



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
Domaine SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Mention PHYSIQUE ET APPLICATIONS



Mémoire pour l'obtention du diplôme de :

MASTER en PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Spécialité : Océanographie

Laboratoire de Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans

Intitulé :

***CARACTERISTIQUES DE LA HOULE AU LARGE DE
LA COTE EST DE MADAGASCAR***

Présenté par :

RASOAVOLOLONIAINA Hanitra Elisa

Devant la commission d'examen composée par :

Président :

Mr RATIARISON Adolphe A., Professeur Titulaire

Rapporteur :

Mme IVONINTSOA VAVIFARA ZILERA Irma, Docteur

Examineurs :

Mme RAKOTOVAO Niry Arinavalona, Maitre de conférences

Mr RAKOTOARISON Solohery, Maitre de conférences

Le 24 août 2018





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
Domaine SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Mention PHYSIQUE ET APPLICATIONS



Mémoire pour l'obtention du diplôme de :
MASTER en PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Spécialité : Océanographie

Laboratoire de Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans

***CARACTERISTIQUES DE LA HOULE AU LARGE DE
LA COTE EST DE MADAGASCAR***

Intitulé :

Présenté par :



RASOAVOLOLONIAINA Hanitra Elisa

Devant la commission d'examen composée par :

Président :

Mr RATIARISON Adolphe A., Professeur Titulaire

Rapporteur :

Mme IVONINTSOA VAVIFARA ZILERA Irma, Docteur

Examineurs :

Mme RAKOTOVAO Nirry Arinavalona, Maitre de conférences

Mr RAKOTOARISON Solohery, Maitre de conférences

Le 24 août 2018



REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donnée la force et la santé d'accomplir ce mémoire.

Je tiens à saisir cette occasion et adresser mes profonds remerciements et mes profondes reconnaissances à :

- Monsieur RATIARISON Adolphe A., Professeur Titulaire et fondateur du Laboratoire de Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans au sein de l'Université d'Antananarivo qui a accepté de m'accueillir dans son laboratoire pour que je puisse effectuer mon Master, et pour le grand honneur qu'il me fait en présidant le jury de ce mémoire ;
- Madame RAKOTOVAO Niry Arinavalona et Monsieur RAKOTOARISON Solohery, Maitres de Conférences au sein de l'Université d'Antananarivo pour avoir accepté d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.
- Madame IVONINTSOA VAVIFARA ZILERA Irma, Docteur au sein de l'Université d'Antananarivo pour ses précieux conseil et aide durant toute la période de ce travail. Toujours disponibles pour m'avoir guidé à chaque étape de ce présent travail, elle a su m'aiguiller de la meilleure façon possible.

Toute l'équipe DYACO qui m'a aidé tout au long de mon année d'étude en Master et durant la réalisation de ce travail.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à mes parents, mon mari, tous les membres de ma famille et tous mes amis qui par leurs prières et leurs encouragements, j'ai pu surmonter tous les obstacles pendant ma dernière année d'étude.

Que Dieu vous bénisse !

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
ABREVIATIONS	v
INTRODUCTION	1
PARTIE 1 : GENERALITE SUR LA HOULE	3
I. Vagues et houle [http 3].....	3
I.1. Vagues	3
I.2. Houles.....	4
I.3. Etat de la mer (fonction de période et de hauteur)	8
II. Formation de houle	9
III. Ressource énergétique de la houle [http 5]	10
IV. Instruments de mesure	12
PARTIE 2 : MATERIELS ET METHODES	13
I. Zone d'étude.....	13
II. Les données	13
III. Matériels	14
IV. Méthodes.....	14
III.1. Analyse en Composantes Principales	14
III.2. Analyse des zones après l'ACP	18
PARTIE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	19
I. Analyse en Composante Principale	19
I.1. Construction des matrices d'entrée en ACP.....	19
I.2. Moyennes et écart-types des trois paramètres de houle	20
I.3. Les axes principaux d'analyse à retenir	21
I.4. Variables	23
I.5. Individus.....	28
II. Analyse des paramètres d'après la régionalisation de l'ACP	33
II.1. Analyse des paramètres d'après la régionalisation de l'ACP	33
II.2. Classification des paramètres de houle	36
DISCUSSIONS.....	41
CONCLUSION	42
BIBLIOGRAPHIE.....	43
ANNEXES.....	I

Annexe I : Matrice initiale de l'ACP pour le paramètre hauteur de houle.....	I
Annexe II : Matrice initiale de l'ACP pour le paramètre période de houle.....	III
Annexe III : Matrice initiale de l'ACP pour le paramètre direction de houle	V
Annexe IV : Coordonnées, contributions et cosinus carrée des individus pour la hauteur	VII
Annexe V : Coordonnées, contributions et cosinus carrée des individus pour la période.....	IX
Annexe VI : Coordonnées, contributions et cosinus carrée des individus pour la direction	XI

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Diagramme théorique donnant la hauteur significative et la période des vagues – Reproduction d'après Gröen et Dorrestein (1976).....	4
Figure 2: Schéma d'une houle se propageant de gauche à droite.....	4
Figure 3: Exemple de mer croisée avec 2 trains de houle de directions différentes.....	5
Figure 4: Schéma de la houle en faible profondeur.....	6
Figure 5: Schéma du comportement de la houle à l'approche du rivage	7
Figure 6: Réfraction de la houle autour d'une pointe	8
Figure 7: Puissance moyenne des vagues au large des côtes.....	12
Figure 8: Localisation et carte de notre zone d'étude.....	13
Figure 9: Zone d'étude (longitudes 47°E-54°E et latitudes 12°S-26°S) avec 120 points de grille	19
Figure 10: Zone d'étude avec 89 points de grille	20
Figure 11: Valeurs propres et variabilité cumulée pour le paramètre hauteur.....	22
Figure 12: Valeurs propres et variabilité cumulée pour le paramètre Période	23
Figure 13: Valeurs propres et variabilité cumulée pour le paramètre Direction	23
Figure 14: Cercle de corrélation des variables dans l'espace factoriel F1-F2 pour la hauteur.....	27
Figure 15: Cercle de corrélation des variables dans l'espace factoriel F1-F2 pour la période.....	27
Figure 16: Cercle de corrélation des variables dans l'espace factoriel F1-F2 pour la direction.....	28
Figure 17: Répartition des individus dans l'espace factoriel F1 et F2 pour la hauteur	31
Figure 18: Répartition des individus dans l'espace factoriel F1 et F2 pour la période	31
Figure 19: Répartition des individus dans l'espace factoriel F1 et F2 pour la direction	32
Figure 20: Régionalisation de la zone d'étude selon les trois paramètres de houle. (a)-Hauteur, (b)-Période, (c)-Direction	33
Figure 21 : Hauteur mensuelle 2009-2017 pour les ZONE_1 et ZONE_2	34
Figure 22: Période mensuelle 2009-2017 pour les ZONE_1 et ZONE_2.....	35
Figure 23: Direction mensuelle 2009-2017 pour les ZONE_1 et ZONE_2	36
Figure 24: Classification des hauteurs pour la ZONE_1	36
Figure 25: Classification des hauteurs pour la ZONE_2	37
Figure 26: Classification des périodes pour la ZONE_1	37
Figure 27: Classification des périodes pour la ZONE_2	38
Figure 28: Classification des directions pour la ZONE_1.....	38
Figure 29: Classification des directions pour la ZONE_2.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Termes descriptifs en fonction de la hauteur des vagues (en mètres)-----	8
Tableau II: Tableau de données en ACP-----	15
Tableau III: Moyenne et écart-types des trois paramètres de houle au large de la côte Est -----	21
Tableau IV : Valeurs propres, pourcentage et pourcentage cumulé des variances pour la Hauteur -----	22
Tableau V: Valeurs propres, pourcentage et pourcentage cumulé des variances pour la Période-----	22
Tableau VI : Valeurs propres, pourcentage et pourcentage cumulé des variances pour la Direction -----	22
Tableau VII : Matrice de corrélation des variables pour la hauteur -----	24
Tableau VIII : Matrice de corrélation des variables pour la Période -----	24
Tableau IX: Matrice de corrélation des variables pour la Direction-----	24
Tableau X : Coordonnées, contributions et cosinus carrée des variables pour la hauteur -----	25
Tableau XI: Coordonnées, contributions et cosinus carrée des variables pour la période -----	26
Tableau XII: Coordonnées, contributions et cosinus carrée des variables pour la direction -----	26
Tableau XIII : Les individus bien représentés en coordonnées négatif et positif pour les trois paramètres --	29
Tableau XIV: Caractéristiques des paramètres de houle pour la ZONE_1 et ZONE_2 -----	39

ABBREVIATIONS

- ACP : Analyse en Composante Principale
- BF : Basse Fréquence
- FNMOC: Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center
- HF : Haute Fréquence
- NETCDF : Network Common Data Form
- SE : Sud-Est
- SSE : Sud-Sud-Est.
- SIG : Systèmes d'Information Géographique

INTRODUCTION

L'océan est un vaste terrain de recherche qui mérite une attention particulière. En effet, les deux tiers de la surface de la Terre sont des océans ouverts. Le mouvement des vagues océaniques est une source d'énergie propre, renouvelable et encore inexploitée. L'exploitation de quantités importantes de cette énergie aurait des implications mondiales. L'énergie des vagues n'est pas répartie uniformément sur les océans [9].

Les vagues océaniques sont constantes et les conditions océaniques peuvent être exactement connues plus de 48 heures à l'avance. Un autre facteur rendant l'énergie houlomotrice particulièrement attractive pour générer de l'électricité est sa forte densité de puissance, en comparaison avec la faible densité de puissance des énergies solaire ou éolienne [9]. Selon la comparaison des densités de puissance moyennes de diverses énergies renouvelables (solaire, éolien, houle), la houle représente $2\,500\text{ W/m}^2$ sur une surface verticale entre 0 et 20 m de profondeur, tandis que le solaire et l'éolien représentent seulement 150 W/m^2 sur une surface horizontale au sol et 400 W/m^2 sur une surface verticale à 50 m de hauteur [8].

D'après la carte de la puissance moyenne annuelle sur les mers du Globe concernant les vagues au large des côtes du « Global Wave Energy Resource Assesment –d'Andrew Cornett (2008) » [1], nous constatons que la houle au large de la côte Est de Madagascar représente une grande part de ressource d'énergie. A proximité des côtes, la hauteur des vagues est plus faible et l'énergie de la houle représente une grande ressource, surtout au large. Cette carte arrive à estimer une ressource accessible jusqu'à 30 kW/m pour le large de la côte Est de Madagascar. A noter que cette moyenne cache une grande disparité selon les saisons, en conformité avec la variation saisonnière des vents.

Dans cette étude, nous allons effectuer des analyses sur les paramètres principaux de la caractérisation d'une houle. Notre objectif est de sortir les informations pertinentes relatives à la houle sur la côte Est de Madagascar. En d'autres termes, nous voulions classifier ou délimiter cette partie en sous-zone selon les comportements de ces paramètres de houle afin de pouvoir extraire des informations sur les exploitations possibles dans cette zone. Ainsi, les résultats de notre étude visent à servir des études antérieures sur l'utilisation des mers notamment dans la récupération de l'énergie des vagues au large de la côte Est de Madagascar.

Nous allons traiter dans ce présent travail, composé de trois parties, la caractérisation de la houle au large de la côte Est de Madagascar appuyé sur une approche statistique à partir des données de télédétection. La première partie est consacrée à la généralité sur la houle. Dans la seconde partie, la méthodologie sera présentée. Les résultats seront représentés et interprétés dans la dernière partie.

PARTIE 1 : GENERALITE SUR LA HOULE

I. Vagues et houle [http 3]

I.1. Vagues

Les vagues sont un mouvement ondulatoire de la surface de la mer. Elles sont créées par le vent qui transfère de l'énergie de l'atmosphère dans la mer. Les phénomènes en jeu sont très compliqués, et les études théoriques se poursuivent encore maintenant.

En un lieu et à un moment donné, la force des vagues définit ce qu'on nomme un état de mer. Celles-ci sont caractérisées par leur *hauteur*, leur *période* et la *direction* de leur propagation.

Toutes les vagues ne sont pas de la même hauteur. Pour décrire un état de mer, on parle de hauteur significative des vagues H_s . En pratique, si on mesure toutes les vagues de crête à creux durant l'événement, on trouve qu'un tiers des vagues sont plus hautes que H_s et les autres plus basses. C'est pourquoi certains parlent aussi de $H_{1/3}$ pour désigner la hauteur significative. La hauteur des vagues maximales est typiquement égale à $1,8 \times H_s$.

Plus le vent est fort, plus il souffle longtemps, plus la hauteur des vagues est importante. L'étendue de la surface marine sur laquelle le vent souffle est dénommée « **fetch** ». Celui-ci est un paramètre influant, comme on peut le voir sur la figure 1 qui donne la hauteur significative des vagues en fonction des principaux facteurs à condition que la profondeur d'eau soit suffisante. Ces valeurs théoriques correspondent à un état de mer dit développé. Si les paramètres sont plus faibles que ceux du diagramme, la hauteur des vagues est plus faible. Par exemple, pour un vent de 15 m/s soufflant durant 7 h, la hauteur des vagues est de 3 m à condition que le fetch soit au moins de 100 km. Par contre, si le fetch n'est que de 30 km, la hauteur des vagues sera de 2 m ; celle-ci sera d'ailleurs atteinte après 3 h. Si la profondeur d'eau est réduite, les phénomènes sont différents, comme on va le voir ci-dessous.

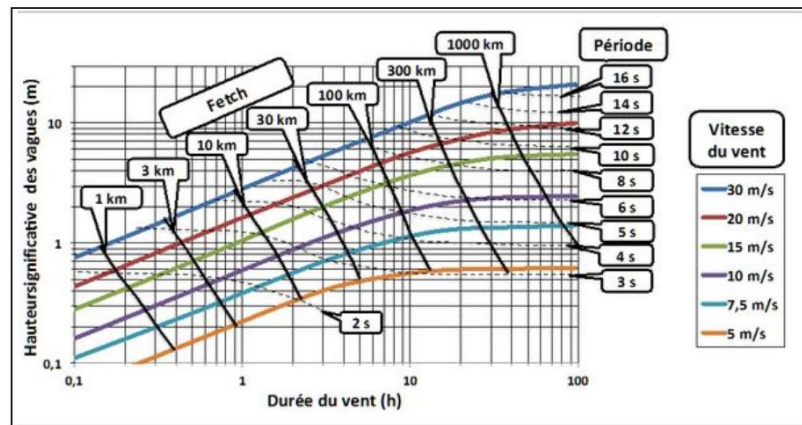


Figure 1: Diagramme théorique donnant la hauteur significative et la période des vagues – Reproduction d’après Gröen et Dorrestein (1976)

La figure 1 doit être considérée comme une simplification de la réalité. Durant les fortes tempêtes, on observe parfois des vagues bien plus grosses que les autres. Voir figure 3. On observe dans certaines conditions des vagues monstrueuses, ou *freak waves*, parfois appelées aussi vagues scélérates, traduction directe du nom en anglais *rogue waves*. Elles atteignent 30m de crête à creux.

On remarque sur la figure 1 que les grosses vagues ne peuvent pas avoir de courtes périodes.

I.2. Houles

Les vagues se propagent sur l’océan. Quand elles quittent la zone ventée qui leur a donné naissance, elles se transforment en un mouvement plus régulier qui est la houle. La houle est une onde qui agite la surface de façon périodique. Lorsque la profondeur est suffisante, les particules d’eau suivent des trajectoires circulaires, comme schématisé sur la figure 2 suivante.

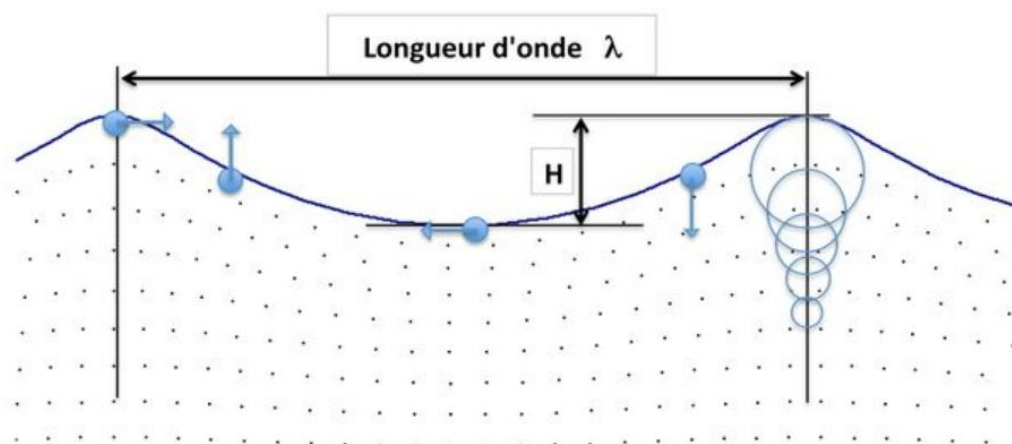


Figure 2: Schéma d’une houle se propageant de gauche à droite.

Source : <http://www.clubdesargonautes.org/>

Les mouvements des particules d'eau sont des trajectoires circulaires dont le rayon de giration diminue avec la profondeur. Les flotteurs sur la surface visualisent le mouvement à différents instants.

La période de la houle T est le nombre de secondes qui sépare le passage de 2 crêtes successives.

La longueur d'onde λ est la distance entre 2 crêtes successives. Elle est liée à la période :

$$\lambda = 1,56.T^2 \text{ (m)}$$

T : période de la houle

λ : longueur d'onde

L'onde se propage à la vitesse c :

$$c = 1,56.T \text{ (m/s)}$$

Les ondes longues se déplacent plus vite que les autres. Elles peuvent voyager sur des milliers de kilomètres. Si la hauteur de la houle au large dépasse $0,14 \lambda$ (λ : longueur d'onde) (par exemple parce que le vent souffle), la houle devient instable et déferle à son sommet, formant des « moutons ».

Plusieurs trains de houle créés en des endroits différents peuvent se rencontrer et se superposer. Une situation similaire existe lorsque le vent crée localement des vagues dont la direction est différente de celle de la houle provenant du large. On parle de mer croisée ou de mer hachée (Fig.3). Les états de mer correspondants sont dangereux pour la navigation.



Figure 3: Exemple de mer croisée avec 2 trains de houle de directions différentes

Source : Waitwow.com

▪ Houle en faible profondeur

La figure 4 ci-après illustre une houle en faible profondeur. Lorsque la houle s'approche de la côte, la profondeur d'eau diminue. La proximité du fond modifie le mouvement de la houle à partir du moment où la profondeur est inférieure à la moitié de la longueur d'onde.

Les trajectoires des particules d'eau ne sont plus circulaires mais elliptiques. Sur le fond, l'eau suit un mouvement alternatif.

La vitesse de l'onde diminue lorsque la profondeur se réduit. Par faible fond, cette vitesse s'approche de la valeur limite :

$$C = \sqrt{g \cdot z}$$

g : accélération de la pesanteur = $9,81\text{m/s}^2$; z : profondeur d'eau locale (m)

On remarque que cette célérité ne dépend plus de la hauteur de la vague. La période reste inchangée, la longueur d'onde diminue aussi, si bien que l'énergie se concentre dans une vague plus courte mais plus haute.

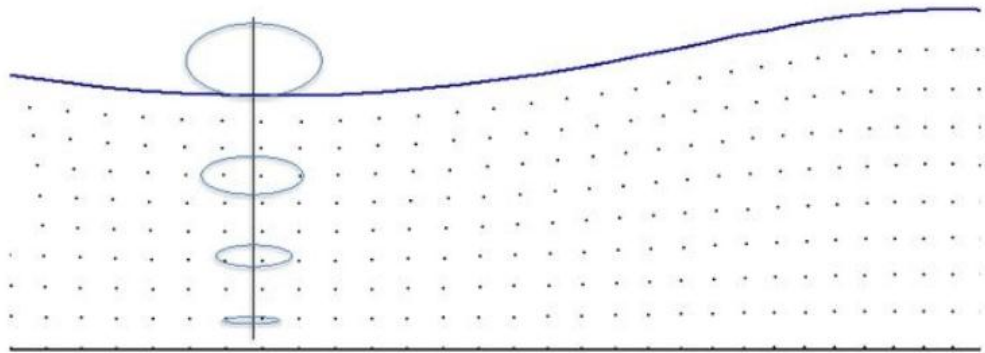


Figure 4: Schéma de la houle en faible profondeur.

Source : <http://www.clubdesargonautes.org/>

▪ Comportement de la houle à l'approche du rivage

La figure 5 illustre le mécanisme de dissipation de l'énergie cinétique emportée par les moutons (houle instable et déferlé à son sommet). Selon ce mécanisme l'eau située au sommet est propulsée vers l'avant. L'énergie cinétique emportée par les moutons est dissipée dans la masse d'eau, mais leur quantité de mouvement génère un léger courant de la surface qui est dirigé dans le sens de propagation de la houle. Ce courant est bien entendu compensé par un courant de retour à proximité du fond dirigé vers le large.

Ce mécanisme consomme progressivement l'énergie de la houle, dont la hauteur diminue au fur et à mesure qu'elle avance vers le rivage. La houle perd également de l'énergie par frottement sur le sol. A l'arrivée sur le rivage, toute l'énergie résiduelle est dissipée sous forme de brisants, parfois sous forme de rouleaux plongeants, selon la pente du fond.

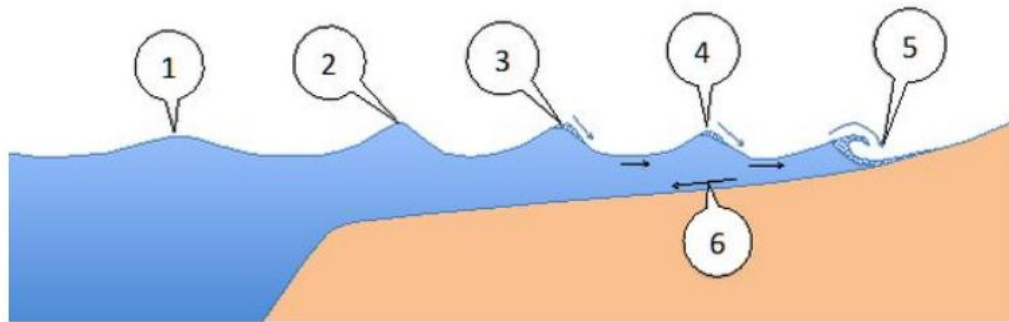


Figure 5: Schéma du comportement de la houle à l'approche du rivage

Source : <http://www.clubdesargonautes.org/>

1. Houle océanique
2. La profondeur décroît, la célérité et la longueur d'onde diminuent. La hauteur de la vague augmente
3. Quand la cambrure de la vague est trop forte, le sommet déferle. De l'eau est projetée vers l'avant. Ceci dissipe de l'énergie. De l'énergie est aussi perdue à cause du frottement sur le fond
4. Le déferlement continu dissipe progressivement l'énergie de la vague dont la hauteur se réduit
5. L'énergie résiduelle est dissipée sur le rivage, soit sous la forme de brisants, soit de rouleaux en fonction de la pente du sol
6. Le déferlement provoque un courant d'eau vers le rivage en surface, accompagné d'un courant de retour au fond

Sur la figure 6, le ralentissement de l'onde quand la profondeur d'eau diminue a pour effet de diffracter les vagues. Le front de la vague a tendance à modifier sa direction pour devenir parallèle à la côte. La houle se renforce autour des promontoires, et s'étale au fond d'une baie. Ce phénomène doit être pris en compte pour l'implantation des houlomoteurs.



Figure 6: Réfraction de la houle autour d'une pointe

Source : Surflanka

D'après la figure 6, la houle qui vient du large en haut de l'image tourne autour de la pointe. Elle s'étale dans la baie et se concentre sur la pointe.

I.3. Etat de la mer (fonction de période et de hauteur)

Le terme « état de mer » désigne l'agitation locale de la mer observée sur une certaine durée. L'état de mer peut recouvrir des formes diverses selon que la mer est calme ou peu agitée ou bien en phase de tempête, selon que les vagues sont en phase de formation, on parle alors de **mer de vent**, ou au contraire arrivent de l'océan après s'être propagées sur plusieurs milliers de kilomètres, on parle alors de « **houle océanique** ». Il peut être composé de plusieurs systèmes de vagues ayant des origines différentes et chacun avec leurs caractéristiques propres. Ces composantes d'état de mer sont souvent définies par la hauteur, la période et l'incidence. [http 4]

Tableau I: Termes descriptifs en fonction de la hauteur des vagues (en mètres)

Termes descriptifs	Hauteurs
Petite houle	Vagues < 2 m
Houle modérée	2 m < vagues < 4 m
Grande houle	Vagues > 4 m

Source : Wikipédia- Houle

II. Formation de houle

Le vent est le principal moteur de formation des vagues. En effet, lorsque le vent souffle, il frotte sur la surface de la mer et génère des ondes superficielles. La croissance de la houle est fonction de la force du vent, de sa durée d'action, et de la distance sur laquelle il peut souffler sans rencontrer d'obstacles (fetch) [http 5].

On appelle **mer du vent** (ou **houle haute fréquence HF**) un système de vagues directement généré par les vents locaux. On distingue la **houle longue** (ou **houle basse fréquence BF**), système formé de vagues qui se propagent librement hors de la zone d'action du vent.

Chacun de ces états de mer se caractérise par une répartition des vagues en hauteur, période et direction. En particulier, la mer du vent présente des périodes courtes (inférieures à 10 s) par rapport à la houle longue dont les périodes évoluent entre 10 et 30 s en général. Comme la mer est un milieu dispersif, les houles longues se déplacent plus rapidement que les houles courtes.

Sur un site donné, la houle locale peut se composer des différents types de houle (mer du vent et houle longue). Ainsi, l'approche spectrale est l'outil mathématique indispensable pour identifier les composantes de l'état de mer car elle permet d'évaluer la répartition de l'énergie des vagues en fréquence et en direction.

La houle est générée par l'effet du vent sur la surface des océans. Plus il souffle fort, longtemps et sur une grande distance, et plus la hauteur des vagues générées va être importante. Ces vagues, ondes de gravité, ont la particularité de se propager sans dissipation d'énergie et peuvent donc voyager sur de longues distances avant d'être dissipées sur les côtes [5].

Les trains de vagues engendrées par un vent local constituent la *mer du vent*. Cette *mer du vent* est d'autant plus forte que le vent est fort, ou souffle longtemps, ou sur une distance (fetch) importante. Ces vagues se transforment en houle lorsque le vent faiblit ou lorsqu'elles se propagent en dehors de l'aire génératrice. La houle peut se propager très loin de la zone de génération (on parle alors de *houle résiduelle*) [16].

La propagation des vagues diffère suivant si elles sont en eau profonde ou en eau peu profonde. La variation de la vitesse de phase avec la longueur d'onde est appelée la relation de dispersion. [3].

EN EAU PROFONDE ($d > L/2$), on obtient une relation simple $c = \sqrt{gL / 2\pi}$

$$L = 1.56 T^2 \text{ m} ; c = 1.56 T \text{ m/s} = 3 T \text{ kt}$$

L : longueur d'onde ; c : célérité ; T : période ; kt : nœud

$c \sim \lambda$: les ondes se propagent donc à une *vitesse* qui dépend de leur *longueur d'onde*, le milieu est dit DISPERSIF. Plus les ondes sont longues, plus elles sont rapides.

EN EAU PEU PROFONDE ($d < L/40$), la relation de dispersion donne : $c = \sqrt{gd}$

- $c \sim \sqrt{g}$: la célérité est donc proportionnelle à la racine carrée de la profondeur.
- Toutes les ondes se propagent à la même vitesse, le milieu n'est PLUS dispersif.

Au-delà d'une profondeur supérieure à la moitié de la longueur d'onde, on peut donc considérer que la houle n'a plus d'impact.

La mer contient des composantes de périodes variées qui lui donnent un aspect erratique. Par grande profondeur, la célérité de ces composantes est proportionnelle à leur période. Le rapport diminue quand la profondeur diminue, ce qui ne change pas qualitativement le phénomène. Les vagues créées par un vent soufflant sur une largeur donnée s'étalent au cours de leur déplacement par le phénomène de diffraction, ce qui diminue la contribution des composantes dans le sens de propagation de la houle, et ce d'autant plus qu'elles sont plus courtes. En effet, les composantes les plus courtes sont donc progressivement abandonnées en route, ce qui donne une impression de régularisation alors que la hauteur significative diminue.

III. Ressource énergétique de la houle [http 5]

On calcule l'énergie de la houle en intégrant l'énergie des particules d'eau sur toute la profondeur supposée suffisamment grande. Pour une houle régulière de hauteur H et de période T , on obtient la formule théorique suivante :

$$E = \frac{\rho \cdot g^2}{64 \cdot \pi} \cdot H_s^2 \cdot T$$

Dans laquelle :

ρ est la masse volumique de l'eau de mer (1024 kg.m^{-3})

g est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$)

H_s est la hauteur de la houle mesurée en mètres. Comme on suppose ici une houle régulière, donc toutes les vagues ont la même hauteur H , bien entendu égale à H_s

T est la période de la houle en secondes.

Le résultat E est en watts par mètre de crête (W/m).

Cette formule théorique est valable si la profondeur d'eau est grande

Si on fait le calcul des termes constants, on obtient :

$$E = 490. H_s^2.T$$

En fait, une houle n'est que rarement régulière, mais est généralement la superposition de plusieurs ondes. La résultante est une houle dont la hauteur est H_s et la période apparente T . L'énergie est alors supérieure à celle d'une houle pure. Pour tenir compte de ce phénomène on utilise la formule empirique suivante si on calcule E en watts par mètre de crête :

$$E = 500. H_s^2.T \text{ (W/m)}$$

Si on désire exprimer la puissance en kilowatts par mètre de ligne parallèle à la côte, on a :

$$E = \frac{1}{2} .H_s^2.T \text{ (kW/m)}$$

Exemples :

Houle de 2m et de période 4s : 8 kW/m

Houle de 3m et de période 6s : 27 kW/m

Houle de 10m et de période 14s : 700 kW/m

Ces quelques valeurs soulignent la puissance considérable des vagues de tempête et expliquent pourquoi les installations destinées à récolter l'énergie des vagues doivent être conçues pour résister aux tempêtes.

L'énergie est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de toutes les particules d'eau entraînées dans leurs trajectoires circulaires. Ceci amène une remarque importante : la moitié de l'énergie correspond à la composante verticale du mouvement, et la moitié à la composante horizontale. Si un système houlomoteur utilise le seul mouvement vertical de la houle, il ne peut exploiter que la moitié de la ressource. Pareil pour un volet oscillant qui n'exploite que le seul mouvement horizontal.

La carte de la figure 7 suivante indique la puissance moyenne annuelle sur les mers du Globe. On constate que la ressource de la houle est abondante dans les zones tempérées balayées par les dépressions océaniques. Des études ont conduit à estimer la ressource théorique à 3 TW. Oceanor paper_OMAW_2010 (Assessing the global wave energy potential)

La ressource accessible serait de 0,5 TW, soit 10% de la consommation mondiale d'électricité.

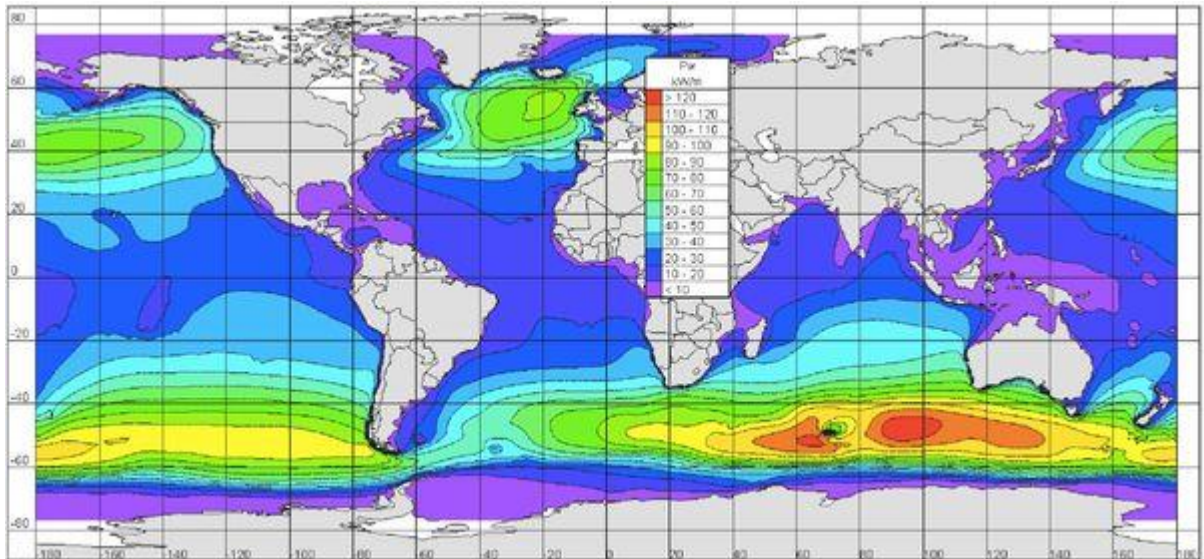


Figure 7: Puissance moyenne des vagues au large des côtes

Source: A Global Wave Energy Resource Assesment – Andrew Cornett (2008)

Cette moyenne cache une grande disparité selon les saisons, en conformité avec la variation saisonnière des vents, comme on le voit sur la figure 7.

IV. Instruments de mesure

Comme les vagues, la houle peut se mesurer à partir de l'élévation de la surface, avec des bouées houlographes, perches à houle, radars à houle, à partir de la pression sous l'eau (marégraphes haute fréquence) ou des vitesses dans l'eau (courantomètres). De plus la houle crée des modulations des vagues plus courtes. Elle est alors visible sur des images radar, en particulier avec un radar à synthèse d'ouverture. Ce type de radar est idéal pour caractériser l'évolution de la houle à l'échelle des bassins océaniques (imagerie), ou en zone côtière (mode image). [http 4]

PARTIE 2 : MATERIELS ET METHODES

I. Zone d'étude

Notre étude se situe dans la partie Est de Madagascar et plus particulièrement entre les longitudes 47°E-54°E et latitudes 12°S-26°S (figure 8).

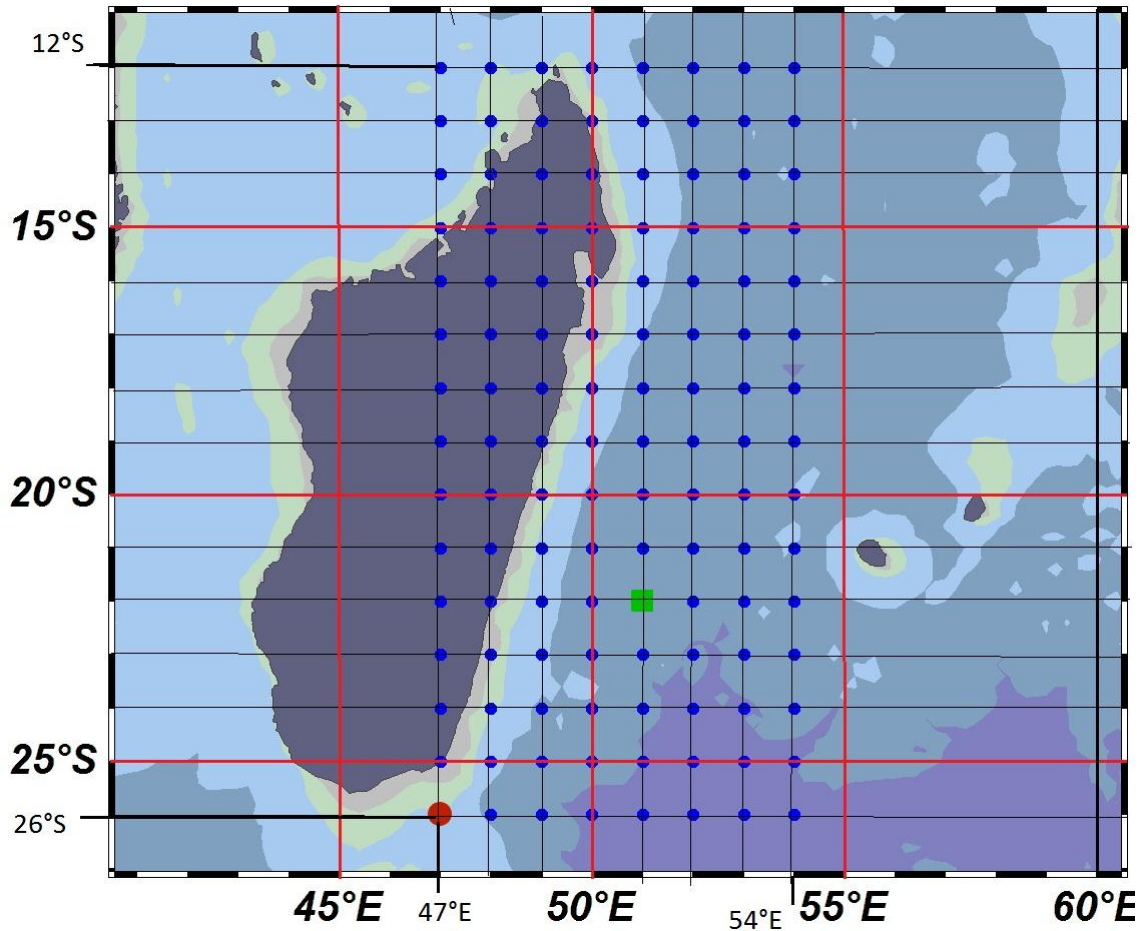


Figure 8: Localisation et carte de notre zone d'étude

Source : Auteur

II. Les données

Pour notre étude, les données ont été récupérées au format grib sur le serveur du site officiel de la marine américaine <http://www.usgodae.org/ftp/outgoing/fnmoc/models/ww3/>. Les fichiers étant fournis à l'échelle globale, au pas de temps trihoraire et à une résolution spatiale 1° x 1°. Les données dans ce site subissent un traitement en temps réel. Les données sont des sorties du modèle Wave Watch III du centre FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)

Les données qui nous intéressent sont des paramètres caractéristiques de la houle à 12HTU, 15HTU et 18HTU : hauteur, période et direction. Elles s'étalent sur la période 2009 à 2017 (09 ans).

III. Matériels

Dans notre étude, nous avons utilisé le langage R pour l'extraction et la conversion de l'extension des données en d'autres formats comme .nc et .txt. Ensuite, les logiciels Xlstat et QGIS ont été utilisés pour le traitement de données et les différentes cartes.

IV. Méthodes

Etant donné que les données récupérées sont brutes, à l'échelle globale et avec un pas de temps trihoraire, il est donc nécessaire d'effectuer quelques prétraitements et transformations sur les fichiers de données.

Nous avons suivi les étapes suivantes avant d'effectuer des différentes opérations de l'analyse statistique :

- Convertir les fichiers de données brutes en fichiers NETCDF (Network Common Data Form) afin de stocker les données sous forme de tableaux de valeurs, et qui possède un en-tête décrivant les caractéristiques et la disposition des données. Ce format est couramment utilisé dans le partage de fichiers scientifiques, notamment dans les domaines océanographique, météorologique, climatologique ainsi que dans les systèmes d'information géographique (S.I.G).
- Extraire les données relatives à notre zone d'étude

III.1. Analyse en Composantes Principales

On cherche une représentation des n individus, dans un sous-espace F_k de R^p de dimension k (k petit 2, 3 ...; par exemple un plan).

Autrement dit, on cherche à définir k nouvelles variables combinaisons linéaires des p variables initiales qui feront perdre le moins d'information possible.

Ces variables seront appelées « **composantes principales** », les axes qu'elles déterminent : « **axes principaux** » les formes linéaires associées : « **facteurs principaux** ».

III.1.1. Objectifs de l'ACP

Pour les individus : nous cherchons à distinguer, dans l'ensemble des individus, des groupes qui se ressemblent ou qui se différencient des autres ;

Pour les variables : de façon analogue, nous pouvons étudier les structures de leurs liaisons linéaires. Nous prospectons celles qui présentent une forte corrélation ou, au contraire, celles qui n'en ont aucune avec les autres [10].

III.1.2. Les données

L'ACP s'intéresse à des tableaux de données rectangulaires avec des individus en i lignes et des k variables quantitatives en colonnes.

Soient les ensembles Y et Z : $X = \{x_{ik} / i \in Y, k \in Z\}$

Tableau II: Tableau de données en ACP

	1	k	K
1			
i		x_{ik}	
I			

X : Tableau des données

x_{ik} : valeur de la i -ème observation pour la k -ième variable

$x_{i.}$: i -ème observation du tableau

$x_{.k}$: k -ème variable du tableau

I : effectif des individus

Données manquantes : L'ACP ne sait pas traiter les données manquantes. Certains logiciels proposent de supprimer les individus possédant des données manquantes, alors que d'autres vont remplacer la donnée manquante par un zéro.

Avant d'analyser les résultats d'un ACP, il est bon de réaliser une statistique descriptive simple en déterminant pour chaque variable, son maximum, son minimum, sa moyenne et son écart-type. Cela permet d'avoir une première connaissance des données étudiées et le cas échéant, de décider si l'ACP doit être réduite ou non.

Soient les ensembles I et J : $= \{\notin, \in\}$

- La moyenne de la variable :

$$\bar{x}_j = \sum \left\{ \frac{m_i}{M} x_{ij} \mid i \in I \right\} \text{ avec } M = \sum \{m_i \mid i \in I\}$$

Où m_i est le poids affecté à l'individu i ;

$$m_i = \frac{1}{\text{card } I} \text{ Et } \sum \{m_i \mid i \in I\} = M = 1$$

- La variance de la variable x_j :

$$\sigma_j^2 = \text{var}(x_j) = \sum \left\{ \frac{m_i}{M} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \mid i \in I \right\}$$

Où σ_j^2 est l'écart type de x_j

$$\Rightarrow \text{moy}(X_j) = \sum \{X_{ij} \mid i \in I\} = 0$$

$$\text{et } \text{var}(X_j) = \left\{ [X_j - \text{moy}(X_j)]^2 \mid i \in I \right\} = 1$$

- Le coefficient de corrélation linéaire entre deux variables x_j et $x_{j'}$:

$$r_{jj'} = \sum \left\{ \frac{m_i}{M} X_{ij} X_{ij'} \mid i \in I \right\} \text{ qui prend les valeurs entre } -1 \text{ et } 1.$$

- La variable centrée et réduite qui a pour composantes sur l'ensemble I :

$$X_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j^2}$$

III.1.3. Matrice de corrélation

Le choix de la matrice de corrélation est un paramètre de l'ACP. Pour déterminer les composantes principales, on part d'une matrice carrée des variables dont les éléments de la diagonale sont égaux à 1.

$$\begin{pmatrix} 1 & \dots & r_{p-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p-1} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Choix de la matrice de corrélation : si on a des données hétérogènes avec des ordres de grandeurs différents, alors on a une métrique « inverse des variances » et on travaille avec une matrice des corrélations.

III.1.4. Choix du nombre d'axes principaux

Afin de représenter les individus sur les nouveaux axes factoriels, il faut d'abord connaître le nombre de composantes principales à retenir. Il existe plusieurs manières de déterminer le nombre des nouveaux axes principaux à retenir. Parmi ces méthodes, on peut citer les deux suivantes :

- Un critère “absolu” : ne retenir que les axes dont les valeurs propres sont supérieures à 1. (C'est le critère de Kaiser).
- Un critère “relatif” : retenir les valeurs propres qui “dominent” les autres, en se référant au graphique en barres des valeurs propres [13].

Valeur propre :

La valeur propre d'une composante principale est égale à la somme des coefficients de corrélation au carré de chaque variable d'entrée avec la composante. Les composantes principales sont classées par valeur propre décroissante. L'inertie expliquée par la i -ème composante principale est associée à la i -ème plus grande valeur propre.

III.1.5. Interprétation des axes

Sur un plan factoriel déterminé, on n'interprète que les variables et les individus qui participent le plus à la formation de l'axe, c'est-à-dire, ceux qui sont bien représentés sur un axe ou un plan factoriel.

▪ *Les variables*

Une variable est d'autant bien représentée sur un axe qu'elle est proche du bord du cercle des corrélations et de l'axe, d'autant plus mal représentée qu'elle est proche de l'origine.

Les positions des variables par rapport aux axes afin de déterminer quelles sont les variables qui « font les axes ». On va ainsi pouvoir nommer les axes en fonction des variables.

Les positions des variables les unes par rapport aux autres. Le coefficient de corrélation entre deux variables étant le cosinus de l'angle formé par les vecteurs on en déduit que :

- deux variables qui sont proches ou confondu (angle de 0°) sont corrélées positivement (Coefficient de corrélation proche de 1),

- deux variables opposées (formant un angle de 180°) sont corrélées négativement (coefficient de corrélation proche de -1)
- deux variables positionnées à angle droit (angle de 90°) ne sont pas du tout corrélées (Coefficient de corrélation égal à 0)

- *Les individus*

Un individu est bien représenté sur un axe, lorsque son angle par rapport au plan factoriel est proche de zéro, c'est-à-dire le cosinus carré tend vers 1. Dans le cas inverse, l'angle est proche de 90° et le cosinus est proche de 0 [11].

Deux cas se présentent :

L'ACP est réalisé sur un tableau comportant beaucoup d'individus (plus de 30). Dans ce cas, on ne pourra pas interpréter les positions relatives de tous les individus car le nuage sera tellement dense que l'on n'y verra pas grand-chose. Toutefois, si un individu est atypique, il va ressortir du nuage et on pourra alors l'identifier pour éventuellement le supprimer et effectuer un nouveau passage sans cet individu. Dans ce cas, on a souvent recours à une méthode classification automatique afin de regrouper les individus qui sont proches les uns des autres et ainsi de constituer des types d'individus ayant un comportement similaire.

Si l'ACP est réalisée sur un nombre d'individus plus faible, l'interprétation du nuage des individus est alors possible. C'est notamment le cas lorsque l'on travaille avec des unités statistiques secondaires, où il sera par exemple intéressant d'étudier la position de telle ou telle agence bancaire.

Sous réserve d'une bonne représentation, la proximité de deux individus sur un plan factoriel est synonyme d'individus ayant un comportement similaire, c'est-à-dire ayant des réponses aux variables de l'analyse qui sont très proches. Si deux individus ont exactement les mêmes valeurs aux différentes variables, ils seront superposés sur les différents plans factoriels. De même, des individus ou des groupes d'individus s'opposant par rapport à un axe factoriel, s'opposeront par rapport aux variables qui « font » cet axe.

III.2. Analyse des zones après l'ACP

Dans cette partie, nous allons réaliser une analyse statistique descriptive simple pour les individus résultants de l'ACP et les variables des trois paramètres de houle. Cela permet de dégager les caractéristiques des trois paramètres de houle.

PARTIE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I. Analyse en Composante Principale

Nous avons vu dans les modules précédents les différents calculs à réaliser.

Pour chaque ACP des trois paramètres de houle réalisée, nous avons 89 points de grille (individus) et 12 valeurs de moyenne mensuelle (variables) entre 2009-2017 des trois paramètres de houle. D'où, pour chaque paramètre nous avons une matrice initiale de l'ACP contenant 1068 observations.

Vu la taille du tableau de données, c'est le logiciel qui réalisera les étapes de l'ACP.

Le logiciel produit alors différents tableaux et graphiques qu'il faudra interpréter.

I.1. Construction des matrices d'entrée en ACP

Pour notre étude, nous avons choisi comme individus les points de grilles (représentés sur la Figure 9.ci-dessous en lettre suivi de chiffre : A15, A14, ..., H2, H1), et variables les moyennes mensuelles entre 2009 et 2017 des trois paramètres de houle dans chaque point de grille.

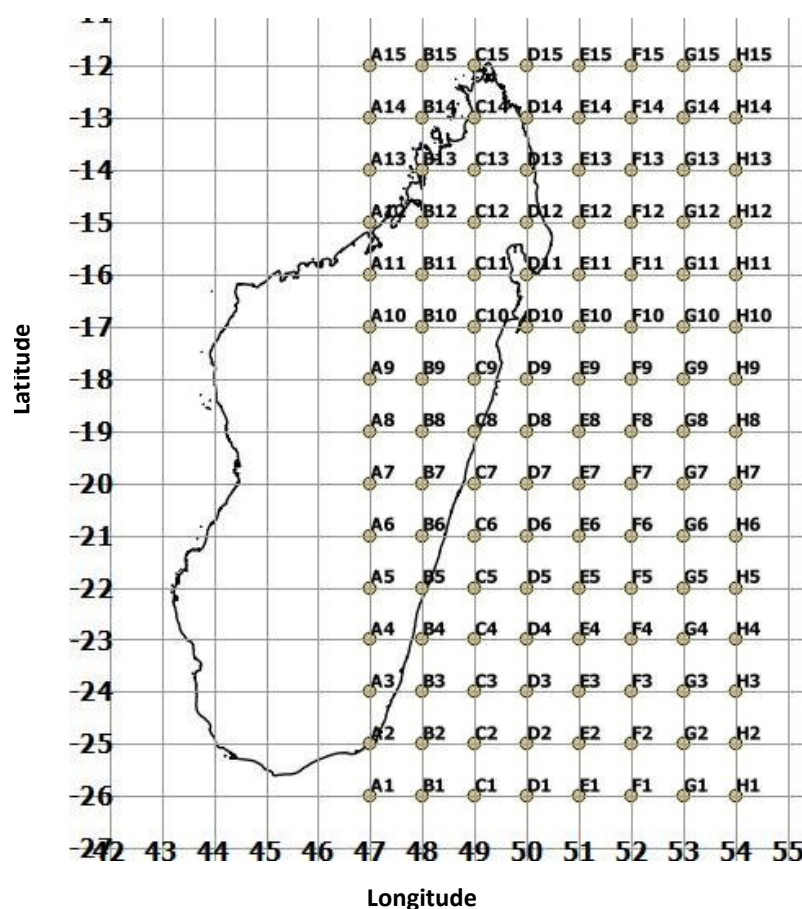


Figure 9: Zone d'étude (longitudes 47°E-54°E et latitudes 12°S-26°S) avec 120 points de grille

Source : Auteur

Dans le schéma précédent (Fig.9) nous avons 120 individus qui ne sont que les intersections des latitudes et longitudes incluant notre zone d'étude. Mais vue que notre étude ne s'intéresse pas aux individus se situant au Nord-Ouest de l'île et ceux qui touchent terre (voir Figure 10), il ne reste donc que 89 individus dans la réalisation de notre ACP représentés par la Figure 10 suivante :

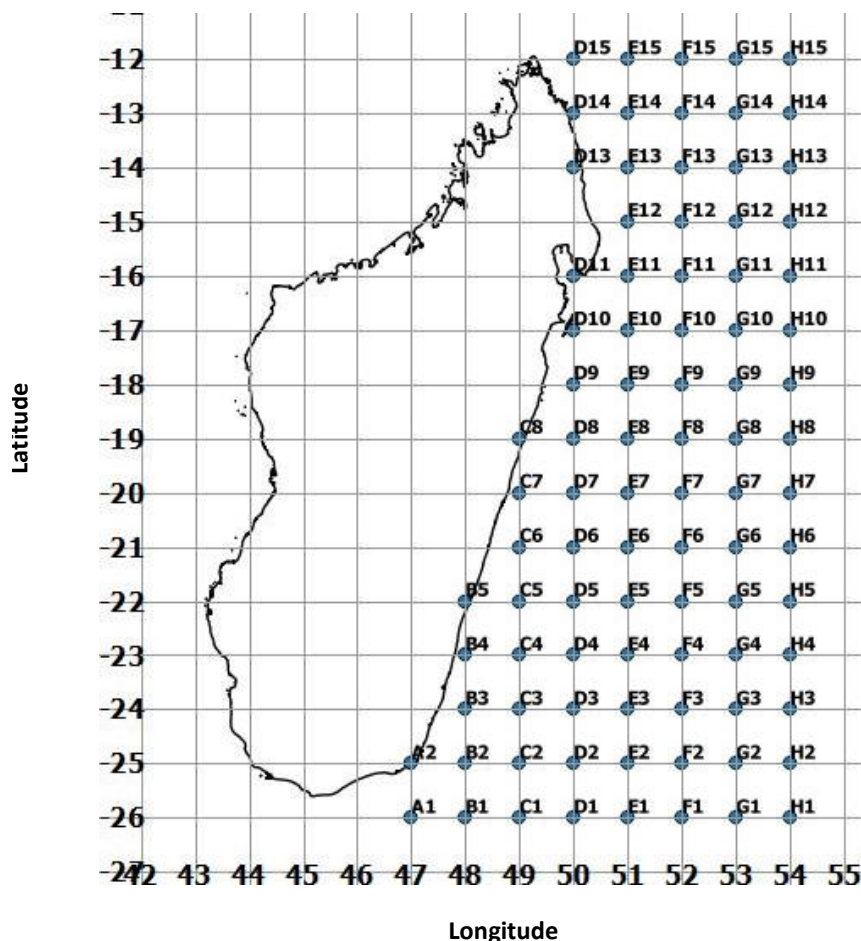


Figure 10: Zone d'étude avec 89 points de grille

Source : Auteur

Nos matrices initiales de l'ACP pour les trois paramètres de houle deviennent alors comme représentés dans les annexes 1, 2 et 3.

I.2. Moyennes et écart-types des trois paramètres de houle

Le tableau III ci-après représente les moyennes et l'écart-types des hauteur, période et direction de houle pendant les 12 mois de l'année au large de la côte Est de Madagascar de 2009 à 2017. Nous constatons que, dans cette partie, les hauteurs de houle sont en moyennes supérieures à 1,5 mètres tous les mois. Elles atteignent 2 m et plus pour les mois de juin, juillet et août. Les périodes sont en moyennes aux environs de 9 secondes et atteignent jusqu'à 10 s et plus pour les mois de mai à août. Les directions sont en moyennes de Sud-Est (SE) à Sud-Sud-Est (SSE).

Tableau III: Moyenne et écart-types des trois paramètres de houle au large de la côte Est

Variables	Moyennes			Ecart-types		
	Hauteur (m)	Période (s)	Direction (°)	Hauteur (m)	Période (s)	Direction (°)
Janvier	1,648	8,837	142,341	0,290	0,726	17,979
Février	1,707	8,878	142,932	0,311	0,492	13,622
Mars	1,733	9,208	143,169	0,317	0,663	11,275
Avril	1,855	9,667	147,629	0,281	0,748	16,143
Mai	1,834	10,150	153,325	0,285	0,794	18,058
Juin	2,026	10,423	152,673	0,293	0,850	22,640
Juillet	2,106	10,430	151,653	0,272	0,761	18,909
Aout	2,005	10,204	145,183	0,253	0,800	20,464
Sept	1,905	9,976	144,269	0,234	0,775	22,547
Octobre	1,692	9,509	142,374	0,239	0,732	20,885
Novembre	1,542	9,228	146,088	0,253	0,797	22,414
Décembre	1,449	9,121	144,099	0,245	0,752	21,277

I.3. Les axes principaux d'analyse à retenir

Selon le critère de Kaiser, nous avons les résultats représentés par les trois tableaux IV, V, VI et les trois figures 11, 12, 13 respectivement pour les trois paramètres de houle ci-dessous :

- A chaque valeur propre de ces tableaux correspond un axe principal qui porte une quantité d'information. D'après les axes F1, les informations décroissent très rapidement au fur et à mesure que le rang de l'axe augmente jusqu'à presque s'annuler à F12.
- Les figures représentent aussi les valeurs propres qui correspondent aux axes principaux. En appliquant le théorème du coude, nous pouvons retenir les deux premiers axes principaux F1 et F2 pour la suite de notre travail afin de présenter dans un plan nos variables pour chaque paramètre.

Au final, nous avons décidé de ne garder qu'une valeur propre (axe F1) pour les trois paramètres.

Tableau IV : Valeurs propres, pourcentage et pourcentage cumulé des variances pour la Hauteur

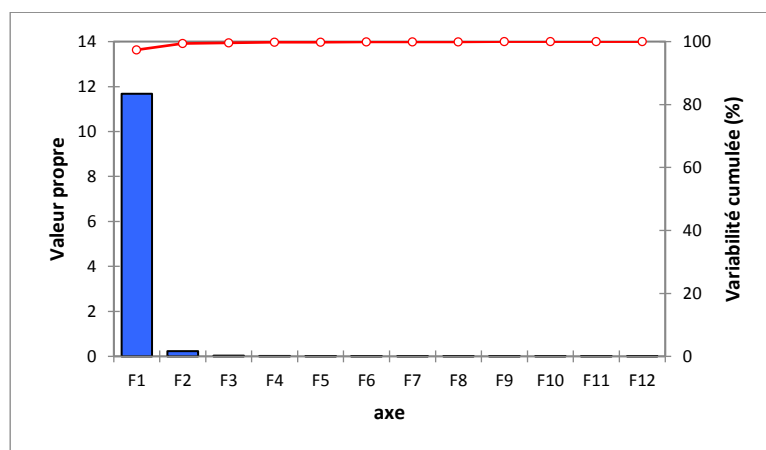
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Valeur propre	11,686	0,236	0,035	0,018	0,007	0,007	0,004	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
Variabilité (%)	97,381	1,965	0,292	0,147	0,058	0,056	0,031	0,018	0,017	0,017	0,010	0,006
% cumulé	97,381	99,345	99,638	99,785	99,843	99,900	99,931	99,949	99,967	99,984	99,994	100,000

Tableau V: Valeurs propres, pourcentage et pourcentage cumulé des variances pour la Période

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Valeur propre	11,513	0,344	0,048	0,028	0,019	0,013	0,009	0,008	0,007	0,005	0,003	0,002
Variabilité (%)	95,945	2,871	0,396	0,235	0,162	0,111	0,078	0,063	0,055	0,044	0,024	0,016
% cumulé	95,945	98,815	99,212	99,447	99,609	99,720	99,798	99,861	99,916	99,960	99,984	100,000

Tableau VI : Valeurs propres, pourcentage et pourcentage cumulé des variances pour la Direction

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Valeur propre	10,716	0,984	0,141	0,090	0,025	0,017	0,011	0,007	0,004	0,003	0,002	0,001
Variabilité (%)	89,297	8,199	1,178	0,750	0,211	0,140	0,091	0,054	0,032	0,021	0,016	0,011
% cumulé	89,297	97,496	98,674	99,424	99,635	99,775	99,866	99,920	99,952	99,973	99,989	100,000

**Figure 11: Valeurs propres et variabilité cumulée pour le paramètre hauteur****Source : Auteur**

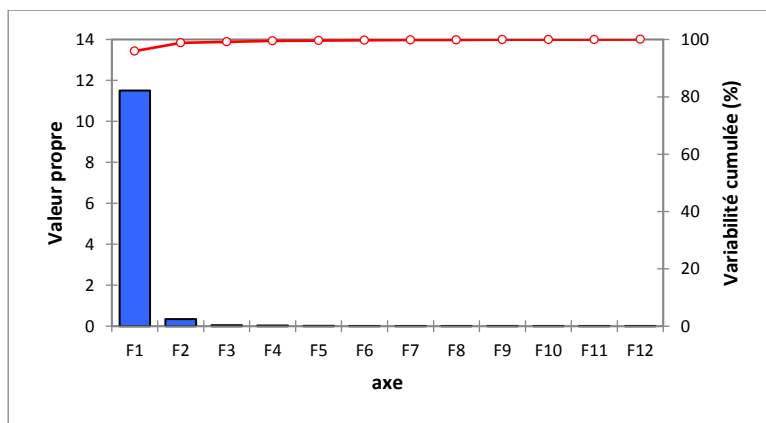


Figure 12: Valeurs propres et variabilité cumulée pour le paramètre Période

Source : Auteur

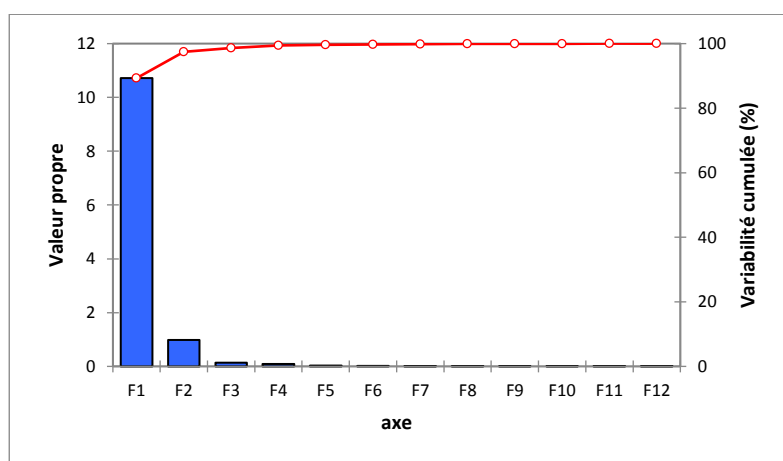


Figure 13: Valeurs propres et variabilité cumulée pour le paramètre Direction

Source : Auteur

I.4. Variables

I.3.1. Matrices de corrélation des variables

Les matrices de corrélation des variables pour les trois paramètres de houle sont illustrées par les tableaux VII, VIII et IX. On constate que les corrélations sont fortes et positives (supérieure à 0,8) pour tous les mois et pour tous les paramètres. Cela a dû au fait que les données que nous utilisons sont celles de l'après-midi. En d'autres termes, nous avons en moyenne le même comportement des variables le long de la large Est de l'île en après-midi pour la période 2009-2017.

Ces résultats sont renforcés par les figures 14, 15 et 16 des cercles de corrélations des variables.

Tableau VII : Matrice de corrélation des variables pour la hauteur

Variables	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Janvier	1											
Février	0,986	1										
Mars	0,993	0,995	1									
Avril	0,996	0,976	0,985	1								
Mai	0,992	0,967	0,982	0,991	1							
Juin	0,966	0,924	0,948	0,972	0,987	1						
Juillet	0,969	0,933	0,954	0,974	0,989	0,993	1					
Aout	0,949	0,896	0,923	0,958	0,974	0,992	0,988	1				
Septembre	0,945	0,892	0,918	0,953	0,972	0,992	0,986	0,998	1			
Octobre	0,975	0,942	0,961	0,979	0,984	0,987	0,982	0,983	0,982	1		
Novembre	0,975	0,931	0,953	0,983	0,983	0,986	0,978	0,982	0,980	0,986	1	
Décembre	0,985	0,948	0,967	0,988	0,990	0,986	0,980	0,980	0,978	0,989	0,995	1

Tableau VIII : Matrice de corrélation des variables pour la Période

Variables	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Janvier	1											
Février	0,985	1										
Mars	0,968	0,988	1									
Avril	0,960	0,984	0,986	1								
Mai	0,888	0,932	0,955	0,961	1							
Juin	0,893	0,935	0,953	0,972	0,983	1						
Juillet	0,863	0,911	0,930	0,948	0,981	0,988	1					
Aout	0,852	0,899	0,916	0,939	0,967	0,987	0,987	1				
Septembre	0,889	0,928	0,946	0,959	0,978	0,992	0,984	0,991	1			
Octobre	0,905	0,944	0,961	0,966	0,978	0,987	0,976	0,979	0,991	1		
Novembre	0,953	0,975	0,986	0,983	0,965	0,958	0,935	0,924	0,954	0,969	1	
Décembre	0,968	0,986	0,991	0,983	0,960	0,956	0,937	0,923	0,948	0,964	0,988	1

Tableau IX: Matrice de corrélation des variables pour la Direction

Variables	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Janvier	1											
Février	0,893	1										
Mars	0,871	0,801	1									
Avril	0,769	0,577	0,921	1								
Mai	0,784	0,614	0,938	0,990	1							
Juin	0,737	0,533	0,892	0,992	0,984	1						
Juillet	0,792	0,631	0,933	0,981	0,990	0,986	1					
Aout	0,799	0,611	0,907	0,982	0,975	0,984	0,984	1				
Septembre	0,767	0,561	0,891	0,987	0,978	0,993	0,984	0,994	1			
Octobre	0,805	0,600	0,897	0,980	0,970	0,984	0,979	0,991	0,993	1		

Novembre	0,705	0,479	0,875	0,981	0,974	0,981	0,961	0,950	0,969	0,962	1	
Décembre	0,712	0,508	0,888	0,965	0,963	0,958	0,942	0,916	0,938	0,933	0,987	1

I.3.2. Coordonnées, contributions et cosinus carrés des variables

Les coordonnées, les contributions et les cosinus carrés des variables par rapport aux axes 1 et 2 sont représentés dans les tableaux X, XI et XII. En effet, une variable est bien représentée suivant l'axe, si son cosinus carré tend vers 1.

Pour les trois paramètres, l'axe F1 représente toutes les variables. L'axe F2 n'en présente aucune pour les paramètres hauteur et période tandis que la variable Février est assez-bien représenté (qui a un cosinus carré égal à 0,729) pour le paramètre direction. Il ne nous reste que les axes F1 des trois paramètres car ils contiennent le maximum d'informations.

Tableau X : Coordonnées, contributions et cosinus carrée des variables pour la hauteur

Variables	AXE 1			AXE 2		
	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés
Janvier	0,991	8,399	0,981	0,128	6,938	0,016
Février	0,962	7,915	0,925	0,268	30,479	0,072
Mars	0,978	8,182	0,956	0,203	17,448	0,041
Avril	0,993	8,434	0,986	0,088	3,263	0,008
Mai	0,997	8,513	0,995	0,028	0,337	0,001
Juin	0,991	8,403	0,982	-0,111	5,215	0,012
Juillet	0,990	8,392	0,981	-0,080	2,726	0,006
Aout	0,982	8,245	0,963	-0,184	14,352	0,034
Sept	0,979	8,208	0,959	-0,195	16,141	0,038
Octobre	0,992	8,427	0,985	-0,050	1,057	0,002
Novembre	0,991	8,403	0,982	-0,066	1,826	0,004
Décembre	0,995	8,479	0,991	-0,023	0,218	0,001

Tableau XI: Coordonnées, contributions et cosinus carrée des variables pour la période

Variables	AXE 1			AXE 2		
	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés
Janvier	0,946	7,773	0,946	0,300	26,207	0,300
Février	0,975	8,265	0,975	0,203	11,944	0,203
Mars	0,985	8,432	0,985	0,140	5,715	0,140
Avril	0,990	8,518	0,990	0,082	1,959	0,082
Mai	0,983	8,388	0,983	-0,114	3,780	-0,114
Juin	0,987	8,469	0,987	-0,137	5,459	-0,137
Juillet	0,973	8,230	0,973	-0,202	11,838	-0,202
Aout	0,967	8,122	0,967	-0,234	15,939	-0,234
Sept	0,984	8,404	0,984	-0,156	7,099	-0,156
Octobre	0,989	8,492	0,989	-0,098	2,766	-0,098
Novembre	0,986	8,443	0,986	0,097	2,719	0,097
Décembre	0,987	8,464	0,987	0,126	4,575	0,126

Tableau XII: Coordonnées, contributions et cosinus carrée des variables pour la direction

Variables	AXE 1			AXE 2		
	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés
Janvier	0,841	6,598	0,841	0,486	24,042	0,486
Février	0,672	4,218	0,672	0,729	54,031	0,729
Mars	0,952	8,466	0,952	0,210	4,491	0,210
Avril	0,989	9,125	0,989	-0,121	1,500	-0,121
Mai	0,991	9,160	0,991	-0,077	0,600	-0,077
Juin	0,981	8,987	0,981	-0,177	3,173	-0,177
Juillet	0,991	9,156	0,991	-0,056	0,317	-0,056
Aout	0,985	9,049	0,985	-0,066	0,443	-0,066
Sept	0,983	9,019	0,983	-0,134	1,818	-0,134
Octobre	0,985	9,050	0,985	-0,078	0,625	-0,078
Novembre	0,965	8,688	0,965	-0,231	5,440	-0,231
Décembre	0,953	8,483	0,953	-0,186	3,520	-0,186

I.3.3. Cercles de corrélation des variables

Toutes les variables sont corrélées positivement entre elles. Ainsi, les résultats des matrices de corrélations de variables discutées dans le précédent module sont justifiés. Le premier axe factoriel correspond alors à une synthèse de l'effet commun à ces variables.

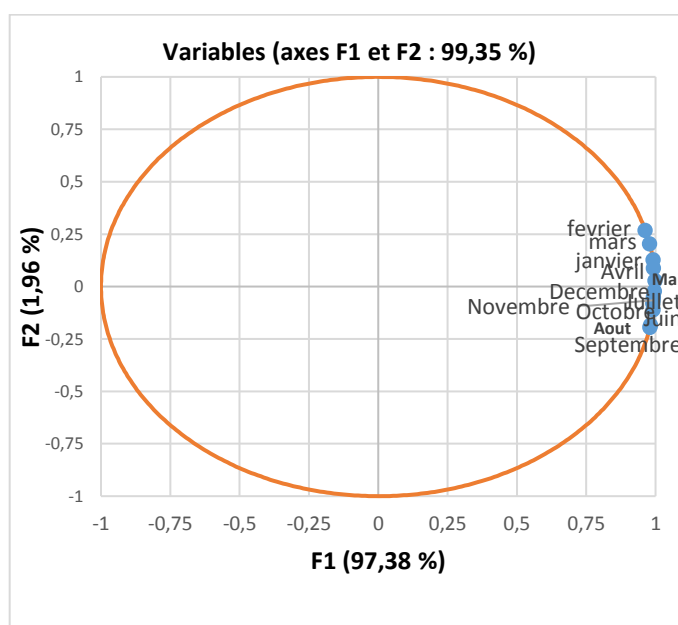


Figure 14: Cercle de corrélation des variables dans l'espace factoriel F1-F2 pour la hauteur

Source : Auteur

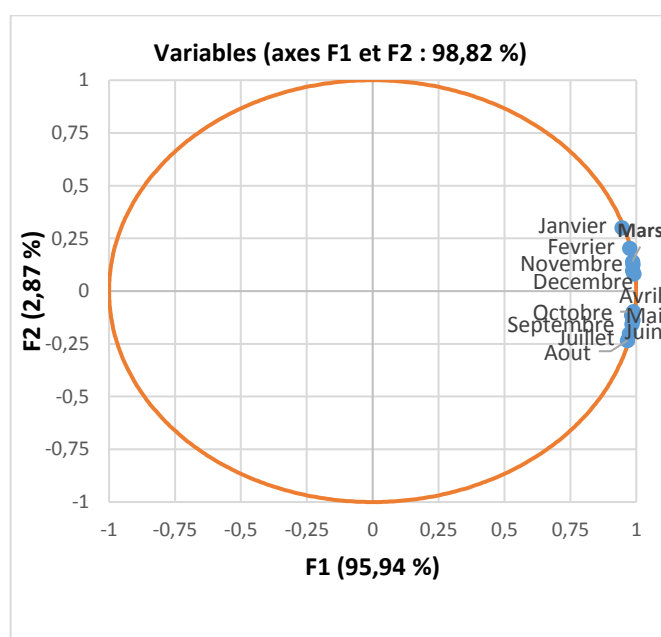


Figure 15: Cercle de corrélation des variables dans l'espace factoriel F1-F2 pour la période

Source : Auteur

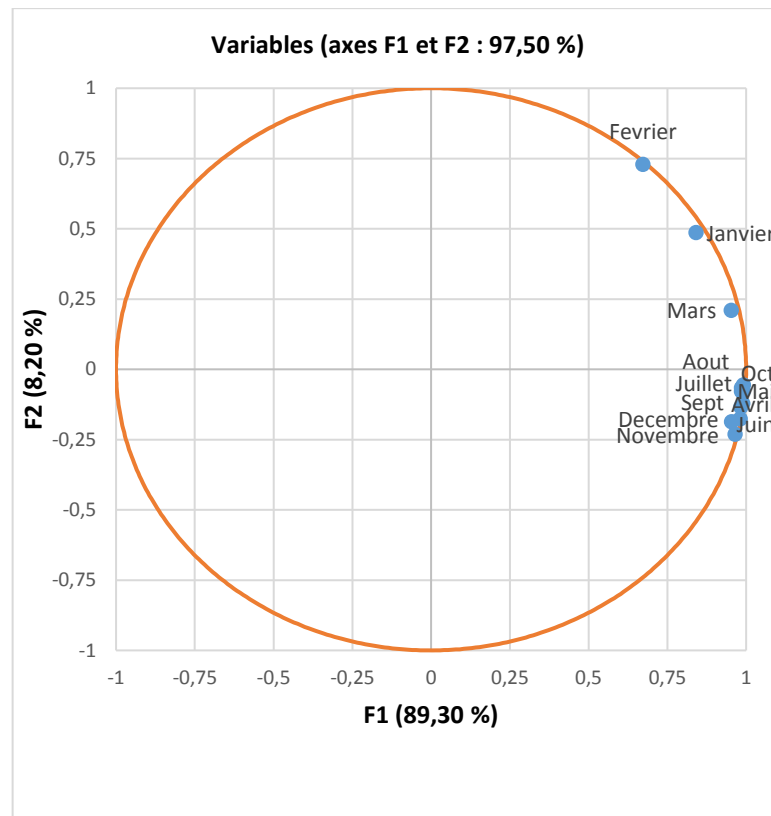


Figure 16: Cercle de corrélation des variables dans l'espace factoriel F1-F2 pour la direction

Source : Auteur

Selon les figures 14, 15 et 16 ci-dessus, les plans (F1 et F2) des paramètres hauteur, période et direction de houle gardent respectivement 99,35%, 98,82% et 97,5% des informations de ses matrices brutes. Sur le premier plan des deux premières figures (Fig.14 et Fig.15), toutes les variables sont sur le bord de cercle de corrélation et leurs projections par rapport à l'axe F1 sont proches de 1.

I.5. Individus

I.2.1. *Coordonnées, contributions et cosinus carrés des individus*

L'axe 1 contient respectivement 97,38%, 95,94% et 89,30% des informations sur les paramètres hauteur, période et direction de houle. La plupart des cosinus carrés des individus sont bien représentés sur l'axe 1.

Le tableau XIII suivant représente les individus bien représentés sur l'axe 1 (cosinus carré avec l'axe F1 proche de 1) en coordonnées négatif (colonnes marquées par le signe "-") et positif (colonnes marquées par le signe "+") pour les trois paramètres hauteur, période et direction.

Tableau XIII : Les individus bien représentés en coordonnées négatif et positif pour les trois paramètres

Hauteur		Période		Direction	
" ₋ "	" ₊ "	" ₋ "	" ₊ "	" ₋ "	" ₊ "
B4	A1	B3	A1	B3	A1
B5	B1	B4	B1	B4	B1
C5	B2	B5	B2	B5	B2
C6	C1	C5	C1	C4	C1
C7	C2	C6	C2	C5	C2
C8	C3	C7	C3	C6	C3
D6	D1	C8	D1	C7	D1
D7	D2	D6	D2	C8	D2
D8	D3	D7	D3	D6	D3
D9	D4	D8	D4	D7	D4
D10	E1	D9	D5	D8	E1
D11	E2	D10	E1	D9	E2
D13	E3	D11	E2	D10	E3
D14	E4	D13	E3	D11	E4
D15	E5	D14	E4	D13	E5
E7	F1	D15	E5	D14	F1
E8	F2	E8	E6	D15	F2
E9	F3	E9	E7	E7	F3
E10	F4	E10	F1	E8	F4
E11	F5	E11	F2	E9	F5
E12	F6	E12	F3	E10	F6
E13	F7	E13	F4	E11	G1
E14	G1	E14	F5	E12	G2
E15	G2	E15	F6	E13	G3
F8	G3	F9	F7	E14	G4
F9	G4	F10	G1	E15	G5
F10	G5	F11	G2	F8	G6
F11	G6	F12	G3	F9	G7
F12	G7	F13	G4	F10	H1
F13	H1	F14	G5	F11	H2
F14	H2	F15	G6	F12	H3
F15	H3	G12	G7	F13	H4
G9	H4	G13	G8		H5
G10	H5	G14	G9		H6
G11	H6	G15	H1		H7
G12	H7	H14	H2		H8
G13	H8	H15	H3		
G14	H9		H4		
G15			H5		
H11			H6		
H12			H7		
H13			H8		
H14			H9		
H15			H10		
			H11		

Les coordonnées, les contributions et les cosinus carrés des individus sur l'axe F1 et F2 sont quand même classées par les tableaux des annexes IV, V et VI respectivement pour les trois paramètres hauteur, période et direction. Nous remarquons que les premiers axes principaux portent la plus grande information.

I.2.2. Partition des individus

Les figures 17, 18 et 19 ci-après montrent respectivement la répartition des individus retenus dans l'espace factoriel F1 et F2 pour les paramètres hauteur, période et direction.

SYNTHESE des individus

- Premièrement, pour l'axe principal **F1** de la hauteur de houle (Figure 17) : la partie négative correspond à des hauteurs de houle variant entre 1m et 2m où la moyenne des hauteurs est autour de 1,5 m tandis que la partie positive correspond à celles variant entre 1,7m et 2,8m avec une moyenne autour de 2m. F1 représente donc la hauteur moyenne de vague pendant les deux saisons.
- Deuxièmement, pour l'axe principal **F1** de la période de houle (Figure 18) : la partie négative correspond aux périodes de houle variant entre 7s et 10,5s, et celle positive correspond à celles variant entre 8,7s et 11,5s. F1 représente donc la période moyenne de vague tant pendant l'été que pendant l'hiver.
- Et troisièmement, pour l'axe principal **F1** de la direction de houle (Figure 19) : la partie négative correspond aux directions de houle de provenance Sud-Est (SE) en moyenne (127°) et la partie positive celles de provenance Sud-Sud-Est (SSE) en moyenne (164°). F1 représente donc la direction moyenne de vague pendant toute l'année.

Les résultats obtenus pour les seconds axes des trois paramètres ne sont pas concluant, ce qui les rendent difficiles à interpréter.

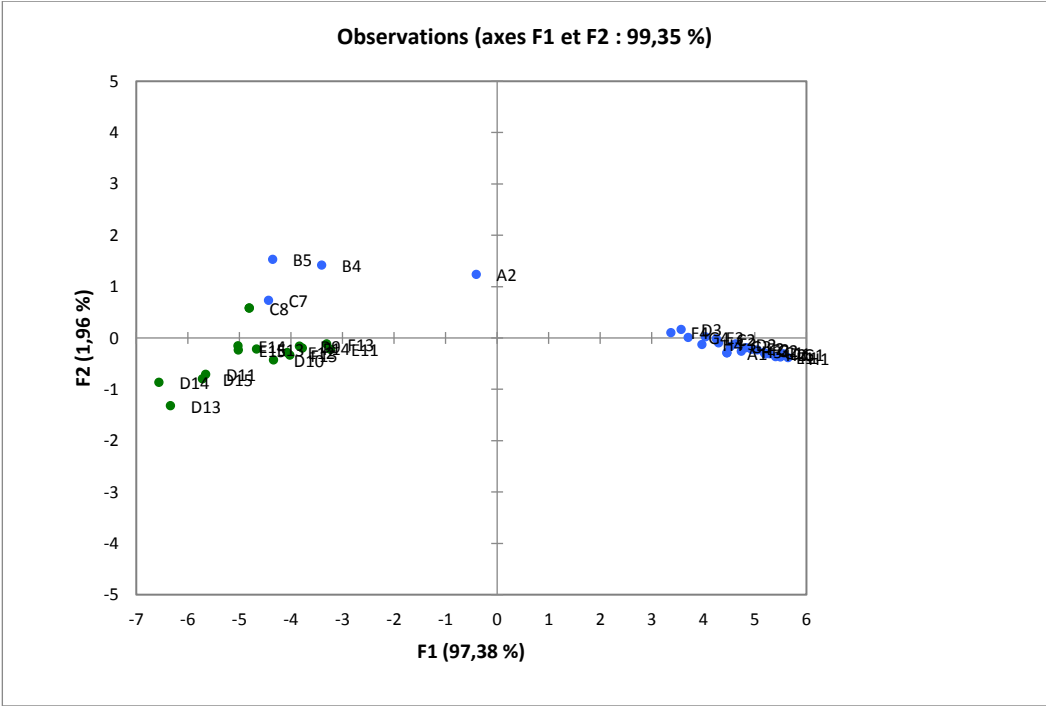


Figure 17: Répartition des individus dans l'espace factoriel F1 et F2 pour la hauteur
Source : Auteur

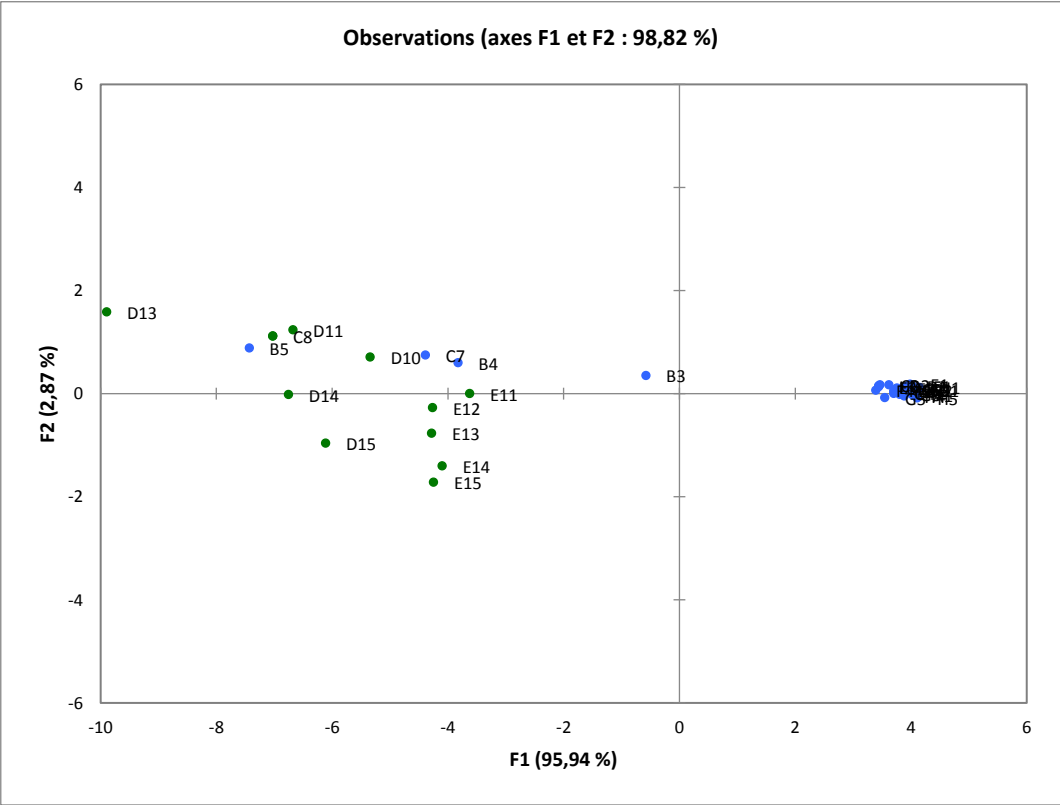


Figure 18: Répartition des individus dans l'espace factoriel F1 et F2 pour la période
Source : Auteur

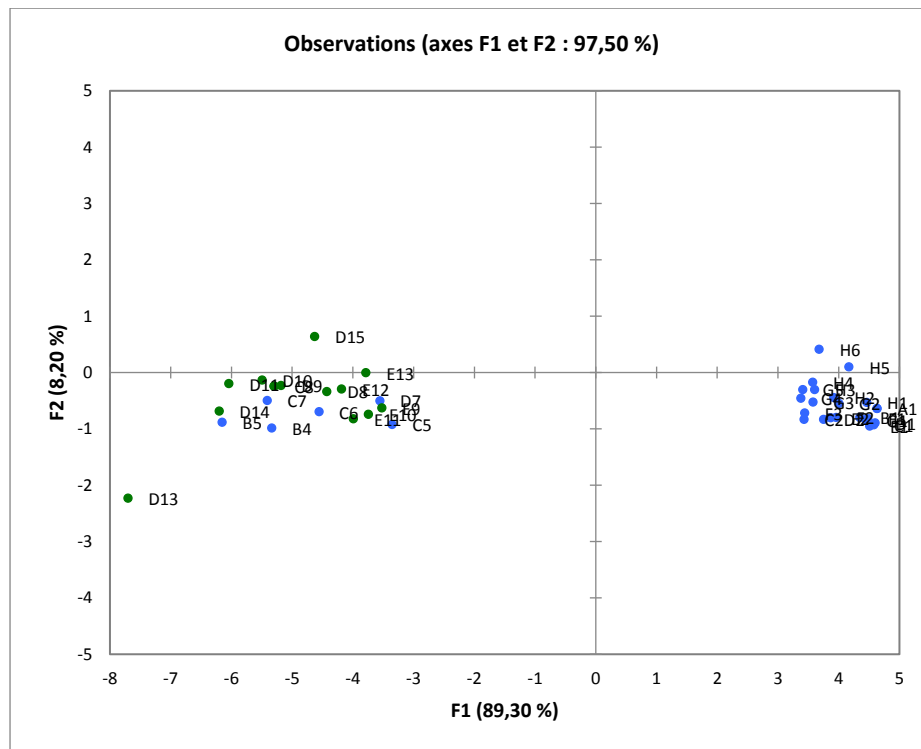


Figure 19: Répartition des individus dans l'espace factoriel F1 et F2 pour la direction
Source : Auteur

I.2.3. Régionalisation

L'ACP réalisée nous a permis de subdiviser notre zone d'étude en deux régions pour chaque paramètre de houle étudié. Les points coloriés en rouge illustrés dans la figure 20 caractérisent les individus de la ZONE_1 et ceux coloriés en bleu illustrés dans la figure 20 caractérisent les individus de la ZONE_2 pour les trois paramètres de houle. Les individus ont de même évolution pour tous les mois de l'année c'est-à-dire les valeurs les plus hautes sont rencontrées en hiver austral.

Les points coloriés en vert illustrés dans la figure 20 – c) représentent les individus non classés.

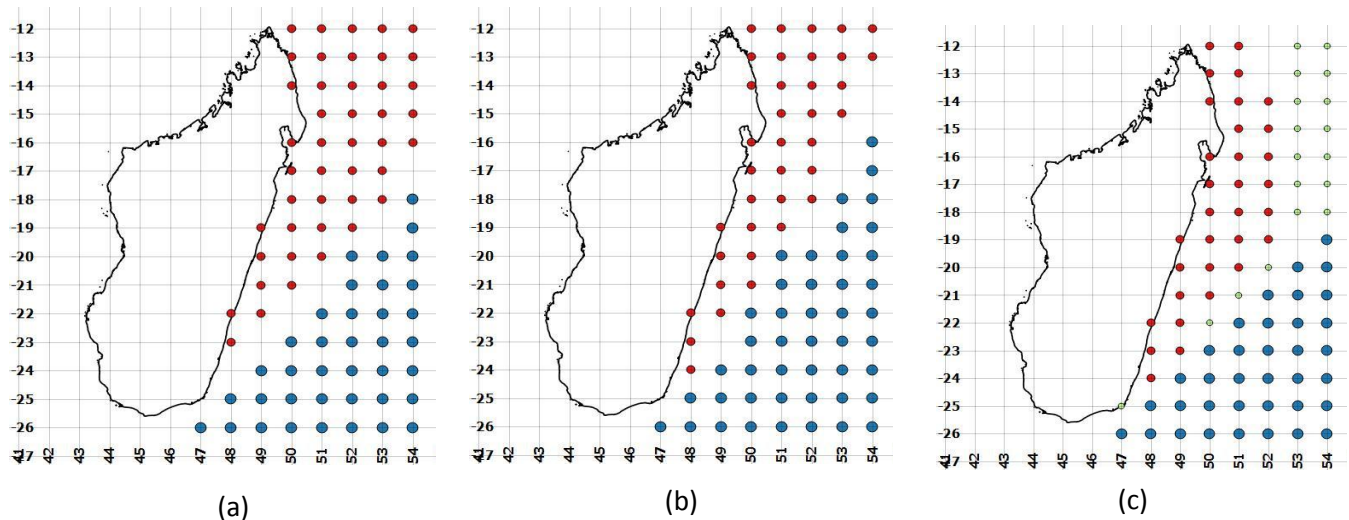


Figure 20: Régionalisation de la zone d'étude selon les trois paramètres de houle. (a)-Hauteur, (b)-Période, (c)-

Direction

Source : Auteur

II. Analyse des paramètres d'après la régionalisation de l'ACP

II.1. Analyse des paramètres d'après la régionalisation de l'ACP

L'examen des figures 21, 22 et 23 permet de dégager les comportements des trois paramètres de houle dans les ZONE_1 et ZONE_2.

Pour chaque figure, les axes représentent les individus retenus d'après l'ACP pour chaque paramètre, et les ordonnées représentent les valeurs des moyennes mensuelles de la période 2009-2017 des trois paramètres de houle.

■ Hauteur

Pour les deux zones (Fig.21), nous constatons les valeurs plus fortes lors des mois de juin, juillet, août, septembre et octobre. Ces valeurs varient entre de 1,5m et 2m pour la zone_1 et entre 2m et 2,5m pour la zone_2.

Interprétation :

Pendant les mois d'hiver, les hauteurs de houle ont des valeurs plus fortes, atteignant 2m pour la zone_1 et 2,5m pour la zone_2, que lors des mois d'été. ZONE_2 plus énergétique que la zone_1 en termes de hauteurs de houle.

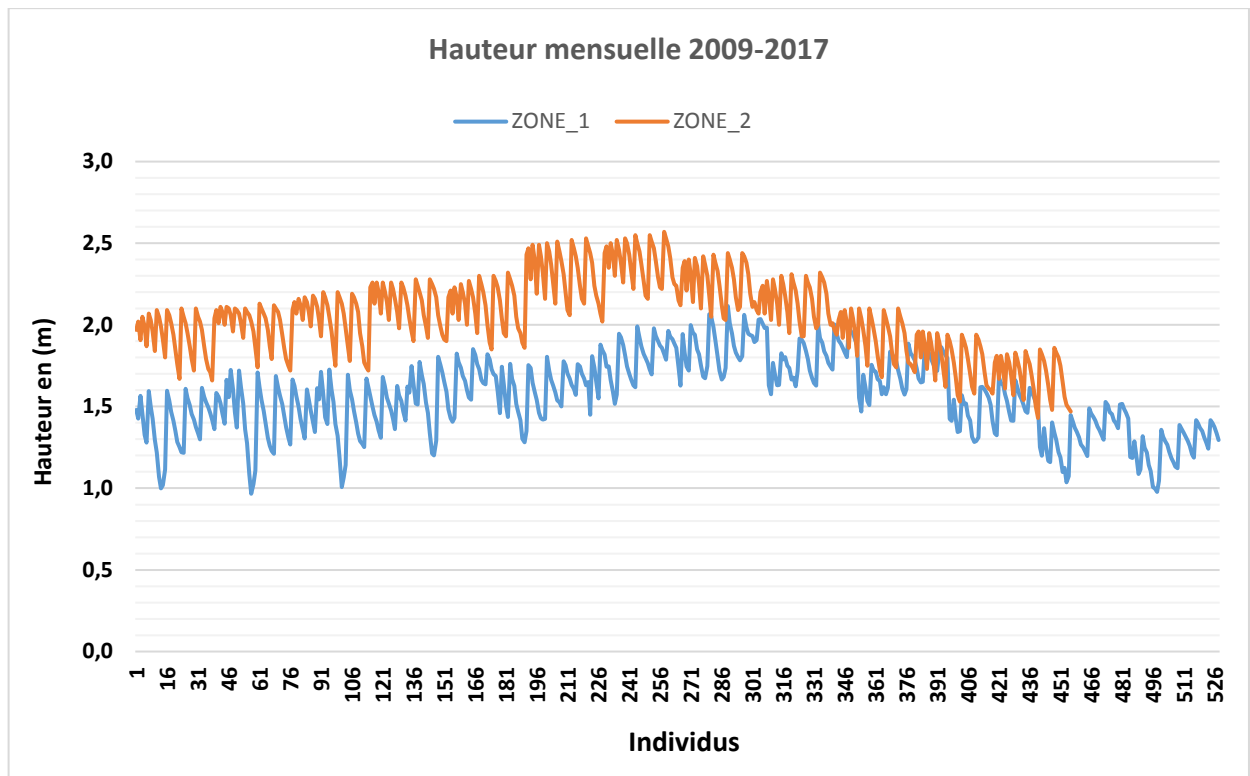


Figure 21 : Hauteur mensuelle 2009-2017 pour les ZONE_1 et ZONE_2
Source : Auteur

■ Période

La figure 22 montre une faible variation de période de houle dans la zone_2 (autour de 10s) avec des valeurs plus fortes rencontrées lors des mois de mai à août (entre 10s et 12s), et dans la zone_1, des valeurs plus fortes rencontrées lors des mois de mai à septembre (avec un minimum autour de 8s et un maximum autour de 10s).

Interprétation :

Pendant les mois d'hiver, les périodes de houle ont des valeurs plus fortes, entre 8s et 10s pour la zone_1 et 10s et 12s pour la zone_2, que lors des mois d'été. ZONE_2 est donc plus énergétique que la zone_1 en termes de période de houle.

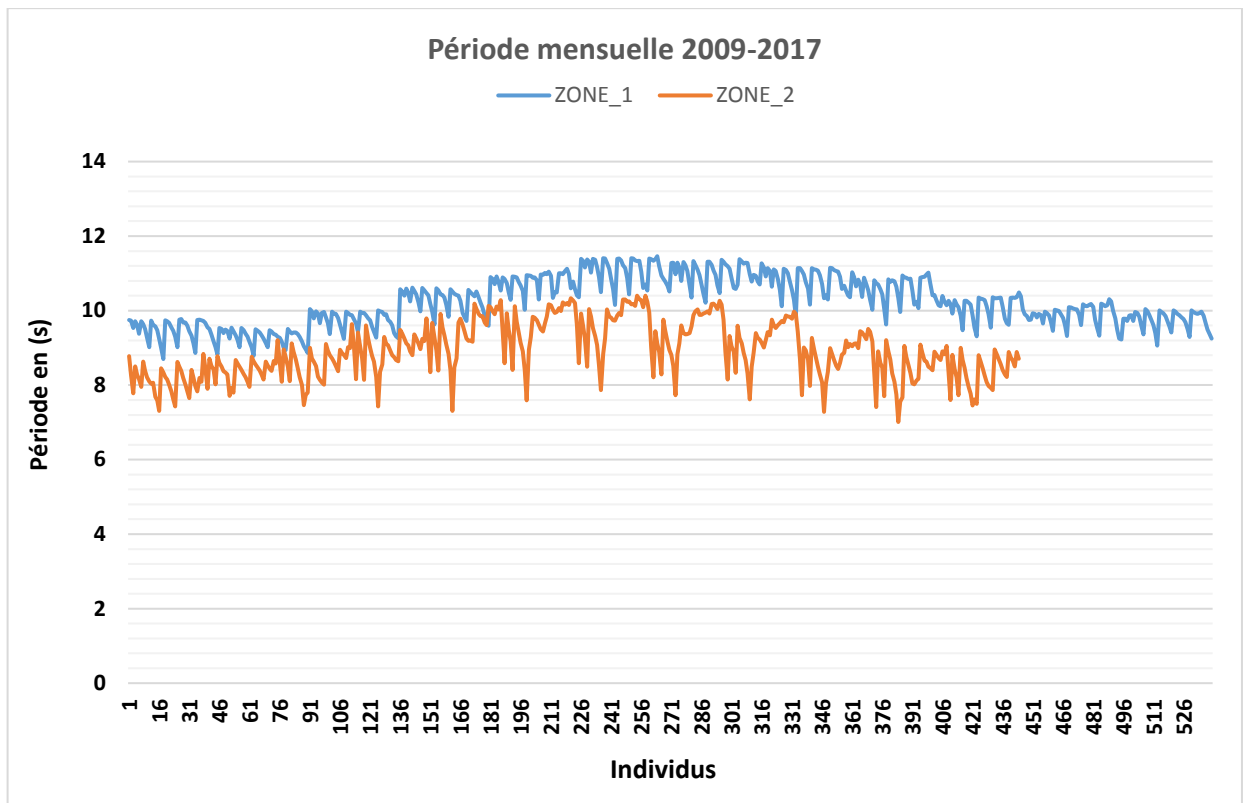


Figure 22: Période mensuelle 2009-2017 pour les ZONE_1 et ZONE_2
Source : Auteur

■ Direction

Pour la zone_2 (Fig.23), nous constatons 2 de variation de directions des vagues, elles varient entre 140° et 160° lors des mois de janvier à mars. Et elles varient entre 140° et 190° entre avril et décembre.

Pour la zone_1 (Fig.23), nous constatons une forte amplitude de direction des vagues pour tous les mois, avec un minimum de 80° et un maximum de 160° . Un même type de comportement de direction est constaté pendant tous les mois.

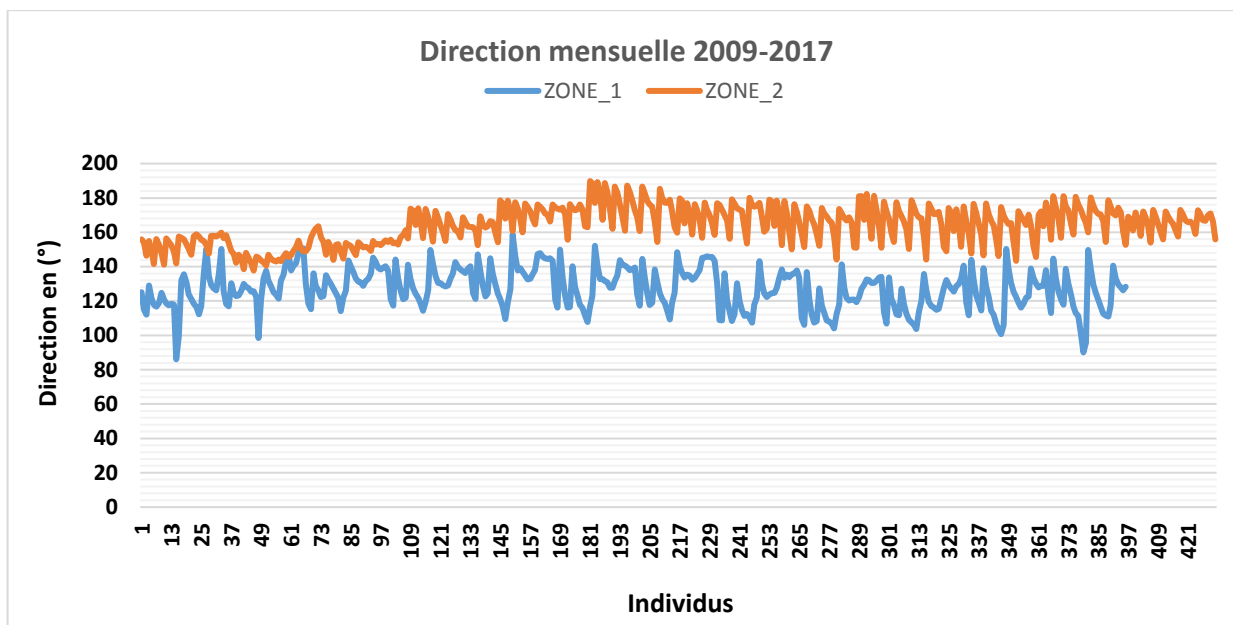


Figure 23: Direction mensuelle 2009-2017 pour les ZONE_1 et ZONE_2

Source : Auteur

II.2. Classification des paramètres de houle

La classification des paramètres de houle (hauteur, période et direction) permet de cibler les valeurs qui reviennent le plus fréquemment. Les histogrammes des figures 24 à 29 présentés ci-dessous présentent les distributions en pourcentage des valeurs de ces paramètres entre 2009 à 2017 de dans les 2 zones.

■ Hauteur

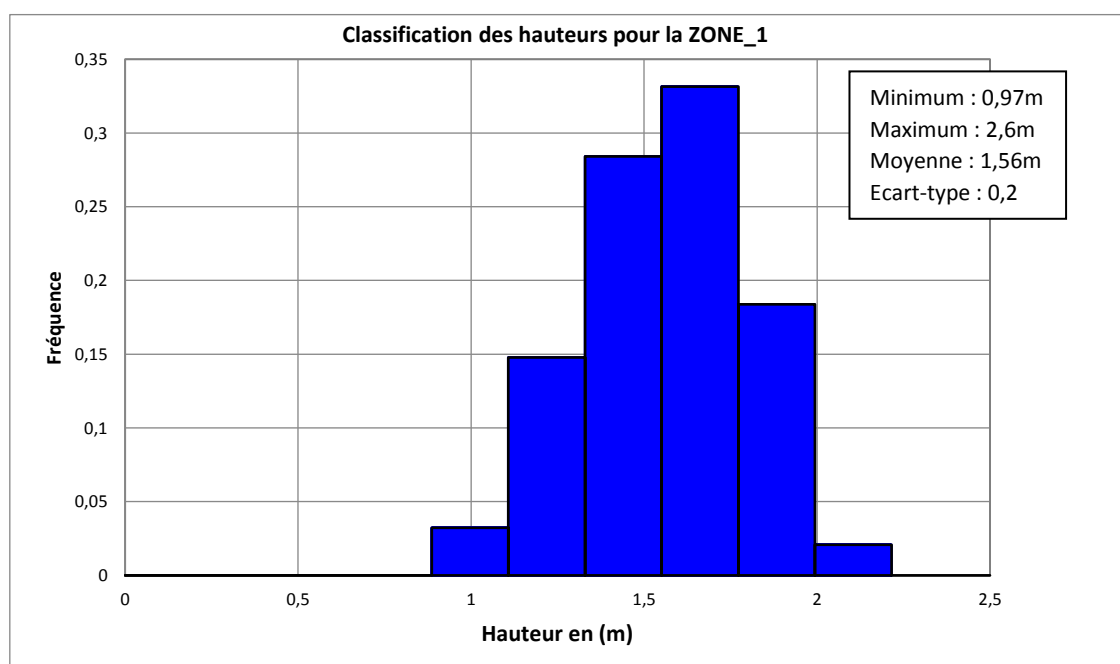


Figure 24: Classification des hauteurs pour la ZONE_1

Source : Auteur

Les hauteurs de vagues sont comprises entre 0,97m et 2,6m et la totalité des hauteurs sont comprise entre 1m et 2m, moins de 5% sont supérieures à 2m (Fig.24).

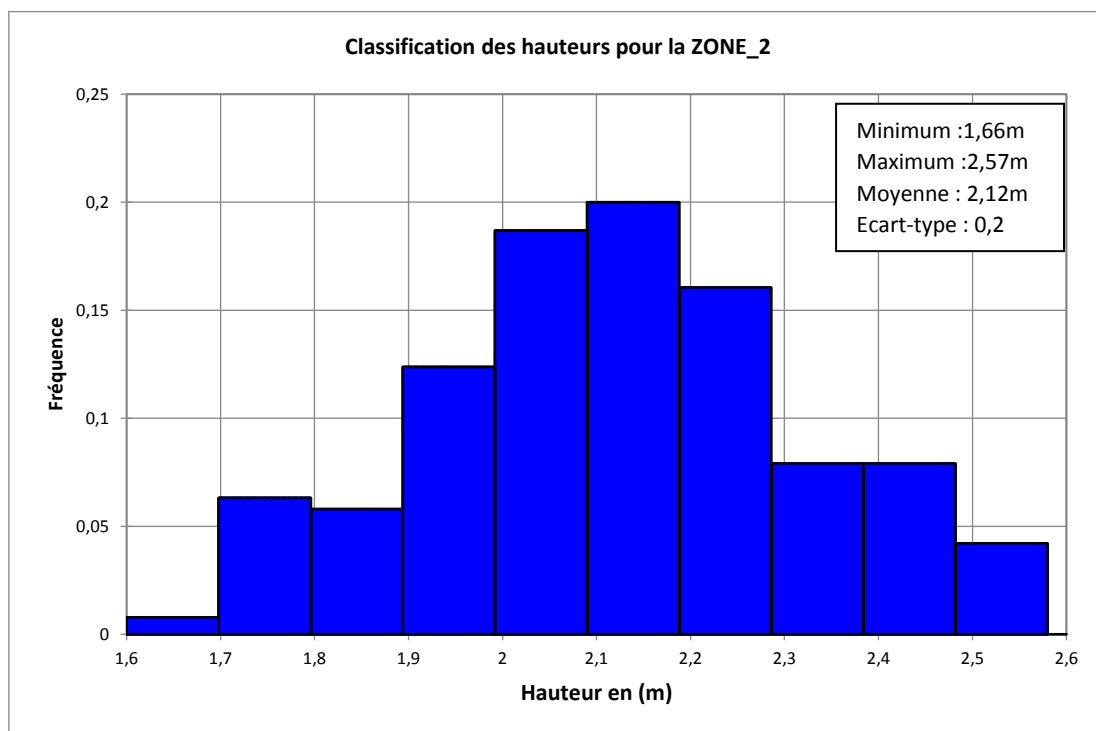


Figure 25: Classification des hauteurs pour la ZONE_2

Source : Auteur

Les hauteurs de vagues sont comprises entre 1,66m et 2,57m. 25% sont inférieures à 2m et 75% supérieures à 2m (Fig.25).

■ Période

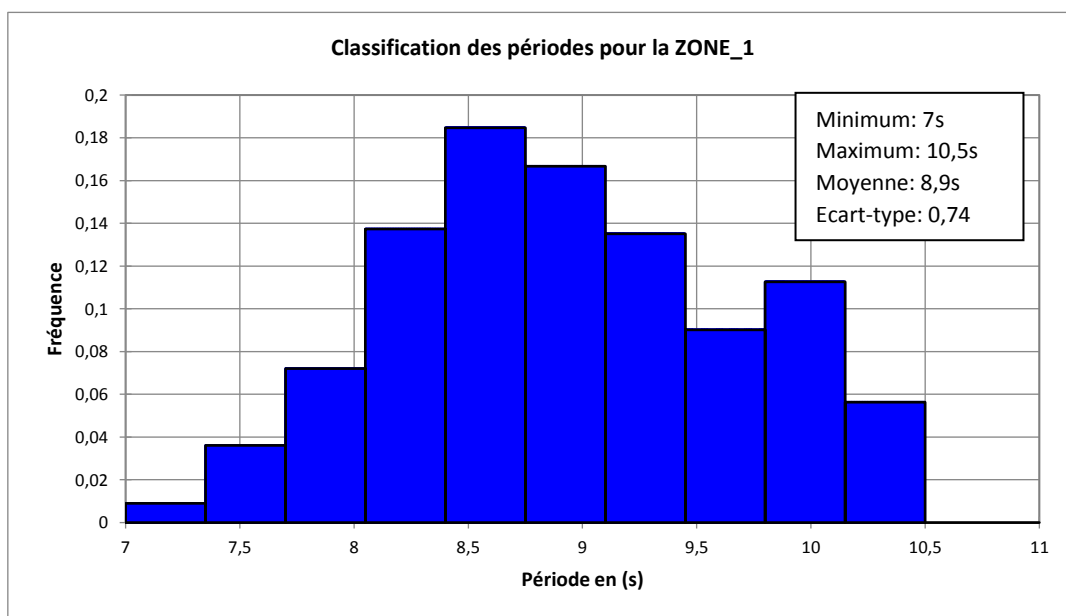


Figure 26: Classification des périodes pour la ZONE_1

Source : Auteur

Pour la ZONE_1 (Fig.26) : Les périodes se situent entre 7s et 10,5s. Près de 80% sont comprises entre 8 et 10s. 10% sont inférieures à 8s et 10% sont supérieures à 10s.

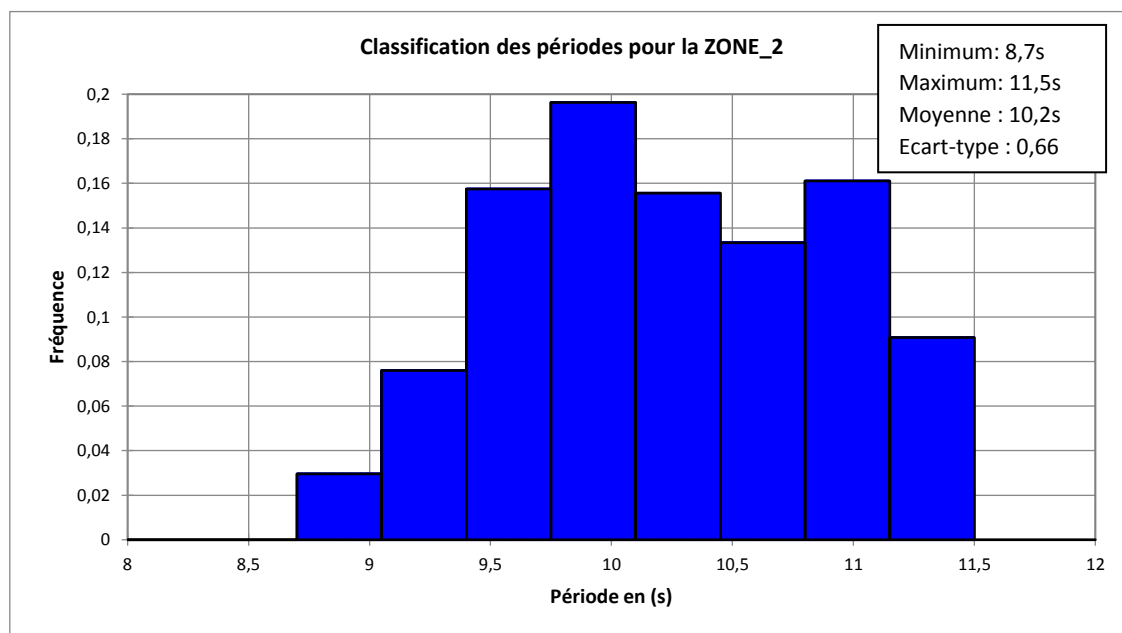


Figure 27: Classification des périodes pour la ZONE_2
Source : Auteur

Pour la ZONE_2 (Fig.27) : Les périodes se situent entre 8,7s et 11,5s. Près de 46% sont inférieures à 10s et 54% supérieures à 10s.

▪ Direction

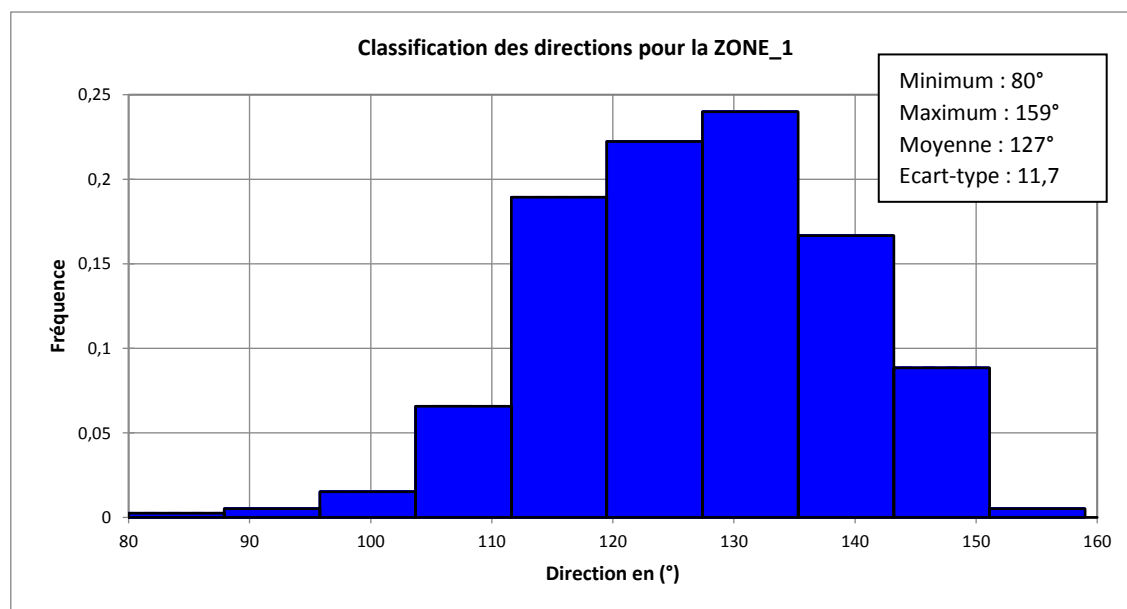


Figure 28: Classification des directions pour la ZONE_1
Source : Auteur

Pour la ZONE_1 (Fig.28) : Les directions de houles sont comprises entre 80° et 159°. 95% des houles ont de provenance comprise entre 110° (ESE) et 150° (SSE).

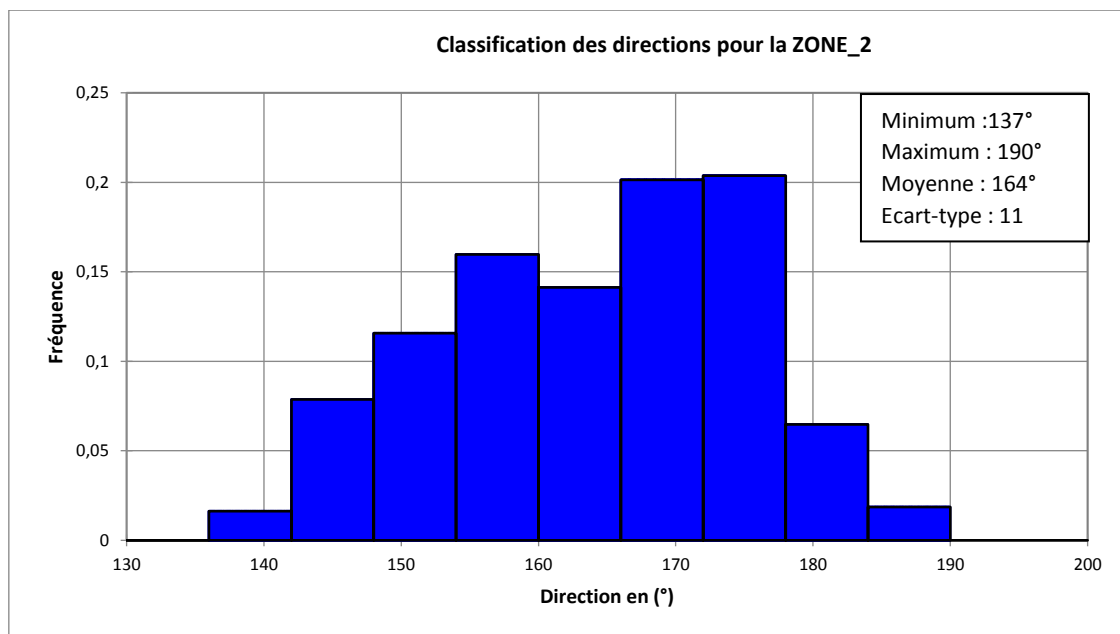


Figure 29: Classification des directions pour la ZONE_2

Source : Auteur

Pour la ZONE_2 (Fig.29) : les directions de houles sont comprises entre 137° et 190°. 20% sont inférieures à 150° et 80% supérieures à 150°.

• Caractéristiques des paramètres de houle pour les zones 1 et 2

La caractérisation des trois paramètres de houle est résumée dans le tableau 14 ci-dessous. Chaque paramètre est caractérisé par son minimum, son maximum, sa moyenne et sa fréquence d'occurrence de trois classes.

Tableau XIV: Caractéristiques des paramètres de houle pour la ZONE_1 et ZONE_2

Paramètre	Régions	Min	Max	Moy	H<1	1<H<2	H>2
Hauteur H (en m)	ZONE_1	0,97	2,6	1,56	5%	90%	5%
	ZONE_2	1,66	2,57	2,12	0%	25%	75%
Paramètre	Régions	Min	Max	Moy	P<8	8<P<10	P>10
Période P (en s)	ZONE_1	7	10,5	8,9	10%	80%	10%
	ZONE_2	8,7	11,5	10,2	0%	46%	54%
Paramètre	Régions	Min	Max	Moy	D<100	100<D<150	D>150
Direction D (en °)	ZONE_1	80	159	127	3%	95%	2%
	ZONE_2	137	190	164	0%	20%	80%

Les hauteurs et les directions moyennes mensuelles de houle sont majoritairement entre 1m-2m et 100°-150° respectivement dans la ZONE_1. Les valeurs sont majoritairement supérieures à 2 m et 150° respectivement pour la hauteur et la direction dans la ZONE_2.

Les périodes sont en générales comprises entre 8s et 10s dans la ZONE_1. La moitié des périodes dans la ZONE_2 sont comprises entre 8s et 10s tandis que l'autre moitié sont supérieures à 10s.

DISCUSSIONS

L'Analyse en Composante Principale a permis de subdiviser notre zone d'étude en deux régions (ZONE_1 et ZONE_2). Elles sont classées suivant les comportements des moyennes mensuelles de 2009 et 2017 des hauteur, période et direction de houle.

Les résultats de l'ACP sur la régionalisation de notre zone d'étude pour les trois paramètres de houle confirment les résultats de Andrew Cornett-2008 [1] sur la puissance moyenne annuelle des vagues au large des côtes dans le monde.

Nos résultats sur le comportement des trois paramètres caractéristiques de houle au large Est de Madagascar, dans les zones 1 et 2 mettent en évidence ce que Andrew Cornett-2008 [1] a aussi précisé dans son résultat qui dit que cette moyenne de la puissance annuelle des vagues cache une grande disparité selon les saisons, en conformité avec la variation saisonnière des vents. En effet pour Madagascar, les valeurs maximales pour les trois paramètres sont rencontrées en hiver.

Cette étude a permis de constater que la ZONE_2 est plus énergétique que la ZONE_1. Rappelons que la ZONE_1 occupe presque les deux tiers Nord de notre zone d'étude.

En termes d'énergie de houle, selon toujours l'étude d'Andrew Cornett-2008 [1], nous pouvons répartir en deux zones cette énergie du large de la côte Est de Madagascar (notre zone d'étude) comme suit :

- Dans la partie Nord de notre zone d'étude, là où l'énergie exploitable peut atteindre 20 à 25 kW/m
- Dans la partie Sud de notre zone d'étude, là où l'énergie exploitable peut atteindre 25 à 30 kW/m

CONCLUSION

Le présent travail concerne l'étude des caractéristiques de houle au large de la côte Est de Madagascar. L'étude effectuée a été basée sur les données trihoraires à 12HTU, 15HTU et 18HTU des trois paramètres de houle, hauteur, période et direction, issues du modèle Wave Watch 3 de la NOAA sur la période de 2009 à 2017. En effet, l'objectif consiste à dégager les caractéristiques de ces paramètres au large de la côte est de Madagascar à toute fin utile notamment dans la récupération de l'énergie des vagues. Pour ce faire, nous avons procédé à deux méthodes d'analyse, à partir desquelles nous avons établi que :

- Selon l'Analyse en Composante Principale, le large de la côte Est de Madagascar peut classer en deux régions (ZONE_1 et ZONE_2) selon le comportement des trois paramètres de houle à 12HTU, 15HTU et 18HTU.
- Selon l'analyse descriptive effectuée sur les zones 1 et 2, nous avons conclu que la ZONE_2 est plus énergétique que la ZONE_1.

Pour tout l'ensemble de notre zone d'étude, nous avons remarqué que les paramètres sont plus forts en hiver qu'en été.

En définitive, nous pouvons conclure que l'objectif a été atteint en grande partie. En effet, les caractéristiques des hauteur, période et direction de houle dans les deux zones (au large de la côte Est de Madagascar) ont été identifiés. A partir de ces résultats et l'étude d'Andrew Cornett-2008 [1] sur la puissance moyenne annuelle des vagues au côtes, nous pouvons récupérer annuellement une énergie de vague :

- Jusqu'à 25 kW/m dans la ZONE_1 qui a rencontré majoritairement toute l'année 95% des houles venant du secteur Sud-Est, 90% des hauteurs comprises entre 1 et 2m, et 80% des périodes comprises entre 8s et 10s ;
- Jusqu'à 30 kW/m dans la ZONE_2 qui a rencontré majoritairement toute l'année 80% des houles venant du secteur Sud, 75% des hauteurs supérieures à 2m, et des périodes comprises entre 8s et 11,5s.

En guise de perspectives de travail, il serait intéressant de mener une étude encore plus profonde sur l'exploitation des énergies de vagues dans ces deux zones.

BIBLIOGRAPHIE

Références webographiques :

- [1]. A. BOUCHIER, « Statistique et logiciel R », <http://rstat.ouvaton.org> ; description théorique de l'ACP et mise en œuvre sous R avec le package ADE-4.
- [2]. Comparaison des densités de puissance moyennes de diverses énergies renouvelables. Disponible sur <<http://www.ifremer.fr>> (consulté en juin 2017)
- [3]. Energie des vagues. Disponible sur <<http://www.aw-energy.com>> (consulté en juin 2017)
- [4]. Houle, Disponible sur <<http://www.fr.m.wikipedia.org/>> (consulté en juin 2018)
- [5]. JACQUES Ruer- L'énergie de la houle. Disponible sur <<http://www.clubdesargonautes.org/>> (consulté en juin 2018)

Références bibliographiques :

- [1]. Andrew CORNETT, Juillet 2008, « A Global Wave Energy Resource Assessment »
- [2]. A-C. FONTAN et H. QUETELARD, 2013, Houle cyclonique et Onde de tempête
- [3]. Amélie LAUGEL, 2013, Climatologie des états de mer en Atlantique nord-est : analyse du climat actuel et des évolutions futures sous scénarios de changement climatique par descente d'échelle dynamique et statistique
- [4]. André BOUCHIER, Janvier 2006, L'analyse des données à l'usage des non mathématiciens, INRA Montpellier
- [5]. Aurélien BABARIT, 2009, Jean-Marc Rousset, La récupération de l'énergie de la houle, partie 1 : caractérisation de la ressource et bases de l'hydrodynamique
- [6]. Aurélien BABARIT, Jean-Marc Rousset, 2009, La récupération de l'énergie de la houle, partie 2 : caractérisation de la ressource et bases de l'hydrodynamique
- [7]. Bernard PITON, Marc TAQUET, 1992, Océanographie physique des parages de l'île de la Réunion, Ed ORSTOM
- [8]. BRGM/RP-56715-FR, novembre 2008, Mise en place d'outils pour l'étude du forçage des agents dynamiques sur le littoral aquitain
- [9]. Cyril DUTHEIL, 2013, Caractérisation de l'environnement océanique et atmosphérique d'atolls lors d'événements dystrophiques dans les lagons
- [10]. DEBIAN, 2005 : Cours ADD mrs2, chap.2 : Analyse en Composantes Principales (ACP).
- [11]. DEBIAN, 26 oct. 2007 : Cours mintppt, Analyse en Composantes Principales (ACP).

- [12]. Ewen GALLIC, 2015, Logiciel R et programmation - Boucles et calculs vectoriels, Université de Rennes 1
- [13]. F. SEYTE, M. TERRAZA, 2007 : Analyse de données module 3 : Formalisation mathématique de l'ACP, module 4 : ACP pratique, Professeur de sciences économiques – Université de Montpellier I.
- [14]. François HUSSON, Analyse en composantes principales (ACP), Laboratoire de mathématiques appliquées - Agrocampus Rennes
- [15]. G. Jay KERNS, 2011, Introduction to Probability and Statistics Using R
- [16]. G. SAPORTA, 2006, « Probabilités, Analyse de données et Statistique », Dunod, partie théorique, pages 155 à 177 ; partie pratique, pages 177 à 181.
- [17]. Garrett GROLEMUND, 2013, Data Analysis with R.
- [18]. Jean LE BORGNE, 1987, CLIMATOLOGIE DU SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN: Le cas de l'Ile Maurice, Ed ORSTOM
- [19]. Mayeul KAUFFMANN, Mars 2009 : AIDE MÉMOIRE R, Référence des fonctions de R les plus courantes
- [20]. ÖZGÜRERGÜL, 2013, Guide to Programming and Algorithms Using R, Springer
- [21]. PEDREROS R, LECACHEUX S, Quantification de la houle centennale de référence sur les façades littorales de la Réunion
- [22]. Ph ROLET JJ Seguin, Février 1986, Traitement des données multivariées (application aux sciences de la terre), Bureau des Recherches Géologiques et Minières
- [23]. Phil SPECTOR, 2008, Data Manipulation with R, Robert Gentleman
- [24]. RAKOTOMALALA Ricco, Analyse en Composantes Principales : Principes et pratiques de l'ACP, Université Lyon 2
- [25]. Serge Folly TOMETY, 2016, Analyse des statistiques de vagues au nord du golfe de guinée (cote d'ivoire, Ghana, Benin, Nigeria) dans le cadre du suivi de l'érosion côtière.
- [26]. Yannig GOUDE, 2017, Introduction à la manipulation de série temporelle avec R, MAP-STA2 : Séries chronologiques
- [27]. YIHUIXIE, 2013, Dynamic Documents with R and knitr. Chapman and Hall/CRC.

ANNEXES

Annexe I : Matrice initiale de l'ACP pour le paramètre hauteur de houle

Individus	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A1	1,97	2,04	2,09	2,23	2,17	2,43	2,44	2,35	2,20	2,03	1,94	1,77
A2	1,71	1,86	1,85	1,89	1,80	1,94	2,00	1,84	1,73	1,64	1,50	1,46
B1	2,021	2,09	2,14	2,26	2,21	2,47	2,48	2,39	2,24	2,08	1,96	1,81
B2	1,906	2,01	2,07	2,13	2,07	2,28	2,35	2,21	2,07	1,92	1,80	1,67
B3	1,687	1,85	1,84	1,86	1,81	1,90	2,03	1,85	1,75	1,62	1,49	1,41
B4	1,479	1,66	1,61	1,62	1,59	1,65	1,74	1,63	1,55	1,42	1,25	1,19
B5	1,426	1,56	1,54	1,59	1,46	1,45	1,63	1,58	1,47	1,41	1,20	1,18
C1	2,05	2,11	2,16	2,26	2,23	2,49	2,50	2,40	2,27	2,09	1,96	1,81
C2	1,99	2,08	2,12	2,20	2,17	2,39	2,43	2,31	2,18	2,01	1,87	1,74
C3	1,87	2,00	2,03	2,07	2,03	2,19	2,30	2,14	2,03	1,86	1,73	1,61
C4	1,70	1,85	1,86	1,89	1,88	1,96	2,09	1,91	1,84	1,69	1,53	1,44
C5	1,57	1,72	1,71	1,75	1,74	1,81	1,94	1,77	1,69	1,54	1,37	1,29
C6	1,46	1,61	1,58	1,64	1,64	1,74	1,83	1,70	1,62	1,43	1,25	1,19
C7	1,33	1,47	1,43	1,52	1,51	1,65	1,74	1,63	1,53	1,34	1,17	1,09
C8	1,28	1,37	1,39	1,51	1,44	1,55	1,72	1,63	1,51	1,35	1,16	1,11
D1	2,07	2,11	2,17	2,26	2,25	2,49	2,52	2,41	2,28	2,10	1,95	1,82
D2	2,03	2,10	2,14	2,21	2,20	2,42	2,46	2,36	2,22	2,04	1,89	1,77
D3	1,96	2,06	2,08	2,14	2,13	2,32	2,38	2,25	2,13	1,94	1,80	1,69
D4	1,84	1,96	1,99	2,03	2,00	2,16	2,26	2,10	2,00	1,81	1,66	1,57
D5	1,71	1,84	1,86	1,89	1,87	2,01	2,12	1,93	1,85	1,68	1,53	1,44
D6	1,60	1,72	1,73	1,77	1,76	1,88	2,00	1,83	1,76	1,57	1,40	1,32
D7	1,50	1,62	1,60	1,69	1,67	1,85	1,95	1,79	1,72	1,51	1,34	1,25
D8	1,43	1,52	1,53	1,64	1,63	1,82	1,94	1,80	1,71	1,52	1,30	1,22
D9	1,29	1,36	1,39	1,52	1,52	1,74	1,85	1,75	1,67	1,44	1,22	1,14
D10	1,22	1,28	1,32	1,46	1,47	1,75	1,82	1,74	1,66	1,41	1,19	1,10
D11	1,07	1,08	1,18	1,34	1,42	1,66	1,75	1,67	1,58	1,31	1,10	1,01
D13	1,00	0,97	1,01	1,21	1,30	1,59	1,68	1,68	1,62	1,28	1,13	1,00
D14	1,02	1,02	1,07	1,20	1,28	1,52	1,67	1,62	1,58	1,29	1,04	0,98
D15	1,11	1,11	1,14	1,29	1,35	1,57	1,75	1,72	1,62	1,31	1,07	1,05
E1	2,09	2,10	2,18	2,26	2,27	2,50	2,53	2,42	2,30	2,10	1,95	1,83
E2	2,05	2,09	2,16	2,22	2,22	2,45	2,50	2,37	2,25	2,04	1,89	1,79
E3	1,99	2,07	2,11	2,16	2,17	2,37	2,43	2,30	2,18	1,97	1,82	1,73
E4	1,91	2,01	2,03	2,08	2,07	2,26	2,33	2,18	2,08	1,87	1,73	1,65
E5	1,80	1,92	1,93	1,98	1,95	2,13	2,22	2,05	1,95	1,75	1,62	1,54
E6	1,69	1,79	1,81	1,88	1,82	2,00	2,10	1,94	1,86	1,67	1,50	1,42
E7	1,60	1,71	1,69	1,80	1,75	1,94	2,07	1,92	1,84	1,62	1,45	1,36
E8	1,54	1,62	1,60	1,76	1,74	1,92	2,05	1,91	1,82	1,62	1,41	1,32

E9	1,47	1,54	1,54	1,71	1,64	1,88	1,99	1,89	1,80	1,61	1,37	1,29
E10	1,41	1,47	1,47	1,65	1,59	1,81	1,91	1,84	1,78	1,58	1,35	1,27
E11	1,35	1,40	1,40	1,59	1,54	1,75	1,81	1,79	1,72	1,55	1,31	1,22
E12	1,28	1,31	1,33	1,48	1,46	1,70	1,72	1,72	1,67	1,51	1,27	1,18
E13	1,25	1,26	1,29	1,43	1,43	1,67	1,67	1,67	1,61	1,41	1,25	1,16
E14	1,22	1,23	1,27	1,41	1,42	1,63	1,68	1,64	1,57	1,34	1,23	1,13
E15	1,22	1,21	1,25	1,43	1,42	1,62	1,74	1,63	1,61	1,32	1,20	1,12
F1	2,09	2,10	2,20	2,26	2,30	2,51	2,55	2,43	2,31	2,10	1,94	1,84
F2	2,06	2,08	2,17	2,23	2,25	2,45	2,50	2,38	2,26	2,04	1,90	1,80
F3	2,01	2,06	2,12	2,18	2,20	2,39	2,45	2,33	2,21	1,98	1,85	1,76
F4	1,94	2,02	2,05	2,12	2,12	2,31	2,37	2,24	2,13	1,90	1,77	1,69
F5	1,85	1,96	1,96	2,04	2,00	2,20	2,27	2,12	2,02	1,81	1,68	1,60
F6	1,76	1,86	1,85	1,96	1,89	2,09	2,18	2,04	1,93	1,72	1,57	1,50
F7	1,67	1,74	1,75	1,90	1,85	2,06	2,16	2,03	1,93	1,68	1,53	1,43
F8	1,61	1,69	1,67	1,82	1,80	1,99	2,12	2,00	1,89	1,68	1,49	1,39
F9	1,55	1,62	1,62	1,77	1,72	1,92	2,01	1,92	1,83	1,64	1,46	1,36
F10	1,51	1,56	1,56	1,74	1,66	1,87	1,95	1,89	1,81	1,63	1,44	1,34
F11	1,45	1,51	1,50	1,69	1,63	1,82	1,87	1,84	1,78	1,58	1,41	1,31
F12	1,42	1,44	1,45	1,66	1,59	1,80	1,83	1,81	1,73	1,53	1,38	1,29
F13	1,37	1,37	1,41	1,60	1,54	1,77	1,80	1,77	1,67	1,47	1,36	1,26
F14	1,34	1,31	1,35	1,56	1,53	1,73	1,78	1,74	1,65	1,41	1,33	1,21
F15	1,30	1,27	1,31	1,54	1,50	1,70	1,81	1,73	1,65	1,41	1,30	1,19
G1	2,10	2,13	2,20	2,28	2,30	2,52	2,55	2,44	2,30	2,09	1,94	1,85
G2	2,05	2,10	2,17	2,24	2,27	2,47	2,51	2,40	2,26	2,04	1,90	1,82
G3	2,01	2,07	2,13	2,20	2,23	2,42	2,47	2,35	2,23	1,99	1,86	1,78
G4	1,95	2,04	2,07	2,15	2,15	2,35	2,39	2,28	2,16	1,93	1,79	1,72
G5	1,87	1,97	1,98	2,06	2,04	2,24	2,29	2,17	2,05	1,83	1,70	1,63
G6	1,79	1,87	1,87	1,99	1,95	2,16	2,23	2,09	1,98	1,76	1,62	1,54
G7	1,72	1,79	1,78	1,92	1,93	2,13	2,22	2,11	2,00	1,74	1,58	1,48
G8	1,67	1,73	1,72	1,89	1,84	2,01	2,14	2,04	1,91	1,71	1,55	1,44
G9	1,61	1,67	1,68	1,85	1,78	1,98	2,06	2,00	1,89	1,66	1,53	1,42
G10	1,56	1,63	1,63	1,82	1,75	1,93	1,99	1,94	1,86	1,62	1,51	1,40
G11	1,53	1,56	1,55	1,76	1,70	1,90	1,95	1,90	1,83	1,57	1,46	1,37
G12	1,50	1,50	1,52	1,73	1,67	1,87	1,94	1,88	1,79	1,55	1,45	1,35
G13	1,46	1,42	1,48	1,66	1,63	1,86	1,93	1,86	1,76	1,51	1,42	1,31
G14	1,42	1,36	1,42	1,64	1,61	1,82	1,89	1,83	1,73	1,47	1,40	1,28
G15	1,36	1,31	1,36	1,64	1,57	1,79	1,91	1,80	1,72	1,46	1,37	1,24
H1	2,10	2,12	2,19	2,28	2,32	2,53	2,57	2,44	2,32	2,10	1,94	1,86
H2	2,05	2,10	2,17	2,25	2,28	2,48	2,53	2,42	2,29	2,05	1,91	1,83
H3	2,02	2,08	2,13	2,22	2,24	2,44	2,48	2,38	2,26	2,01	1,87	1,80
H4	1,97	2,03	2,08	2,17	2,18	2,38	2,41	2,31	2,19	1,95	1,82	1,75

H5	1,87	1,94	1,95	2,06	2,05	2,24	2,29	2,19	2,07	1,84	1,71	1,65
H6	1,79	1,86	1,87	1,99	1,98	2,18	2,25	2,11	2,00	1,77	1,63	1,56
H7	1,73	1,79	1,77	1,94	1,95	2,13	2,24	2,14	2,01	1,76	1,61	1,51
H8	1,71	1,75	1,74	1,91	1,89	2,07	2,15	2,09	1,97	1,74	1,60	1,49
H9	1,66	1,72	1,72	1,90	1,86	2,02	2,12	2,07	1,94	1,71	1,58	1,47
H10	1,62	1,67	1,69	1,86	1,83	1,99	2,08	2,03	1,91	1,67	1,55	1,45
H11	1,58	1,60	1,63	1,82	1,76	1,96	2,03	1,98	1,85	1,61	1,51	1,42
H12	1,56	1,54	1,57	1,79	1,75	1,93	2,04	1,96	1,86	1,59	1,52	1,40
H13	1,52	1,48	1,53	1,73	1,70	1,91	2,01	1,95	1,84	1,56	1,49	1,38
H14	1,46	1,41	1,47	1,70	1,67	1,88	1,98	1,91	1,81	1,52	1,46	1,34
H15	1,40	1,34	1,42	1,69	1,63	1,86	1,98	1,87	1,80	1,50	1,43	1,29

Annexe II : Matrice initiale de l'ACP pour le paramètre période de houle

Individus	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A1	9,75	9,53	10,04	10,57	10,9	11,39	11,28	11,27	11,03	10,39	9,93	9,78
A2	8,92	8,87	9,29	9,64	9,86	10,28	10,15	10,16	10,13	9,63	9,36	8,98
B1	9,73	9,51	9,98	10,51	10,85	11,34	11,29	11,16	10,9	10,25	9,91	9,78
B2	9,53	9,4	9,79	10,4	10,71	11,16	10,98	10,92	10,65	10,14	9,82	9,72
B3	8,78	8,84	9,21	9,64	9,79	10,28	10,2	9,95	9,76	9,43	9,17	9,05
B4	8,27	8,47	8,59	8,97	9,18	9,45	9,61	9,01	8,88	8,67	8,31	8,35
B5	7,78	7,9	8,09	8,16	8,35	8,59	8,59	8,21	8,15	7,73	7,41	7,6
C1	9,71	9,49	9,98	10,59	10,92	11,37	11,29	11,14	10,83	10,26	9,91	9,87
C2	9,62	9,46	9,92	10,48	10,78	11,31	11,16	11,06	10,69	10,18	9,88	9,88
C3	9,38	9,25	9,66	10,25	10,54	11,02	10,8	10,64	10,37	9,92	9,65	9,72
C4	8,88	8,96	9,38	9,86	10,05	10,52	10,34	10,09	9,86	9,45	9,32	9,27
C5	8,5	8,71	8,96	9,41	9,67	9,93	9,92	9,45	9,32	9,01	8,91	8,81
C6	8,28	8,52	8,76	9,03	9,28	9,48	9,6	9,12	9,04	8,93	8,6	8,43
C7	8,16	8,42	8,49	8,72	8,93	9,17	9,25	8,89	8,9	8,68	8,47	8,21
C8	7,95	8,02	8,11	8,14	8,39	8,41	8,49	8,29	8,33	7,98	7,7	7,73
D1	9,71	9,54	9,94	10,62	10,89	11,39	11,3	11,11	10,88	10,28	9,97	9,96
D2	9,64	9,45	9,96	10,53	10,85	11,36	11,22	11,06	10,71	10,17	9,94	9,94
D3	9,51	9,34	9,82	10,44	10,74	11,17	11,06	10,84	10,55	10,09	9,87	9,83
D4	9,28	9,21	9,66	10,22	10,49	10,9	10,68	10,56	10,29	9,86	9,69	9,6
D5	9,02	9,02	9,37	9,98	10,29	10,5	10,35	10,12	10,02	9,47	9,46	9,36
D6	8,63	8,78	9,12	9,6	9,91	10,12	10,04	9,76	9,59	9,27	9,21	9
D7	8,38	8,6	8,89	9,24	9,55	9,7	9,84	9,46	9,27	8,96	8,91	8,67
D8	8,21	8,49	8,68	9	9,34	9,42	9,53	9,16	9,12	8,73	8,69	8,47
D9	8,1	8,37	8,45	8,79	9,09	9,14	9,32	8,94	8,86	8,49	8,31	8,19
D10	8,04	8,34	8,21	8,63	8,84	8,91	9,08	8,81	8,67	8,29	8,09	7,94
D11	8,06	8,29	8	8,22	8,4	8,41	8,53	8,52	8,31	8,07	7,75	7,77
D13	7,69	7,71	7,46	7,43	7,31	7,59	7,87	7,73	7,62	7,28	7,01	7,45
D14	7,59	7,93	7,75	8,36	8,48	8,95	8,83	8,83	8,49	8,05	7,56	7,62
D15	7,31	7,8	7,8	8,55	8,72	9,29	9,26	9,12	8,86	8,36	7,67	7,5
E1	9,73	9,53	9,97	10,61	10,92	11,41	11,33	11,12	10,81	10,26	10,02	10,04

E2	9,62	9,47	9,92	10,55	10,91	11,4	11,23	11,09	10,74	10,26	10,01	9,99
E3	9,58	9,38	9,91	10,47	10,89	11,28	11,1	11	10,7	10,21	9,99	9,89
E4	9,47	9,3	9,8	10,41	10,77	11,12	10,95	10,79	10,57	10,16	9,9	9,74
E5	9,24	9,16	9,62	10,18	10,68	10,84	10,71	10,55	10,44	9,88	9,8	9,61
E6	9	9,01	9,43	9,97	10,53	10,57	10,46	10,29	10,05	9,54	9,6	9,4
E7	8,7	8,79	9,24	9,63	10,02	10,15	10,21	9,84	9,63	9,31	9,32	9,06
E8	8,45	8,67	9	9,29	9,68	9,83	10,03	9,6	9,4	8,99	9,05	8,8
E9	8,34	8,58	8,72	9,11	9,78	9,81	9,84	9,4	9,27	8,84	8,76	8,64
E10	8,22	8,49	8,63	9,07	9,62	9,74	9,81	9,36	9,22	8,68	8,56	8,44
E11	8,15	8,41	8,51	8,92	9,44	9,62	9,74	9,37	9,14	8,52	8,32	8,25
E12	8,01	8,3	8,23	8,8	9,25	9,5	9,73	9,4	9,01	8,43	8,05	8,08
E13	7,83	8,21	8,14	8,75	9,19	9,44	9,87	9,58	9,21	8,6	8,02	7,98
E14	7,62	8,09	8,07	8,67	9,2	9,65	9,94	9,88	9,42	8,82	8,12	7,93
E15	7,43	7,95	8,01	8,64	9,16	9,84	9,88	9,98	9,34	8,86	8,17	7,87
F1	9,74	9,5	9,97	10,6	10,95	11,39	11,31	11,14	10,84	10,35	10,09	10,01
F2	9,71	9,46	9,94	10,55	10,94	11,4	11,31	11,14	10,77	10,32	10,08	9,96
F3	9,67	9,41	9,89	10,44	10,93	11,35	11,23	11,06	10,81	10,31	10,06	9,93
F4	9,55	9,34	9,88	10,42	10,88	11,22	11,07	10,97	10,79	10,28	10,04	9,85
F5	9,46	9,25	9,76	10,35	10,89	11,14	10,96	10,76	10,64	10,12	10,03	9,71
F6	9,3	9,13	9,65	10,15	10,81	10,87	10,68	10,59	10,34	9,9	9,89	9,58
F7	9,02	9,02	9,43	9,83	10,3	10,44	10,47	10,16	9,96	9,54	9,61	9,41
F8	8,82	8,85	9,26	9,65	10,15	10,29	10,39	9,95	9,82	9,31	9,29	9,16
F9	8,62	8,76	9,1	9,48	10,19	10,17	10,3	10,03	9,76	9,2	9,09	8,96
F10	8,49	8,64	8,92	9,39	10,05	10,14	10,3	9,89	9,61	9,02	8,87	8,82
F11	8,38	8,55	8,8	9,25	9,91	10,02	10,24	9,89	9,53	9,1	8,66	8,69
F12	8,19	8,47	8,72	9,12	9,85	9,94	10,25	9,92	9,61	9,04	8,63	8,56
F13	8,01	8,39	8,62	9,07	9,85	9,96	10,17	9,95	9,66	9,11	8,49	8,41
F14	7,83	8,28	8,51	8,91	9,68	10,07	10,18	9,98	9,72	9,12	8,46	8,29
F15	7,65	8,15	8,37	8,8	9,61	9,99	10,13	9,92	9,69	8,99	8,4	8,22
G1	9,76	9,47	9,97	10,57	10,97	11,41	11,36	11,14	10,94	10,36	10,17	10,01
G2	9,77	9,44	9,94	10,51	10,96	11,4	11,31	11,11	10,89	10,33	10,13	9,97
G3	9,68	9,37	9,94	10,45	11,01	11,35	11,24	11,1	10,88	10,33	10,12	9,91
G4	9,68	9,35	9,88	10,42	10,98	11,33	11,19	11,07	10,85	10,34	10,15	9,88
G5	9,59	9,3	9,79	10,4	11,05	11,34	11,12	10,95	10,86	10,35	10,18	9,82
G6	9,45	9,27	9,74	10,26	10,93	11,05	10,87	10,71	10,54	10,11	10,1	9,77
G7	9,33	9,16	9,57	9,94	10,34	10,61	10,61	10,33	10,16	9,78	9,75	9,69
G8	9,12	9	9,43	9,82	10,5	10,7	10,58	10,41	10,24	9,66	9,54	9,5
G9	8,86	8,94	9,28	9,72	10,49	10,54	10,69	10,3	10,07	9,62	9,33	9,29
G10	8,76	8,8	9,19	9,53	10,3	10,42	10,67	10,29	9,96	9,54	9,14	9,16
G11	8,58	8,72	9,1	9,48	10,23	10,31	10,56	10,2	9,86	9,54	9,03	9,06
G12	8,41	8,63	8,95	9,36	10,13	10,22	10,4	10,18	9,87	9,45	8,9	8,89
G13	8,2	8,53	8,86	9,26	10,09	10,16	10,31	10,19	9,84	9,41	8,82	8,75
G14	7,97	8,44	8,81	9,11	9,98	10,2	10,28	10,13	9,83	9,34	8,73	8,65
G15	7,83	8,38	8,73	8,97	9,9	10,15	10,09	10,04	9,78	9,23	8,67	8,5
H1	9,75	9,51	10,01	10,56	11	11,4	11,38	11,15	10,88	10,34	10,19	10,01
H2	9,76	9,44	9,98	10,49	11	11,38	11,32	11,14	10,9	10,35	10,16	9,96

H3	9,74	9,39	9,96	10,44	10,98	11,34	11,26	11,09	10,91	10,34	10,12	9,93
H4	9,72	9,41	9,89	10,38	11,06	11,38	11,29	11,06	10,97	10,36	10,14	9,91
H5	9,67	9,41	9,9	10,51	11,12	11,46	11,28	11,05	11,02	10,49	10,31	9,94
H6	9,55	9,37	9,75	10,36	10,99	11,19	10,98	10,91	10,73	10,38	10,25	9,97
H7	9,51	9,29	9,7	10,21	10,6	10,94	10,78	10,58	10,41	10,03	10	9,86
H8	9,36	9,17	9,6	10,08	10,78	10,86	10,96	10,67	10,42	9,9	9,79	9,67
H9	9,17	9,04	9,4	9,87	10,57	10,78	10,93	10,53	10,28	9,85	9,48	9,49
H10	9,02	8,96	9,31	9,69	10,41	10,67	10,78	10,41	10,14	9,75	9,25	9,36
H11	8,82	8,86	9,26	9,59	10,36	10,51	10,7	10,36	10,12	9,76	9,22	9,25
H12	8,54	8,79	9,16	9,48	10,19	10,44	10,52	10,33	10,04	9,68	9,06	9,13
H13	8,35	8,73	9,02	9,4	10,2	10,38	10,46	10,3	10,01	9,62	8,99	9,06
H14	8,19	8,65	9,02	9,24	10,11	10,33	10,4	10,26	9,97	9,51	8,91	8,89
H15	8,09	8,58	8,99	9,18	10,03	10,27	10,24	10,16	9,91	9,43	8,83	8,71

Annexe III : Matrice initiale de l'ACP pour le paramètre direction de houle

Individus	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Novembre	Décembre
A1	155,86	149,1	157,25	173,77	178,62	189,84	179,68	179,05	180,94	174,1	170,04	169,18
A2	133,33	131,48	136,44	144,81	146,55	150,01	145,9	144,73	149,26	143,9	148,86	141,01
B1	154,19	147,25	154,38	172,73	176,53	188,42	178,15	177,83	180,95	171,38	172,02	167,45
B2	146,28	142,27	146,89	164,18	167,89	177,03	165,2	163,77	167,24	160,64	163,46	161,1
B3	125,09	125,77	129,62	137,53	140,17	143,33	139,37	129,87	133,6	134,13	140,58	137,92
B4	114,97	118,19	118,43	121,09	124,78	120,77	123,92	108,82	109,77	113,53	119,21	122,48
B5	112,12	116,99	115,28	117,33	121,23	116,14	117,22	108,67	106,17	106,92	111,69	113,08
C1	154,88	146,91	154,31	173,96	178,36	189,3	176,89	178,35	182,27	173,47	177,33	171,57
C2	149,62	145,16	151,29	166,9	172,03	182,61	170,87	171,14	170,89	164,33	170,77	166,89
C3	141,5	138,5	143,99	156,53	160,72	167,19	158,57	152,44	156,32	151,56	155,7	158
C4	128,97	130,36	136,03	144,1	147,12	149,96	144,53	136,09	136,76	133,72	143,88	144,74
C5	121,29	124,62	128,62	133,3	137,51	133,83	133,36	120,54	120,88	121,29	132,69	133,15
C6	117,92	122,9	126,23	126,04	128,78	122,95	124,06	113,72	112,28	117,89	123,47	125,64
C7	116,7	123,25	122,32	121,07	122,68	116,22	117,57	108,34	107,31	112,19	119,2	121,06
C8	118,72	125,88	122,95	122	124,37	116,53	118,89	112,21	108,3	111,73	114,45	117,93
D1	156,09	148,04	152,69	173,54	177,41	188,69	176,37	178,32	181,25	175,03	181,05	172,15
D2	152,62	145,09	153,01	168,94	173,81	183,2	172,86	170,61	172,6	166,43	174,5	168,88
D3	147,86	141,98	148,83	162,69	167,52	173,37	167,51	160,42	162,63	158,97	168,24	163,82
D4	141,09	137,7	144,59	154,49	160,03	162,08	156,72	150,02	151,06	147,62	156,75	154,04
D5	132,67	133,4	138,8	147,46	154,13	150,59	146,71	138,97	141,43	134,7	147,78	146,95
D6	124,76	130,01	134,95	141,13	144,94	140,17	138,3	130,36	127,27	127,24	139,15	138,65
D7	120,88	128,2	132,36	132,67	135,82	128,04	130,84	119,96	117,36	118,64	128,51	130,06
D8	118,56	127,49	129,88	127,32	129,74	122,79	124,32	114,87	113,3	112,55	122,49	123,97
D9	117,44	125,49	127,19	124,09	124,12	117,9	121,24	111,37	108,63	109,13	114,39	116,8

D10	118,39	125,64	124,31	121,82	121,2	116	118,99	112,41	108,01	107,62	111,89	113
D11	117,81	122,27	122	118,68	116,76	111,76	114,26	110,11	106,79	106,11	107,19	111,28
D13	86,05	98,53	114,09	114,28	109,51	107,77	109,23	107,41	104,1	103,62	103,28	101,21
D14	99,38	120,91	122,02	119,4	119,34	116,92	118,75	118	112,44	113,62	100,74	90,16
D15	132,03	133,32	126,12	126,22	126,93	122,88	125,01	122,16	117,9	119,99	106,05	95,69
E1	156,44	145,71	153,83	172,39	176,67	186,62	177,36	176,45	177,8	176,63	181,01	172,97
E2	154,36	145,28	152,71	168,44	174,66	182,99	173,29	171,73	172	171,26	175,12	169,15
E3	152,27	143,56	152,05	163,9	172,35	176,13	170,02	166,05	167,83	165,15	172,74	164,98
E4	148,66	142,41	149,42	160,41	167,54	168,94	165,13	159,1	160,02	158,53	165,28	160,25
E5	141,83	140,51	146,82	154,84	164,66	160,87	158,39	151,31	154,46	146,47	158,74	155,8
E6	135,52	137,54	143,52	149,75	158,72	152,07	148,47	143,2	141,27	135,8	150,34	149,68
E7	130,64	131,89	140,37	141,79	146,39	140,53	140,21	129,87	127,81	126,67	139,03	138,96
E8	123,85	128,56	136,99	134,55	137,81	132,66	136,07	124,29	121,67	119,61	130,59	129,62
E9	121,14	125,06	133,18	130,49	139,06	132,73	133,67	122,36	120,29	117,05	125,36	124,61
E10	118,46	123,56	131,28	130,29	137,12	131,72	135,34	123,87	120,75	116,14	122,36	120,37
E11	116,61	121,37	130,92	129,19	134,79	130,83	134,83	124,59	120,85	114,8	119,18	116,81
E12	112,21	131,83	128,88	128,38	132,58	127,79	132,33	124,73	119,26	115,36	116,24	112,67
E13	116,85	135,12	131,69	129,06	132,9	127,8	133,42	127,53	122,11	121,34	118,39	111,44
E14	135,58	142,92	133,03	133,1	135,65	131,66	135,46	133,45	127,21	127,47	121,9	111,02
E15	150,5	147,03	135,97	135,98	138,1	134,83	138,04	138,33	129,34	132,15	122,65	117,32
F1	157,59	146,92	154,23	170,63	176,25	187,24	176,94	175,06	177,44	176,78	180,73	172,12
F2	156,74	144,54	152,96	167,45	174,85	183,53	176,01	172,42	172,31	170,74	176,23	169,41
F3	155,92	143,6	151,25	163,82	173,22	178,5	173,22	167,96	169,25	166,74	173,24	166,83
F4	153,1	142,99	151,57	161,31	170,98	172,69	170,01	164,62	166,4	163,85	168,87	164,93
F5	150,22	144,07	150,79	160,52	170,21	168,82	166,83	158,92	161,87	156,46	165,41	161,12
F6	146,87	143,13	149,17	156,9	166,26	160,72	156,23	152,05	150,29	146,21	159,96	157,51
F7	140,48	142,39	148,21	148,67	153,19	149,3	149,1	139,2	137	135,38	148,87	149,29
F8	134,35	137,8	145,25	142,65	147,38	143,67	145,14	133,42	132,63	129,39	138,83	140,51
F9	129,46	140,48	142,74	139,79	147,83	141,14	145,46	135,36	132,11	127,3	133,46	133,11
F10	127,41	141,92	139,34	138,43	145,77	140,62	145,91	133,79	130,48	125,51	130,09	129,55
F11	126,14	147,94	138,31	137,29	144,89	139,64	145,62	135,64	130,51	128,65	127,91	127,99
F12	135,57	150,13	139,44	136,24	144,48	137,9	145,63	136,17	131,83	129,94	128,91	126,26
F13	150,19	150,63	140,29	138,65	144,93	138,47	143,45	137,84	133,73	133,11	128,79	128,26
F14	154,34	153,34	141,58	139,3	144,19	140,16	143,48	140,27	134,17	136,6	130,49	128,21
F15	164,48	155,7	141,29	140,28	144,86	141,52	143,96	142,47	135,88	136,97	132,6	131,15
G1	157,69	145,86	155	168,72	176,24	186,68	179,1	174,22	178,69	174,6	180,23	172,97
G2	158,92	147,87	152,95	166,08	174,43	182,57	176,68	171,04	174,66	169,63	175,64	170,32
G3	157,6	145,55	153,27	163,38	173,85	178,03	174,01	169,22	170,72	166,63	172,18	166,89
G4	155,62	146,78	152,56	163,07	173,29	176,13	173,16	166,94	168,64	164,88	170,64	165,89
G5	154,87	149,19	153,93	162,99	174,32	174,87	172,59	165,6	168,14	165,4	170,32	166,11
G6	152,61	151,26	155,29	161,14	170,45	166,14	162,79	157,84	157,19	154,27	166,46	164,56

G7	147,63	155,03	154,39	152,44	155,75	154,4	153,4	144,1	144,08	143,39	154,37	159,12
G8	143,9	151,87	150,11	148,15	156,32	153,9	152,49	144,72	143,22	139,86	146,16	150,71
G9	140,78	157,14	146,92	145,3	154,78	149,54	153,82	141,28	140,04	138,58	140,36	142,29
G10	144,49	156,7	145,81	141,83	151,89	148,02	153,9	141,9	138,1	137,94	137,59	137,42
G11	147,25	159,4	145,13	143,97	151,28	145,53	152,03	141,12	137,76	139,11	136,6	136,47
G12	155,08	159,01	143,87	142,93	149,56	143,99	149,06	141,46	138,84	138,42	135,07	134,11
G13	165,06	159,04	144,65	144,52	149,66	142,65	146,88	142,82	138,44	139,94	135,35	134,77
G14	164,66	159,69	145,65	143,78	149,54	144,78	147,43	144,42	139,68	141,21	135,88	137,1
G15	168,73	160,55	144,51	143,31	148,76	145,21	147,35	145,4	140,99	141,82	137,96	135,2
H1	157,88	150,46	155,74	169,26	176,34	185,36	180,05	173,52	176,7	172,28	178,67	172,79
H2	157,94	149,05	153,63	164,47	173,89	180,04	176,25	170,97	173,71	169,46	175,08	170,14
H3	157,56	148,95	154,03	162,74	172,85	177,35	174,81	168,39	170,59	167,08	170,91	167,05
H4	158,51	150,93	152,94	163,5	173,37	177,19	175,56	166,85	170,8	164,18	169,9	166,68
H5	159,7	156,9	157,09	166,41	176,26	178,92	177,13	168,71	171,81	170,26	174,27	169,86
H6	156,7	160,19	158,39	166,01	173,31	172,23	168,68	165,68	164,84	164,09	171,45	171,04
H7	158,38	162,17	161,25	159,59	163,54	162,88	160,39	151,14	151,47	151,92	160,71	166,17
H8	153,79	163,42	156,38	154,24	162,98	159,78	162,03	150,96	148,98	145,53	152,76	155,92
H9	153,63	162,99	151,07	149,06	158,61	157,03	159,92	146,94	145,05	144,63	145,16	147,18
H10	155,96	161,82	150,01	146,82	155,03	153,69	156,85	144,89	143,6	143,86	141,58	143,47
H11	159,79	162,64	150,19	147,05	154,67	150,49	154,86	144,53	143,64	144,68	141,11	141,8
H12	163,67	162,86	149,39	145,97	152,24	148,76	151,29	144,79	143,34	144	138,77	140,6
H13	168,03	161,16	148,12	146,16	152,36	147,46	150,88	145,72	143,22	144,28	138,78	140,95
H14	166,22	163,06	149,39	146,9	152,41	147,86	150,37	146,48	143,52	144,5	139,04	139,81
H15	170,87	164,77	148,41	146,61	151,06	148,01	149,09	147	143,24	144,77	140,11	137,68

Annexe IV : Coordonnées, contributions et cosinus carrée des individus pour la hauteur

Individus	AXE 1			AXE 2		
	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés	Coordonnées	Contributions	Cosinus carrés
A1	4,456	1,909	0,988	-0,294	0,413	0,004
A2	-0,404	0,016	0,091	1,232	7,233	0,848
B1	4,979	2,383	0,992	-0,280	0,373	0,003
B2	3,164	0,962	0,989	0,229	0,251	0,005
B3	-0,511	0,025	0,164	1,143	6,229	0,822
B4	-3,405	1,114	0,850	1,417	9,572	0,147
B5	-4,357	1,825	0,874	1,528	11,126	0,108
C1	5,179	2,579	0,994	-0,288	0,395	0,003
C2	4,252	1,739	0,999	-0,020	0,002	0,000
C3	2,462	0,583	0,967	0,421	0,846	0,028
C4	0,080	0,001	0,009	0,821	3,209	0,950
C5	-1,783	0,306	0,747	1,015	4,914	0,242
C6	-3,101	0,925	0,908	0,940	4,208	0,083

C7	-4,434	1,890	0,969	0,732	2,557	0,026
C8	-4,807	2,222	0,983	0,579	1,596	0,014
D1	5,284	2,685	0,995	-0,309	0,454	0,003
D2	4,626	2,058	0,998	-0,121	0,070	0,001
D3	3,567	1,223	0,997	0,163	0,126	0,002
D4	1,955	0,368	0,944	0,458	0,999	0,052
D5	0,180	0,003	0,057	0,711	2,412	0,886
D6	-1,319	0,167	0,735	0,758	2,740	0,243
D7	-2,188	0,460	0,935	0,495	1,170	0,048
D8	-2,643	0,672	0,980	0,161	0,123	0,004
D9	-3,827	1,408	0,991	-0,164	0,129	0,002
D10	-4,333	1,805	0,981	-0,435	0,900	0,010
D11	-5,649	3,069	0,975	-0,716	2,445	0,016
D13	-6,331	3,854	0,956	-1,325	8,365	0,042
D14	-6,555	4,131	0,978	-0,870	3,611	0,017
D15	-5,710	3,135	0,973	-0,798	3,035	0,019
E1	5,401	2,805	0,994	-0,371	0,655	0,005
E2	4,831	2,244	0,998	-0,195	0,180	0,002
E3	4,041	1,570	0,999	0,019	0,002	0,000
E4	2,866	0,790	0,990	0,254	0,307	0,008
E5	1,384	0,184	0,870	0,510	1,239	0,118
E6	-0,067	0,000	0,013	0,551	1,450	0,906
E7	-0,833	0,067	0,827	0,294	0,412	0,103
E8	-1,294	0,161	0,941	0,018	0,002	0,000
E9	-1,880	0,340	0,968	-0,141	0,094	0,005
E10	-2,497	0,599	0,977	-0,211	0,212	0,007
E11	-3,226	1,000	0,979	-0,229	0,250	0,005
E12	-4,068	1,591	0,979	-0,287	0,393	0,005
E13	-4,664	2,091	0,989	-0,220	0,230	0,002
E14	-5,020	2,423	0,995	-0,158	0,119	0,001
E15	-5,017	2,421	0,995	-0,243	0,280	0,002
F1	5,495	2,904	0,995	-0,371	0,657	0,005
F2	4,937	2,344	0,997	-0,224	0,239	0,002
F3	4,298	1,776	0,999	-0,097	0,045	0,001
F4	3,368	1,091	0,997	0,101	0,049	0,001
F5	2,113	0,429	0,972	0,325	0,504	0,023
F6	0,874	0,073	0,815	0,371	0,656	0,147
F7	0,235	0,005	0,399	0,020	0,002	0,003
F8	-0,378	0,014	0,659	-0,073	0,025	0,024
F9	-1,148	0,127	0,979	0,008	0,000	0,000
F10	-1,617	0,251	0,963	-0,055	0,015	0,001
F11	-2,208	0,469	0,973	-0,075	0,026	0,001
F12	-2,719	0,711	0,981	-0,111	0,058	0,002
F13	-3,299	1,047	0,986	-0,119	0,067	0,001
F14	-3,774	1,369	0,989	-0,201	0,192	0,003
F15	-4,016	1,551	0,989	-0,337	0,542	0,007

G1	5,547	2,958	0,996	-0,313	0,467	0,003
G2	5,046	2,448	0,997	-0,239	0,272	0,002
G3	4,528	1,971	0,997	-0,169	0,135	0,001
G4	3,707	1,321	0,999	0,005	0,000	0,000
G5	2,462	0,583	0,988	0,208	0,206	0,007
G6	1,424	0,195	0,966	0,192	0,175	0,017
G7	0,956	0,088	0,872	-0,173	0,142	0,029
G8	0,173	0,003	0,388	-0,026	0,003	0,009
G9	-0,388	0,014	0,786	-0,064	0,020	0,022
G10	-0,905	0,079	0,908	-0,027	0,004	0,001
G11	-1,492	0,214	0,959	-0,099	0,047	0,004
G12	-1,838	0,325	0,965	-0,183	0,160	0,010
G13	-2,308	0,512	0,970	-0,306	0,447	0,017
G14	-2,756	0,730	0,967	-0,370	0,654	0,017
G15	-3,127	0,940	0,962	-0,499	1,186	0,024
H1	5,646	3,065	0,994	-0,389	0,720	0,005
H2	5,204	2,604	0,996	-0,315	0,473	0,004
H3	4,734	2,155	0,996	-0,261	0,325	0,003
H4	3,973	1,518	0,997	-0,129	0,080	0,001
H5	2,499	0,600	0,995	0,053	0,013	0,000
H6	1,564	0,235	0,976	0,070	0,024	0,002
H7	1,186	0,135	0,898	-0,286	0,391	0,052
H8	0,663	0,042	0,872	-0,167	0,134	0,056
H9	0,320	0,010	0,612	-0,132	0,083	0,104
H10	-0,136	0,002	0,201	-0,145	0,101	0,229
H11	-0,767	0,057	0,869	-0,146	0,102	0,032
H12	-1,033	0,103	0,837	-0,330	0,518	0,085
H13	-1,473	0,209	0,880	-0,448	0,955	0,081
H14	-1,966	0,372	0,900	-0,566	1,527	0,075
H15	-2,387	0,548	0,903	-0,684	2,230	0,074

Annexe V : Coordonnées, contributions et cosinus carrée des individus pour la période

Individus	AXE 1			AXE 2		
	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés	Coordonnées	Contributions	Cosinus carrés
A1	4,032	1,587	0,979	-0,026	0,002	0,000
A2	-0,125	0,002	0,033	0,244	0,195	0,128
B1	3,779	1,394	0,982	0,063	0,013	0,000
B2	2,999	0,878	0,985	0,175	0,100	0,003
B3	-0,575	0,032	0,602	0,349	0,397	0,222
B4	-3,819	1,423	0,966	0,594	1,150	0,023
B5	-7,428	5,385	0,982	0,883	2,542	0,014
C1	3,833	1,434	0,988	0,082	0,022	0,000
C2	3,469	1,174	0,987	0,168	0,092	0,002
C3	2,202	0,473	0,966	0,302	0,298	0,018

C4	0,163	0,003	0,084	0,398	0,517	0,506
C5	-1,932	0,364	0,892	0,555	1,003	0,073
C6	-3,303	1,065	0,954	0,594	1,151	0,031
C7	-4,385	1,876	0,963	0,744	1,806	0,028
C8	-7,023	4,813	0,972	1,115	4,055	0,025
D1	3,929	1,507	0,989	0,137	0,061	0,001
D2	3,623	1,281	0,990	0,166	0,089	0,002
D3	3,005	0,881	0,990	0,218	0,155	0,005
D4	1,908	0,355	0,952	0,353	0,406	0,033
D5	0,545	0,029	0,463	0,481	0,754	0,360
D6	-0,996	0,097	0,746	0,432	0,609	0,140
D7	-2,384	0,555	0,946	0,448	0,654	0,033
D8	-3,407	1,133	0,965	0,550	0,987	0,025
D9	-4,492	1,969	0,981	0,595	1,155	0,017
D10	-5,339	2,782	0,979	0,708	1,634	0,017
D11	-6,675	4,348	0,959	1,231	4,943	0,033
D13	-9,894	9,553	0,968	1,580	8,142	0,025
D14	-6,751	4,448	0,993	-0,022	0,002	0,000
D15	-6,110	3,644	0,967	-0,963	3,024	0,024
E1	3,988	1,552	0,991	0,183	0,110	0,002
E2	3,760	1,379	0,995	0,107	0,037	0,001
E3	3,444	1,158	0,997	0,131	0,056	0,001
E4	2,891	0,816	0,991	0,188	0,115	0,004
E5	1,996	0,389	0,971	0,198	0,127	0,010
E6	0,875	0,075	0,730	0,280	0,255	0,075
E7	-0,660	0,043	0,549	0,402	0,528	0,204
E8	-1,870	0,341	0,914	0,386	0,486	0,039
E9	-2,551	0,635	0,961	0,250	0,203	0,009
E10	-3,048	0,907	0,981	0,108	0,038	0,001
E11	-3,621	1,279	0,987	-0,005	0,000	0,000
E12	-4,264	1,774	0,980	-0,276	0,249	0,004
E13	-4,277	1,785	0,955	-0,775	1,958	0,031
E14	-4,097	1,638	0,884	-1,408	6,469	0,104
E15	-4,246	1,759	0,846	-1,723	9,686	0,139
F1	4,036	1,589	0,996	0,140	0,064	0,001
F2	3,906	1,489	0,996	0,084	0,023	0,000
F3	3,708	1,342	0,998	0,050	0,008	0,000
F4	3,394	1,124	0,997	0,061	0,012	0,000
F5	2,907	0,825	0,990	0,099	0,032	0,001
F6	2,055	0,412	0,948	0,217	0,154	0,011
F7	0,635	0,039	0,548	0,464	0,702	0,292
F8	-0,259	0,007	0,254	0,290	0,274	0,317
F9	-0,776	0,059	0,811	-0,035	0,004	0,002
F10	-1,387	0,188	0,894	-0,174	0,098	0,014
F11	-1,831	0,327	0,936	-0,361	0,426	0,036
F12	-2,128	0,442	0,903	-0,646	1,362	0,083

F13	-2,384	0,555	0,855	-0,966	3,042	0,140
F14	-2,671	0,696	0,803	-1,313	5,621	0,194
F15	-3,128	0,955	0,809	-1,504	7,377	0,187
G1	4,118	1,655	0,997	0,074	0,018	0,000
G2	3,970	1,538	0,996	0,085	0,023	0,000
G3	3,810	1,417	0,998	-0,017	0,001	0,000
G4	3,705	1,340	0,996	-0,002	0,000	0,000
G5	3,548	1,229	0,988	-0,082	0,022	0,001
G6	2,810	0,770	0,974	0,231	0,174	0,007
G7	1,461	0,208	0,811	0,633	1,309	0,152
G8	1,115	0,121	0,918	0,109	0,039	0,009
G9	0,579	0,033	0,703	-0,175	0,100	0,064
G10	0,028	0,000	0,003	-0,339	0,375	0,485
G11	-0,402	0,016	0,342	-0,439	0,630	0,409
G12	-0,915	0,082	0,653	-0,627	1,282	0,306
G13	-1,311	0,168	0,674	-0,873	2,484	0,299
G14	-1,697	0,281	0,683	-1,114	4,046	0,294
G15	-2,170	0,460	0,756	-1,159	4,379	0,215
H1	4,147	1,678	0,997	0,118	0,046	0,001
H2	4,017	1,575	0,997	0,060	0,012	0,000
H3	3,863	1,456	0,996	0,044	0,006	0,000
H4	3,886	1,474	0,994	-0,049	0,008	0,000
H5	4,110	1,648	0,992	-0,087	0,025	0,000
H6	3,447	1,159	0,978	0,152	0,076	0,002
H7	2,485	0,603	0,941	0,550	0,986	0,046
H8	2,201	0,473	0,980	0,077	0,019	0,001
H9	1,459	0,208	0,938	-0,160	0,083	0,011
H10	0,819	0,066	0,789	-0,205	0,137	0,049
H11	0,443	0,019	0,436	-0,369	0,445	0,303
H12	-0,126	0,002	0,038	-0,538	0,943	0,689
H13	-0,467	0,021	0,242	-0,735	1,761	0,599
H14	-0,880	0,076	0,454	-0,878	2,513	0,451
H15	-1,297	0,164	0,629	-0,890	2,585	0,296

Annexe VI : Coordonnées, contributions et cosinus carrée des individus pour la direction

Individus	AXE 1			AXE 2		
	Coordonnées	Contributions (%)	Cosinus carrés	Coordonnées	Contributions	Cosinus carrés
A1	4,631	2,249	0,963	-0,640	0,468	0,018
A2	-0,697	0,051	0,285	-0,943	1,015	0,522
B1	4,351	1,985	0,950	-0,799	0,729	0,032
B2	2,553	0,684	0,871	-0,881	0,886	0,104
B3	-2,240	0,526	0,757	-1,158	1,531	0,202
B4	-5,333	2,982	0,948	-0,991	1,121	0,033
B5	-6,149	3,964	0,969	-0,883	0,891	0,020

C1	4,582	2,202	0,951	-0,930	0,987	0,039
C2	3,434	1,236	0,936	-0,837	0,800	0,056
C3	1,259	0,166	0,668	-0,839	0,803	0,296
C4	-1,271	0,169	0,610	-0,962	1,057	0,350
C5	-3,350	1,177	0,910	-0,926	0,979	0,070
C6	-4,556	2,176	0,964	-0,700	0,559	0,023
C7	-5,408	3,067	0,977	-0,497	0,282	0,008
C8	-5,293	2,938	0,991	-0,247	0,070	0,002
D1	4,600	2,219	0,953	-0,896	0,917	0,036
D2	3,751	1,475	0,951	-0,833	0,793	0,047
D3	2,541	0,677	0,904	-0,811	0,751	0,092
D4	0,905	0,086	0,584	-0,739	0,623	0,389
D5	-0,673	0,048	0,352	-0,812	0,754	0,512
D6	-2,140	0,480	0,846	-0,785	0,703	0,114
D7	-3,555	1,325	0,962	-0,502	0,288	0,019
D8	-4,422	2,051	0,983	-0,342	0,134	0,006
D9	-5,179	2,812	0,994	-0,234	0,063	0,002
D10	-5,491	3,162	0,997	-0,137	0,021	0,001
D11	-6,035	3,819	0,992	-0,204	0,047	0,001
D13	-7,698	6,214	0,916	-2,236	5,711	0,077
D14	-6,197	4,026	0,946	-0,687	0,539	0,012
D15	-4,623	2,241	0,924	0,633	0,458	0,017
E1	4,514	2,136	0,951	-0,952	1,035	0,042
E2	3,870	1,571	0,954	-0,808	0,745	0,042
E3	3,211	1,081	0,947	-0,733	0,614	0,049
E4	2,286	0,548	0,929	-0,611	0,426	0,066
E5	1,210	0,153	0,745	-0,598	0,409	0,182
E6	-0,131	0,002	0,025	-0,543	0,336	0,436
E7	-1,819	0,347	0,841	-0,440	0,221	0,049
E8	-3,015	0,953	0,946	-0,451	0,232	0,021
E9	-3,521	1,300	0,952	-0,631	0,455	0,031
E10	-3,737	1,464	0,947	-0,744	0,633	0,038
E11	-3,985	1,665	0,938	-0,827	0,781	0,040
E12	-4,182	1,834	0,965	-0,297	0,100	0,005
E13	-3,779	1,498	0,959	-0,008	0,000	0,000
E14	-2,865	0,861	0,872	0,768	0,674	0,063
E15	-2,068	0,448	0,646	1,280	1,872	0,248
F1	4,481	2,106	0,961	-0,819	0,766	0,032
F2	3,960	1,645	0,955	-0,800	0,730	0,039
F3	3,442	1,243	0,949	-0,720	0,592	0,042
F4	2,973	0,927	0,948	-0,638	0,466	0,044
F5	2,447	0,628	0,952	-0,480	0,263	0,037
F6	1,403	0,206	0,820	-0,293	0,098	0,036
F7	-0,152	0,002	0,036	0,057	0,004	0,005
F8	-1,221	0,156	0,747	-0,038	0,002	0,001
F9	-1,572	0,259	0,851	0,091	0,009	0,003

F10	-1,892	0,375	0,885	0,159	0,029	0,006
F11	-1,877	0,369	0,783	0,471	0,254	0,049
F12	-1,695	0,301	0,721	0,884	0,892	0,196
F13	-1,308	0,179	0,501	1,264	1,826	0,468
F14	-1,036	0,113	0,309	1,493	2,546	0,641
F15	-0,678	0,048	0,108	1,804	3,718	0,764
G1	4,456	2,082	0,960	-0,846	0,816	0,035
G2	4,007	1,683	0,975	-0,549	0,344	0,018
G3	3,581	1,344	0,970	-0,530	0,321	0,021
G4	3,377	1,196	0,978	-0,457	0,239	0,018
G5	3,408	1,218	0,988	-0,306	0,107	0,008
G6	2,573	0,694	0,943	0,087	0,009	0,001
G7	1,046	0,115	0,412	0,729	0,606	0,200
G8	0,463	0,022	0,220	0,588	0,395	0,354
G9	-0,006	0,000	0,000	0,958	1,047	0,628
G10	-0,251	0,007	0,037	1,149	1,509	0,782
G11	-0,246	0,006	0,027	1,389	2,204	0,873
G12	-0,333	0,012	0,039	1,627	3,025	0,941
G13	-0,140	0,002	0,005	1,906	4,147	0,929
G14	0,009	0,000	0,000	1,893	4,091	0,948
G15	0,076	0,001	0,001	2,015	4,636	0,899
H1	4,463	2,089	0,984	-0,533	0,324	0,014
H2	3,922	1,613	0,981	-0,449	0,230	0,013
H3	3,604	1,362	0,987	-0,306	0,107	0,007
H4	3,572	1,338	0,992	-0,174	0,035	0,002
H5	4,170	1,823	0,995	0,099	0,011	0,001
H6	3,680	1,420	0,960	0,408	0,190	0,012
H7	2,485	0,648	0,715	1,136	1,472	0,149
H8	1,812	0,344	0,597	1,262	1,819	0,290
H9	1,078	0,122	0,336	1,418	2,296	0,582
H10	0,710	0,053	0,166	1,555	2,762	0,797
H11	0,684	0,049	0,131	1,757	3,524	0,861
H12	0,523	0,029	0,067	1,942	4,305	0,923
H13	0,530	0,029	0,066	1,948	4,333	0,887
H14	0,584	0,036	0,075	2,020	4,661	0,905
H15	0,597	0,037	0,063	2,239	5,727	0,890

CARACTERISTIQUES DE LA HOULE AU LARGE DE LA COTE EST DE MADAGASCAR

Résumé: Ce présent travail a pour objectif d'étudier les données des paramètres de houle afin de connaître les caractéristiques principales de ces paramètres au large de la côte Est de Madagascar. La zone d'étude est située entre 12°S à 26°S de latitude et 47°E à 54°E de longitude. Deux outils statistiques ont été utilisés, l'Analyse en Composante Principale qui nous a permis de subdiviser notre zone d'étude suivant les comportements des paramètres de houle en deux régions notées ZONE_1 et ZONE_2, et l'analyse statistique descriptive simple permettant de classer ces paramètres pour les deux zones obtenues. Les résultats ont montré que les valeurs maximales sont rencontrées en hiver austral et les vagues sont plus fortes au large. L'analyse effectuée sur les deux zones ont montré que la ZONE_2 est plus énergétique que la ZONE_1.

Mots clés : Houle, WaveWatch3, Analyse en Composante Principale, hauteur, direction, période

CHARACTERISTICS OF THE SWELL OFF THE EAST COAST OF MADAGASCAR

Abstract: This work aims to study the data of wave parameters in order to know the main characteristics of these parameters off the east coast of Madagascar. The study area is located between 12 ° S to 26 ° S latitude and 47 ° E to 54 ° E longitude. Two statistical tools were used, the Principal Component Analysis which allowed us to subdivide our study area according to the wave parameters behaviors into two regions marked ZONE_1 and ZONE_2, and the simple descriptive statistical analysis allowing to classify these parameters for the two zones obtained. The results showed that maximum values are encountered in the austral winter and the waves are stronger offshore. The analysis performed on the two zones showed ZONE_2 is more energetic than ZONE_1.

Keywords: Swell, WaveWatch3, Principal Component Analysis, height, direction, period

<u>IMPÉTRANTE</u> Madame RASOAVOLOLONIAINA Hanitra Elisa	Domaine SCIENCES ET TECHNOLOGIES Mention PHYSIQUE ET APPLICATIONS Parcours Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans
<u>ENCADREUR</u> Docteur IVONINTSOA VAVIFARA ZILERA Irma.	