



**Probabilité d'apparition des
événements extrêmes chauds, secs
et venteux basé sur les copules**

1. Introduction

Stratégie d'identification des impact du changement climatique

copula

Constat : Se concentrer sur des statistiques univariées pour estimer les dommages causés par les événements extrêmes composés ne permet généralement pas de communiquer le risque réel.

Définition : Les événements extrêmes combinés sont définis par le GIEC comme « deux ou plusieurs événements extrêmes se produisant simultanément ou successivement, des combinaisons d'événements extrêmes avec des conditions sous-jacentes qui amplifient l'impact des événements, ou des combinaisons d'événements qui ne sont pas eux-mêmes extrêmes, mais conduisent à un événement ou à un impact extrême lorsqu'ils sont combinés » (Seneviratne et al., 2012).

Enjeux : les HDW (hot, dry, and windy events) de juillet et août au Kansas ont endommagé 30 % de la récolte prometteuse de sept millions de dollars (Curtis 1891).

Méthode : L'utilisation de la copule permet d'étudier la cooccurrence de plusieurs extrêmes.

Objectif : faire un bilan en Europe du risque des d'apparition des HDW.

Zoom sur les enjeux de l'étude des hot, dry, and windy events

Les événements HDW :

- augmentent l'évapotranspiration (Derrel et al 1993);
- provoquent une série d'impacts graves sur les terres cultivées (Curtis 1891, Lydolph 1964, Yang et Wang 1978, Lydolph et Williams 1982, Leathers et Harrington 2001, Wang et al 2016);
- influencent l'apparition rapide de sécheresses soudaines (Otkinet al 2018, Christianet al 2019);
- déclenchent ou intensifient les incendies de forêt (Flannigan et Harrington 1988, Jolly et al 2015, Srock et al 2018).

Leathers et Harrington (2001) ont défini un événement HDW ou « vent de four » avec une température supérieure à 35 °C, une humidité relative inférieure à 30 % et une vitesse du vent égale ou supérieure à 7 ms⁻¹.

Data agrégés par jours issu de Copernicus en 2022, 2023 et 2024:

<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/derived-era5-pressure-levels-daily-statistics?tab=overview>
<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/sis-ecde-climate-indicators>

Hot days K : Ce paramètre représente la température de l'atmosphère. Son unité est le kelvin (K). La température mesurée en kelvin peut être convertie en degrés Celsius (°C) en soustrayant 273,15. Ce paramètre est disponible à plusieurs niveaux dans l'atmosphère.

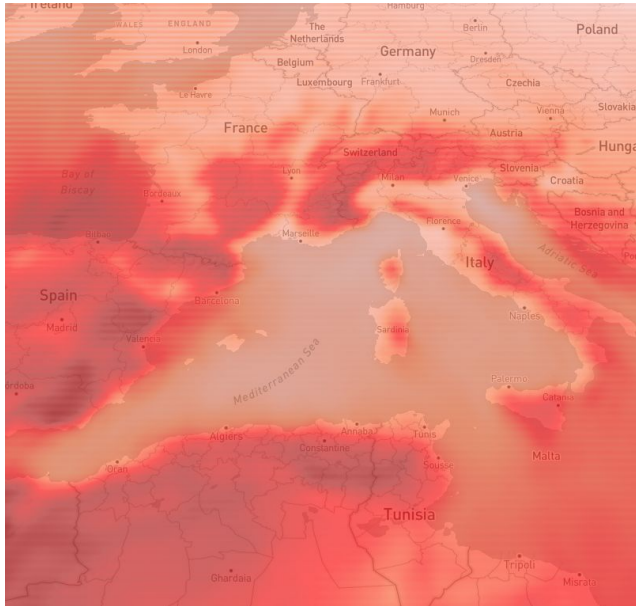
Winds days m s⁻¹: composante est/nord du vent. Il s'agit de la vitesse horizontale/verticale de l'air se déplaçant vers l'est/nord. Un signe négatif indique que l'air se déplace vers l'ouest/sud. Ce paramètres peut être combinés pour donner la vitesse et la direction du vent horizontal/vertical. vitesse scalarisée (le module du vecteur vent) à chaque point et instant, on calcule la norme du vecteur (u,v)

Humidité relative % : pression de vapeur d'eau exprimée en pourcentage de la valeur à laquelle l'air devient saturé (point où la vapeur d'eau commence à se condenser en eau liquide ou à se déposer en glace). Pour des températures supérieures à 0 °C (273,15 K), il est calculé pour la saturation sur l'eau. Pour des températures inférieures à -23 °C, il est calculé pour la saturation sur la glace. Entre -23 °C et 0 °C, ce paramètre est calculé par interpolation entre les valeurs de la glace et de l'eau à l'aide d'une fonction quadratique.

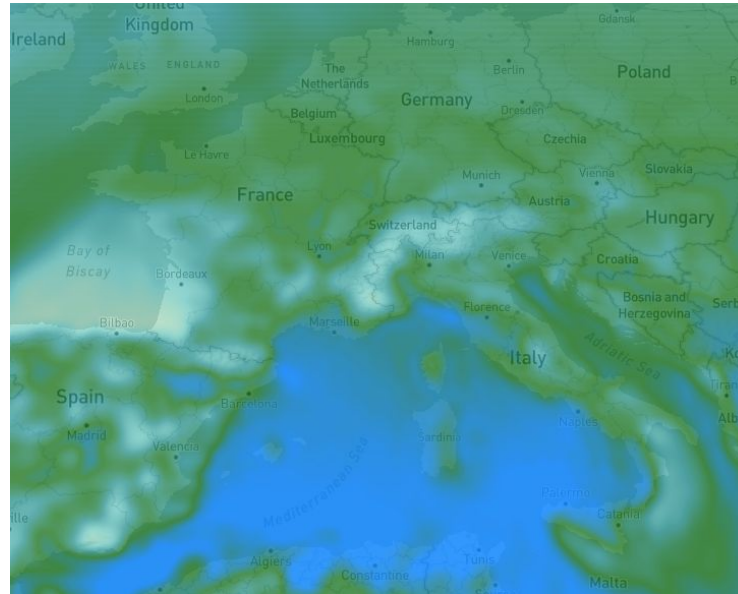
Données, image le 2022/06/08

copula

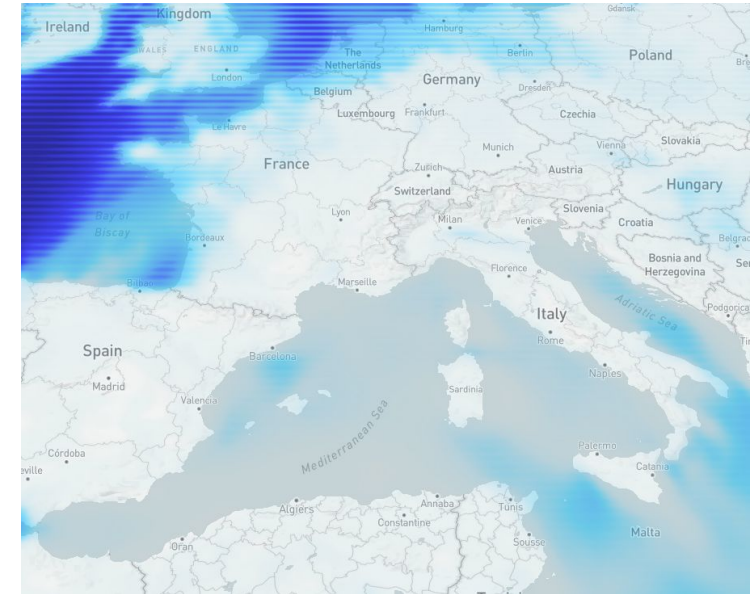
Température



Humidité relative (%)



Vent ms -1



2. Méthode

1. Simple décompte des dépassements composés de la température, de la vitesse du vent extrême et de temps sec.
2. Copules pour modéliser la dépendance tridimensionnelle de la température, de l'humidité relative et de la vitesse du vent.
 - Une copule est une fonction qui relie une fonction de distribution multivariée à ses fonctions de distribution marginale unidimensionnelle (Nelsen, 2007).
 - Diverses familles de copules caractérisent la dépendance sans échelle entre les variables aléatoires.

Méthode

Pour les trois variables aléatoires de X (par exemple l'humidité relative), Y (par exemple la température) et Z (par exemple la vitesse du vent) avec des fonctions de distribution cumulatives (CDF) $F_X(x) = \Pr(X \leq x)$, $F_Y(y) = \Pr(Y \leq y)$, $F_Z(z) = \Pr(Z \leq z)$,

La fonction de distribution conjointe trivariée ou copule (C) peut s'écrire :

$$F(x, y, z) = \Pr(X \leq x, Y \leq y, Z \leq z) = C(u, v, z) \quad (1)$$

où trois variables sont inférieures à un seuil établi et u , v et z sont les marginaux uniformément répartis sur $[0, 1]$.

La probabilité de dépassement/non-dépassement peut s'écrire comme suit :

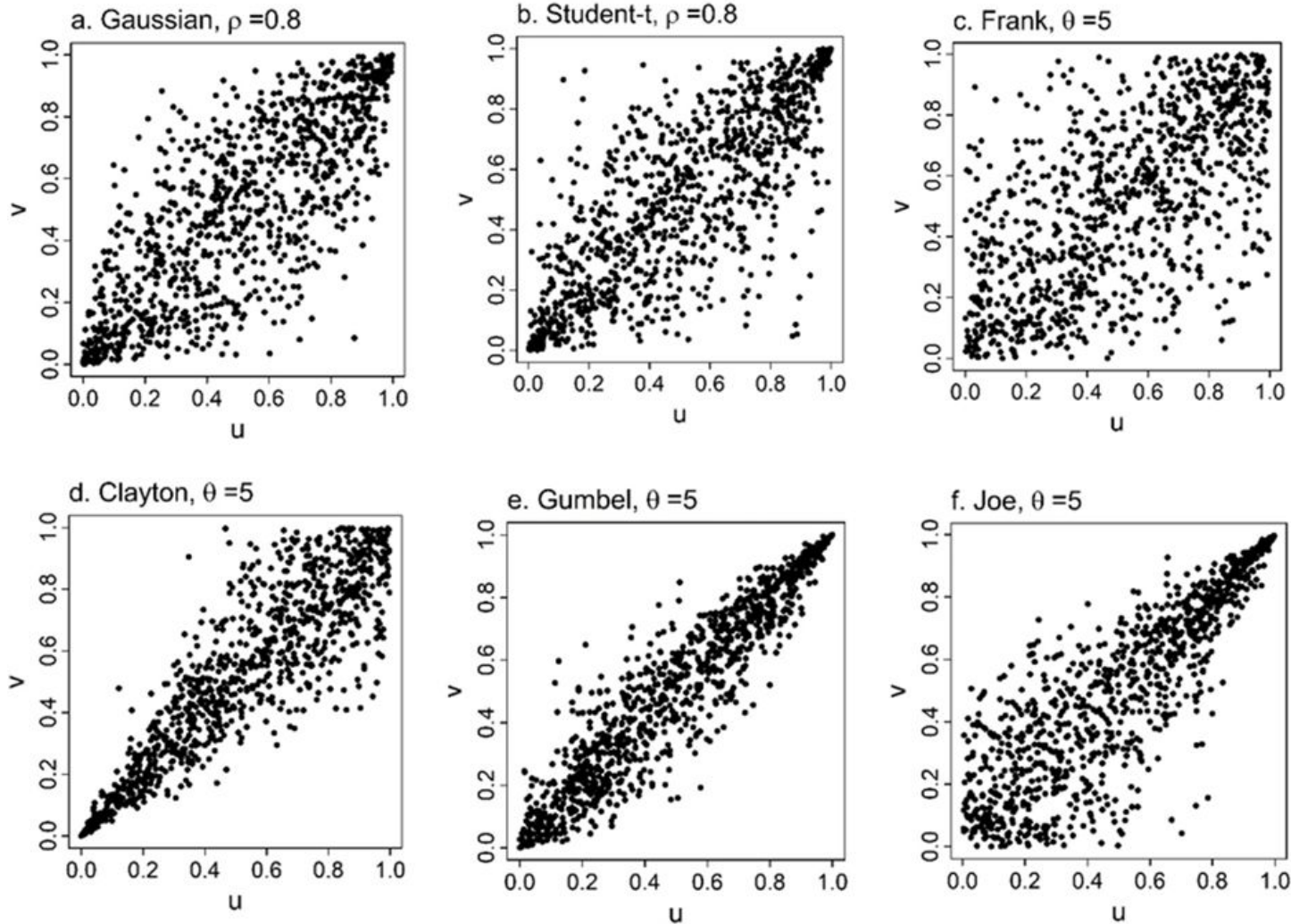
$P = \Pr(X \leq x, Y > y, Z > z) = C(u, v', z')$ (2) où $v' = 1 - v$, et $z' = 1 - z$ sont les probabilités de dépassement de la température et de la vitesse du vent, respectivement, et u est la probabilité de dépassement humidité inférieure au seuil.

Par conséquent, l'équation peut être résolue comme (Nelsen2007,Liuetal2018) :

$$P = u - C(u, v') - C(u, z') + C(u, v', z'). \quad (3)$$

Dans ce cas, les extrêmes trivariés seraient définis comme la zone dans l'espace tridimensionnel où la température et la vitesse du vent dépassent le seuil établi, tandis que l'humidité relative est inférieure au seuil. Si l'on considère les seuils de 90 et 10e centile tels qu'ils sont établis dans la littérature sur les changements climatiques extrêmes ; Par conséquent, $v' = z' = 0,9$ et $u = 0,1$. Si l'on considère les seuils fixes, la valeur de $u, v',$ et z' n'est pas nécessairement égale.

Méthode, choix de la copule



Les tracés montrent 1000 échantillons aléatoires provenant d'une gaussienne(a), d'un Student-t(b), d'un Frank(c), d'un Clayton(d), d'un Gumbel(e), et de Joe(f) copulas. Les Archimèdes et les copules d'Elliptique ont été créés en utilisant respectivement $\rho=0,8$ et $\theta=5$.

Méthode, choix de la copule

copula

1. Il est nécessaire de transformer des variables aléatoires (c'est-à-dire la température, l'humidité relative et la vitesse du vent) en variables marginales uniformément distribuées sur $[0,1]$ en calculant les rangs normalisés
2. Les copules les mieux adaptées ont été sélectionnés sur la base des statistiques les plus petites du critère d'information Akaike (AIC).

Méthode, choix de la copule

copula

L'impact de la dépendance sur la probabilité des extrêmes composés a été analysé.

Pour les cas trivariés, lorsque les trois variables sont considérées ensemble, la mesure des associations (τ_{XYZ}) a été calculée comme la moyenne des coefficients correspondants par paires (Nelsen, 1996, Genest et al., 2011).

$$\tau_{XYZ} = \frac{1}{3} (\tau_{XY} + \tau_{XZ} + \tau_{YZ}) \quad (4) \text{ où, par exemple, les } \tau_{XY}, \tau_{XZ} \text{ et } \tau_{YZ}$$

Le test de Mann-Kendall (Mann 1945, Kendall 1975) a été utilisé pour identifier les tendances monotones dans les séries chronologiques.

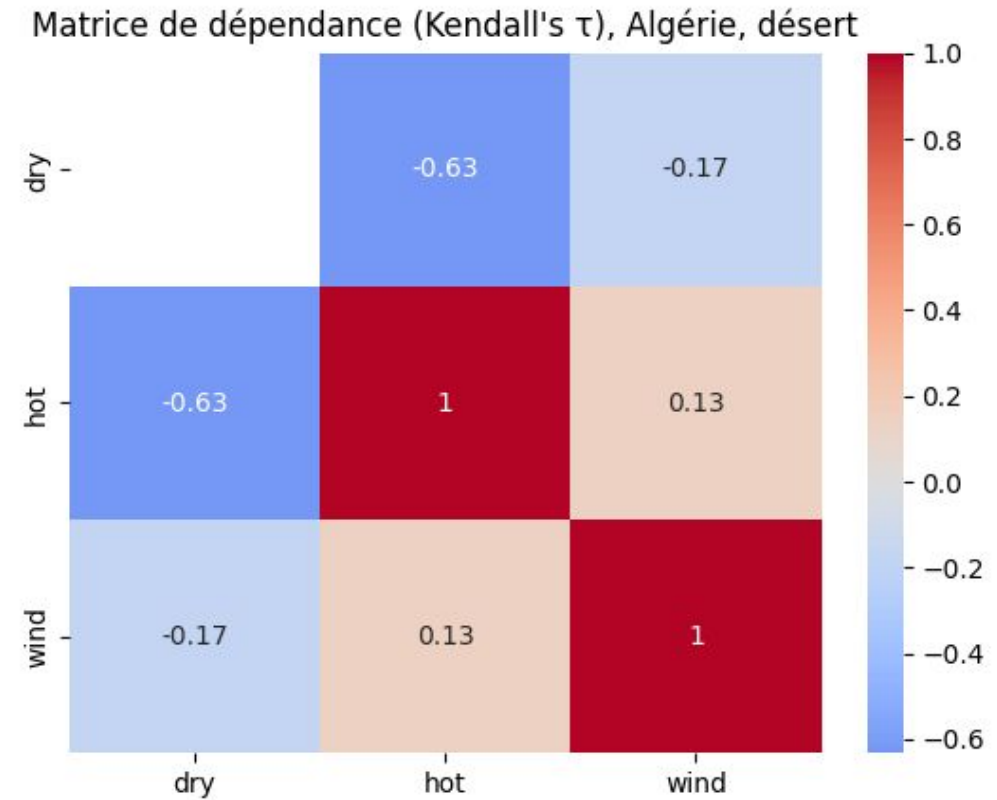
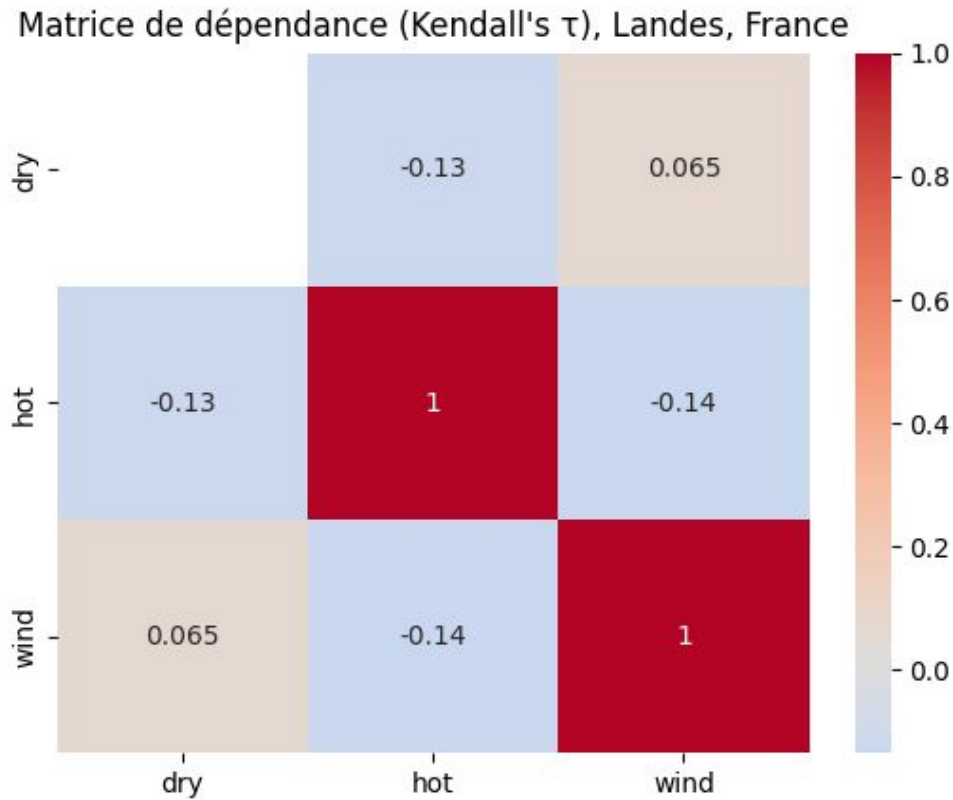
En outre, le test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) à deux échantillons (Massey, 1951) a été utilisé pour reconnaître les différences entre les CDF des valeurs d'événements extrêmes uniques et composés pour les deux sous-périodes de 35 ans, à savoir 1949-1983 et 1984-2018

Les tracés montrent 1000 échantillons aléatoires provenant d'une gaussienne(a), d'un Student-t(b), d'un Frank(c), d'un Clayton(d), d'un Gumbel(e), et de Joe(f) copulas. Les Archimèdes et les copules d'Elliptique ont été créés en utilisant respectivement $\rho=0,8$ et $\theta=5$.

4. Résultats

Il existe une dépendance seulement entre la chaleur et l'air sec

copula

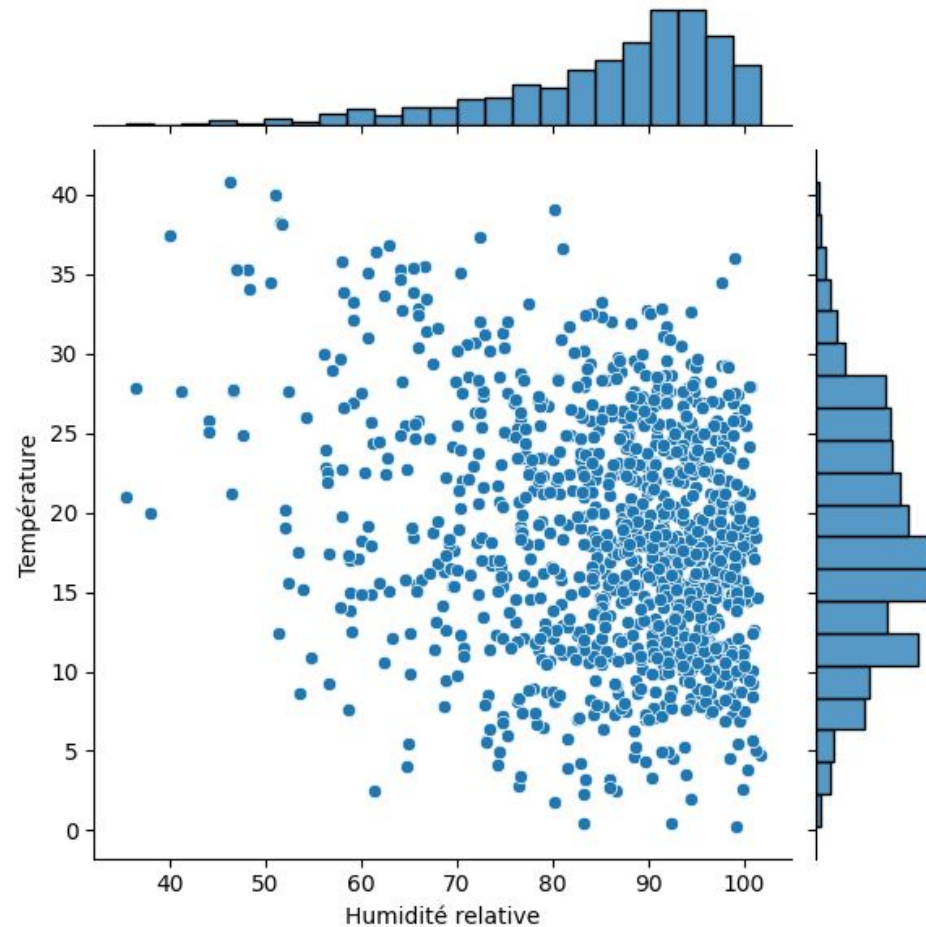


Le tau de Kendall est un coefficient de corrélation non paramétrique qui mesure la force et la direction d'une relation monotone entre deux variables. C'est une sorte de taux de paires concordantes

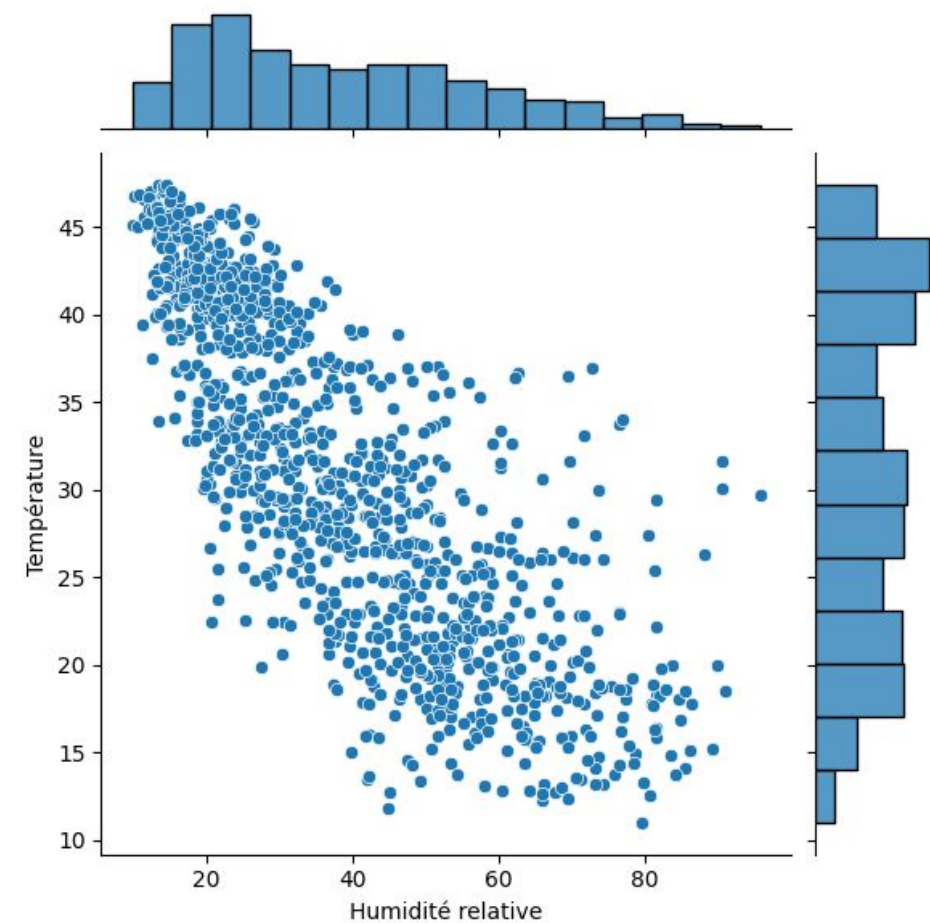
Zoom sur la chaleur et l'air sec, distribution conjointe

copula

Landes, France



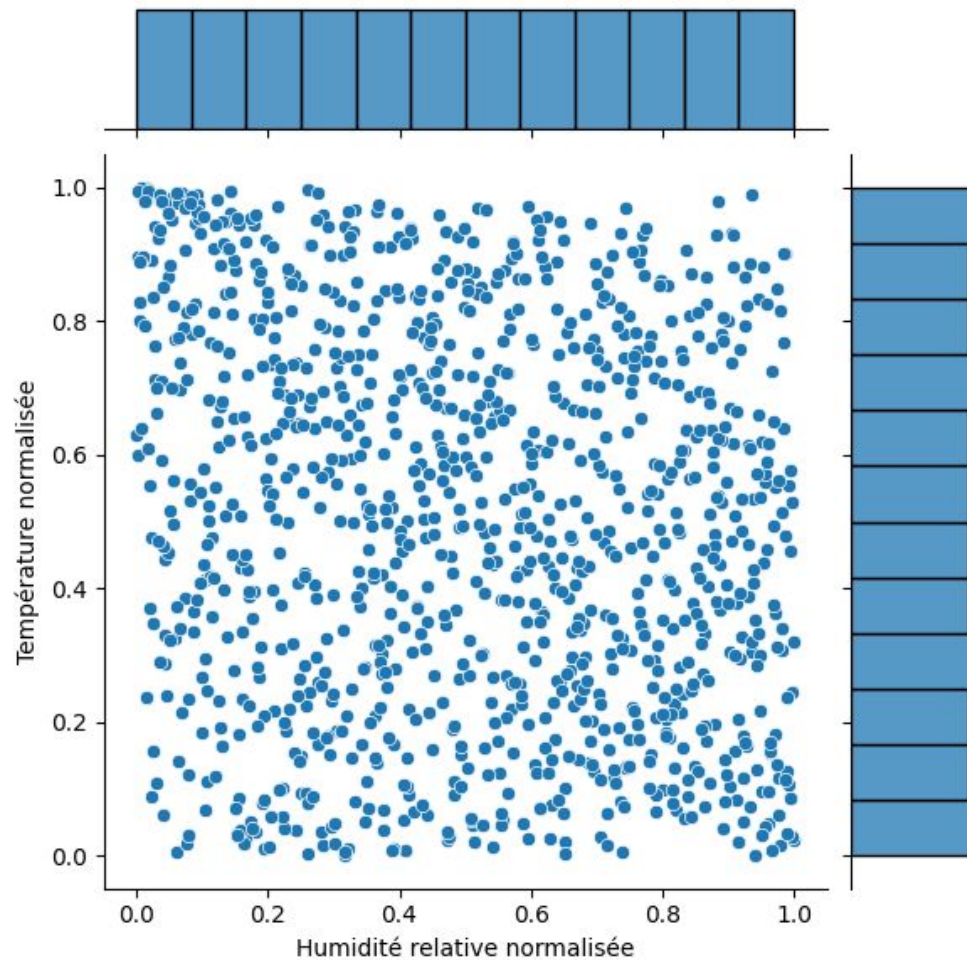
Algérie, désert



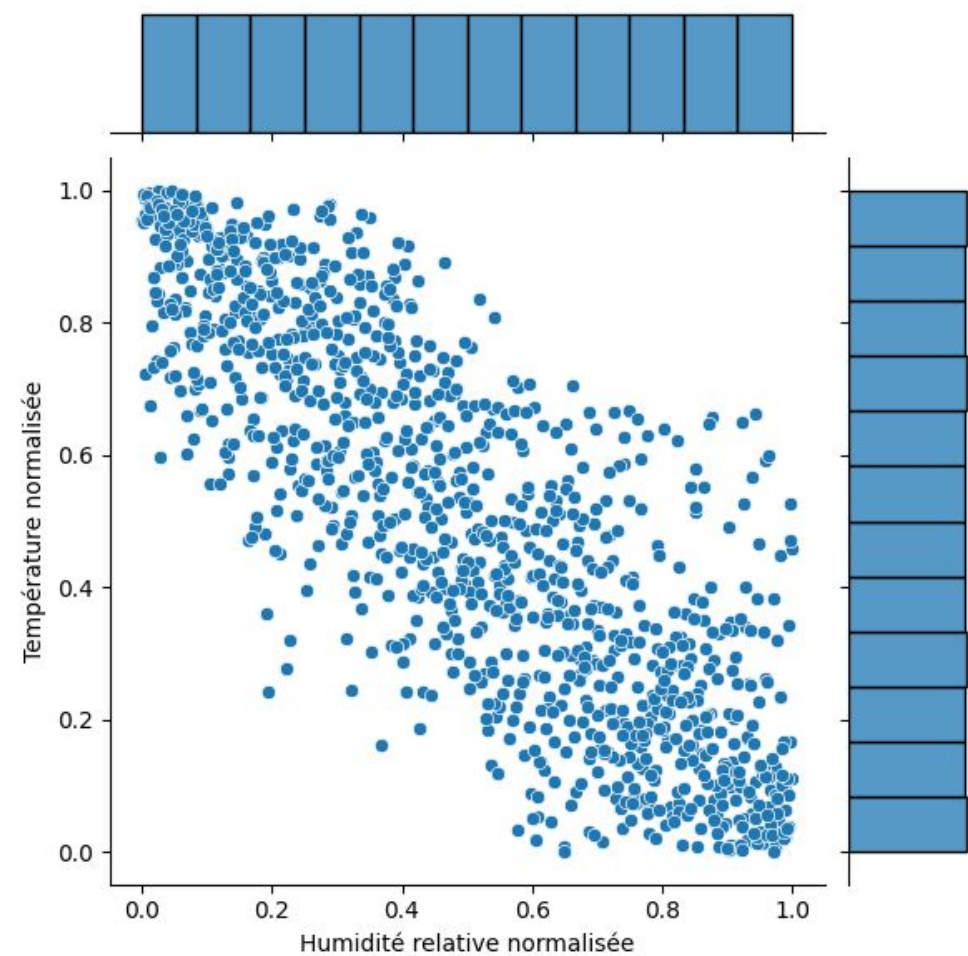
Zoom sur la chaleur et l'air sec, distribution conjointe des variables uniformisées

copula

Landes, France



Algérie, désert



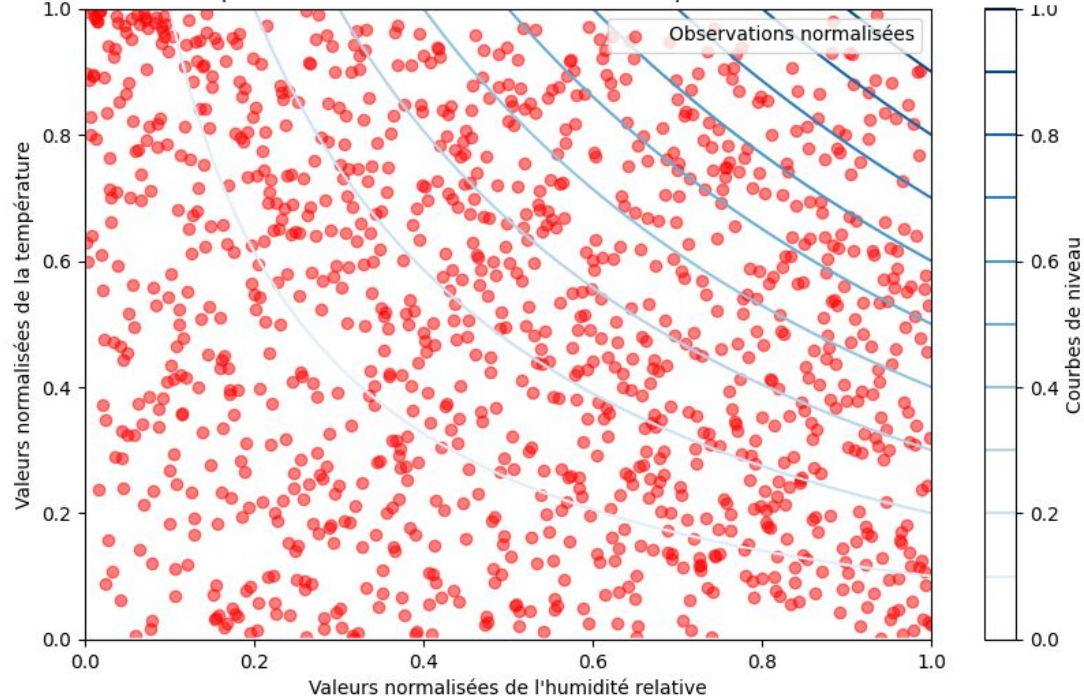
Zoom sur la chaleur et l'air sec, application des copules

copula

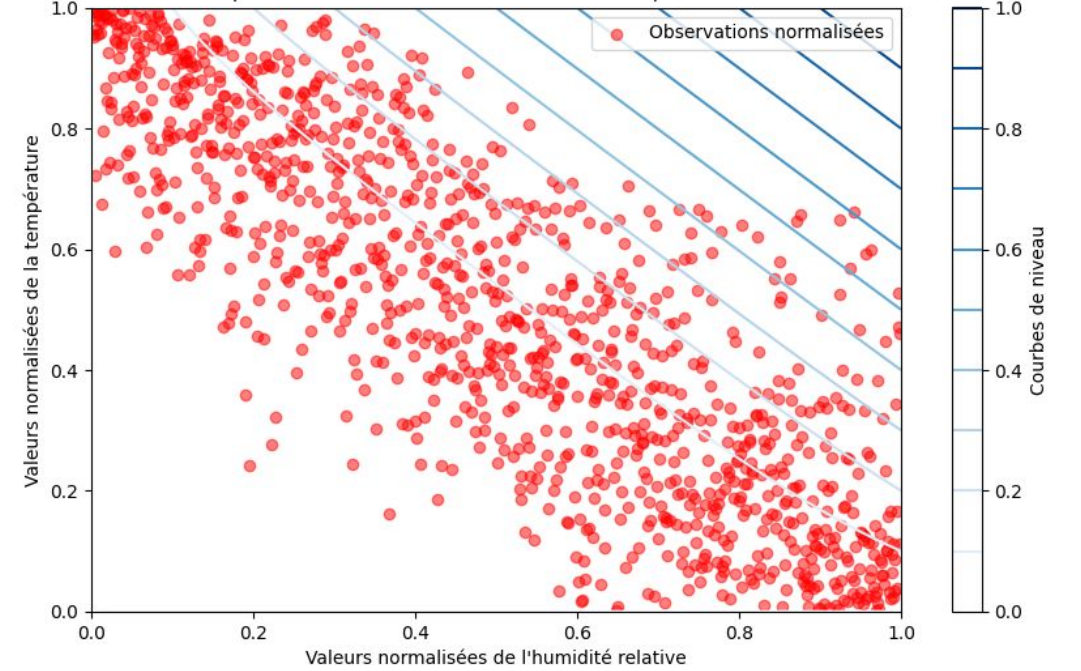
Algérie, désert

Landes, France

Copule sélectionnée : FRANK | Paramètre $\theta = -1.5742496675964401$ |



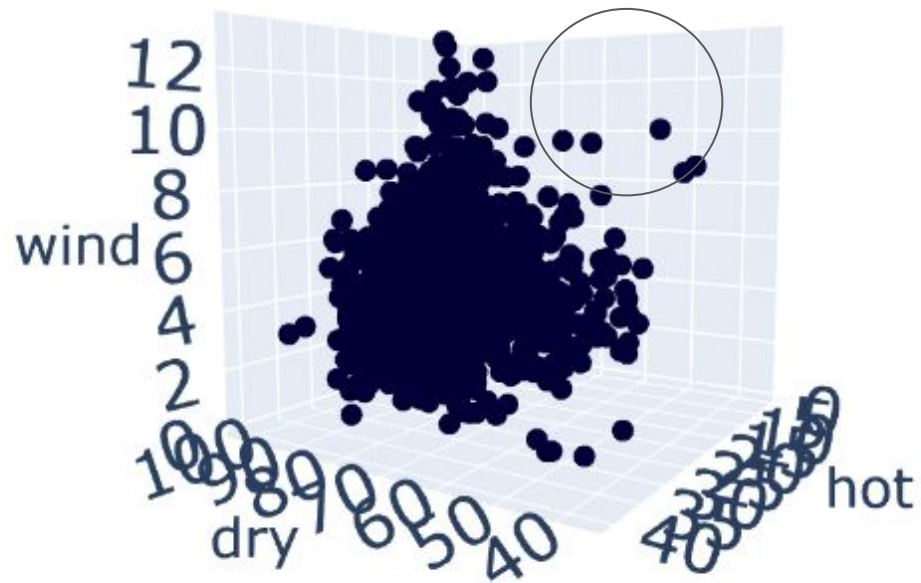
Copule sélectionnée : FRANK | Paramètre $\theta = -8.885612763761856$ |



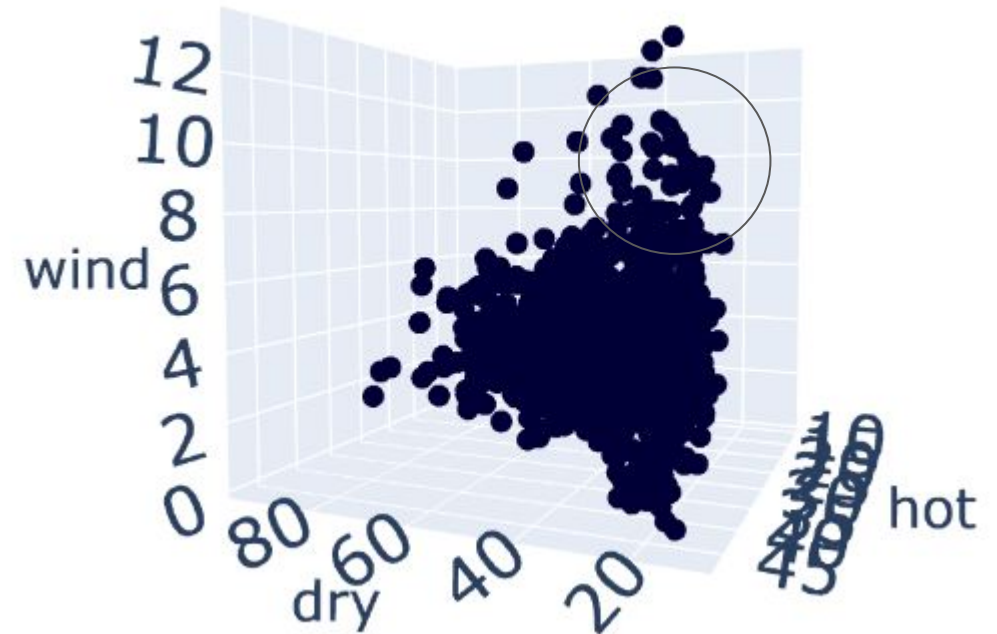
Il n'y a pas de co-occurrence de la chaleur, l'air sec et le vent extrêmes

copula

Distribution conjointe. Landes, France

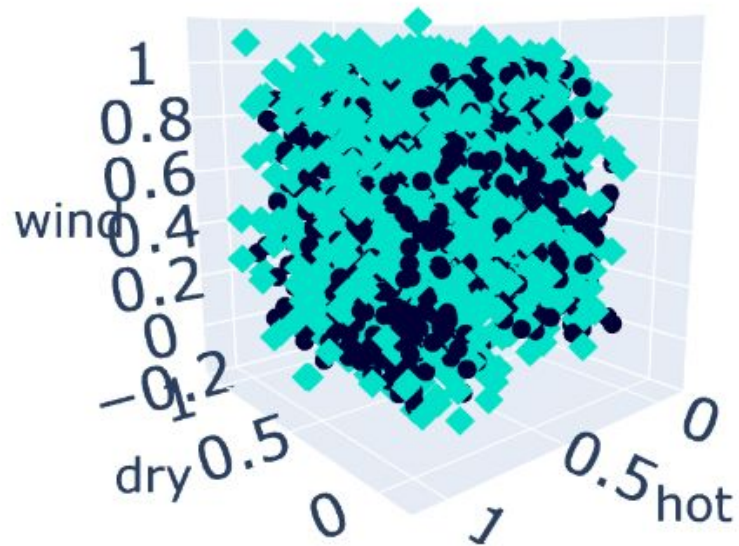


Distribution conjointe. Arabie Saoudite, désert

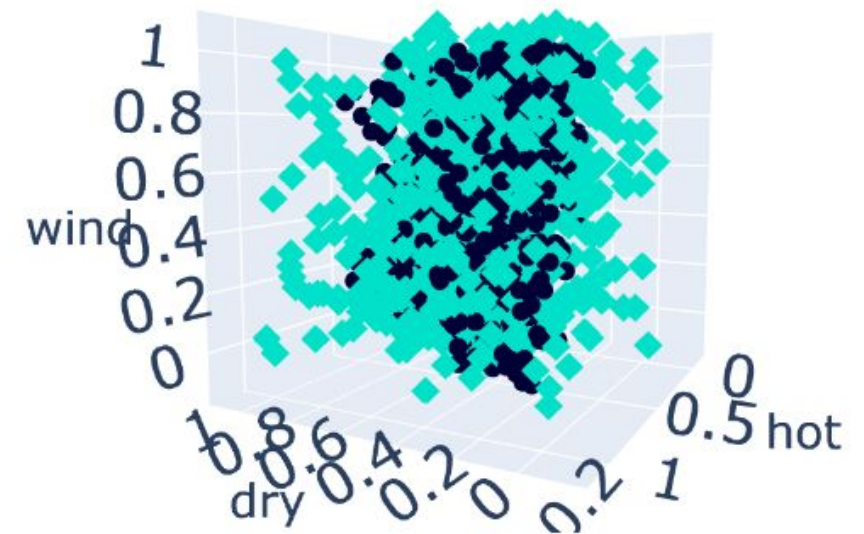


Visualisation d'une copules multivariés flexible, copula elle n'est représente une structure de dépendance

Landes, France



Arabie Saoudite, désert



Data
• Real
◆ Synthetic

Ce sont les données normalisés. Les copules modélisés sont des Vine copule, qui ont l'avantage d'être très flexible.

Certains pays comme la France n'ont presque pas connu de HDW ces trois dernières années

copula

Pays	Nombre total de HDW en 2022, 2023 et 2024
Allemagne	0
France	2
Espagne	91
Italie	150
Maroc	11649
Algérie	38159

Prochaines étapes et améliorations

copula

1

- calculer la probabilité d'apparition des HDW dans une zone cible

2

- chercher dans la littérature d'autres événements conjoints dangereux