

INTRODUCTION

Les précipitations constituent une ressource naturelle essentielle pour la société humaine et les écosystèmes. Sa variabilité affecte non seulement l'approvisionnement en eau, mais aussi les conditions climatiques mondiales.

Compte tenu de la topographie, les précipitations sont inégalement réparties pour le cas de Madagascar. Elles sont relativement abondantes sur les côtes est et se font de plus en plus rares dans certaines régions. En fait, dans l'extrême sud de Madagascar, la moyenne annuelle des précipitations est inférieure à 600 mm et la carence en eau de 9 à 11 mois. Selon Doncques (1975), le sud reste la région la plus sèche qu'importe la classification adoptée.

La rareté en eau de pluie affecte surtout l'Agriculture dans la région Androy. L'insuffisance en eau ne parvient plus à humidifier convenablement les surfaces cultivables. Peu de culture résiste à ces conditions défavorables entraînant famine et mal nutrition.

Des études sur les causes contribuant au manque de ce météore dans le sud de Madagascar ont été déjà effectuées. Dans sa thèse, Arivelo (2009) accorde une place importante sur la dynamique atmosphérique des événements secs sur la partie sud de Madagascar. Elle a évoqué les régimes météorologiques et les perturbations qui auraient des impacts significatifs à moduler l'occurrence de sécheresse de la partie sud.

Raholijao (2009) énonce qu'El Niño n'explique pas toutes les sécheresses dans la région Androy, car on observe qu'il n'y a pas de famines dans beaucoup de périodes de survenues d'El Niño. D'autres facteurs devraient être ainsi analysé notamment, les phénomènes océaniques à l'échelle régionale tels que le phénomène d'upwelling au sud de Madagascar et le courant côtier du sud-ouest de Madagascar. Mahatante Paubert (2016) a suggéré une étude approfondie de l'upwelling au sud de Madagascar afin de comprendre ses caractéristiques et ses effets sur le climat.

En effet, l'atmosphère et l'océan sont intimement liés. La température de la surface de la mer influence les régimes de précipitations à travers le monde. Lorsque la température de l'océan change, les régimes de précipitations ont tendance aussi à changer. Les scientifiques surveillent les changements de la TSM, à la recherche d'eaux plus chaudes ou plus froides que la moyenne, pour prévoir les inondations, les sécheresses : cas de l'Océan Pacifique équatoriale. En 1967, VIERS.G souligne que les courants marins ont une influence considérable sur les températures et sur les précipitations des régions qu'ils bordent. Aussi dans le cours de Météorologie maritime du Dr RAKOTOVAZAHA Olivier, il est dit que toute variation dans la quantité d'eau transportée ou dans la direction du courant aura une influence sur les phénomènes météorologiques (précipitation et évaporation) ou climatiques.

En plus, il insiste sur le fait que la présence au large des volumes substantiels d'eau relativement froide influence les climats des côtes, et presque la plupart des régions à des remontées d'eau profonde présentent un climat côtier aride et un minimum de précipitation.

Steven DiMarco et Al (2000), Lutjeharms et Al (2000), Chung-Ru Ho et Al (2001) ont mis en évidence la présence de zone d'upwelling au sud de Madagascar en utilisant des données issues des capteurs satellitaires : données sur la température de la surface de la mer et sur le taux de concentration de chlorophylle-a. Et pour toute la première fois, la zone d'upwelling au sud de Madagascar a été hydrographiquement mise en évidence suite au programme Agulhas Current Source Experiment (ACSEX) à bord du R / V Pelagia en mars 2001.

Sur ce, des travaux de recherche réalisés par Ramanantsoa et Al (2018) ont mis en valeur la dynamique de la région d'upwelling et du courant côtier SMACC. Du point de vue, biologique et écologique, le phénomène de remontée d'eau froide est responsable des richesses halieutiques des eaux marines côtières de la partie sud de l'île.

Cette étude a donc pour objectif d'analyser l'influence de la zone d'upwelling au sud de Madagascar et du courant côtier du sud-ouest de Madagascar sur la variabilité interannuelle des précipitations des districts de la région Androy à savoir les districts de Bekily, Beloha, Tsihombe et d'Ambovombe

Pour ce faire, nous essayons de résumer, en premier lieu, les points essentiels à retenir sur la région Androy, sur le phénomène de remontée d'eau froide au sud de Madagascar ainsi que du courant marin au sud-ouest de Madagascar.

Dans la deuxième partie intitulée « Méthodologie », nous essayons de développer les principaux outils mathématiques et les logiciels utilisés pour mener l'étude.

La troisième partie présentera les divers résultats obtenus selon les approches adoptées dans la partie méthodologie.

Enfin, une conclusion termine notre manuscrit.

CHAPITRE 1 : Cadre physique de la région Androy

I.1 . Localisation géographique [1]

La région Androy est située dans l'extrême sud de Madagascar. Elle s'étend sur 19 538km². Elle se trouve entre les fleuves du Mandrare à l'Est et de Menarandra à l'Ouest. Elle est limitée au Nord par les contreforts montagneux des Hautes Terres méridionales Bara et au Sud par l'océan Indien et le canal du Mozambique.

Elle est bornée par les coordonnées géographiques suivantes :

- Latitude : entre 24°13' S et 25°24' S ;
- Longitude : entre 45°20' E et 46°26' E.

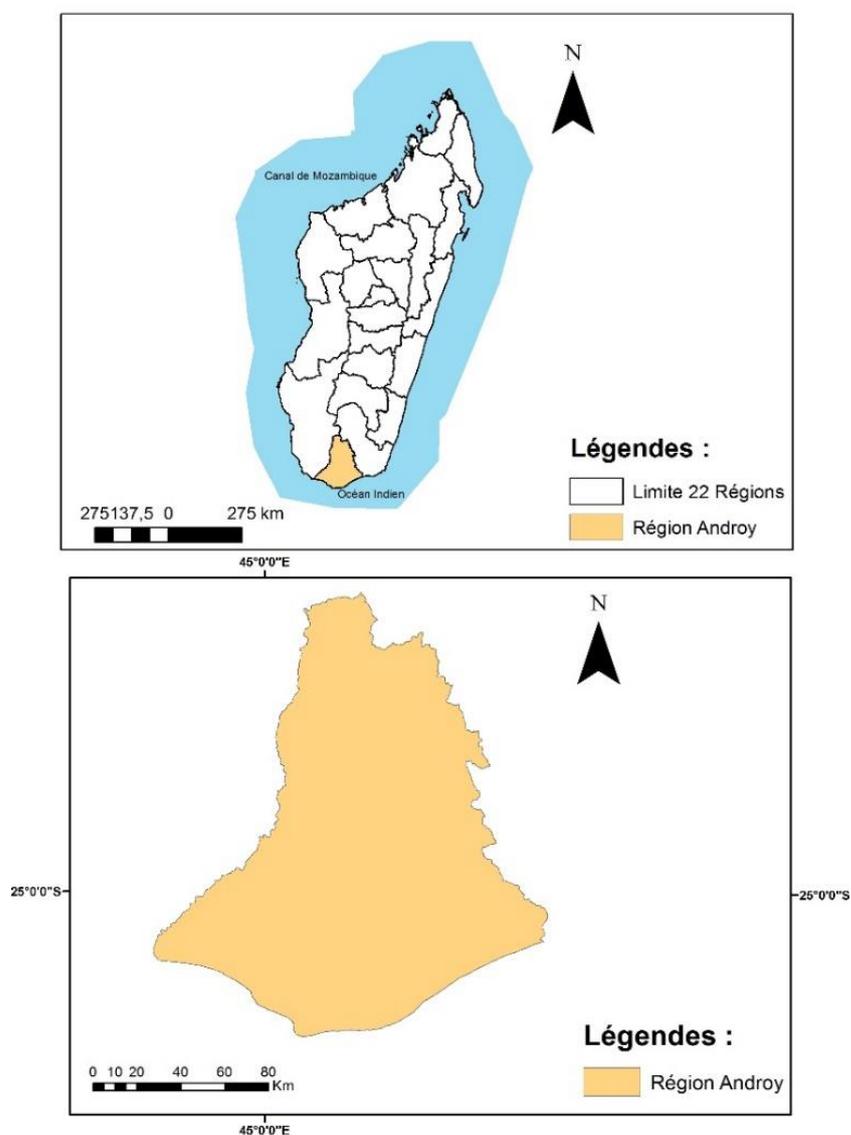


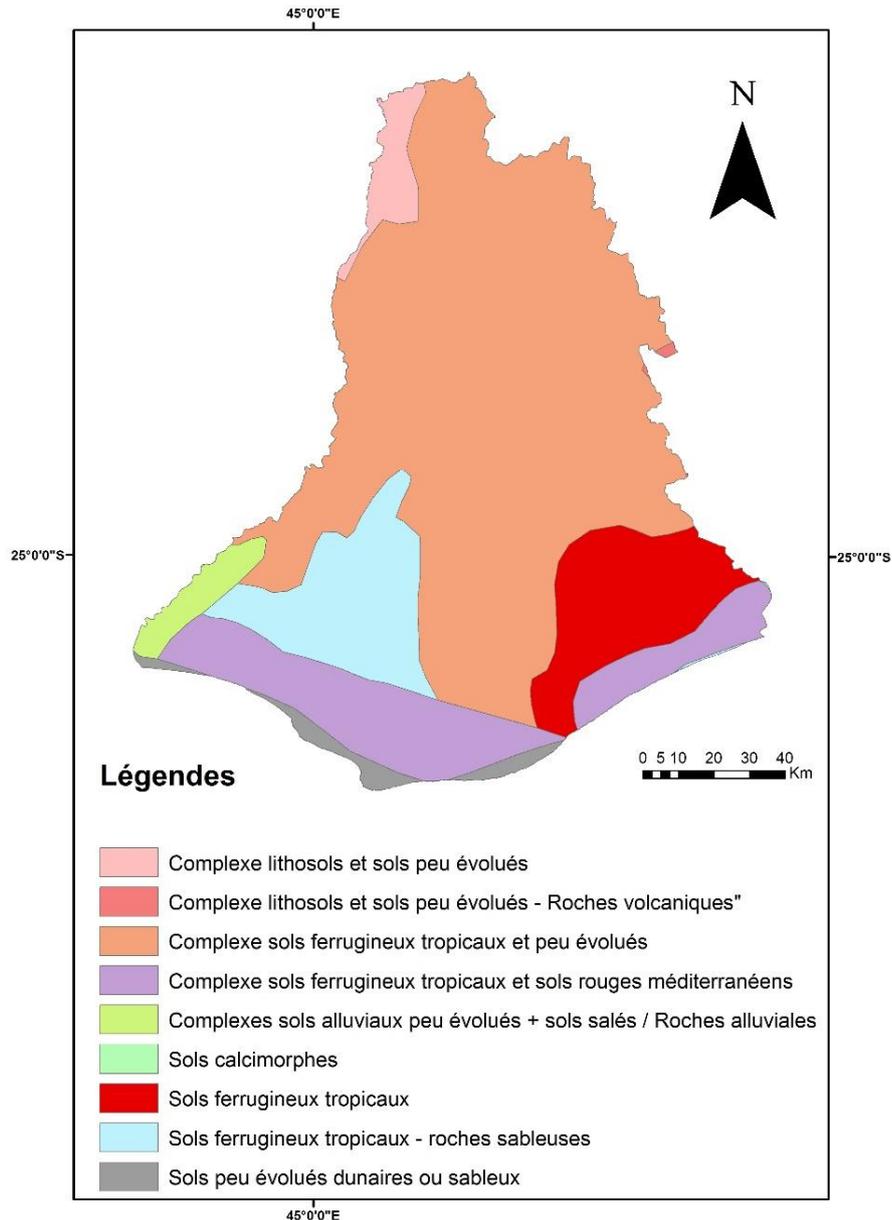
Figure 1 : Localisation géographique de la région Androy.
[Source : BD 500 FTM/ Projection Laborde/auteur]

I.2 . Relief [1]

Près de Beraketa, les altitudes varient entre 1 046m et 1 190m. La région Androy est limitée, au nord par les contreforts montagneux des Hautes Terres méridionales Bara, à l'extrémité ouest par la chaîne Ivakoana en forme de fer à cheval. Au Sud de la couronne formée par cette chaîne, l'altitude décroît du Nord au Sud, et on trouve une vaste étendue de plateaux et de pénéplaines d'altitude allant de 300 à 600 m. Dans la partie méridionale de la région, l'altitude varie entre 150m et 250m. De vastes zones sableuses encadrent les deux bassins sédimentaires d'Ambovombe et de Beloha, isolés de la mer par le plateau grés-calcaire de Karimbola.

I.3 . Pédologie (ou Etude des sols)

En général, il y a neuf types de sols sur la zone d'étude. Ces derniers sont particulièrement pauvres, peu ou pas humifères et fragiles, mais restent tout de même très cultivés. Le complexe sol ferrugineux tropical et peu évolué est le plus dominant dans la région. Les sables dunaires décalcifiés plus ou moins rubéfiés de la partie sud font l'objet de remaniements éoliens. Bien que fragiles, à faible capacité de rétention et faible teneur en matière organique, les sols sont très cultivés.



*Figure 2 : Pédologie de la région Androy.
[Source : BD 500 FTM/ Projection Laborde/auteur]*

I.4 . Formation végétale [2] [3] [37]

La région Androy est très riche en biodiversité. Elle fait partie du réseau de formation forestière unique au monde : les « fourrés d'épineux ». Cette formation est marquée par la domination du Roy (*Mimosa delicatula*). Ces fourrés sont classés parmi les écosystèmes les plus riches au monde avec des faunes et flores uniques. Elles abritent les espèces les plus connues à Madagascar à savoir : les Maki, les Sifaka, les lémurien, les tortues terrestres et plusieurs espèces d'oiseaux, de reptiles et d'amphibiens qui sont uniques à cette région. Par ailleurs, il faut aussi noter la présence de forêts-galeries le long des cours d'eau, la présence de l'Alafohy, forêts naines constituées de bonzaï naturel.

Parmi ces formations végétales, les trois arbustes suivants sont chers aux Antandroy :

- Le fantsiholitra (*Alluaudia procera* de la famille des Didiereaceae)
- Le Roy (*Mimosa delicatula*), épineux qui a donné son nom à la région et à ses habitants
- Les cactus : en plus de son rôle nourricier, ils forment autour des villages de véritables remparts, coupant les vents violents durant la saison sèche.

Concernant la couverture forestière de la région Androy, en 2013, elle couvre une superficie estimée à 367 526 ha et ne cesse de diminuer ces dix dernières années. Selon les chiffres statistiques sortis récemment après l'analyse d'évolution de l'état de la couverture des forêts humides de 2005 à 2013, une réduction de la couverture forestière de l'ordre de 33 520 ha a été constatée.

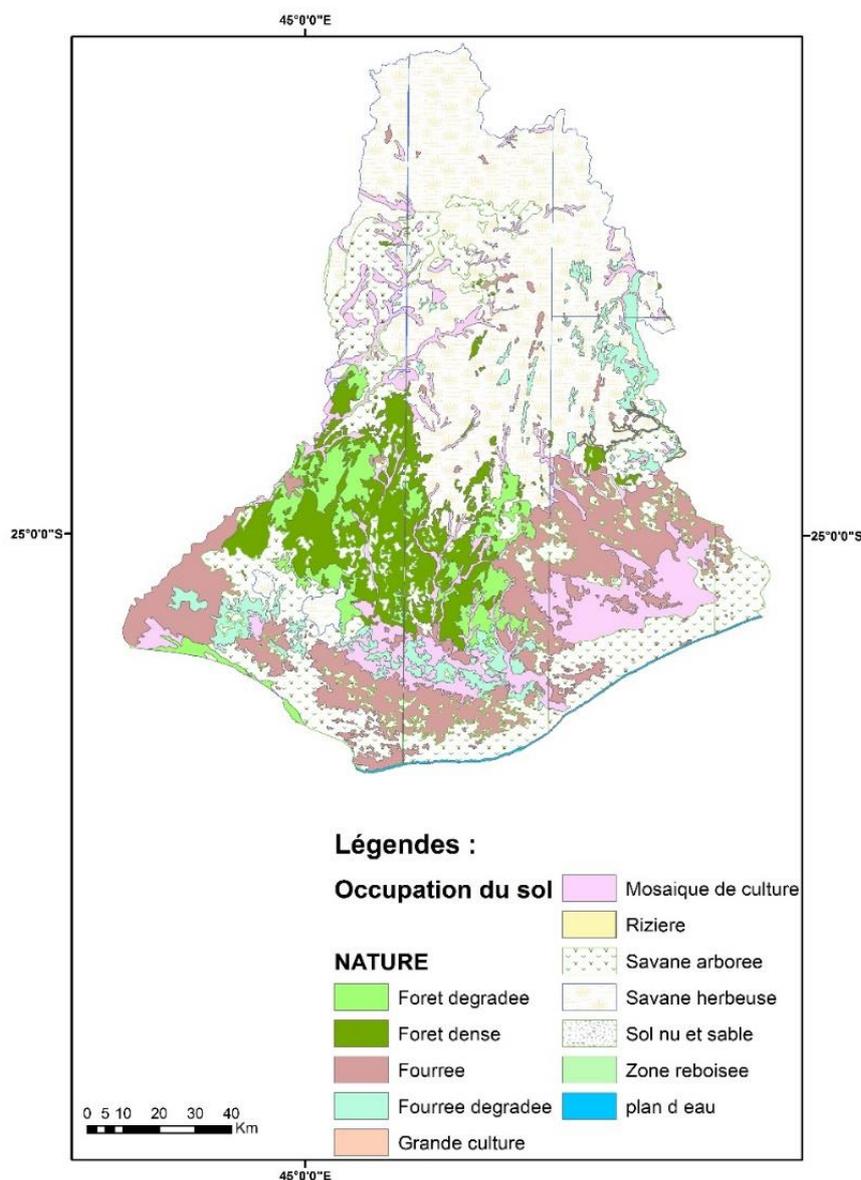


Figure 3 : Couverture végétale de la région Androy.
[Source : BD 500 FTM/ Projection Laborde/ auteur]

I.5 . Hydrologie [1] [4].

I.5.1. Fleuve

La région Androy est caractérisée par sa pauvreté en rivières permanentes. Au fur et à mesure que l'on va vers l'aval, les cours d'eau dépérissent. La dominance des sols à texture sableuse favorise l'infiltration. Trois grands fleuves drainent la région Androy. Ce sont : Menarandra, Manambovo et Mandrare. Elles s'écoulent en général dans une direction nord-sud.

Menarandra : Sa longueur totale est égale à 235 km. Elle prend naissance à l'ouest d'Isoanala dans le massif du Tsikofiky (1 425 m) vers 800 m d'altitude. Sa direction est d'abord nord-est/sud-ouest, puis nord-sud. Le Menarandra draine un bassin versant d'une superficie de 8 350 km² et peut rester à sec pendant 5 mois sur 12 mois. Ses nombreux petits affluents ne coulent que pendant la saison des pluies. Son débit moyen annuel observé au cours de la période 1951-1967 est de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Manambovo : d'une longueur totale de 165 km, elle prend sa source à 40 km au nord d'Antanimora dans la zone ouest d'Andalatanosy vers 400 à 500 m d'altitude. Elle prend une direction nord-sud. Ses principaux affluents de la rive droite prennent aussi naissance dans la même zone : Andriambarotra, Sakavola et Andranomiteraka, tandis que la Lalany le rejoint plus au Sud. Manambovo draine un bassin versant de l'ordre de 4 450 km². Il n'y a pas d'écoulement superficiel pendant sept à huit mois. Son débit moyen annuel observé pendant la même période que précédemment est de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Mandrare : Le bassin versant de Mandrare a une superficie de 12 570 km². Elle a une longueur totale de l'ordre de 270 km et coule avec un débit moyen annuel de $65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Elle prend sa source dans le massif du Beampingatra, près du pic Trafonaomby (1 957 m), vers 1 800 m d'altitude. Pendant les premiers kilomètres de son parcours, il se dirige vers le nord dans une vallée tectonique étroite et encaissée. À la sortie du massif granitique et jusqu'à Mahafaly, la direction devient sensiblement est-ouest. Le Mandrare descend ensuite vers le sud/sud-ouest jusqu'à Ifotaka où une coulée volcanique récente le repousse vers le sud/sud-est, en direction de la mer. Les principaux gros affluents de Mandrare sont Mananara et Manambolo.

I.5.2. Lacs

A part le lac salé d'Ihodo, celui de Sihanapotsy (district de Tsihombe) et du lac d'eau douce Imonto (commune Imongy), les lacs de quelque importance n'existent pratiquement pas dans la région : seules des marrés périodiques et les « ranovato » y sont présentes.

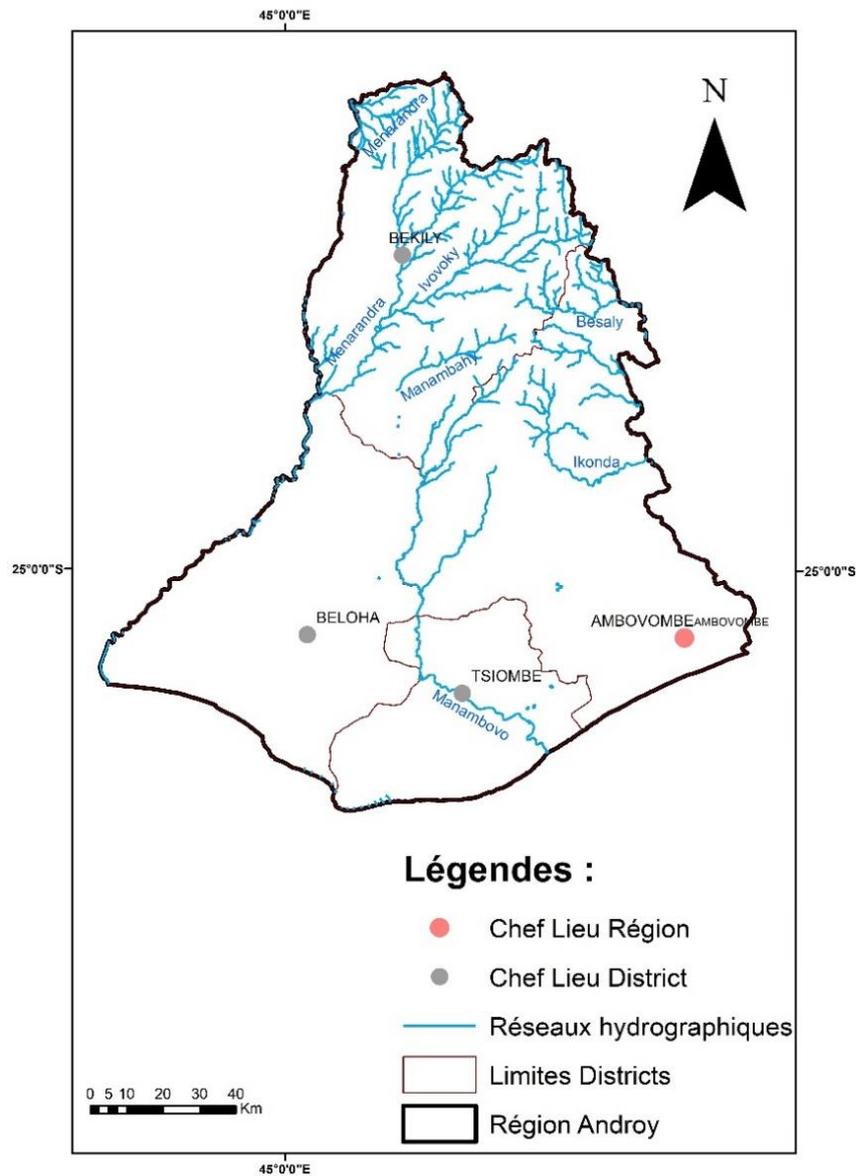


Figure 4 : Carte hydrographique de la région Androy.
 [Source : BD 500 FTM/ Projection Laborde/auteur]

1.6 . Saison dans la région Androy

Le tableau suivant montre les trois saisons dans la région Androy : Asara, Asotry et le Faosa

Tableau 1 : Saisons et climat dans l'Androy

Mois	N D J F M	A M J J	A S O
Nom des saisons	Asara	Asotry ou sakamasay	Faosa ou Taninandroka
Le climat Tandroy	Saison humide et chaude	Saison sèche et fraîche	Saison sèche et chaude

Source : Monographie région Anosy, juin 2013.

I.7 . Climatologie

Le climat de Madagascar est très diversifié à cause de l'influence maritime, du relief et de la position géographique de chaque région.

I.7.1. Cas du district de Bekily

a) Température

Sur la figure 5, la courbe en bleu représente la moyenne mensuelle de la température maximale, la courbe en gris la moyenne mensuelle de la température moyenne et la courbe en orange la moyenne mensuelle de la température minimale. Elles sont calculées sur la période de 1985-2015.

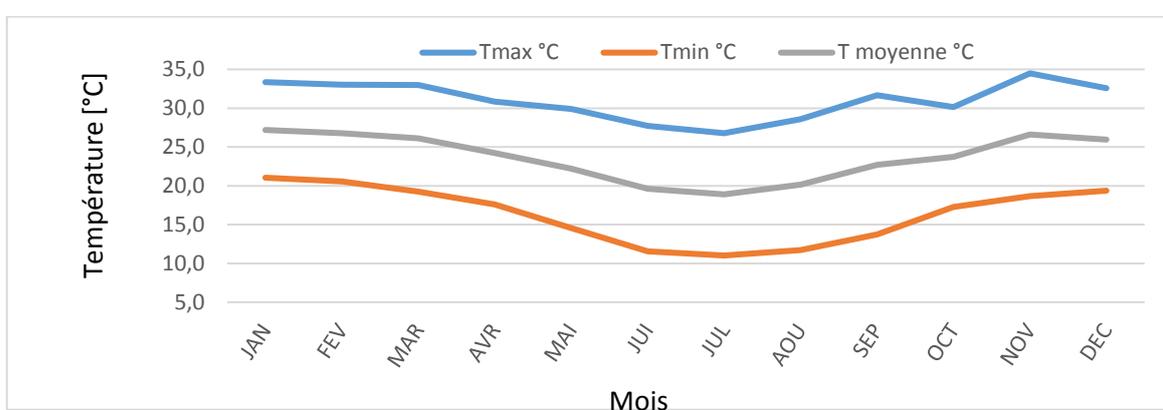


Figure 5 : Moyenne mensuelle de la : température maximale (bleu), température moyenne (gris), température minimale (orange) pour le cas du district de Bekily.

La température maximale moyenne mensuelle atteint un minimum au cours du mois de juillet avec 26,8°C et un maximum au mois de novembre avec 34,5°C. Pour la température minimale moyenne mensuelle, on observe un maximum de valeur en janvier avec 21°C et un minimum au cours du mois de juillet avec 11°C.

La température moyenne mensuelle se trouve entre la courbe de variation de la température maximale et minimale moyenne. On note une faible valeur de cette température moyenne mensuelle en juillet avec 18,9°C et une forte valeur allant de 27,2°C en janvier. Durant le mois d'août en octobre, elle se trouve dans la gamme de 20,2°C à 23,6 °C, elle oscille de 18,9°C à 24,2°C d'avril en juillet et de 26,1°C à 27,2°C de novembre en mai. La température moyenne annuelle est de 23,6°C.

b) Précipitation

La figure 6 illustre la moyenne mensuelle de la précipitation du district de Bekily de 1985-2015. La moyenne mensuelle des précipitations supérieures à 40 mm se produit toute pendant le mois de novembre jusqu'au mois de mars.

A partir du mois de mai jusqu'au mois de septembre, on assiste à un taux de précipitation moyen inférieur à 10mm. La quantité maximale moyenne de 170,2mm est relevée en janvier durant l'Asara. Par contre, le minimum de précipitation se présente au cours du mois de juin durant l'Asotry avec une valeur moyenne de 1,4mm. La précipitation moyenne annuelle est de 623,7mm.

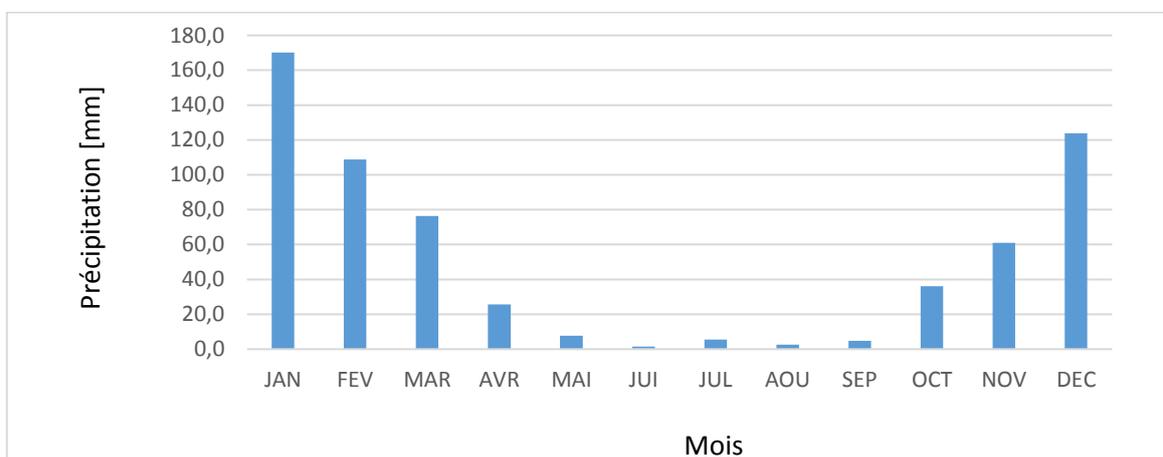


Figure 6 : Précipitation moyenne mensuelle de 1985-2015 du district de Bekily.

1.7.2. Cas du district de Beloha

a) Température

La figure ci-dessous présente la variation moyenne mensuelle de la température maximale (en bleu), de la température moyenne (en gris) et la température minimale (en orange) pour le district de Beloha.

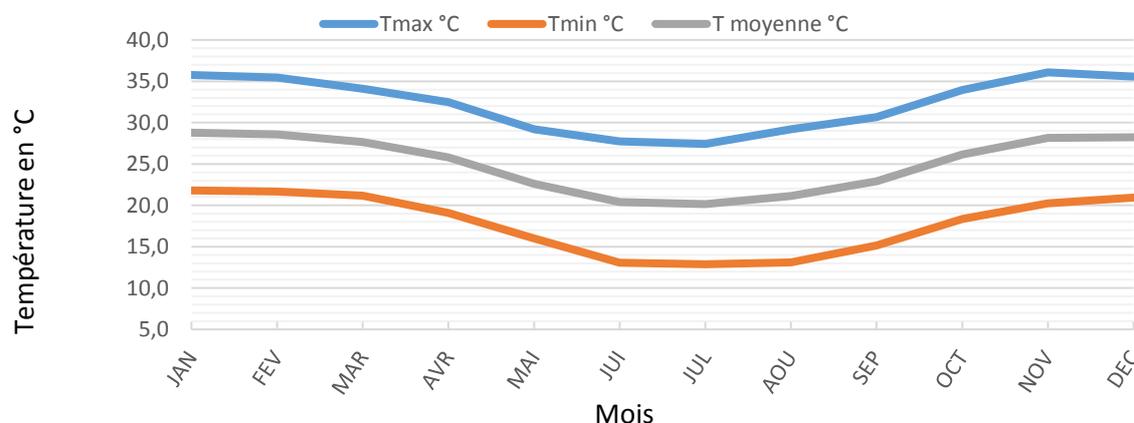


Figure 7 : Moyenne mensuelle de la : température maximale (bleu), température moyenne (gris), température minimale (orange) pour le cas du district de Beloha.

Les trois graphes de températures évoluent de façon presque similaire pour atteindre un minimum durant le mois de juillet et un maximum pendant le mois de janvier. Pendant le mois de janvier et le mois de février, les courbes de température présentent un profil assez constant. Pour le cas de la température minimale, un profil presque stationnaire se remarque au cours du mois de juin, juillet, août, avec des valeurs allant respectivement de 13,1°C, 12,9°C et 13,1°C. La température moyenne annuelle est de 25°C.

b) Précipitation

Les histogrammes sur la figure 8 montrent la distribution moyenne mensuelle de la précipitation du district de Beloha. Le maximum de valeur est relevé pendant le mois de janvier avec 118,2mm et le minimum pendant le mois de septembre avec 3,9mm. Les précipitations moyennes supérieures à 40mm se passent durant le mois de décembre, janvier, février et mars. Et les valeurs inférieures à 10mm se notent au cours du mois de mai à septembre. La précipitation moyenne annuelle est de 458,9mm.

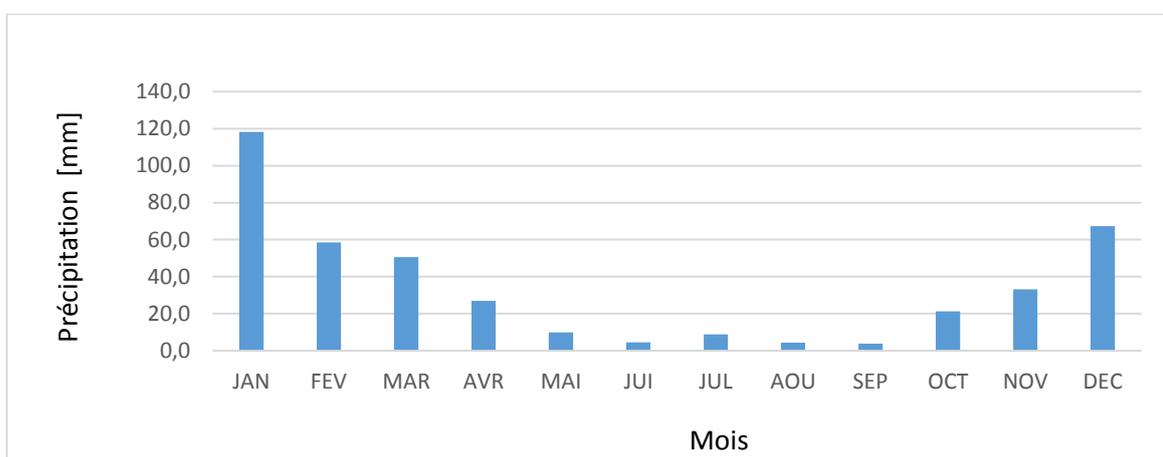


Figure 8 : Précipitation moyenne mensuelle de 1985-2015 du district de Beloha.

1.7.3. Cas du district d'Ambovombe

a) Température

Le graphe suivant montre la variation moyenne mensuelle de la température maximale (en bleu), de la température moyenne (en gris) et de la température minimale (en orange) du district d'Ambovombe.

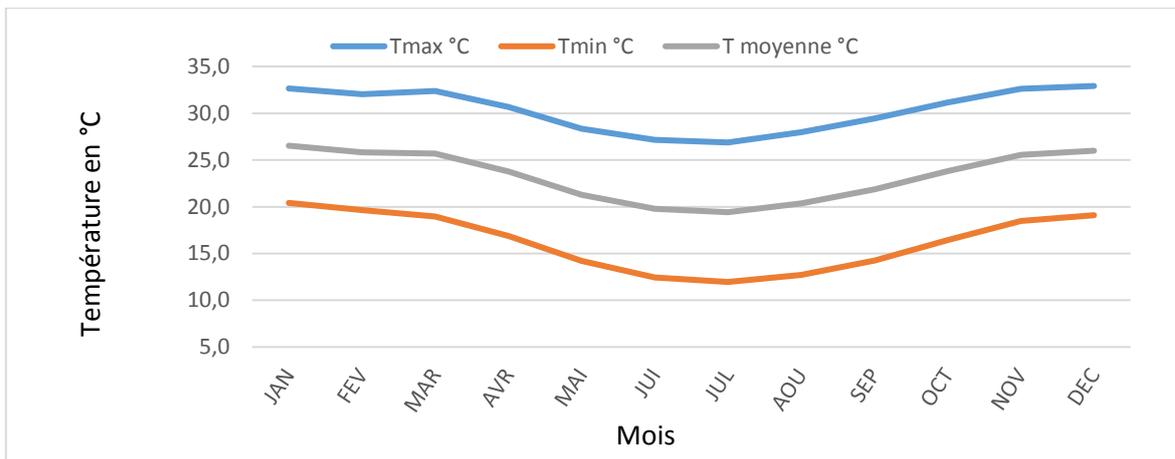


Figure 9 : Moyenne mensuelle de la : température maximale (bleu), température moyenne (gris), température minimale (orange) pour le cas du district d'Ambovombe.

On remarque que les trois courbes de température atteignent respectivement un minimum au cours du mois de juillet. On observe 26,9°C pour la température maximale moyenne mensuelle, 12°C pour la température moyenne mensuelle et 19,4°C pour la température minimale moyenne mensuelle. Pour la température maximale moyenne mensuelle : le maximum de valeur se manifeste durant le mois de décembre avec 32,9°C. Pour la température moyenne mensuelle et température minimale moyenne mensuelle, les valeurs maximales persistent pendant le mois de janvier avec des gammes de valeurs allant respectivement de 26,5°C et 20,4°C. Pour ce district, la température moyenne annuelle est égale à 23,3°C.

b) Précipitation

La courbe suivante nous donne l'état moyen de la répartition des précipitations moyennes mensuelles du district d'Ambovombe.

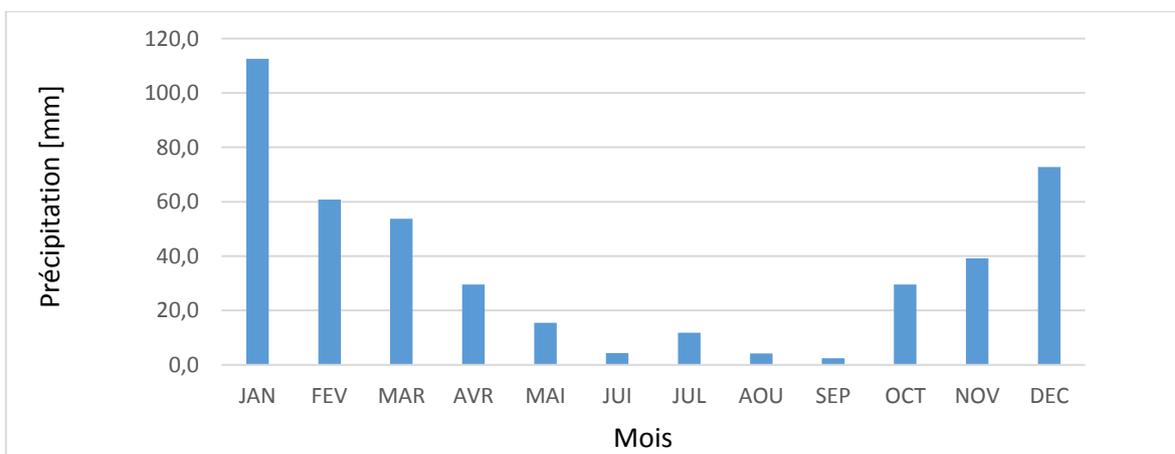


Figure 10 : Précipitation moyenne mensuelle de 1985-2015 du district d'Ambovombe.

Pour le cas d'Ambovombe, la majorité des précipitations de quantité moyenne supérieure à 40mm se produit de décembre à mars. On note une valeur moyenne de 112,6mm en janvier. C'est durant ce mois qu'on remarque un taux de précipitation moyen élevé. Pendant le mois de mai à septembre, le taux des précipitations moyennes mensuelles varie de 15,4mm à 2,4mm dans le district. Le mois de septembre est caractérisé par un taux de précipitation minimale de 2,4mm. La précipitation moyenne annuelle est de 596,8mm

1.7.4. Cas du district de Tsihombe

a) Température

La figure suivante illustre la variation moyenne mensuelle de la température maximale (en bleu), de la température moyenne (en gris) et la température minimale (en orange) du district de Tsihombe.

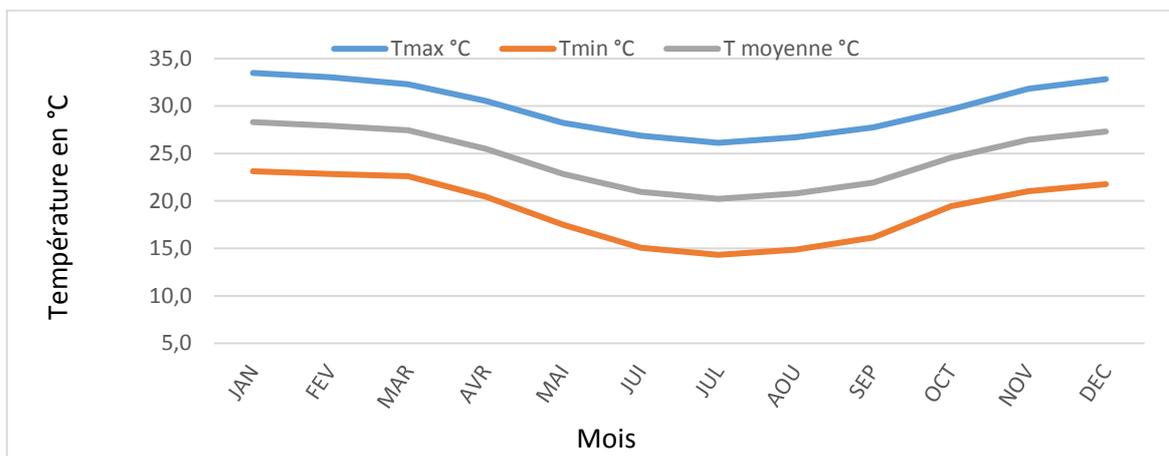


Figure 11 : Moyenne mensuelle de la : température maximale (bleu), température moyenne (gris), température minimale (orange) pour le cas du district de Tsihombe.

Que ce soit pour la température maximale, minimale ou moyenne, le maximum est relevé au cours du mois de janvier et minimum au cours du mois de juillet.

Pour la température maximale, on relève une valeur moyenne de 33,5°C en janvier et 26,1°C en juillet. Pour la température minimale, le maximum en janvier est de 23,1°C et le minimum au cours du mois de juillet varie de 14,3°C. Et pour le cas de la température moyenne, le maximum est de 28,3°C et le minimum est de 20,2°C. On peut voir clairement sur la figure 11 que durant les sept premiers mois de l'année (janvier à juillet), les trois courbes de température décroissent pour arriver à un minimum en juillet et croissent de nouveau jusqu'en mois de décembre pour atteindre le maximum en janvier. La température moyenne annuelle est égale à 25,5°C.

b) Précipitation

Les histogrammes de la figure 12 montrent que le mois de décembre, janvier, février, mars ont des précipitations moyennes supérieures à 40mm. Ces mois restent les mois les plus arrosés. Pour le mois de mai, juin, juillet, août et septembre, les précipitations restent inférieures à 12mm. La précipitation moyenne annuelle est de 386,3mm.

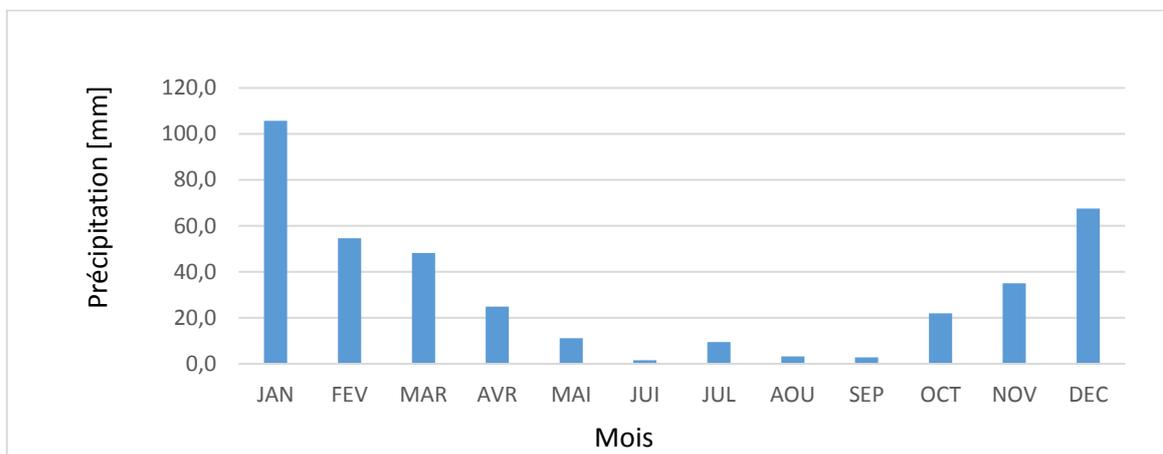


Figure 12 : Précipitation moyenne mensuelle de 1985-2015 du district de Tsihombe.

L'extrême sud de l'île est une zone semi-aride où la précipitation moyenne annuelle est inférieure à 600 mm avec déficit hydrique de 9 à 11 mois. Elle reste la région la plus sèche en dépit des diverses classifications climatiques adoptées. On remarque une diminution significative de l'intensité de précipitation de la zone nord vers l'extrême sud de la zone littorale. [5]

I.8 . Vent [6] [7] [8] [9]

Les alizés sont connus comme flux de sud-est et dominant dans la grande île. Elles sont associées à la circulation dans le sens inverse de l'aiguille d'une montre. L'anticyclone des Mascareignes se trouve dans la position géographique plus à l'ouest (55°E – 35°S) au cours de l'hiver austral (mai à octobre) et à une position plus orientale (80°E) au cours de la saison d'été (novembre à avril).

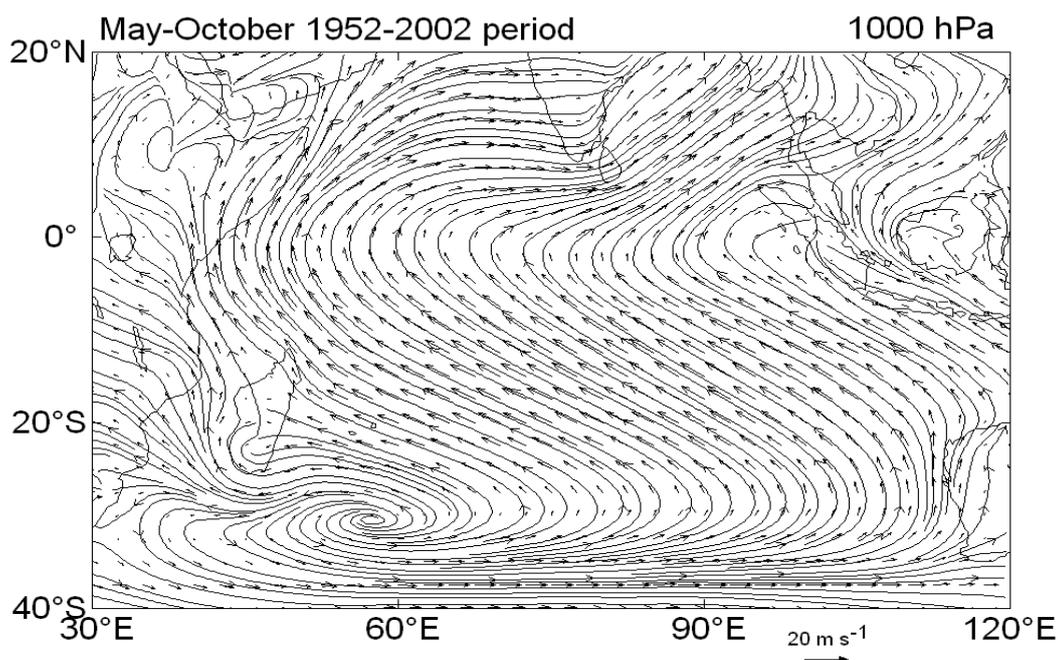


Figure 13 : Climatologie moyenne du vent à 1000hPa sur l'Océan Indien pendant 1952-2002. [Source : Tatiana Andry Arivelo, 2009]

Comme indiqué précédemment, les alizés seraient un facteur météorologique important à grande échelle pour la pluviométrie de Madagascar. Et ces flux ont un cycle annuel, comme illustré à la figure 14, avec un maximum durant l'hiver austral, 10 m/s au cours du mois de juillet jusqu'au mois d'août et un plus faible niveau d'intensité de 4 m/s pendant le mois de janvier et février.

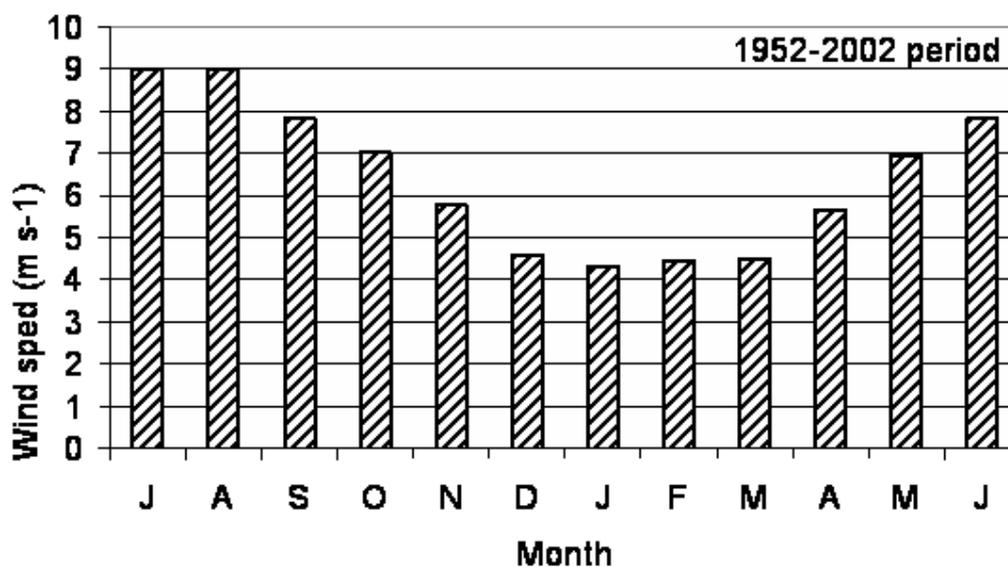


Figure 14 : Climatologie moyenne de la vitesse du vent au sud-est de l'océan Indien (10°S-25°S, 55°E-65°E). [Source : Tatiana Andry Arivelo, 2009]

La région Androy ne bénéficie pas du vent humide venant de l'est. Elle ne reçoit que l'alizé de direction sud-est subissant l'effet de foehn engendré par la chaîne montagneuse d'Anosy donc à caractère chaud et sec et assèche fortement la zone. Les habitants de la région l'appellent Tiokatimo.

Le vent dominant dans l'extrême sud de Madagascar a une direction sensiblement parallèle au tracé du littoral avec une vitesse généralement supérieure à 20 m/s. En plus, ce vent dominant borde la côte Malagasy à Taolagnaro en soufflant dans la direction est-nord-est. Cette direction devient sensiblement Est sur le littoral méridional de l'Androy, puis sud-est au-delà du Cap Sainte Marie.

Tableau 2 : Différents vents dans l'Androy

Nom du vent	Signification	Provenance
Tiopoty	Vent blanc	Vient de l'est, desséchant
Tiomena	Vent rouge	Vent d'Est qui dessèche tout ; souffle de septembre à décembre
Tiobaratra	Vent du Nord	Ce vent amène la pluie et elle souffle du nord-ouest en saison des pluies.

Source : Monographie de la région d'Anosy, juin 2003.

I.9 . Les composantes marines

I.9 .1. Le plateau continental [10] [11] [12]

Le plateau continental du sud de Madagascar est encore méconnaissable par la plupart des habitants de la région et des décideurs locaux. Ce dernier est exceptionnellement très large par rapport à la plupart de ceux des autres parties de la côte de la grande île. En effet, c'est un lieu de développement de la flore et la faune marine, très riche en biodiversité où la profondeur ne dépasse pas les 50 m.

Le plateau continental sous-marin de l'extrême sud de Madagascar s'allonge suivant une direction nord-sud entre les latitudes 26°S et 36°S. Il se trouve au nord de la dorsale Sud-Ouest-Indienne. Il couvre une superficie totale d'environ 117 000 km² et domine deux bassins océaniques : le bassin océanique du Mozambique à l'Ouest et le bassin océanique de Madagascar à l'est. Au-dessus de ce plateau, la profondeur de la mer est généralement de 1500 à 3000 m, sauf pour quelques zones surtout au sud où la profondeur n'est que de 20m. Vers 32°S, le plateau s'élargit de 300 km vers l'est par un éperon qui marque la limite entre les régions du bassin de Madagascar créées au crétacé supérieur respectivement par la dorsale centrale indienne et la dorsale Sud-Ouest-Indienne. Vers 31°S une dépression de plusieurs milliers de mètres divise géomorphologiquement le plateau en deux.