

Dépendance entre variables météorologiques des typhons :
une exploration avec les copules

Florian Gimé & Tina Truong

Sommaire

I. Introduction	3
1. Un peu de météorologie	3
2. Des conséquences dévastatrices	4
3. Une catastrophe naturelle redoutée en réassurance	4
II. Application des copules	5
1. Description de la base de données	6
2. Premières visualisations	6
a. Sélection des variables bivariées	6
i. Rank-rank plot (diagrammes de dispersion)	6
ii. Tests d'indépendance	8
iii. Visualisation de la dépendance grâce aux Chi-plot et K-plot	9
b. Distribution des marginales	10
i. Pression	10
ii. Vitesse du vent	11
iii. Rayon	12
3. Estimation avec les copules	12
a. Vent et pression	13
i. Estimation semi-paramétrique	13
ii. Tests d'ajustement / d'adéquation des copules	14
b. Rayon et pression	15
i. Estimation semi-paramétrique	15
ii. Tests d'ajustement / d'adéquation des copules	16
III. Conclusion	17
IV. Références	18
V. Annexes	19

I. Introduction

1. Un peu de météorologie

La circulation des masses d'air dans l'atmosphère peut entraîner la formation d'anticyclones ou de cyclones. Ce sont des phénomènes météorologiques qui influencent les conditions climatiques d'une région durant une période donnée.

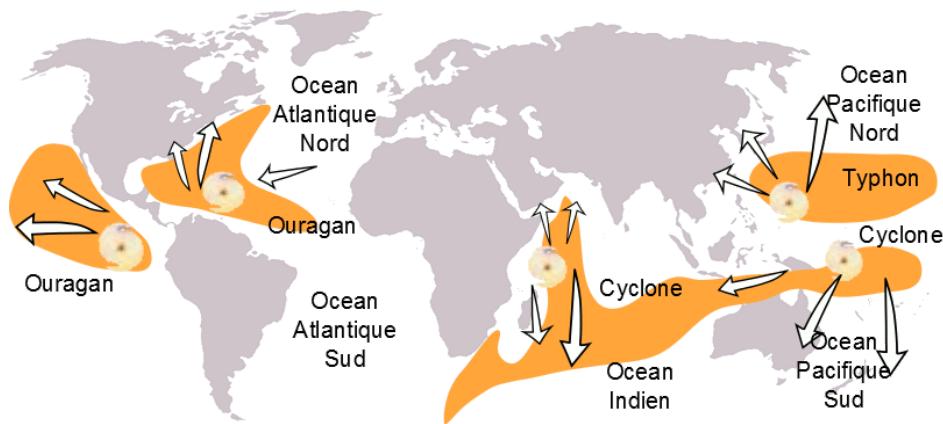
“Un cyclone, ou une dépression, est une zone de circulation atmosphérique qui se déploie autour d'un centre de basse pression” [1]. En effet, la pression mesurée au centre du cyclone est équivalente aux pressions les plus faibles que l'on puisse trouver au niveau de la mer.

Les phénomènes météorologiques résultant de la dépression évoluent généralement de manière proportionnelle à l'intensité des vents issus de cette dernière. Cela peut ainsi provoquer la formation d'une tempête tropicale, voire un ouragan. L'ouragan est la forme extrême du cyclone et peut être dévastateur s'il traverse une zone peuplée.

Trois conditions doivent être vérifiées pour qu'un ouragan se forme : une forte dépression, des “conditions atmosphériques propices à la formation d'un orage et une température de l'eau de l'océan d'au moins 26°C à une profondeur de 60m, qui constitue sa source d'énergie” [1]. Si ces trois conditions sont vérifiées, un ouragan peut se former et la vitesse des vents associés déterminent la puissance de celui-ci. L'échelle de Saffir-Simpson mesure en partie la vitesse des vents et classe en 5 niveaux les ouragans [3].

En fonction de sa localisation dans le monde, l'ouragan a une appellation différente :

- dans l'océan Atlantique ou dans l'océan Pacifique Nord-Est, ce sont des **ouragans**
- dans l'océan Indien, ce sont des **cyclones tropicaux**
- dans l'océan Pacifique Ouest, ce sont des **typhons**



Contrairement à un cyclone, un anticyclone se caractérise par une zone de pression plus élevée que dans ses environs. Il est généralement responsable du temps ensoleillé en période estivale.

2. Des conséquences dévastatrices

Le dégagement de chaleur latente au sein d'un cyclone tropical peut dépasser les 2×10^{19} joules par jour (équivalent à l'explosion d'une bombe thermonucléaire de 10 mégatonnes toutes les 20 minutes, ou encore 200 fois la capacité de production électrique mondiale en temps réel) [4].

Au large, les cyclones tropicaux sont responsables de vagues anormalement hautes et récurrentes et d'une forte pluie associée à des vents violents. Il est fréquent que des navires accostés soient endommagés du fait des collisions entre eux ou de l'intensité des vagues qui viennent les percuter. Par ailleurs, si un ouragan est amené à traverser un territoire peuplé, les dégâts tant au niveau des infrastructures qu'en termes de bilan humain peuvent être considérables. L'environnement extérieur est dangereux du fait d'un manque de visibilité à cause de fortes pluies et des débris transformés en projectiles à cause des vents violents. Des inondations peuvent résulter de ces cyclones tropicaux les jours suivants et engendrer des épidémies. L'environnement résultant peut rendre l'accès aux soins difficile voire impossible pour les populations touchées (inondations, chutes d'arbres, éboulements). Enfin, les installations électriques peuvent être endommagées et ne plus fournir en électricité les foyers. Les secours extérieurs peuvent également éprouver des difficultés à joindre les sinistrés.

3. Une catastrophe naturelle redoutée en réassurance

Du fait de leurs conséquences parfois dévastatrices pour les populations touchées (plusieurs centaines, voire milliers de victimes chaque année), les cyclones tropicaux sont redoutés par les réassureurs qui voient leur intensité augmenter avec le temps. Ils sont classés parmi les risques naturels les plus courants.

En décembre 1999, les tempêtes Lothar et Martin ont coûté autant que l'ensemble de l'assurance aux biens sur un an (12 milliards d'euros en France).

En août 2005, l'ouragan Katrina, qui a frappé le Deep South des Etats-Unis, Cuba et les Bahamas principalement, devient l'événement le plus coûteux de l'histoire de la réassurance avec 70 milliards d'euros de réparations.

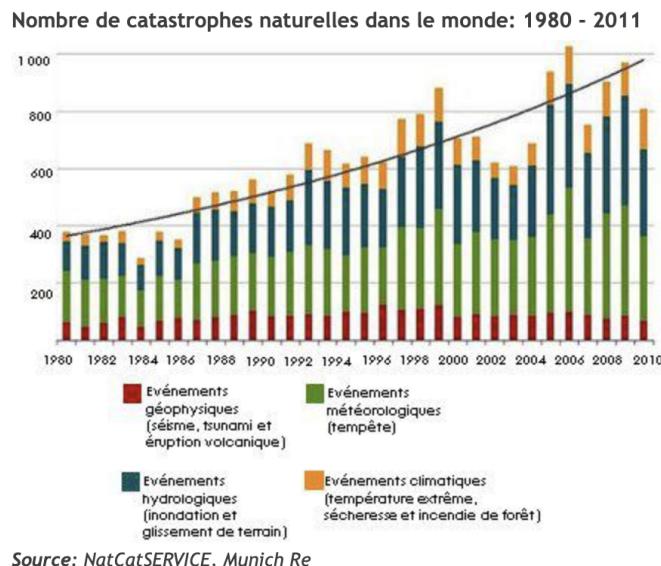
Le tableau ci dessous montre que historiquement, les ouragans sont connus pour causer le plus de dégâts :

Top 20 des sinistres couverts par l'assurance 1970-2011			
	Montant total du sinistre ¹	Événement	Pays
25 août 2005	74 700	Ouragan Katrina	Etats Unis, Caraïbes
11 mars 2011	35 000 ²	Tremblement de terre et tsunami	Japon
23 août 1992	25 600	Ouragan Andrew	Etats Unis, Bahamas
17 janvier 1994	21 200	Tremblement de terre	Etats Unis
6 septembre 2008	21 100	Ouragan Ike	Etats Unis, Caraïbes
27 juillet 2011	15 000-20 000 ²	Inondations	Thaïlande
2 septembre 2004	15 400	Ouragan Ivan	Etats Unis, Caraïbes
19 octobre 2005	14 500	Ouragan Wilma	Etats Unis, Caraïbes, Mexique
22 février 2011	14 000 ²	Tremblement de terre	Nouvelle Zélande
20 septembre 2005	11 600	Ouragan Rita	Etats Unis, Cuba
11 août 2004	9 600	Ouragan Charley	Etats Unis, Caraïbes, Cuba
27 septembre 1991	9 300	Typhon Mireille	Japon
15 septembre 1989	8 300	Ouragan Hugo	Etats Unis, Porto Rico
27 février 2010	8 200	Tremblement de terre et tsunami	Chili
25 janvier 1990	8 000	Tempête Daria	Europe
25 décembre 1999	7 800	Tempête Lothar	Europe
22 avril 2011	7 300	Tempête et tornade	Etats Unis
20 mai 2011	7 000	Tempête et tornade	Etats Unis
18 janvier 2007	6 600	Tempête Kyrill	Europe
15 octobre 1987	6 100	Tempête et inondations en Europe	Europe

¹ Montants indexés sur la base de 2011

² Estimation

En effet, les dégâts annuels attendus sont de 0,82 million de dollars lorsqu'il n'y a pas de typhon, et s'élèvent à 3,27 millions de dollars lorsque des typhons se sont produits.



Une tendance claire s'installe depuis les 30 dernières années. L'ampleur des dégâts s'explique par l'augmentation du taux de pénétration de l'assurance dans les zones à risques, par la croissance de la densité démographique et également par un bond des valeurs assurées. De plus, il est fort probable que l'activité humaine soit en partie responsable de la hausse des températures ayant pour conséquence une modification du cycle de l'eau. Dans le futur, une accélération du nombre de cyclones, d'inondations et pluies diluviales est à craindre.

Sous l'influence du réchauffement climatique et de l'élévation du niveau de la mer, la fréquence et l'intensité des catastrophes naturelles telles que les typhons, les tempêtes de pluie et les ondes de tempête ont augmenté. De plus, les dommages causés par ces catastrophes ont augmenté.

Récemment, les fonctions de copule sont de plus en plus utilisées dans l'analyse multivariée des événements hydrologiques. Par exemple, ils ont été utilisés pour l'analyse de la fréquence des crues. Par conséquent, les fonctions de copule sont utilisées pour établir la distribution de probabilité conjointe trivariée des typhons, des précipitations et des ondes de tempête. Affectés par les mêmes systèmes météorologiques, les typhons, les précipitations et les ondes de tempête sont trois variables corrélées.

II. Application des copules

Dans cette partie, nous allons étudier les typhons, qui sont des cyclones tropicaux du Pacifique Ouest et de la mer d'Asie de l'Est. Formés dans l'océan, ils peuvent causer des dégâts importants lorsqu'ils touchent la terre.

1. Description de la base de données

La [base de données](#) étudiée est disponible sur [Kaggle](#).

Cette base de données contient des informations sur la position, l'intensité et la taille des cyclones tropicaux sur 6 heures de la journée de 1980 jusqu'en 2016.

Les données décrivent des cyclones tropicaux capturés par des satellites dans le nord-ouest de l'océan Pacifique, et leur zone géographique inclut le nord de l'équateur, à l'ouest de 180°, comprenant la mer d'Asie de l'Est.

Les variables descriptives disponibles sont:

- **code**: l'identifiant du cyclone correspondant à la date du cyclone (sous format year NN-code MM-month DD-day HH-hour)
- **LAT**: latitude
- **LONG**: longitude
- **PRS**: pression centrale du cyclone ou *center pressure*, i.e. endroit où la pression est la plus faible
- **WND**: vitesse de vent maximale ou pour *maximum sustained wind (MSW)*
- **SiR34**: le rayon, en 34n mile/h (the radius, in km, of 34 kt, i.e., *tropical cyclone TC size*)
- **SATSer**: le capteur satellite à l'origine de l'observation

2. Premières visualisations

a. Sélection des variables bivariées

Notre base de données contient 14 998 lignes et 7 colonnes.

Dans notre étude, on ne s'intéressera qu'à des variables quantitatives et en particulier des variables continues. On peut alors enlever 2 colonnes, la colonne **code** qui donne l'identifiant du cyclone et la colonne **SATSer** qui correspond au satellite utilisé pour détecter le cyclone.

```
##          code    LAT    LONG   PRS    WND   SiR34 SATSer
## 1 198003040518 13.16 177.34 990 24.3 137.7 GOE-3
## 2 198003040606 15.97 177.20 987 27.5 182.9 GOE-3
## 3 198003040618 17.90 178.28 987 25.9 140.8 GOE-3
## 4 198003040700 18.75 179.01 992 22.2 111.6 GOE-3
## 5 198003040706 19.40 179.68 994 22.1 125.5 GOE-3
## 6 198015080812 14.15 157.04 996 17.6 139.8 GOE-3
```

Premières lignes de la base de données

i. Rank-rank plot (diagrammes de dispersion)

Nous avons représenté les diagrammes de dispersion entre les paires de variables quantitatives dans notre base de données (graphique à gauche ci-dessous). Cependant, comme nous l'avons vu en cours, cette représentation ne permet pas de déceler facilement la structure de dépendance entre les variables.

Nous travaillons alors sur le rank-rank plot (graphique à droite ci-dessous). Ce graphique nous montre que la latitude et la longitude du cyclone sont relativement indépendantes entre elles et aussi indépendantes des autres variables. Il y a donc une faible corrélation entre la localisation du cyclone, son intensité et sa taille.

En revanche, le rank-rank plot suggère d'utiliser une structure de copule pour caractériser la dépendance des extrêmes entre trois variables : PRS, WND et SiR34.

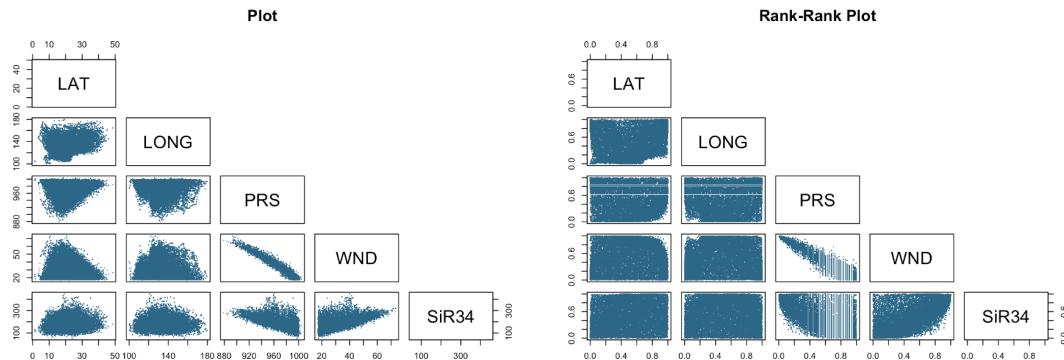
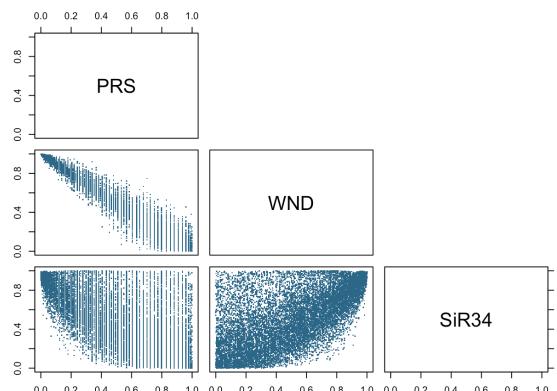


Diagramme de dispersion (gauche) et diagramme des rangs normalisés (droite)

Regardons donc plus près le rank-rank plot entre les trois variables PRS, WND et SiR34.



Relations entre rangs normalisés: PRS, WND et SiR34

Le graphique PRS - WND ci-dessus (pression et intensité du vent) suggère que :

- PRS et WND varient dans des sens opposés : plus la pression est basse, plus le vent sera fort. Ceci est évident, car un cyclone est le résultat d'une dépression et l'intensité de cette dépression détermine la puissance du cyclone. La vitesse du vent est réduite lorsque la pression est élevée, ce qui correspond bien à un anticyclone, où il y a peu de vents ou des vents très faibles.
- Il y a une forte asymétrie entre l'extrême en haut à gauche et l'extrême en bas à droite.
- La copule associée aurait une queue lourde, ce qui signifie qu'il y a une concentration relativement élevée de valeurs extrêmes.

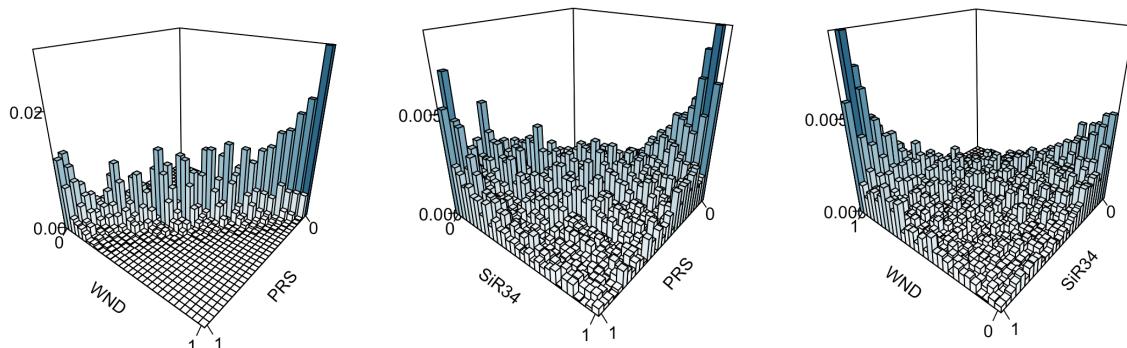
Le graphique entre SiR34 - PRS (taille du typhon et pression) suggère que :

- WND et SiR34 varient dans des sens opposés : plus la pression est basse, plus la taille du typhon sera importante.
- Il y a une faible asymétrie (on pourrait même considérer une symétrie), mais elle est moins marquée que PRS-WND.
- La copule aurait une queue plus légère, ce qui signifie qu'il y a moins de concentration dans les valeurs extrêmes.

Le graphique entre WND - SiR34 (intensité du vent et taille du typhon) suggère que :

- WND et SiR34 varient dans le même sens (relation sur la première bissectrice) : plus le vent est élevé, plus la taille du cyclone sera importante.
- Il y a également une faible asymétrie, mais elle est moins marquée que PRS-WND
- La copule aurait une queue plus légère, ce qui signifie qu'il y a moins de concentration dans les valeurs extrêmes.

Pour résumer, les histogrammes en 3D ci-dessous mettent encore plus en évidence l'asymétrie, le sens des variations, ainsi que le comportements des copules aux extrêmes.



Perspectives décrivant la relation bivariée entre les rangs normalisés

Notons que l'échelle du premier histogramme est presque 4 fois plus grande que celle des deux autres. La relation est donc bien plus marquée entre le premier couple pression-vent qu'avec les couples pression-rayon et rayon-vent.

Par la suite, on étudiera la relation entre la variable PRS (pression centrale) et les deux autres variables WND (vitesse du vent) et SiR34 (taille du cyclone). En effet, on cherchera à caractériser l'effet de la dépression sur la puissance et la taille du cyclone engendré.

ii. Tests d'indépendance

Pour tester l'indépendance des paramètres, on ne fera pas de tests de Pearson, car les données ne sont pas distribuées selon une loi normale. On effectue donc ici deux tests non paramétriques : le test de Kendall et le test de Spearman.

Dans tous les tests non-paramétriques effectués, on accepte l'hypothèse alternative, c'est-à-dire que le tau de Kendall / le rho de Spearman sont significativement différents de 0 (où 0 désigne le cas d'indépendance).

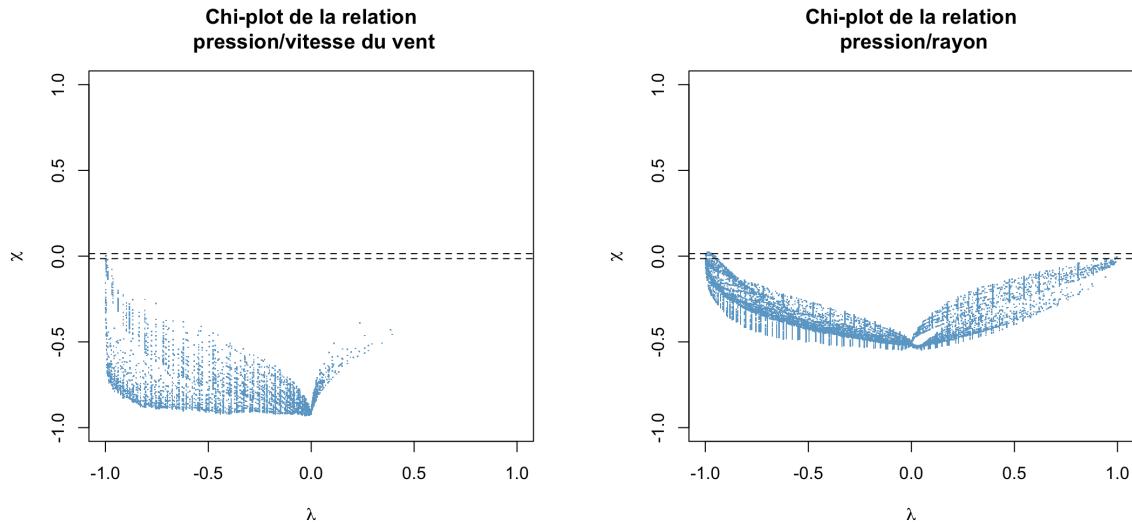
Tests d'indépendance	WND - PRS	SiR34 - PRS
Kendall	tau = - 0.88 z = - 161 p-value < 2.2e-16	tau = - 0.48 z = - 88 p-value < 2.2e-16
Spearman	rho = - 0.98 S = 1.1e+12 p-value < 2.2e-16	rho = - 0.65 S = 9.3e+11 p-value < 2.2e-16

Résultat des tests d'indépendance

iii. Visualisation de la dépendance grâce aux Chi-plot et K-plot

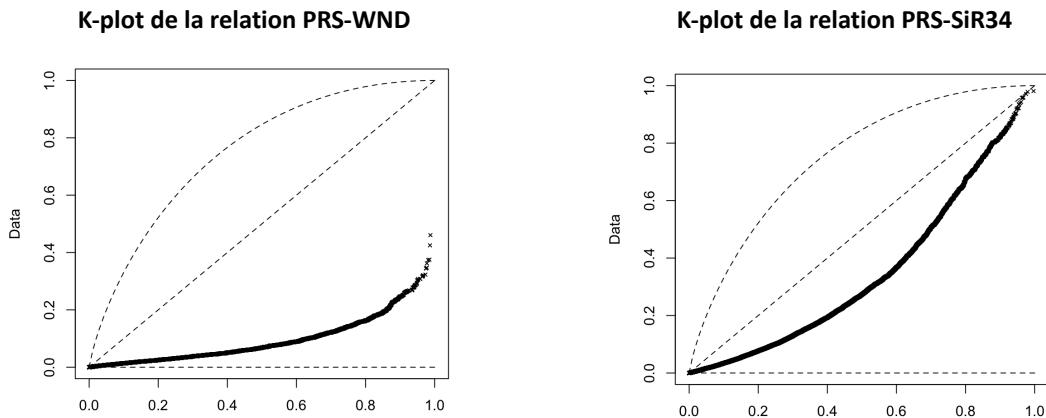
Nous pouvons aussi analyser les graphiques Chi-plot et K-plot pour confirmer visuellement que les variables étudiées ne sont pas indépendantes.

Sur ces Chi-plot, on voit bien que les données sont en dehors de la zone pointillée : il y a bien une dépendance entre les variables.



De plus, ces graphiques montrent que la dépendance est négative et viennent donc conforter notre intuition quant au sens de la variation pour les couples WND - PRS et SiR34 - PRS. Par ailleurs, nous pouvons voir à nouveau que la dépendance est encore plus forte pour le couple WND - PRS.

Il est également possible d'observer la dépendance des variables à travers un diagramme de Kendall ou K-plot. Il s'inspire directement de la droite de Henry en dimension 1:



Ici encore, les graphiques permettent de bien visualiser la dépendance négative entre la pression et les variables d'intérêt du typhon. Un K-plot plus convexe et qui tend vers la borne inférieure de Fréchet Hoeffding (situation de dépendance négative parfaite, représenté par la droite en pointillés horizontale) de la distribution témoigne d'une dépendance encore plus forte entre WND - PRS que SiR34 - PRS. En revanche, SiR34 - PRS est plus proche de la bissectrice en pointillé qui représente la situation d'indépendance parfaite.

b. Distribution des marginales

Si on veut estimer une copule par la **méthode paramétrique**, il faut pouvoir estimer les marginales par une distribution adéquate. En d'autres termes, nous tentons d'utiliser des lois usuelles pour caractériser les distributions des trois variables d'intérêt.

Dans la suite, nous allons faire des histogrammes des observations et tester différents estimateurs paramétriques et non paramétriques. Nous détaillons dans les lignes qui suivent les lois retenues, ainsi que leurs paramètres optimisés.

i. Pression

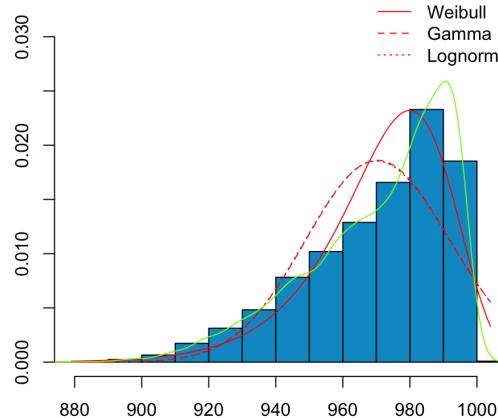
La distribution de la pression minimale possède un skewness négatif. Par conséquent, nous avons essayé d'optimiser les paramètres en faisant l'hypothèse que la pression au centre du cyclone suivait une loi asymétrique usuelle.

Parmi les lois testées (Gamma et log-normale), la loi qui minimise le critère AIC est la loi **Weibull** (voir annexes) de paramètres:

Forme	Echelle
61.8	980.2

En réalité, ce choix pouvait être anticipé, car les distributions Gamma et log-normale ont un skewness positif. L'algorithme optimise donc les paramètres jusqu'à avoir au mieux une distribution symétrique.

Répartition de la pression



ii. Vitesse du vent

La vitesse maximale du vent peut être représentée par une distribution asymétrique avec un skewness positif.

Avec les critères AIC/BIC, on peut conclure que la loi log-normale semble être un bon candidat pour représenter la distribution de la vitesse du vent aux bords du cyclone.

Nous retenons comme paramètres pour la loi **lognormale** :

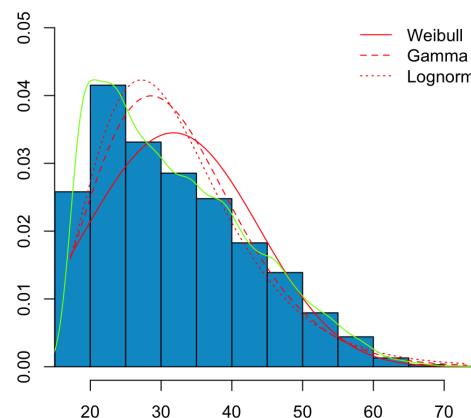
log-moyenne

3.41

log-écart-type

0.33

Répartition de la vitesse du vent



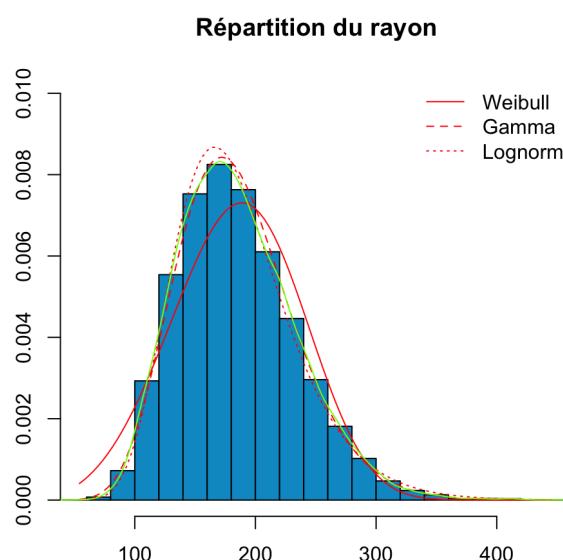
iii. Rayon

La distribution des observations du rayon du cyclone est assez symétrique. En réalité, la loi normale n'est pas la meilleure loi usuelle pour la décrire du fait d'une queue à droite plus importante.

Les lois Gamma et log-normale s'équivalent. Nous conserverons la loi Gamma pour la suite. Remarquons aussi que la densité de la loi Gamma est très proche de la densité obtenue avec la méthode des noyaux gaussienne (courbe en vert).

Nous notons ci-dessous les paramètres optimaux trouvés pour la loi **Gamma** :

Forme	Echelle
14.4	0.078



En conclusion, nous n'avons pu seulement trouver une bonne estimation des densités pour la variable SiR34 (taille du typhon). Ainsi, nous ne pouvons pas faire la méthode paramétrique pour **estimer les copules**.

Nous allons donc utiliser la méthode **semi-paramétrique**.

3. Estimation avec les copules

Nous estimons les fonctions copules avec le **critère de pseudo-log vraisemblance** puis sélectionnons les meilleures copules grâce au **critère AIC**.

Nous avons trouvé pour chacune des deux couples, deux copules possibles. La première solution est une copule plus classique, avec un paramètre et la deuxième copule est une copule

de la classe BB avec deux paramètres. Pour donner un exemple de copule BB, nous donnons l'expression de la copule BB6, dite de Joe-Gumbel, ci-dessous :

$$C(u, v) = 1 - (1 - \exp(-(-\log(1 - (1 - u)^{\theta})^{\delta} + (-\log(1 - (1 - v)^{\theta})^{\delta})^{\frac{1}{\delta}}))) ,$$

avec $\theta, \delta \geq 1$, $u \geq 0$ et $v \leq 1$.

a. Vent et pression

i. Estimation semi-paramétrique

La copule de Gumbel peut être envisagée pour le couple PRS-WND. Elle est souvent utilisée pour représenter la dépendance asymétrique entre les variables, où l'une des variables peut influencer l'autre, mais pas vice versa. La forme de la copule de Gumbel est déterminée par un paramètre de forme. Ici, le paramètre de forme suggéré est de 7.03, ce qui suggère une forte dépendance des extrêmes. La copule de Gumbel est souvent utilisée pour les risques catastrophes et tempêtes.

La copule BB6 est elle aussi envisageable.

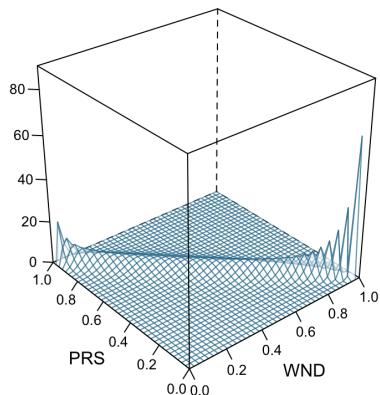
Méthode d'estimation	Rotated Gumbel 270 degrees	Rotated BB6 270 degrees
maximum pseudo-likelihood	par: -7.032 Error: 0.082	par: -1.589 par2: -5.198
Inversion of Kendall's tau	par: -8.683 Error: 0.094	
Inversion of Spearman's rho	par: -7.886 Error: 0.102	

Estimation des copules avec différentes méthodes

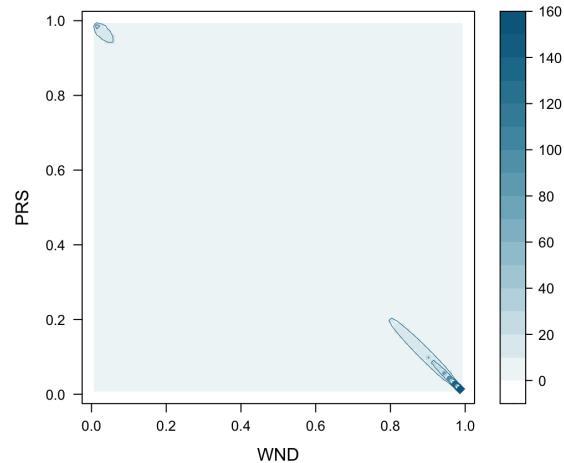
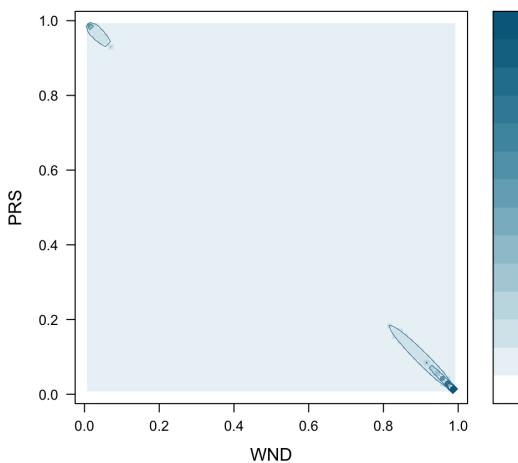
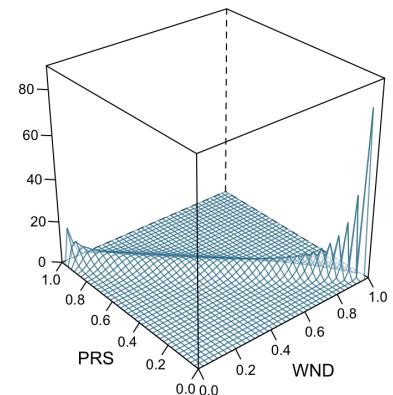
Sur le critère des erreurs commises, on retiendra la copule de Gumbel de paramètre -7.0 et la copule BB6 avec paramètres -1.6 et -5.2. Selon le critère AIC, la copule BB6 est meilleure que la copule de Gumbel.

Représentons tout de même ces copules avec un wireframe plot suivi d'un contour plot:

Rotated Gumbel 270 degrees



Rotated BB6 270 degrees



Visuellement, il n'y a pas de différences notables entre les deux copules. Hors, BB6 requiert un paramètre en plus, et ce sans changer radicalement la copule. Il est donc préférable de retenir la copule de Gumbel pour PRS-WND.

ii. Tests d'ajustement / d'adéquation des copules

Dans cette partie, on fera des tests statistiques pour vérifier l'adéquation des copules.

La copule BB6 ne permet pas d'améliorer significativement le modèle par rapport à la copule de Gumbel.

WND-PRS	rotated Gumbel copula	rotated BB6 copula
Test Cramer Von Mises	\$statistic.CvM 2.07	\$statistic.CvM 1.57
Test Kolmogorov Smirnov	\$statistic.KS 3.60	\$statistic.KS 2.26

b. Rayon et pression

i. Estimation semi-paramétrique

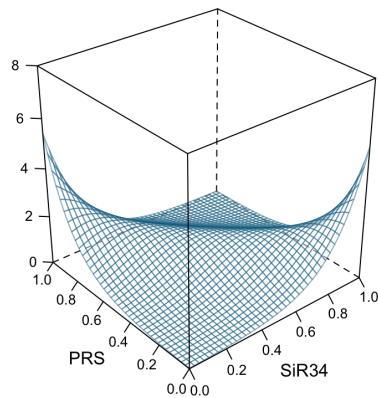
La copule BB8 est meilleure que la copule de Frank selon le critère AIC. La copule de Frank est une copule symétrique. Il est aussi possible d'utiliser la copule BB8, une copule asymétrique.

Méthode d'estimation	Frank	Rotated BB8 270 degrees
maximum pseudo-likelihood	par: -5.26 error: 0.059	par: -6 par2: -0.62
Inversion of Kendall's tau	par: -5.407 Error: 0.005	
Inversion of Spearman's rho	par: -5.093 Error: 0.073	

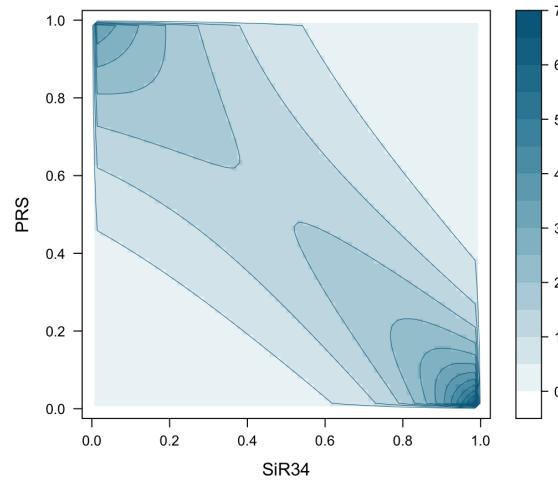
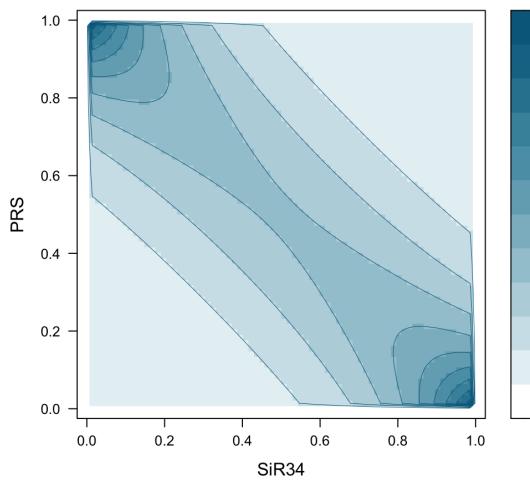
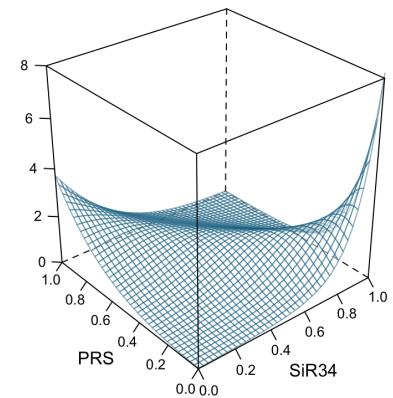
Meilleures copules au sens de la log vraisemblance

Visuellement, il y a une différence notable entre les deux copules puisque la copule de Frank est symétrique, contrairement à la copule BB8.

Frank



Rotated BB8 270 degrees



ii. Tests d'ajustement / d'adéquation des copules

La copule BB8 permet d'améliorer significativement le modèle par rapport à la copule de Frank et permet de capter une asymétrie.

SiR34 - PRS

rotated Frank copula

rotated BB8 copula

Test Cramer Von Mises

\$statistic.CvM
1.79

\$statistic.CvM
0.34

Test Kolmogorov Smirnov

\$statistic.KS
2.26

\$statistic.KS
1.33

III. Conclusion

Cette application des copules nous a permis de caractériser les typhons, ou plus généralement, les cyclones, qui sont des phénomènes naturels très redoutés pour le secteur de l'assurance et de la réassurance. Les variables d'intérêt ont pu être identifiées et les relations entre elles visualisées.

Dans le cas des typhons étudiés, une forte dépression entraîne un cyclone de forte intensité, qui peut être caractérisé par une copule de Gumbel. Elle entraîne aussi un cyclone de taille plus importante, qui peut être caractérisé par une copule BB8 asymétrique. De plus, cette relation est plus importante entre la pression en l'intensité du cyclone (tau de Kendall de -0.88) qu'entre la pression et la taille du cyclone (tau de Kendall de -0.48).

Cependant, il faut noter que les cyclones avec des vents moins intenses peuvent tout de même causer des dommages plus importants que ceux dont l'intensité est plus importante, car cela dépend de l'endroit frappé et des dangers qu'ils provoquent. Il est alors possible d'étudier les localisations des cyclones et leurs trajectoires. Les tempêtes tropicales peuvent elles aussi causer de graves dommages et des pertes en vies humaines, surtout en raison des inondations.

IV. Références

Base de données, Kaggle, <https://www.kaggle.com/datasets/concyclics/chinesetyphoon>

[1] Les cyclones et les anticyclones, alloprof,
https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-cyclones-et-les-anticyclones-s13_60

[2] Cyclone, Wikipedia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cyclone>

[3] Echelle de Saffir-Simpson,
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_de_Saffir-Simpson

[4] Cyclone tropical, Wikipedia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Cyclone_tropical

[5] Les cyclones, une force destructrice,
<https://www.atlas-mag.net/article/les-cyclones-une-force-destructrice>

[6] Estimation de copules et cyclones, Joao Neto,
<http://www.di.fc.ul.pt/~jpn/r/copula/index.html>

[7] Xu H, Xu K, Bin L, Lian J, Ma C. Joint Risk of Rainfall and Storm Surges during Typhoons in a Coastal City of Haidian Island, China
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6069017/#B2-ijerph-15-01377>

[8] La réassurance des catastrophes naturelles, Atlas magazine,
<https://www.atlas-mag.net/article/la-reassurance-des-catastrophes-naturelles>

[9] How to fit rotated Gumbel Copula,
<https://stat.ethz.ch/pipermail/r-help/2016-August/441216.html>

[10] Elements of Copula Modelling with R,
http://copula.r-forge.r-project.org/book/04_fitting.html

V. Annexes

Résultats avec critères AIC et BIC

Pression

Loi estimée	Critère AIC	Critère BIC
Gamma	134508.7	134524.0
Log-normale	134613.2	134628.5
Weibull	131054.5	131069.7

Vitesse du vent

Loi estimée	Critère AIC	Critère BIC
Gamma	111878.5	111893.7
Log-normale	111490.6	111505.8
Weibull	113482.1	113497.3

Rayon

Loi estimée	Critère AIC	Critère BIC
Gamma	158442.1	158457.4
Log-normale	158448.7	158464.0
Weibull	160100.0	160115.2