

Changement climatique et statistique

Antoine Heranval, Thomas Opitz

Biostatistique et processus SPatiaux, INRAE

Atelier avec les stagiaires de 2nde
16 juin 2025

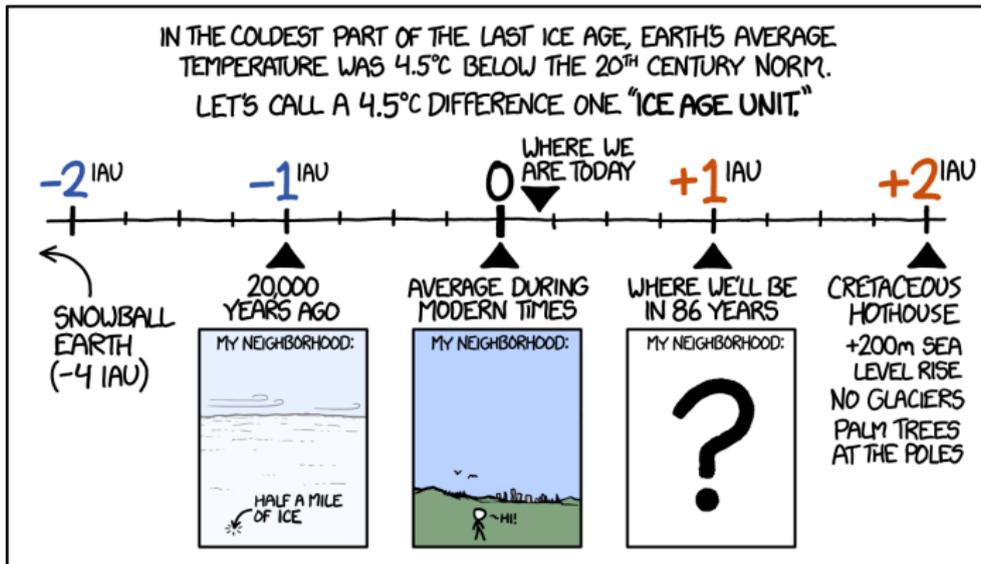


Le changement climatique

Voici un dessin publié en 2014 par un dessinateur de la côte Est des États-Unis.
Essayez de comprendre les informations qu'il contient et la question qu'il soulève.

WITHOUT PROMPT, AGGRESSIVE LIMITS ON CO₂ EMISSIONS, THE EARTH WILL LIKELY WARM BY AN AVERAGE OF 4°-5°C BY THE CENTURY'S END.

HOW BIG A CHANGE IS THAT?



Et le changement climatique à Avignon ?

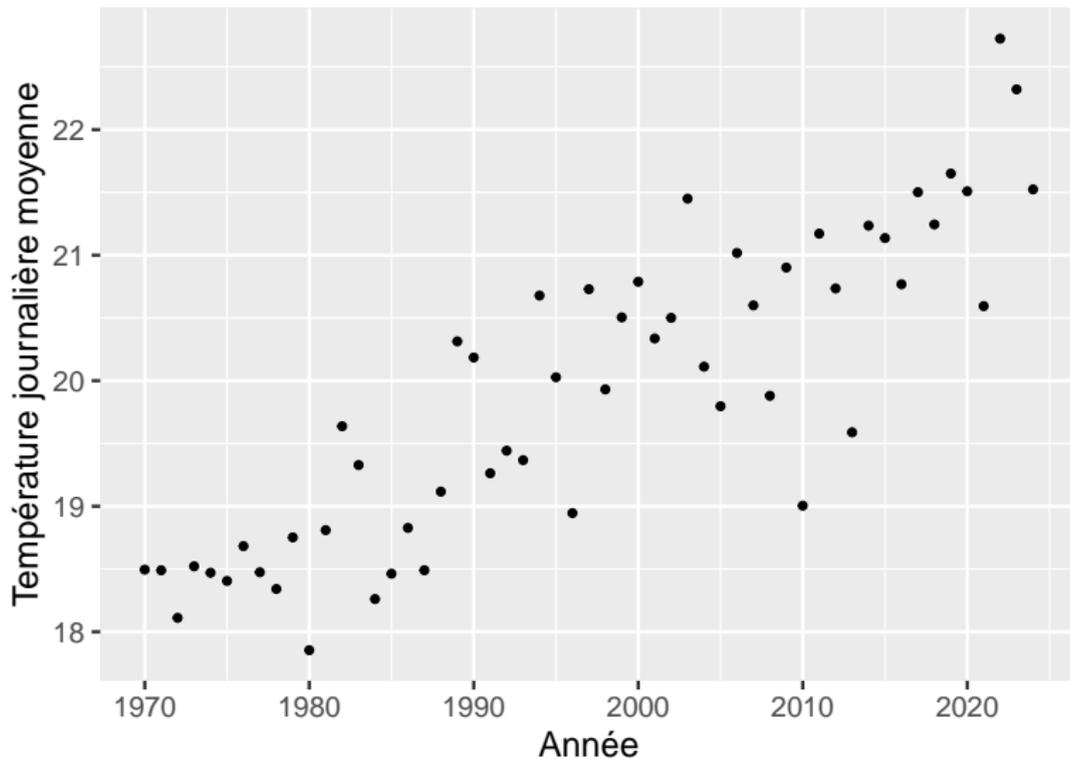
Sondage :

- La température a-t-elle augmenté au cours des 50 dernières années ?
- Si oui, de combien ?

→ **Discussion**

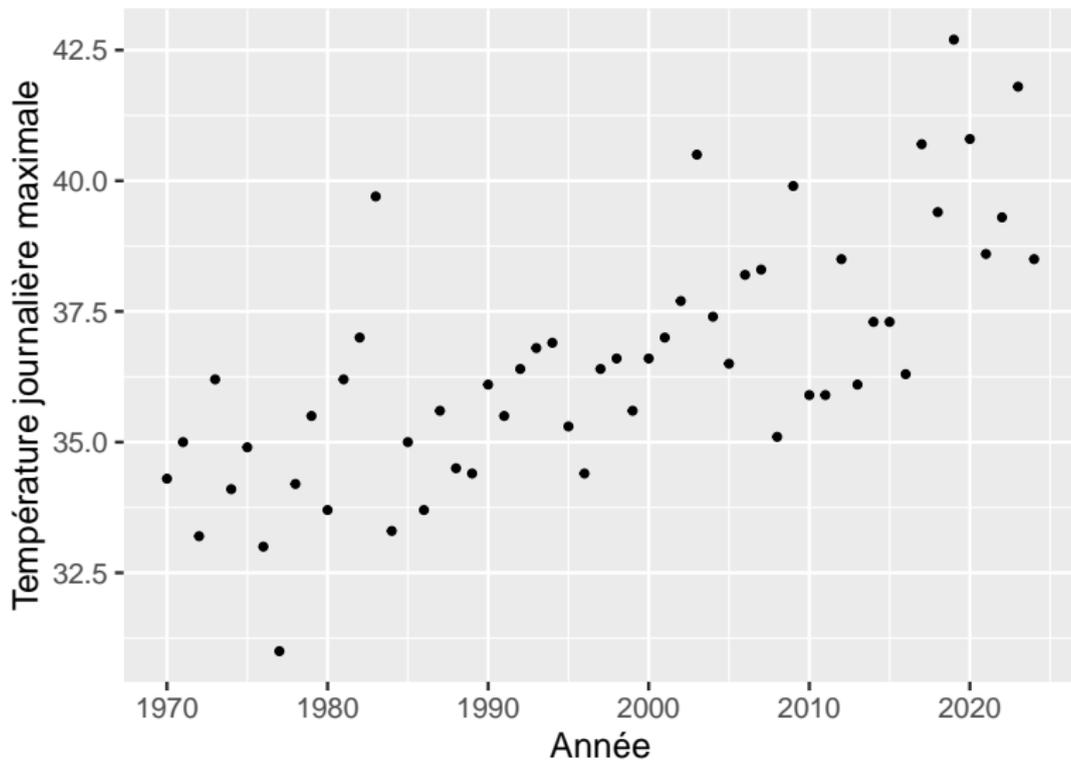
Changement climatique – perceptible à Avignon ?

Séries des moyennes annuelles des températures journalières maximales



Changement climatique – perceptible à Avignon ?

Séries des maxima annuels des températures journalières maximales

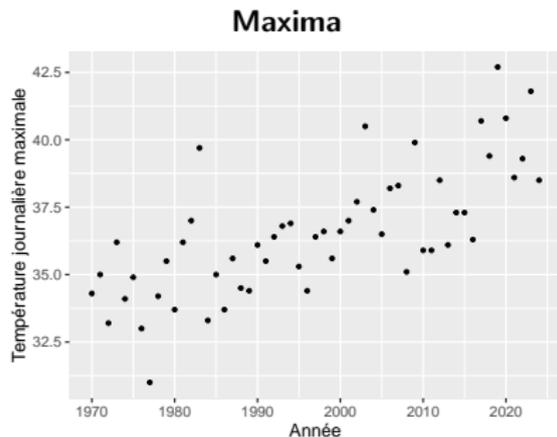
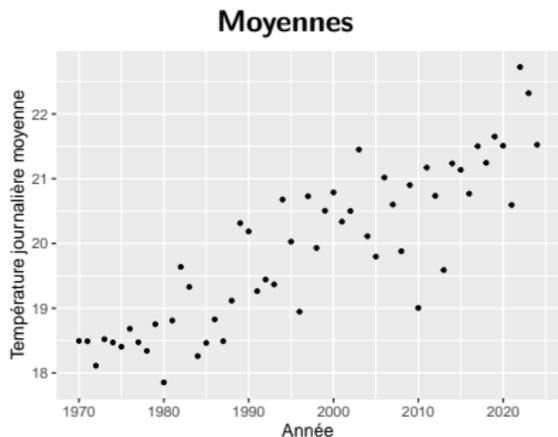


Analyse

- Visuellement, il semble y avoir une tendance à l'augmentation des moyennes et maxima annuels des températures journalières maximales à Avignon depuis 1970.
- L'augmentation n'est pas monotone ; il y a une forte variabilité entre les années.
- Par exemple en 1982 et 1983, il y avait des températures relativement élevées.
- Comme pour un lancer de dé où on ne connaît pas le résultat à l'avance, il y a du hasard dans les phénomènes climatiques.
- Il y a une variabilité naturelle du climat, même s'il ne changeait pas.

Quelle vitesse de réchauffement ?

**De combien de degré Celsius
la température augmente-t-elle en moyenne par année ?
(selon les deux cas : maxima annuels, moyennes annuelles)**



Estimation de la pente – Modèle linéaire

Si la température augmentait en moyenne de β degré Celsius chaque année, la droite suivante devrait à peu près suivre le nuage des observations :

$$T(\text{ANNEE}) = T(1970) + \beta \times (\text{ANNEE} - 1970)$$

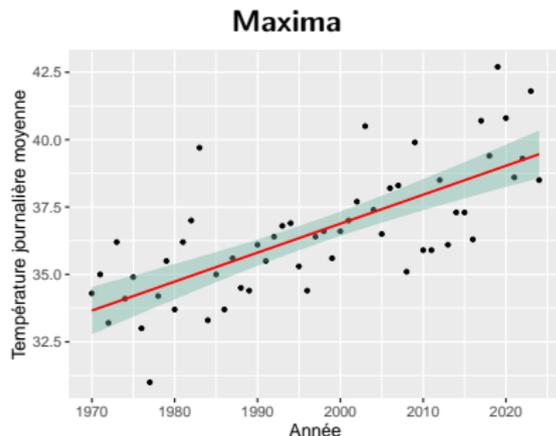
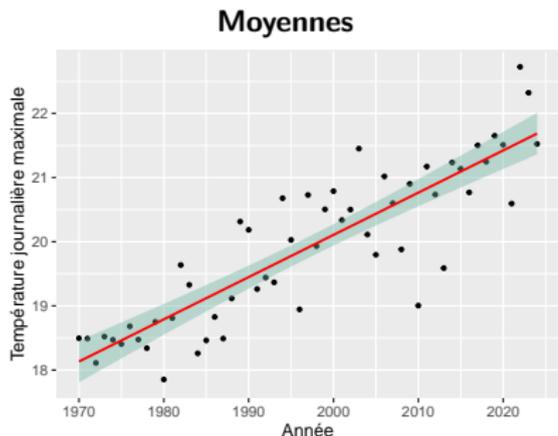
où $T(\text{ANNEE})$ est la valeur de la droite pour ANNEE

En statistique, le **modèle linéaire** permet de déterminer les valeurs les plus pertinentes pour β et pour $T(1970)$.

Résultats d'une estimation statistique calculée sur ordinateur :

$\beta = 0.11^\circ\text{C}$ et $T(1970) = 33.5^\circ\text{C}$ pour les températures journalières maximales,

$\beta = 0.07^\circ\text{C}$ et $T(1970) = 18.1^\circ\text{C}$ pour les températures journalières moyennes



Le changement est-il stable dans l'espace ?

- Est-ce que tous les endroits se réchauffent à la même vitesse ?
- Comment mesurer où cela va se produire le plus vite ?

→ **Discussion**

Comparaison Turquie - Royaume-Uni

Toujours avec :

$$T(\text{ANNEE}) = T(1970) + \beta \times (\text{ANNEE} - 1970)$$

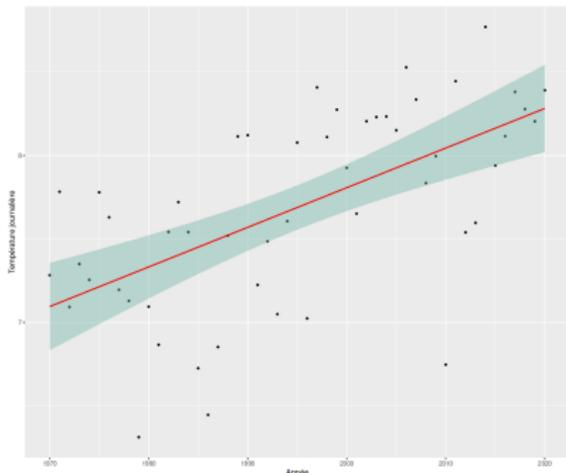
où $T(\text{ANNEE})$ est la valeur de la droite pour ANNEE

Résultats d'une estimation statistique calculée sur ordinateur :

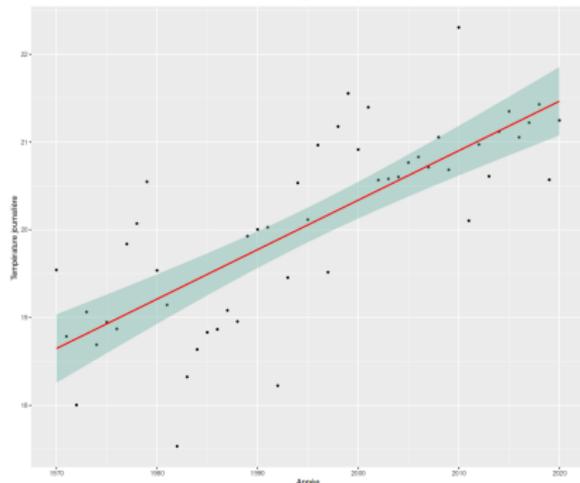
$\beta = 0.02^\circ\text{C}$ et $T(1970) = 7.07^\circ\text{C}$ pour le nord du Royaume-Uni,

$\beta = 0.06^\circ\text{C}$ et $T(1970) = 18.6^\circ\text{C}$ pour le sud de la Turquie

RU

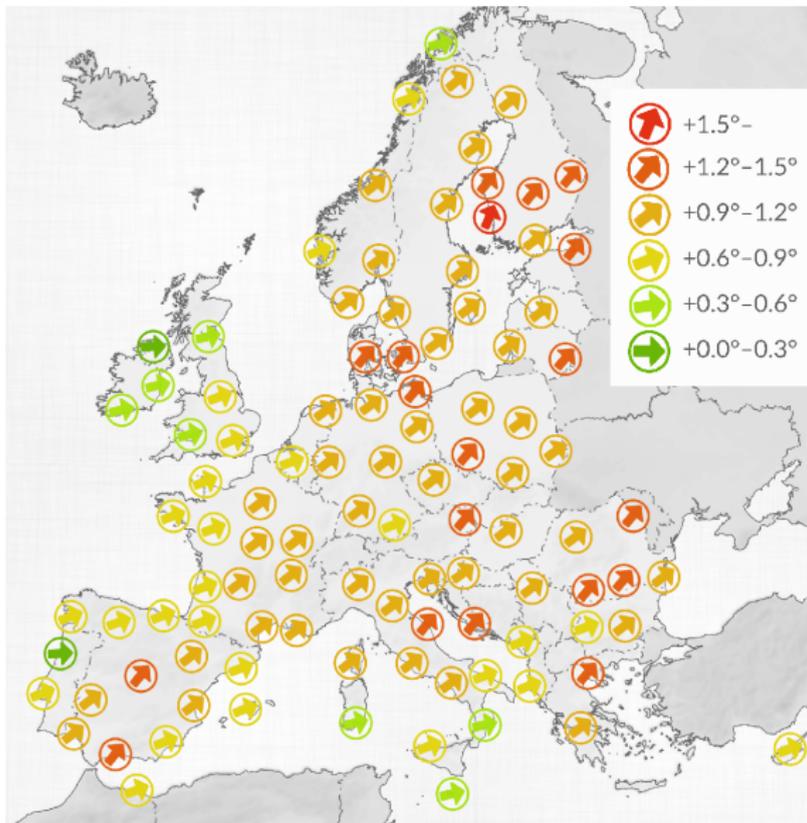


Turquie



Changement climatique – évolution en Europe

Augmentation de la température annuelle moyenne dans certaines villes d'Europe de 1900 à 2017.



Quelle temperature en 2050 ?

À partir des modèles linéaires, calculez quelle température il fera en 2050 à Avignon, au Royaume-Uni, en Turquie. Quelle sera l'augmentation en degrés ?

→ **Discussion**

Peut-on formellement détecter le changement ?

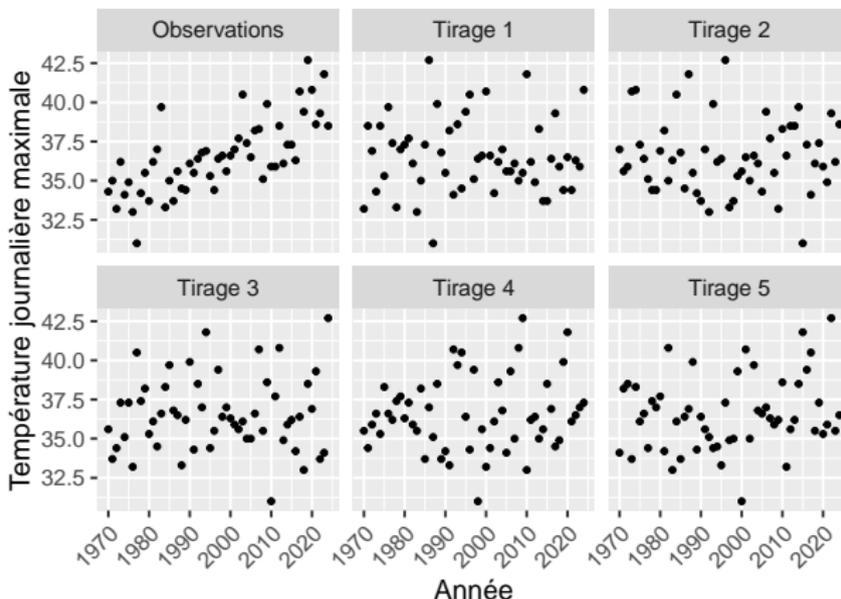
Comment peut-on être sûr que la tendance à l'augmentation, perceptible visuellement, n'est pas un produit du hasard, et que les températures récentes souvent plus élevées indiquent réellement un changement de fond ?

→ **Discussion**

Et s'il n'y avait pas de changement ?

... alors on pourrait mélanger les années de façon aléatoire, et des tendances visuelles comme celles observées devraient également apparaître de temps en temps pour les séries où les années ont été "mélangées".

Exemples de séries avec les années mélangées de façon aléatoire (pour températures maximales)



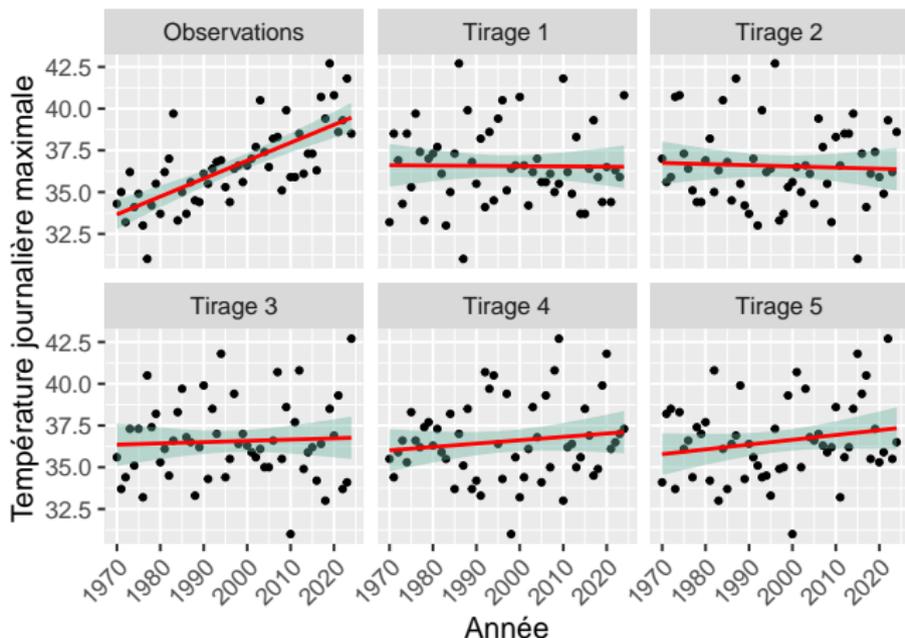
→ Vos commentaires ?

Les pentes des droites pour les années mélangées

Sous l'hypothèse "pas de changement climatique", en mélangeant les années, nous obtenons les pentes suivantes pour les cinq tirages :

$$-0.002, -0.007, -0.007, 0.02, 0.03$$

Pour rappel, la pente des observations (dans la série en haut à gauche) est de 0.11.

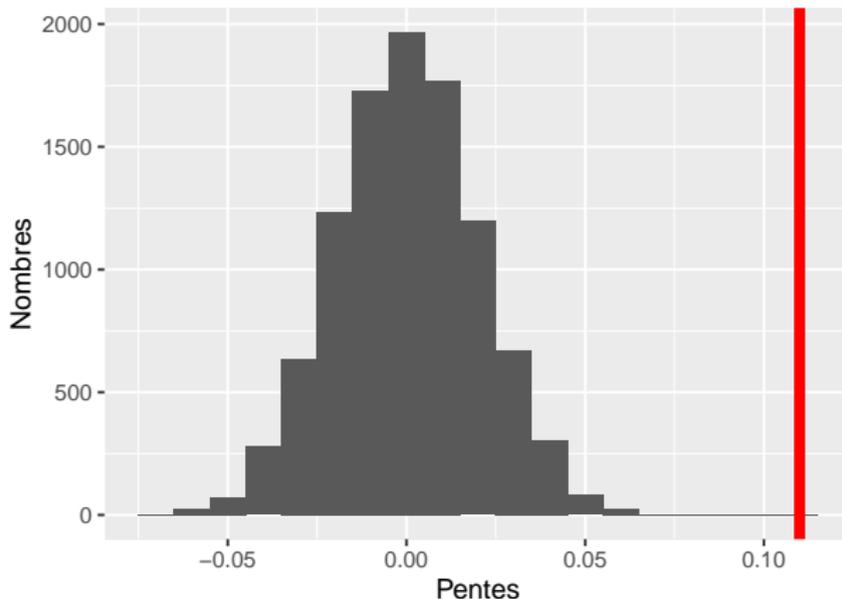


Test statistique

Nous répétons 10,000 fois la procédure suivante :

- Tirage aléatoire des années associées aux observations des maxima annuels
- Estimation statistique de la pente β

La figure en bas montre un **histogramme** des pentes estimées :

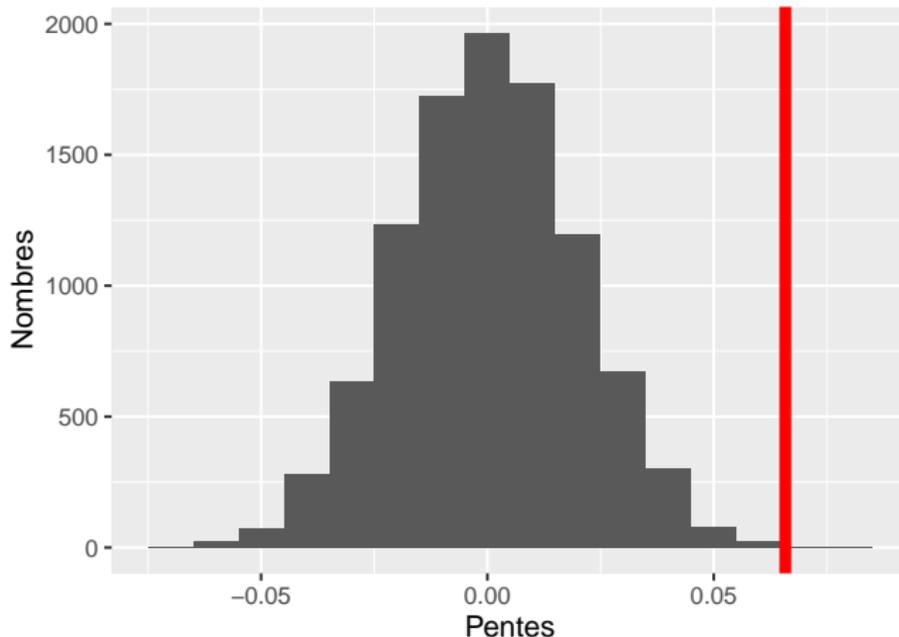


Que représente le trait rouge ?

Que peut-on conclure pour l'hypothèse "il n'y a pas de changement climatique" (concernant les maxima annuels des températures à Avignon) ?

Le même test statistique pour les moyennes annuelles

On trouve 4 sur 10,000 des pentes estimées avec tirage aléatoire des années qui dépassent la pente des observations, donc 0.04% des cas.



Que peut-on conclure pour l'hypothèse "il n'y a pas de changement climatique" (concernant les moyennes annuelles des températures à Avignon) ?

Pour conclure

- Vous venez de découvrir un test statistique de “permutation” qui rejette formellement l’hypothèse de l’absence d’un changement dans les séries des maxima et moyennes annuels de températures à Avignon sur la période 1970–2024.
- D’une façon générale, nous avons besoin de beaucoup de physique, de mathématiques, et de statistique en particulier, pour mieux comprendre et analyser le changement climatique, et anticiper ses conséquences.
- A INRAE, nous étudions certaines conséquences du changement climatique pour les humains, l’agriculture, la forêt, et toute la Planète.
- Deux questions sont centrales :
 - Adaptation : comment faire face aux changements en cours et à venir ?
 - Atténuation : comment limiter le changement climatique ?

Vos questions et commentaires ?