

Caractérisation des vagues de chaleur atmosphériques en Nouvelle-Calédonie

E. Cariou^{*1}, C. Menkes² and A. Peltier³

¹ INPT-ENM, Toulouse, France.

² IRD, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

³ Météo-France, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

October 12, 2023

RÉSUMÉ

La Nouvelle-Calédonie, située dans une région subtropicale, présente un climat varié, mêlant caractéristiques tempérées et tropicales et influencé par sa morphologie géographique. Cette étude vise à faire un état des lieux des vagues de chaleur ayant impacté la Nouvelle-Calédonie au cours des 40 dernières années, à l'aide de l'indice EHF (Excess Heat Factor) généré à partir des données de température in-situ, en huit stations Météo-France et des réanalyses ERA5 Land. Les climatologies et les tendances ont révélé, en moyenne, l'occurrence de 4 à 5 vagues de chaleur par an, durant 4.5 à 5 jours. Elles sont plus nombreuses sur la côte Sud-Est et sur les îles Loyauté, mais plus intenses sur le relief et la côte Ouest. Une augmentation significative du nombre de vagues de chaleur sur la majorité du territoire est observée. L'ENSO et les régimes de temps influencent significativement le nombre et les intensités des canicules.

Mots clés: *vagues de chaleur atmosphériques, climatologies, tendances, téléconnexions, analyse archétypale.*

Introduction

Les territoires insulaires du Pacifique font face à de nombreux aléas naturels (vagues de chaleur atmosphérique et marine, érosion côtière, montée des eaux), de plus en plus marquants dans un contexte de changement climatique. La température moyenne sur terre dans les îles du Pacifique a augmenté de 1.1°C depuis 1951 et sept des huit années les plus chaudes jamais enregistrées, ont eu lieu au cours des 15 dernières années. En moyenne, sur la période 1951-2020, nous observons une augmentation du nombre de jours chauds de 3.1% par décennie (Marra and Warrick 2022). La Nouvelle-Calédonie n'échappe pas à cette tendance. Avec une température moyenne annuelle de 24,7 °C (+1.3°C par rapport à la normale climatique), 2022 est l'année la plus chaude jamais enregistrée sur le territoire (Météo-France 2023). En plus du contexte du réchauffement climatique, ces extrêmes chauds ont été favorisés par La Niña, qui a maintenu un environnement océanique chaud dans la région. Cette situation a favorisé l'occurrence des régimes de temps chauds et instables (alizés instables et temps tropicaux). En effet, la Nouvelle-Calédonie se situant en région subtropicale, son climat présente des caractéristiques tempérées et tropicales. Des variabilités de grandes échelles, comme l'ENSO à l'échelle interannuelle ou l'Oscillation de Madden-Julian (MJO) à l'échelle intra-saisonnière, modulent son climat. Des régimes de temps (Météo-France 2023), caractérisés par des situations synoptiques propres, ont été définis par Météo-France et favorisent des conditions météorologiques locales. De plus, la Nouvelle-Calédonie, longue de 400 km et large de 50 km, est orientée selon un axe Sud-

Est/Nord-Ouest. Elle est composée d'une île principale, "la Grande Terre", traversée par une chaîne de montagnes culminant à 1629m. Elle compte également d'anciens atolls coralliens, les îles Loyauté sur sa côte Est et l'île des Pins au Sud. Du fait de ces différentes caractéristiques morphologiques (flancs abrupts des reliefs sur la côte Est, grandes plaines sur la côte Ouest), la Nouvelle-Calédonie connaît une distribution très variable de son climat.

Il n'existe pas de définition universelle permettant de caractériser les vagues de chaleur (Perkins and Alexander 2013). Une vague de chaleur correspond à une période de plusieurs jours durant laquelle des conditions sont supérieures à la normale. Dans cette étude, l'EHF (Excess Heat Factor) Nairn and Fawcett (2015), a été choisi pour étudier les vagues de chaleur. Combinant anomalies de court et long terme, il permet caractériser excès de chaleur et stress thermique.

L'objectif de cette étude est de caractériser spatialement et temporellement les vagues de chaleur atmosphériques ayant eu lieu au cours des 40 dernières années en Nouvelle-Calédonie. Le travail s'attache à répondre aux problématiques suivantes : quelles sont les caractéristiques des vagues de chaleur (durée, intensité, nombre) ? Quelles sont les tendances ? Quels sont les mécanismes atmosphériques en jeu ? Les épisodes les plus marquants étaient-ils localisés ou concernaient-ils tout le territoire ?

Ainsi, la Section 1 introduit l'indice EHF, sa définition et son comportement. Ensuite, la Section 2 traite des données et des méthodes utilisées pour répondre à ces problématiques et présente les résultats obtenus. Pour finir, les conclusions et perspectives sont données en Section 3.

1 EHF : Excess Heat Factor

L'EHF, uniquement basé sur les températures moyennes journalières est facilement mis en oeuvre au sein des gouvernements dans le cadre de la prévision des canicules. Il a pour mérite de mesurer l'intensité des vagues de chaleur localement en prenant en compte l'acclimatation et de considérer, en plus des températures maximales journalières, les températures minimales. Cet indice est défini comme ceci :

Pour un jour i ,

$$EHF = \max(1, EHI_{acc}) * EHI_{sig} \quad (1)$$

où

$$EHI_{acc} = \frac{TM_i + T_{i-1} + TM_{i-2}}{3} - \frac{TM_{i-3} + \dots + TM_{i-32}}{30}$$

*Contact: enora.cariou@meteo.fr

$$EHI_{sig} = \frac{TM_i + TM_{i-1} + TM_{i-2}}{3} - T90\%$$

T90% représente le centile 90 sur une période choisie et $TM_i = \frac{(T_{max} + T_{min})_i}{2}$

L' EHI_{sig} compare la température sur trois jours par rapport à un extrême climatologique : s'il est positif, alors la température est inhabituellement supérieure à la statistique climatique locale. Le centile 90 est calculé pour chaque jour de l'année, sur une fenêtre de 15 jours centrée sur ce jour, sur une période de 30 ans. Cet indice correspond à un facteur météorologique.

L' EHI_{acc} décrit une anomalie de température moyennée sur 3 jours par rapport aux 30 jours précédents. C'est un facteur d'acclimatation : s'il est positif, alors il indique une augmentation de la température à laquelle la population locale n'aurait pas eu le temps de s'acclimater.

Dans cette définition, c'est le facteur météorologique qui permet de détecter la vague de chaleur. Le facteur d'acclimatation, quant à lui, contribue à amplifier l'intensité de la vague de chaleur, grâce à l'historique des trente jours précédents. Une période est classée vague de chaleur si pendant au moins trois jours consécutifs, l'EHF est positif. Une valeur faible d'EHF indique une vague de chaleur de faible impact.

2 Données et méthodes

Cette section introduit les données utilisées pour la réalisation de l'étude. Elle détaille également les méthodes statistiques et climatologiques utilisées pour répondre aux problématiques introduites précédemment.

2.1 Données

Pour étudier les vagues de chaleur à l'aide de l'indice EHF, des séries quotidiennes de températures maximales et minimales sont requises. Le travail présenté dans ce rapport s'appuie sur les données in-situ de huit stations Météo-France, ainsi que sur les données issues des réanalyses ERA5 et ERA5 Land du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme. La caractérisation des vagues de chaleur atmosphériques dans ce projet se fait en deux temps : étude à l'échelle de la station Météo-France, puis sur l'ensemble du territoire.

Huit stations Météo-France (Koumac, La Roche, Magenta, Nessadiou, Nouméa, Ouanaham, Poindimie, Ponerihouen) sont étudiées. A l'aide des séries journalières de températures maximales (T_x) et minimales (T_n) in-situ et extraites des réanalyses au point de grille de terre le plus proche, l'EHF est calculé à l'aide du programme ClimPACT2 (<https://github.com/ARCCSS-extremes/climpact2>). Ce package codé en R, permet de calculer une soixantaine d'indices d'extrêmes climatiques, à partir des séries quotidiennes de précipitation et T_x et T_n . Cette étape de génération des données permet donc, pour chaque station, de récupérer les séries journalières des indices EHF, EHI_{sig} et EHI_{acc} , au format txt.

L'utilisation de ClimPACT2 avec des fichiers netCDF est moins pratique qu'avec les fichiers txt. En effet il n'est pas trivial de récupérer les séries quotidiennes des différents indices. Ainsi, pour contourner ce problème, un code python, calculant l'EHF de la même manière que ClimPACT2, est utilisé (<https://github.com/tammasloughran/ehfheatwaves>). Les indices EHF, EHI_{sig} et EHI_{acc} sont donc calculés pour chaque jour, en chaque point de grille, et stockés dans un fichier netCDF.

2.2 Méthodes

2.2.1 Climatologies et tendances

Pour caractériser spatialement et temporellement les vagues de chaleur, trois paramètres sont étudiés : nombre de vagues de chaleur, durées moyennes des vagues de chaleur et intensités (EHF) moyennes des vagues de chaleur. Pour chaque paramètre, les climatologies annuelles, saisonnières et les tendances sont étudiées sur la période 01/01/1985 - 31/12/2021.

Concernant les climatologies annuelles, pour ne pas couper la saison chaude en deux, une année est considérée du 1er juin au 31 mai. Pour les climatologies saisonnières, la saison chaude s'étend de novembre à mars et la saison fraîche d'avril à octobre.

Pour l'étude des tendances à long terme, un test de Mann-Kendall est réalisé. Ce test non paramétrique permet d'identifier une tendance dans une série temporelle. Mise en place du test :

- H_0 : "il n'existe pas de tendance dans la série temporelle"
- $\alpha = 0.05$

Rejeter H_0 au niveau alpha, revient à dire qu'il existe une tendance dans la série temporelle. Ce test est réalisé en chaque station avec les données in-situ et ERA5 Land puis en chaque point de grille avec les données ERA5 Land.

2.2.2 Téléconnexions

Pour tester les liens entre l'occurrence des vagues de chaleur, l'ENSO et les types de temps, des tests statistiques du Chi2 entre les nombres observés et théoriques (au sens de l'hypothèse nulle) de jours sous vague de chaleur sous les différentes phases ENSO ou types de temps, sont réalisés. Les hypothèses nulles H_0 testées affirment que les nombres observés de jours sous vague de chaleur ne dépend pas de l'ENSO (test 1), ni du type de temps (test 2). Les occurrences des vagues de chaleur sont calculées à partir des données in-situ, entre 1985 et 2021. Les nombres théoriques (au sens de H_0) dépendent des probabilités d'occurrence des phénomènes étudiés.

- Premier test (type de temps) : sur la période 1985-2021, 2213 jours sont classés canicule, appartenant à un des 5 types de temps. En moyenne annuelle, les probabilités d'occurrence de ces types de temps sont 48.2% pour Alizé Stable (AS), 22.4% pour Alizé instable (AI), 14.8% pour Temps Tropical (TT), 9.6% pour Perturbation Australe (PA) et 5.0% pour Anticyclone Faible (AF). Le nombre théorique de jours de canicule, pour chaque type de temps, correspond au pourcentage correspond des 2213 jours.
- Second test (ENSO) : sur cette même période, 23% des jours sont sous régime Niño, 27% en Niña et 50% Neutre. Le nombre théorique de jours pour chaque phase ENSO est calculé, comme précédemment, en prenant le pourcentage correspondant. L'indice ENSO utilisé est l'indice Niño 3.4.

Si la pvalue est inférieure à 0.05 et que l'erreur $R = \frac{\text{observé} - \text{attendu}}{\sqrt{\text{attendu}}}$ est supérieure (en valeur absolue) à 2, alors la phase ENSO ou le type de temps est considéré comme un contributeur majeur de la significativité du test Jérôme Lefèvre (2010).

2.2.3 Episodes les plus intenses

L'étude des vagues de chaleur les plus intenses a été réalisée à l'aide d'une méthode d'apprentissage non supervisée, l'Analyse

Archétypale (AA) (Christopher C. Chapman 2022). Cette technique permet d’approximer chaque point, par une combinaison convexe d’archétypes situés sur l’enveloppe des données. Ces archétypes sont eux-mêmes construits par une combinaison linéaire des données, ce qui rend leur interprétation aisée. L’algorithme en jeu derrière cette méthode d’analyse archétypale permet de trouver des archétypes approximativement sur l’enveloppe convexe des données (Adele Cutler 1994). Elle permet donc de détecter des patterns des extrêmes d’un jeu de données.

Soit $X_{s \times t}$, la matrice contenant les données initiales. L’AA revient à résoudre le problème d’optimisation

$$\arg \min_{C,S} \|X - XCS\|_F^2 \quad (2)$$

où $\|\cdot\|_F^2$ correspond à la norme de Frobenius, $C_{t \times p}$ et $S_{p \times t}$ sont des matrices stochastiques. p correspond au nombre d’archétypes choisi au préalable, avant de lancer l’algorithme.

Dans cette étude, l’AA est appliquée aux données EHF, seuillées à 0 (0 s’il n’y a pas de vague de chaleur), sur la saison chaude (de novembre à mars), de 1981 à 2021. Cette étude permet donc d’étudier les patterns spatiaux et temporels des vagues de chaleur les plus intenses. Le lien avec l’ENSO est également exploré dans cette étude en comparant les probabilités d’expression des archétypes et l’indice Nino3.4.

3 Résultats

3.1 Climatologies annuelles et saisonnières

Avec les données ERA5 Land, les climatologies annuelles Fig. 1 révèlent en moyenne 4 à 5 vagues de chaleur par an sur le territoire, avec un nombre plus important sur la côte Sud-Est et les îles Loyauté (5 à 6). Elles durent en moyennes 4 à 5 jours, sont plus longues encore sur les Loyauté et plus intenses sur le relief et la côte Ouest de la Grande Terre. Ces résultats sont cohérents avec les données in-situ. Cependant avec les observations des deux stations météorologiques situées sur les îles Loyauté (Ouanaham à Lifou et La Roche à Maré) ne se démarquent pas des autres, contrairement au modèle.

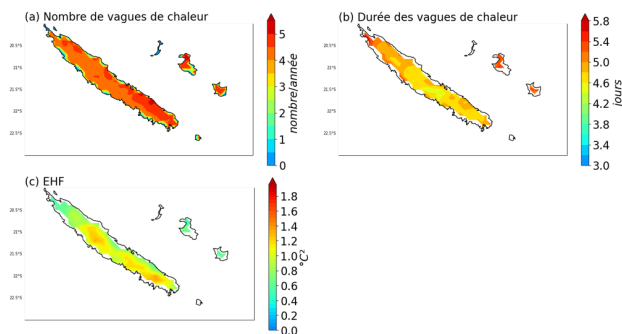


Figure 1: Climatologies annuelles du (a) nombre de vagues de chaleur, (b) des durées, (c) des intensités (EHF) sur la période 1985-2021.

Les climatologies saisonnières révèlent des vagues de chaleur plus longues et plus intenses lors de la saison fraîche que lors de la saison chaude.

3.2 Tendances

Les tests de tendance réalisés avec les données in-situ montrent une augmentation significative du nombre de vagues de chaleur,

en chaque station, à raison d’un épisode par décade. Les modèles semblent quant à eux sous-estimer cette tendance car aucun point de grille ne relève de tendance significative. Concernant les durées et les intensités, le signal est moins clair. Les données in-situ et les réanalyses ne montrent pas de tendances significatives pour les durées et très peu de points pour les intensités.

3.3 Téléconnexions

Les résultats des tests, répertoriés dans les tableaux 1 et 2, montrent que l’ENSO et les types de temps ont une influence significative sur l’occurrence des vagues de chaleur.

En effet, la Niña favorise l’occurrence des vagues de chaleur alors qu’el Niño et la phase Neutre y sont défavorables.

Les types de temps favorisant cette occurrence sont Alizé Instable (caractérisé par un anticyclone sur la mer de Tasman ou sur la Nouvelle-Zélande, apportant dans un flux de Sud-Est modéré à soutenu, des masses d’air chaud sur la Nouvelle-Calédonie), Perturbation Australe (dépression des moyennes latitudes se déplaçant le long du 40ème (dépression des moyennes latitudes se déplaçant le long du 40ème et apportant un flux de Sud-Ouest) et Temps Tropical (dépression tropicale située à proximité du territoire apportant des masses d’air chaud et humide). Les deux autres phases sont défavorables à l’occurrence des vagues de chaleur.

ENSO	Nombre de jours en vague de chaleur
Niño	O : 338 E : 509 R : -7.6
Niña	O : 899 E : 598 R : 12.3
Neutre	O : 976 E : 1106 R : -3.9

Table 1: Nombres observés (O) et attendus (E) de jours sous vague de chaleur selon la phase ENSO. $pvalue \ll 0.01$. Si $R > 2$ alors la phase ENSO est favorable à l’occurrence des vagues de chaleur. Si $R < -2$, la phase est défavorable.

Type de temps	Nombre de jours en vague de chaleur
AS	O : 627 E : 1066 R : -13.4
TT	O : 574 E : 328 R : 13.6
AI	O : 635 E : 496 R : 6.24
AF	O : 87 E : 111 R : -2.3
PA	O : 290 E : 212 R : 5.4

Table 2: Nombres observés (O) et attendus (E) de jours sous vague de chaleur selon le type de temps. $pvalue \ll 0.01$. Si $R > 2$ alors le type de temps est favorable à l’occurrence des vagues de chaleur. Si $R < -2$, le type de temps est défavorable.

3.4 Analyse Archétypale

Après expérimentation, le choix de 6 archétypes a été le plus judicieux dans le cadre de cette étude. La figure Fig. 2 représente les 6 archétypes construits lors de l'analyse. Le premier archétype (archétype 0) correspond à une situation où il n'y a pas de vague de chaleur sur le territoire. Les autres archétypes, représentent les patterns de situations de vagues de chaleur intenses. Les archétypes 4 et 5 représentent les intensités les plus élevées et révèlent des situations ayant lieu en particulier sur le relief et la côte Est de la Grande Terre. Les trois autres archétypes sont des situations plus modérées, faisant ressortir la côte Ouest (archétype 1), le Nord (archétype 2) et le Sud (archétype 3). Cette analyse permet de montrer que lors des épisodes les plus intenses de vague de chaleur, celles-ci semblent localisées à certaines régions géographiques de la Nouvelle-Calédonie et pas sur l'ensemble le territoire.

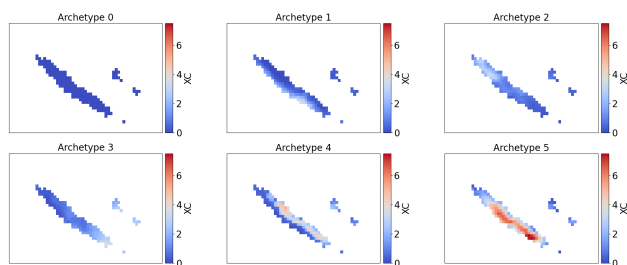


Figure 2: Six archétypes construits par l'analyse archétypale.

L'étude des probabilités d'expression de chaque archétype sur l'ensemble de la série temporelle permet de voir que les archétypes 4 et 5, représentant les situations les plus intenses, sont moins probables que les archétypes 1, 2 et 3.

La figure Fig. 3 représente les probabilités moyennes saisonnières cumulées de chaque archétype sur la période 1981-2021, auxquelles est superposée la moyenne saisonnière de l'indice Niño 3.4. En 1997-1998 et en 2015-2016 des épisodes Niño intenses ont eu lieu. Cette figure semble montrer une corrélation entre ces épisodes Niño et des pics de probabilités d'occurrence des archétypes caractérisant les vagues de chaleur. La phase Niño pourrait donc influencer l'occurrence des vagues de chaleur les plus intenses. De plus, des épisodes Niña intenses, comme en 1988-1989, en 2007-2008 ou en 2010-2011, semblent être corrélés à des pics d'intensité des probabilité d'occurrence, plus modérés que lors des Niño mais tout de même remarquables.

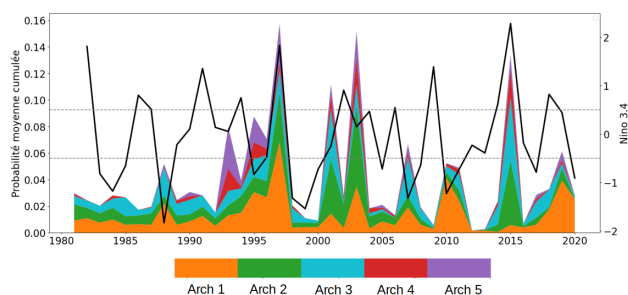


Figure 3: Probabilité moyenne (sur la saison) cumulée d'expression des archétypes et indice moyen Niño 3.4.

4 Conclusions

Cette étude s'inscrit dans les efforts de connaissance des vagues de chaleur atmosphériques en Nouvelle-Calédonie. A l'aide des données in-situ des réanalyses ERA5 Land, les climatologies ont mis en évidence 4 à 5 vagues de chaleur sur le territoire, durant en moyenne 4.5 à 5 jours. Elles sont plus nombreuses sur la côte Sud-Est de la Grande Terre et sur les îles Loyauté, mais plus intenses sur le relief et la côte Ouest. De plus la saison fraîche (d'avril à octobre) connaît des épisodes également plus intenses et plus longs. Une augmentation significative du nombre de vagues de chaleur sur la majorité du territoire est observée. L'analyse archétypale a révélé des patterns spatiaux concernant les événements les plus intenses : ceux-ci semblent localisés à certaines zones géographiques. Enfin, les types de temps et l'ENSO influencent l'occurrence des vagues de chaleur. La phase Niña favorise l'occurrence des vagues de chaleur tandis qu'el Niño semble être corrélé aux épisodes les plus forts.

Pour poursuivre ce travail, des tests statistiques devront être réalisés pour vérifier l'impact del Niño sur l'intensité des vagues de chaleur. De plus les réanalyses ERA5 Land montrent des biais non négligeables par rapport aux observations, en particulier sur les valeurs des températures et le nombre détecté de vagues de chaleur. Des travaux complémentaires sont à envisager en utilisant d'autres modèles. Enfin, il serait intéressant d'appliquer l'analyse archétypale à la saison fraîche puis à l'ensemble de l'année.

Remerciements. Je tiens à remercier Alexandre Peltier et Christophe Menkes, mes encadrant pour leur expertise, leurs conseils avisés et leur bienveillance. Merci à tous les collègues de l'IRD et de Météo-France pour les échanges et le partage de données.

References

- Adele Cutler, L. B., 1994: Archetypal analysis. *Technometrics*, **36:4**, 338–347.
- Christopher C. Chapman, J. R. M. F. B. M. S., Didier P. Monselesan, 2022: A large-scale view of marine heatwaves revealed by archetype analysis. *Nat Commun* 13.
- Jérôme Lefèvre, N. J. C. M. A. L., Patrick Marchesiello, 2010: Weather regimes and orographic circulation around new caledonia. *Marine Pollution Bulletin*, **61 (7)**, 413–431, new Caledonia tropical lagoons: an overview of multidisciplinary investigations.
- Marra, G. G. J. M.-V. K. V. K. M. M. S. P. J., J.J. and O. Warwick, 2022: Pacific islands - climate change monitor 2021. Tech. rep., Regional Climate Centre Network (PI-RCC) Report to the Pacific Islands Climate Service (PICS) Panel and Pacific Meteorological Council (PMC).
- Météo-France, 2023: Bulletin climatique annuel 2022.
- Nairn, J. R. and R. J. B. Fawcett, 2015: The excess heat factor: A metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **12 (1)**, 227–253.
- Perkins, S. E. and L. V. Alexander, 2013: On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, **26 (13)**.