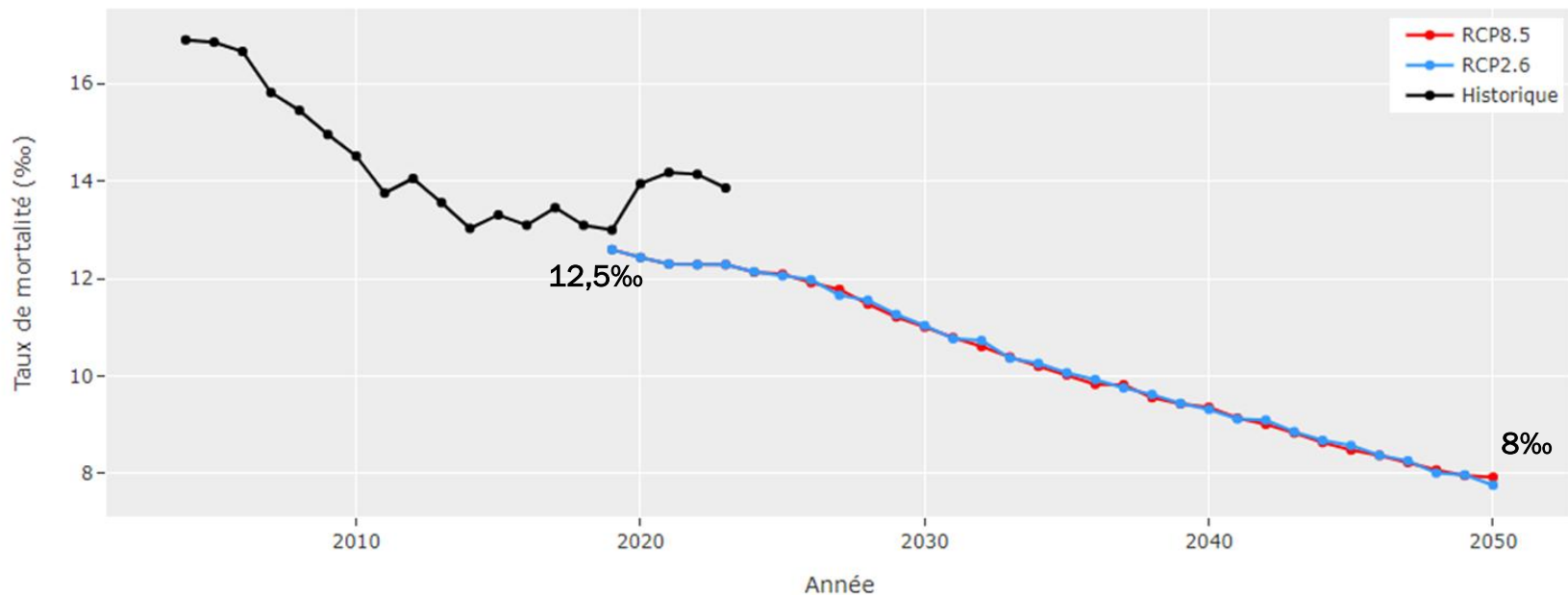


Nombre de décès annuel selon les scénarios de projections, 60-79 ans

➡ **Ecart de 2% à 8%** causés par les scénarios

5 • Projections– Scénarios

- En rapportant le nombre de décès aux estimations de la population, on peut se ramener à des **taux de mortalités**.



Taux de mortalité annuels (%) selon les scénarios de projections

➡ Poursuite de la baisse des taux de mortalité, de **12.5‰ à 8‰ en 2050**

Sommaire

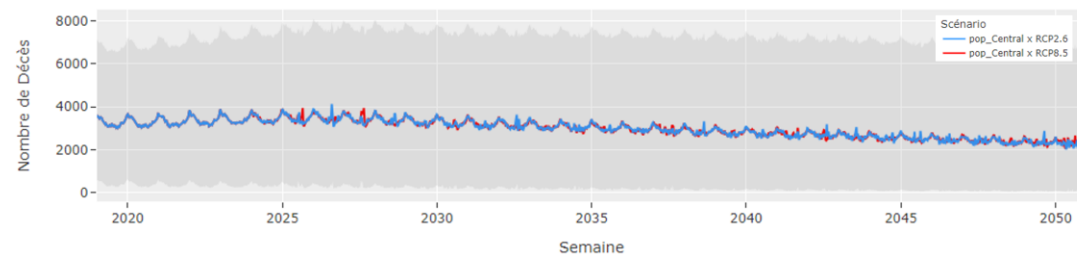
- Données
- Etudes préalables
- Modélisation
- Projections
- Mesures de l'incertitude
- Conclusion

6 • Incertitude- Prophet

■ Incertitude liée aux données futures :

- Scénarios de population INSEE
- Scénarios climatique DRIAS

■ Incertitude qualitative :



Intervalle de confiance hebdomadaire

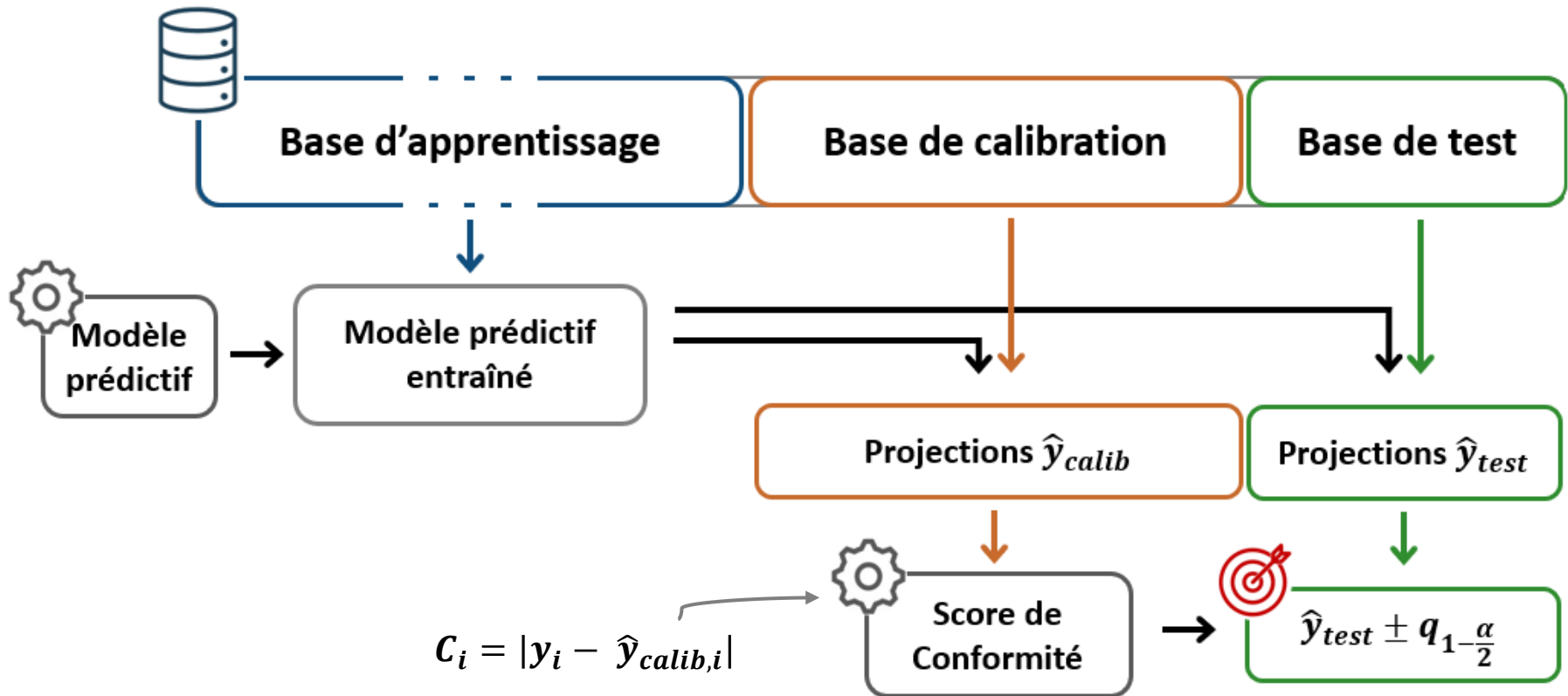
■ Incertitude liée aux modèles :

- Intervalle de confiance



Multiple sources d'incertitude, mesure qualitative avec **intervalle de confiance**

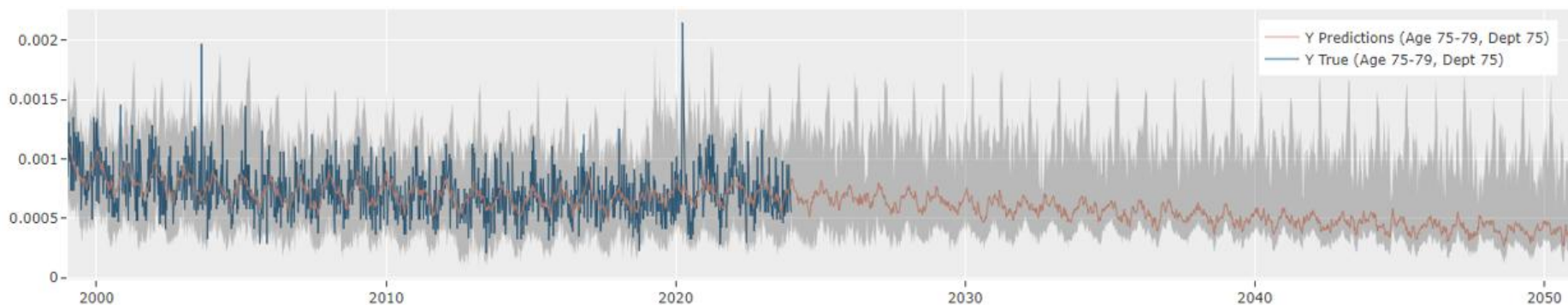
6 • Incertitude- Prédiction Conforme



➔ Méthode **agnostique** de calcul d'**intervalle de prédiction**

6 • Incertitude- Neural Prophet

- Neural Prophet implémente des méthodes de prédictions conformes.
- Son application permet d'obtenir des intervalles de prédictions non-centrés et suivants la saisonnalité.



Neural Prophet : Intervalle de prédiction
Hommes, 75-79 ans, Département 75, RCP2.6



Méthode de **mesure d'incertitude plus pertinente**

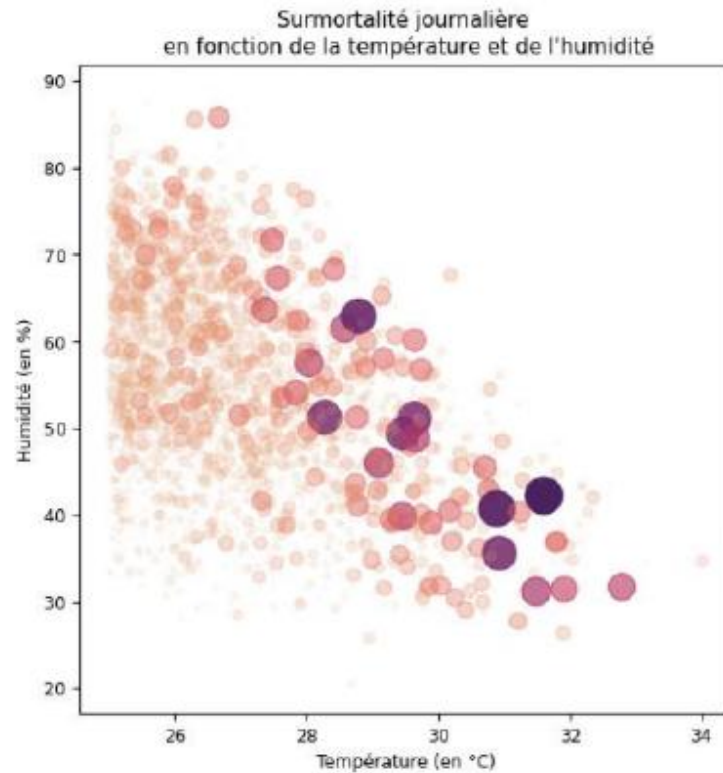
Sommaire

- Données
- Etudes préalables
- Modélisation
- Projections
- Mesures de l'incertitude
- Conclusion

Conclusion

- Ce mémoire s'est inscrit dans une **démarche d'amélioration** de **l'appréhension du risque climatique** sur la mortalité.
- Une **méthode numérique** a été proposée, en se basant sur **Prophet** et son extension Neural Prophet intégrant de méthodes de **conformal predictions**.
- A partir de **données open-source**, les taux de mortalités des 60-79 ans ont été projetés à horizon 2050 suivant deux **trajectoires de réchauffement**.
- Les modèles permettent bien de **répliquer les phénomènes** souhaités (tendance, saisonnalité, canicules).
- Cette étude a permis de mettre en évidence la **force des outils** tels que Prophet ou la conformal prediction, qui pourraient s'appliquer à d'autres problématiques actuarielles ou être reproduits dans le cadre de scénarios ORSA.

TEMPÉRATURE HUMIDE

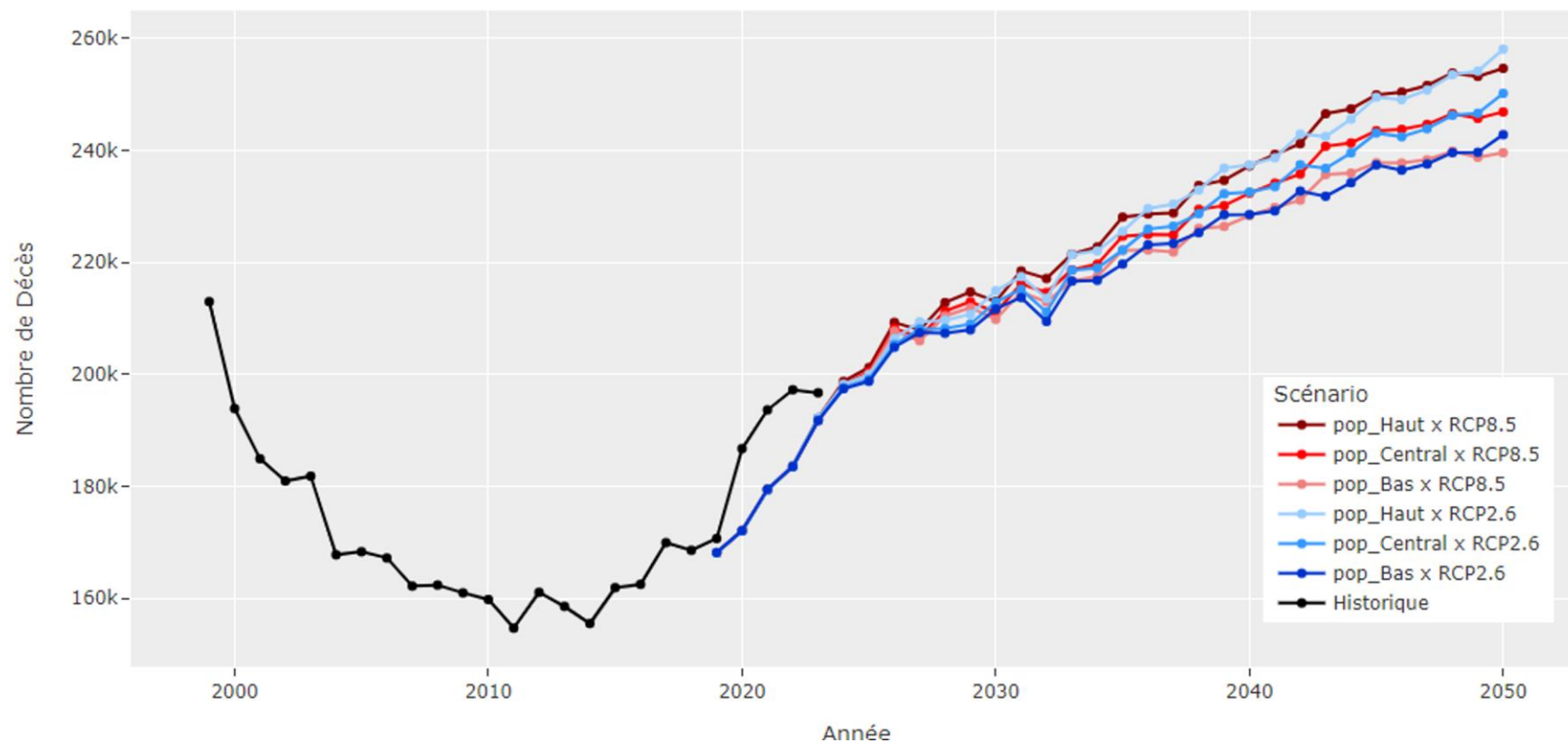


$$T_w = T \arctan(0.151977 \times (RH\% + 8.313659)^{0.5}) \\ + \arctan(T + RH\%) \\ - \arctan(RH\% - 1.676331) \\ + 0.00391838 \times RH\%^{1.5} \times \arctan(0.023101 \times RH\%) \\ - 4.686035$$

Approximation de la température humide par l'équation de Stull

Surmortalité journalière selon la température et l'humidité

Datalab, Galea & Associés



Neural Prophet : Projection du nombre de décès, vision Annuelle