

RAPPORT DE STAGE DE MASTER 2
UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION

Andréa CACHARD

**Etude de la prévisibilité intra-saisonnière
de la migration de la ZCIT et des fortes
pluies associées sur le nord du bassin
sud-ouest de l’océan Indien**

Encadré par :

Sylvie MALARDEL (LACy/Cyclones, Météo France)
François BONNARDOT (DIROI/EC, Météo France)
Hélène VÉRÈMES (LACy/Cyclones)

Février – juillet 2022

Résumé

La Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) est une zone de convergence entre les flux d'alizés du sud-est et du nord-est, génératrice de fortes précipitations et d'orages. Afin d'anticiper ce type d'évènements météorologiques, une méthode de détection automatique de la ZCIT à l'échelle intra-saisonnière (de 2 à 4 semaines) est présentée ici. Cette technique consiste à déterminer à la fois la position et l'intensité de la ZCIT sur le nord du bassin sud-ouest de l'océan Indien. Pour cela, on utilise les champs de vents zonaux et méridionaux à 850hPa et à 200hPa pour caractériser la position et le champ de précipitations pour estimer son activité.

Cette méthode a permis d'établir une climatologie mensuelle de la position de la ZCIT sur le domaine d'étude à partir des données de la réanalyse (ERA5) du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) sur la période 1979-2021. Les résultats sont en accord avec la littérature, montrant une variation méridionale de la ZCIT en fonction de la saison. Un produit probabiliste à partir de la prévision d'ensemble à échéance étendue (jusqu'à 46 jours) du CEPMMT (EPS) a été élaboré avec cette méthode pour permettre la prévision de la migration de la ZCIT semaine par semaine. Une étude d'évaluation de ce produit a été menée en comparant les prévisions intra-saisonnières, les réanalyses ERA5 et les observations des stations météorologiques des Seychelles pour le démarrage de la saison des pluies en 2021. Les prévisions montrent l'arrivée de la ZCIT sur les Seychelles pour la semaine du 6 au 12 décembre 2021 deux semaines à l'avance. Cette prévision est en accord avec ERA5 et confirmée par les observations des Seychelles, montrant le démarrage de la saison des pluies pour cette semaine en particulier. Enfin, un score a été établi permettant d'évaluer les incertitudes associées à la position de la ZCIT diagnostiquée dans les prévisions par rapport au diagnostic obtenu dans les réanalyses. Ce score évalue le passage de la ZCIT au-dessus des Seychelles sur la période allant de 2017 à 2021. Les résultats montrent un taux de bonnes prévisions encourageant mais le nombre de fausses alarmes augmente avec l'échéance.

Les perspectives de ce stage sont d'établir et de calculer d'autres scores de prévision du produit de localisation de la ZCIT à l'échelle intra-saisonnière. Ils apporteront une information sur l'incertitude associée à la position de la ZCIT diagnostiquée dans les prévisions par rapport au diagnostic obtenu dans les réanalyses, c'est une information importante pour les futurs utilisateurs. Suite au calcul de ces scores, le produit pourra être mis à disposition, en temps réel, des prévisionnistes et divers usagers.

Mots-clés : *ZCIT, précipitations, méthode automatique, prévision intra-saisonnière, prévision d'ensemble*

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier mes encadrants **Sylvie MALARDEL**, **François BONNARDOT** et **Hélène VÉRÈMES** pour leur accueil, leur disponibilité et leur accompagnement tout au long de mon stage. Mes remerciements s'adressent également aux membres du SMA (Seychelles Meteorological Authority) pour leur accueil chaleureux et leur expertise. Les échanges avec les prévisionnistes ont été riches et bénéfiques pour l'avancement de mon stage.

Un grand merci également à l'équipe du LACy présente sur le site de Météo-France ainsi qu'à l'équipe de la DIROI pour leur convivialité. Je remercie, par la même occasion, les stagiaires du LACy **Nathan DIMNET**, **Pauline BRISSET** et **Mike PAYET** pour leur bonne humeur au quotidien ainsi que pour leur soutien et leurs précieux conseils durant ce stage.

Enfin, je souhaite remercier **Lucie LAMBERT**, **Valentin LECHARTIER**, **Johann BREIT-BOUDROIT** ainsi que ma famille pour leur visite sur l'île de la Réunion sans qui ce séjour n'aurait pas eu la même saveur. Merci à **Bastien GRENIER** pour son soutien et pour la relecture de ce rapport.

Table des matières

Résumé	I
Remerciements	II
Table des matières	III
Introduction	1
1 Généralités	3
1.1 Etat de l'art	3
1.2 Configuration du bassin	5
1.3 Qu'est-ce que la prévision intra-saisonnière ?	6
1.4 Qu'est-ce que la prévision d'ensemble ?	7
2 Données et méthodes	9
2.1 Données utilisées	9
2.2 Indice de flux de mousson	9
2.3 Méthode de détection automatique de la ZCIT	10
2.3.1 Etape n°1 : Définir le champ météorologique	10
2.3.2 Etape n°2 : Calcul du maximum du champ	11
2.3.3 Etape n°3 : Chercher l'intervalle de latitude le plus fréquent	12
2.3.4 Etape n°4 : Trouver les "points de confiance"	12
2.3.5 Etape n° 5 : Calcul du maximum du champ dans un intervalle réduit	13
2.3.6 Etape n°6 : Choisir le meilleur diagnostic à l'aide des précipitations	14
3 Climatologie	15
3.1 Climatologie de l'indice de flux de mousson sur la période 1979-2021	15
3.2 Climatologie mensuelle de la position de la ZCIT sur la période 1979-2021	16
4 Application à la prévision d'ensemble	18
4.1 Rejeu de situation : l'arrivée de la ZCIT 2021	18
4.2 Vérification avec les données ERA5 et les stations météorologiques des Seychelles	23
4.3 Elaboration d'un score permettant d'évaluer le produit sur les Seychelles	25
5 Conclusion et perspectives	28
Bibliographie	29
A Annexes	31

Introduction

Les acteurs de terrain de la protection des biens et des personnes tels que les organisations humanitaires et les services de protection civile sont demandeurs de prévisions leur permettant d'anticiper des prises de décisions face aux évènements météorologiques destructeurs. Dans ce contexte, la prévision intra-saisonnière, c'est-à-dire des prévisions allant de 2 semaines à 2 mois, est un outil pouvant apporter des solutions. Plusieurs projets de recherche sont en cours sur le sujet dont le projet PISSARO qui est piloté par le LACy. PISSARO (Prévisions Intra-Saisonnières à Saisonnières avec AROme) est un projet qui se concentre sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien et qui a pour objectifs l'évaluation, l'amélioration et la valorisation de la prévision intra-saisonnière des phénomènes extrêmes et l'élaboration de produits de prévision faciles à utiliser pour les usagers tels que les prévisionnistes de la DIROI (Direction Interrégionale de Météo-France pour l'océan Indien) et du SMA (Seychelles Meteorological Authority) ainsi que les acteurs opérationnels comme la PIROI (Plateforme d'Intervention Régionale de l'Océan Indien). La première partie du projet a été consacrée aux cyclones tropicaux. Mais le projet ne s'y limite pas puisque d'autres phénomènes météorologiques peuvent être dévastateurs, notamment les fortes pluies qui seront au coeur de la seconde partie du projet PISSARO. Dans cette étude on se focalise sur les évènements fortement pluvieux associés à la dynamique de la ZCIT dans le nord du bassin sud-ouest de l'océan Indien à l'échelle de temps intra-saisonnière.

La Zone de Convergence Inter-Tropicale (nommée ZCIT dans la suite du rapport) est un phénomène de grande échelle localisé dans la région tropicale. C'est une zone de basses pressions orientée est-ouest où les alizés de surface du nord-est et du sud-est se rencontrent. Cette zone de convergence donne lieu à des ascendances de grande échelle (correspondant à la branche ascendante de la cellule de Hadley) favorisant des systèmes convectifs, eux-mêmes source de fortes précipitations et d'orages. La ZCIT occupe un rôle primordial dans la redistribution énergétique. En effet, la convection profonde qui lui est associée libère une importante quantité de chaleur créant ainsi un surplus d'énergie dans les tropiques. La divergence en altitude de la ZCIT permet d'exporter cet excédant d'énergie vers les pôles qui quant à eux sont en déficit d'énergie (BEUCHER, 2010).

Les évènements fortement pluvieux associés à la dynamique de la ZCIT comportent des risques pour la population et ses biens. En effet, la ZCIT génère des pluies torrentielles pouvant mener à des inondations. Toutefois, elle est attendue avec impatience par certains pays tels que les Seychelles pour la ressource en eau. La ressource en eau est un enjeu majeur dans le contexte de changement climatique (en particulier pour les domaines insulaires), elle joue un rôle crucial dans de nombreux domaines dont l'agriculture, le maraîchage, etc. Un autre enjeu lié à la ZCIT concerne la pêche. En effet, l'arrivée de la ZCIT dans le nord du bassin du sud-ouest de l'océan Indien s'accompagne d'un changement de direction de vent et d'une variation de la température de la mer, deux phénomènes impactant le déplacement des poissons. Au vu des nombreux enjeux évoqués ci-dessus en correspondance avec la ZCIT, il est intéressant de pouvoir prévoir quelques semaines à l'avance (de une à quatre semaines) sa position sur le bassin afin d'alerter les autorités intéressées. A leur tour, elles pourront informer la population locale.

L'objectif de ce stage est, dans un premier temps, de mettre en place une méthode de détection automatique de la ZCIT à partir des données de sorties modèles. Ensuite, en utilisant la méthode, de réaliser une climatologie mensuelle de la position de la ZCIT et de développer un produit probabiliste pour la prévision de la migration de la ZCIT et le démarrage de la saison des pluies sur le nord du sud-ouest de l'océan Indien.

Ce rapport est organisé de la façon suivante : la partie 1 présente le contexte de l'étude en introduisant les principales caractéristiques de la ZCIT, les différentes configurations du bassin du sud-ouest de l'océan Indien ainsi que les notions de prévision d'ensemble et d'échelle intra-saisonnière. La deuxième partie 2 explique les données utilisées ainsi que la méthode de détection automatique de la ZCIT développée durant le stage. La partie 3 propose une climatologie mensuelle de la position de la ZCIT sur le nord du bassin sud-ouest de l'océan Indien en se basant sur la méthode expliquée en partie 2. Enfin la partie 4 expose le produit de probabilité réalisé avec les 50 membres de la prévision d'ensemble du CEPMMT, son application sur un cas de rejeu d'une situation de 2021 ainsi que l'évaluation de ce produit sur la période 2017-2021. La conclusion et les perspectives sont présentées dans la partie 5.

1 | Généralités

Dans ce chapitre nous nous intéresserons aux différentes études qui ont déjà été réalisées sur le sujet. Ensuite, nous définirons le domaine d'étude avant de parler des différentes configurations du bassin en fonction de la période. Enfin, nous aborderons les notions de prévision intra-saisonnière et de prévision d'ensemble.

1.1 Etat de l'art

La ZCIT est matérialisée par une zone de rencontre entre les flux d'alizés du sud-est et du nord-est et par une large bande nuageuse qui s'étire d'est en ouest (JUMEAUX & AL., 2011). Sa position est fortement corrélée à la température de surface de la mer et à son gradient méridional (WELLER & AL., 2014). Il n'existe pas une méthode bien définie pour déterminer la position de la ZCIT. Plusieurs études ont souligné le lien entre la position de la ZCIT et l'équateur du flux d'énergie (e.g, ADAM & AL., 2016a; SCHNEIDER & AL., 2014), où le flux d'énergie méridional atmosphérique intégré sur la colonne devient nul (KANG & HELD, 2008). Une étude, se focalisant sur l'océan Indien, a montré que la localisation de la ZCIT dépend du transport d'énergie atmosphérique (AET) transéquatorial et de l'apport énergétique net équatorial (NEI). La variation interannuelle de la position de la ZCIT est dominée par l'AET transéquatorial et la variation saisonnière par le NEI (KESHTGAR & AL., 2020). D'autres études ont utilisé la température du sommet des nuages (WALISER & GAUTIER, 1993), des bandes de fortes précipitations (GU et al., 2004) ou encore des champs dynamiques tels que la vorticité (CHAN & EVANS, 2002). WALISER et GAUTIER (1993) ont été les premiers à réaliser une climatologie de la position mensuelle de la ZCIT dans les différents bassin. Pour cela, ils ont utilisé les images satellites infrarouges sur la période 1971-1987. Elle est illustrée par la Figure 1.1 pour l'océan Indien (b) et à l'échelle du globe (h). A l'échelle du globe, la ZCIT est localisée dans l'hémisphère nord (resp. l'hémisphère sud) pendant l'été boréal (resp. l'été austral). Concernant l'océan Indien, la migration de la ZCIT vers l'hémisphère nord montre une intensification de la convection associée à la mousson indienne en été boréal.

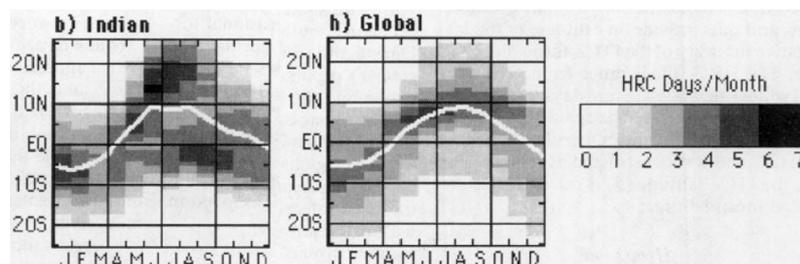


FIGURE 1.1 – Graphiques mois-latitude du cycle annuel de la ZCIT pour l'océan Indien et le globe. L'échelle représente le nombre de jour de convection profonde sur 1 mois avec une résolution horizontale de $1^\circ \times 1^\circ$. La ligne blanche représente l'estimation de la position mensuelle moyenne de la ZCIT (WALISER & GAUTIER, 1993)

Depuis, une autre climatologie de la ZCIT a été produite, BERRY et REEDER (2014) ont développé une méthode de détection automatique de la ZCIT en utilisant le champ de vents (u,v) moyenné entre 1000hPa et 850hPa. Cette méthode a l'avantage d'utiliser des champs standards de sortie de modèle contrairement à la méthode de WALISER et GAUTIER (1993), ce qui permet de l'utiliser pour la prévision opérationnelle ou dans des modèles de climat. Leur méthode leur a permis de réaliser une climatologie saisonnière de la ZCIT représentée par la Figure 1.2. On retrouve les mêmes résultats qu'avec la climatologie de WALISER et GAUTIER (1993), une ZCIT qui se déplace avec le soleil. Une autre information que nous fournit ces graphiques est que la ZCIT de l'océan Indien présente la plus forte migration entre juillet et janvier. Elle passe de 20°N en juillet à 10°S en janvier. Dans la suite, on se focalisera uniquement sur le nord du bassin sud-ouest de l'océan Indien (SOOI), autrement dit des longitudes 40°E à 90°E et des latitudes 10°N à 30°S.

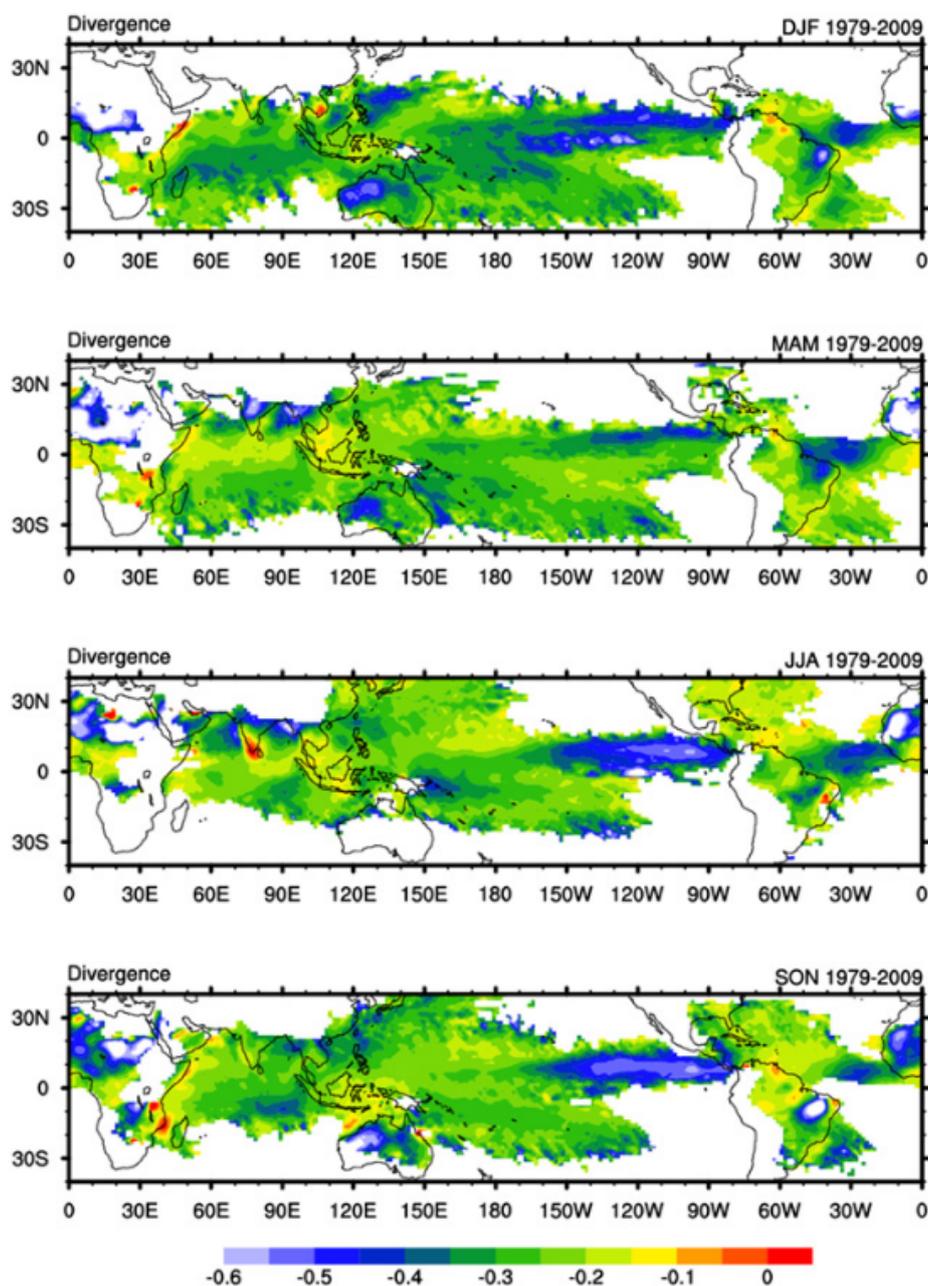


FIGURE 1.2 – Cycle saisonnier de la divergence de la ZCIT. La plage de couleur représente la divergence moyennée entre 1000hPa et 850hPa. (BERRY & REEDER, 2014)

1.2 Configuration du bassin

Le bassin du domaine d'étude se retrouve dans différentes configurations selon la saison dans laquelle nous nous trouvons. Durant l'hiver austral, la ZCIT est localisée dans l'hémisphère nord (cf Figure 1.1), le bassin est alors dit être dans une configuration de "zone tampon" (cf Figure 1.3a). Ensuite pendant les inter-saisons, c'est-à-dire pendant les mois de octobre/novembre et avril/mai, le bassin est dans une configuration de Thalweg Proche Equatorial (nommé TPE dans la suite du rapport). Le TPE est situé dans la courbure cyclonique de l'alizé de surface (BEUCHER, 2010). La Figure 1.3b permet de bien l'observer, il est représenté par l'encadré bleu entre les longitudes 70°E/90°E et les latitudes 0°/10°S. Enfin, la dernière configuration possible du bassin se trouve pendant l'été austral, le basculement du flux de mousson se produit, ce qui crée la zone de convergence entre les vents de sud-est et de nord-est. Le bassin est alors dans une configuration de ZCIT (cf Figure 1.3c). Ici, la ZCIT est représentée par ligne en pointillée bleue. Cette ligne a été tracée à la main sur cette exemple-ci. L'objectif dans la suite de ce rapport est de présenter le programme informatique qui permet de tracer cette ligne de manière automatique à l'échelle hebdomadaire.

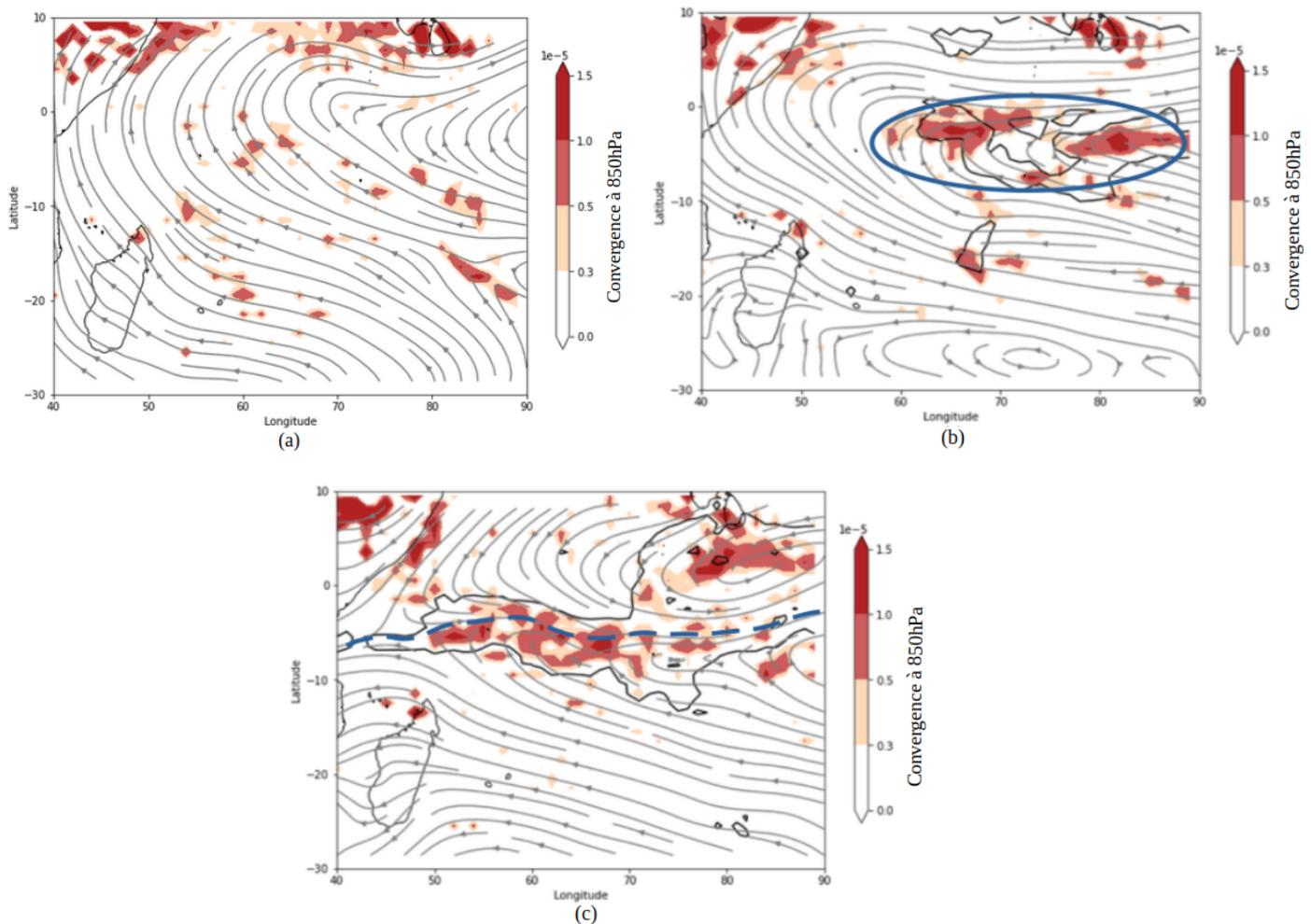


FIGURE 1.3 – Représentation des trois configurations du bassin (a) zone tampon, (b) TPE et (c) ZCIT. La convergence à 850hPa est représentée en couleur, les précipitations à 50mm en contour noir et le flux en gris. Les données proviennent d'ERA5.

1.3 Qu'est-ce que la prévision intra-saisonnière ?

L'échelle de temps qui définit la prévision intra-saisonnière diffère selon les sources. Parfois l'échelle de temps retenue est de 10 jours à 30 jours comme c'est le cas sur le Figure 1.4 tandis que d'autres sources fixent une échelle de temps allant de 2 semaines à 2 mois. Ici, l'échelle de temps utilisée est de 1 semaine à 5 semaines puisque le CEPMMT fourni des prévisions allant jusqu'à 46 jours. La figure 1.4 représente la qualité de la prévision en fonction de l'échelle de temps. La prévision intra-saisonnière est représentée par le "S2S predictions" sur le graphique. Jusqu'à il y a quelques années, il y avait un "fossé" entre les prévisions météorologiques à court et moyen terme (à gauche sur la figure) et la prévision saisonnière (à droite sur la figure). C'est la prévision intra-saisonnière qui permet de combler cet écart entre les deux. On dispose ainsi de prévisions météorologiques en continu pour des échéances allant de quelques heures à une saison. Sur le graphique, la prévision à moyen terme a une performance considérée comme nulle à 10 jours d'échéance alors que la prévision S2S est un cran au-dessus. Attention, ce graphique date de 2017, depuis il y a eu des améliorations notamment avec le projet S2S (VITART & AL., 2017).

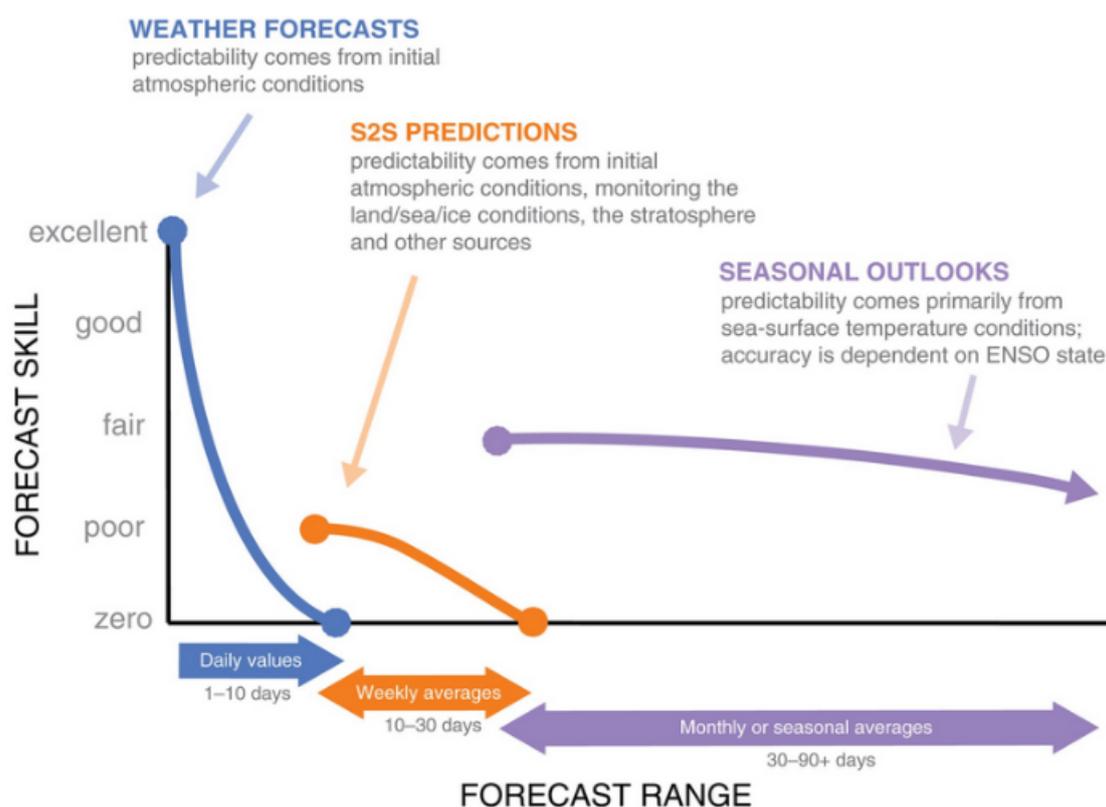


FIGURE 1.4 – Estimation qualitative de la compétence de prévision basée sur la fourchette de prévision. Source : White et al. (2017).

La figure 1.5 détaille les différentes étapes de prise de décisions en fonction de l'échelle de prévisions. La prévision intra-saisonnière se trouve entre la prévision saisonnière qui permet de prendre des décisions stratégiques, c'est-à-dire se tenir prêt et préparer le matériel nécessaire pour la saison à venir, et la prévision météorologique qui permet de prendre des décisions dites "opérationnelles", c'est-à-dire de lancer le départ et de déployer le matériel et le personnel sur la zone impactée. La prévision intra-saisonnière va quant à elle intervenir dans la prise de décisions tactiques. Elle va servir à renforcer la préparation et discuter de la stratégie à mettre en place pour l'intervention.

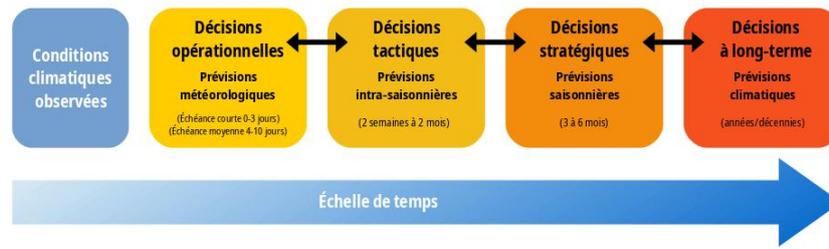


FIGURE 1.5 – *Prise de décision dans le cadre de la gestion des risques de catastrophes dans le continuum des échelles de temps des informations climatiques. Figure adaptée du rapport des Nations-Unies de 2019 (ST/ESCAP/2867).*

1.4 Qu'est-ce que la prévision d'ensemble ?

La qualité des prévisions météorologiques dépend des différentes sources d'erreur associées listées ci-après (e-learning, Ensemble forecasting : sources of uncertainty, ECMWF) :

1. Les conditions initiales : des millions d'observations de l'atmosphère sont réalisées chaque jour mais cela ne suffit pas à connaître l'état de l'atmosphère dans le monde entier et à toutes les altitudes. Pour obtenir une représentation en 3D de l'état de l'atmosphère on effectue un processus d'assimilation de données, qui comporte des incertitudes. De plus, les observations elles-mêmes sont associées à des incertitudes (liées aux instruments notamment).
2. Le modèle de prévision : les équations mathématiques qui définissent l'évolution de l'état de l'atmosphère sont très complexes à résoudre. Pour les résoudre numériquement, elles sont donc simplifiées et discrétisées dans l'espace et dans le temps ce qui engendrent des erreurs.
3. Les conditions aux limites (au sommet et à la surface) : dans les modèles atmosphériques, les interactions avec les autres composantes du système Terre (surface terrestre, océan, glace etc) ne sont pas toutes représentées en détail. Elles sont donc une source d'incertitude supplémentaire.
4. L'atmosphère est chaotique : une erreur minime dans les conditions initiales va s'amplifier au cours de la prévision et peut alors entraîner une erreur importante lorsque l'échéance augmente (théorie de l'effet papillon, LORENZ (1963)).

Toutes ces sources d'incertitude réduisent la fiabilité des prévisions météorologiques dès lors que l'on s'éloigne des observations et en conséquence la prévision s'éloigne de la réalité comme illustré sur la Figure 1.6 dans la partie traitant la "prévision déterministe". Ainsi pour tenir compte et exploiter ces incertitudes on utilise la prévision d'ensemble.

La prévision d'ensemble météorologique est une méthode de prévision numérique du temps avec laquelle on calcule plusieurs états météorologiques futurs. La Figure 1.6 compare de façon schématique le principe général de la prévision déterministe à celui de la prévision d'ensemble. Dans un premier temps, nous partons de l'état initial de référence et on le perturbe légèrement de façon à tenir compte des erreurs sur la connaissance de l'état de l'atmosphère au début de la prévision (on parle de perturbations sur les conditions initiales). On obtient alors des états initiaux (zone orange). Ensuite, on applique le modèle de prévision numérique du temps (qui subit également des perturbations pendant le calcul de la prévision) à chacun de ces états initiaux (flèches noires) pour obtenir non pas un seul état prévu comme pour un modèle déterministe mais plusieurs scénarios futurs (zone bleue). Chacune des simulations réalisées à partir d'un état initial différent porte le nom de "membre". Cet ensemble de prévision permet d'évaluer quel est le scénario le plus probable, quels sont les scénarios extrêmes et également de

fournir une information sur l'incertitude associée à la prévision. Plus les scénarios se ressemblent, plus l'état futur de l'atmosphère est prévisible et meilleure est la confiance. C'est en décembre 1992 que le CEPMMT et le National Meteorological Center ont commencé à produire et à diffuser des prévisions d'ensemble à moyen terme (PALMER & AL., 1993; TRACTON & KALNAY, 1993).

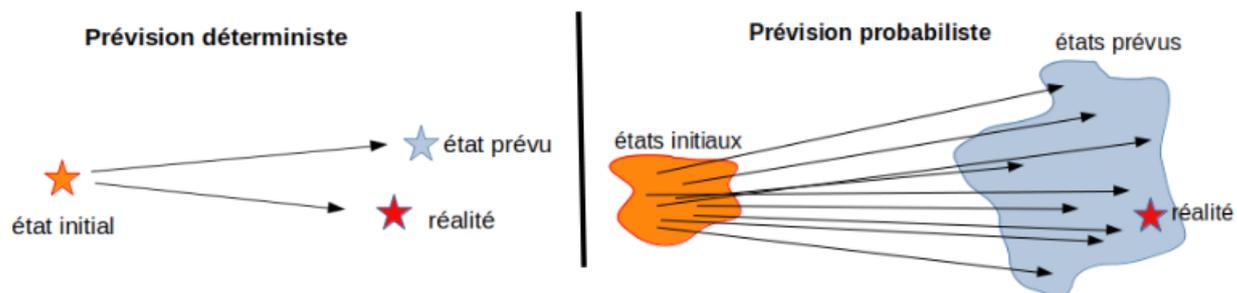


FIGURE 1.6 – *Différence entre une prévision d'ensemble probabiliste et une prévision déterministe.*
Source : *Inspiration d'une figure de N. Girardot*

2 | Données et méthodes

Dans ce chapitre, nous allons détailler les données qui ont été utilisées et revenir sur la création d'un indice de flux de mousson qui a été élaboré afin de déterminer la configuration du bassin. Enfin, on expliquera la méthode de détection automatique de la ZCIT qui a été mise en place dans le cadre de cette étude.

2.1 Données utilisées

Plusieurs études ont été réalisées pour localiser la ZCIT en utilisant les précipitations (GU et al., 2004), des champs dynamiques tels que la vorticité (CHAN & EVANS, 2002) ou la divergence (BERRY & REEDER, 2014). Dans cette étude, la position de la ZCIT est déterminée en utilisant plusieurs paramètres : les vents zonaux (u) et les vents méridionaux (v)    850hPa et à 200hPa ainsi que les précipitations. Comme expliqué en introduction, l'objectif du stage est de pouvoir prévoir la position et l'activité de la ZCIT à l'échelle intra-saisonnière de façon automatique. Pour cela nous utilisons les données de la prévision d'ensemble (EPS) du CEPMMT qui produit des prévisions étendues allant jusqu'à 46 jours deux fois par semaine (le lundi et le jeudi). EPS contient 51 membres (dont un run de contrôle)    une résolution horizontale de 0.4° (soit 36km). Ici, les données manipulées sont des moyennes hebdomadaires interpolées sur une grille de résolution horizontale de 1° ce qui permet de filtrer une partie des phénomènes de petite échelle mais de conserver la ZCIT qui est un phénomène "de grande échelle". Les données qui servent de référence sont les données de la réanalyse ERA5 du CEPMMT (HERSBACH ET AL. et al., 2020) ainsi que les observations des stations météorologiques du Seychelles Meteorological Authority (SMA) partenaire du projet PISSARO. ERA5 permet d'obtenir des données couvrant la période 1979-2022 avec une résolution horizontale de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ et 137 niveaux verticaux. Pour la même raison qu'au dessus la résolution horizontale est dégradée à 1° .

2.2 Indice de flux de mousson

Dans cette étude, nous nous intéressons à la position et à l'activité de la ZCIT sur le nord du bassin sud-ouest de l'océan Indien. Or, pendant l'hiver austral, la ZCIT est localisée dans l'hémisphère nord (cf Section 1.1). Ainsi dans la suite de ce rapport, on s'intéressera uniquement aux mois allant d'octobre à mai. A l'échelle hebdomadaire, l'arrivée de la ZCIT sur le bassin varie d'une année à l'autre. Par conséquent, un indice de flux de mousson a été crée pour savoir si nous sommes dans l'inter-saison, c'est-à-dire dans une configuration de TPE, ou si le bassin est dans une configuration de ZCIT. Cet indice est défini comme étant la moyenne du vent méridional compris entre les latitudes $5^\circ\text{N}/5^\circ\text{S}$ et les longitudes $45^\circ\text{E}/60^\circ\text{E}$ (comme illustré sur la Figure 2.1 par l'encadré noir). Lorsque la valeur du vent méridional moyen est positive cela signifie que le vent est orienté vers le nord et donc que le bassin est dans une configuration de TPE (cf Figure 2.1a). A l'inverse, lorsque la valeur est négative, c'est-à-dire lorsque le vent est dirigé vers le sud, le bassin est dans une configuration de ZCIT (cf Figure 2.1b). Toutefois, le

seuil de la valeur du vent méridional moyen choisi ici est -1m/s car lorsque l'indice de flux de mousson est situé entre 0 et -1m/s , on se situe dans une période de transition et le basculement du vent n'est pas significatif.

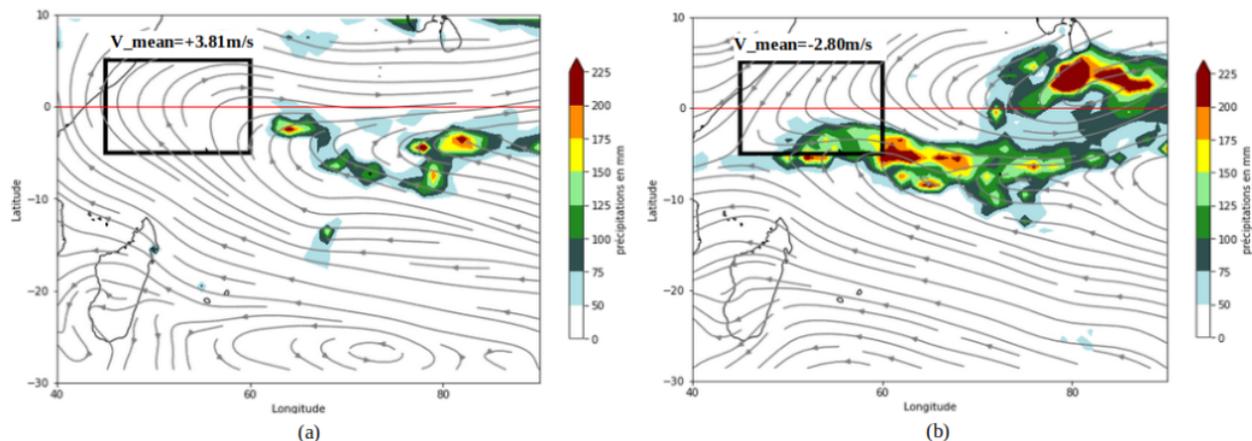


FIGURE 2.1 – Indice de flux de mousson calculé à partir des données ERA5 pour (a) la deuxième semaine d'octobre 2021 et (b) la deuxième semaine de décembre 2021. En couleur il s'agit de l'accumulation de précipitations en mm sur la semaine, en gris le flux moyen, en encadré noir l'indice de flux de mousson et la ligne rouge représente l'équateur.

2.3 Méthode de détection automatique de la ZCIT

Cette partie détaille la méthode de détection automatique de la position de la ZCIT qui a été développée durant le stage. Trouver la méthode la plus adaptée a nécessité plusieurs semaines de recherches. A ma connaissance, à part l'article de BERRY et REEDER (2014) qui utilise le champ de vent moyenné entre 1000hPa et 850hPa, aucune autre étude n'a proposé une méthode de détection automatique de la position de la ZCIT. Par conséquent, cela s'est fait par tâtonnement et au fil des discussions avec mes encadrants. Après plusieurs essais, une méthode a mieux fonctionné que les autres. C'est celle-ci qui va être présentée dans la suite de cette partie. La technique permet de déterminer la localisation de la ZCIT sur le nord du bassin SOOI. Par conséquent, elle est appliquée uniquement quand l'indice de flux de mousson est inférieur à -1m/s (cf Section 2.1). Ici, ce sont les données ERA5 qui sont utilisées pour illustrer la méthode.

2.3.1 Etape n°1 : Définir le champ météorologique

En pratique, la ZCIT est caractérisée par une zone de convection profonde. Les nuages convectifs sont caractérisés par de la convergence en basses couches et de la divergence en altitude. C'est donc tout naturellement que nous regardons dans un premier temps la convergence à 850hPa et la divergence à 200hPa en utilisant le vent zonal (u) et le vent méridional (v). A titre d'illustration, la Figure 2.2a montre le champ de convergence à 850hPa et la Figure 2.2b le champ de divergence à 200hPa pour la deuxième semaine du mois de décembre 2021. Le module windspharm dans python a une fonction qui se nomme `divergence()` qui permet d'obtenir à la fois la divergence (valeurs positives) et la convergence (valeurs négatives). Ainsi, pour obtenir le champ de convergence à 850hPa, nous appliquons la fonction `divergence()` au champ de vent à 850hPa. La convergence correspond aux valeurs négatives de ce champ, ainsi nous mettons égal à 0 toutes les valeurs positives, c'est-à-dire celles correspondant à de la divergence et nous prenons la valeur absolue des valeurs négatives pour avoir une échelle de convergence

positive. De plus, pour le champ de convergence à 850hPa, un masque terre-mer est appliqué car la convergence sur les continents est trop importante et très bruitée. Seule la convergence présente sur l'océan est gardée ici. Pour le champ de divergence à 200hPa (cf Figure 2.2b), il suffit uniquement de mettre égal à 0 toutes les valeurs négatives pour supprimer toutes les convergences. Les Figures 2.2a et 2.2b sont marquées par un ensemble de petites zones de convergence/divergence qui sont principalement associées à des phénomènes de petite échelle (tels que des orages, des fronts, etc). Dans le cadre de l'étude, on s'intéresse uniquement à la ZCIT qui est considérée comme un phénomène de grande échelle. Afin de supprimer toutes ces petites zones de convergence/divergence, les deux champs sont multipliés entre eux ce qui permet d'obtenir le champ météorologique illustré par la Figure 2.2c. La plupart des phénomènes de petite échelle ont disparu. C'est ce champ qui sera utilisé pour les prochaines étapes de la méthode.

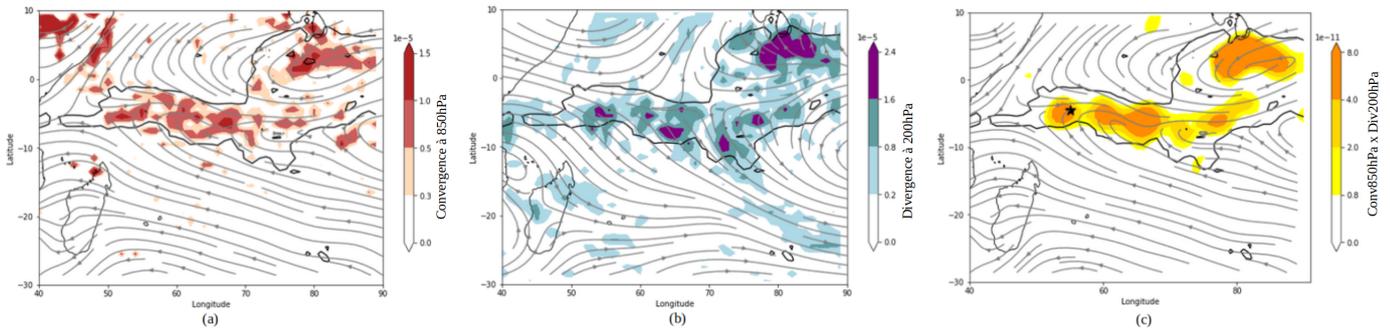


FIGURE 2.2 – (a) Champ de convergence à 850hPa, (b) champ de divergence à 200hPa et (c) champ $Conv850 \times Div200$ hPa. Les précipitations supérieures à 50mm sont représentées en contour noir et les lignes de flux sont représentées par les lignes grises.

2.3.2 Etape n°2 : Calcul du maximum du champ

La seconde étape consiste à chercher le maximum du champ $Conv850 \times Div200$ (cf Section 2.3.1) pour chaque longitude comprise entre 40°E et 90°E. Pour cela, on utilise une formule qui provient de l'article de ADAM et AL. (2016a) :

$$\phi_{max} = \frac{\int_{\phi_1}^{\phi_2} \phi [\cos(\phi)P]^{10} d\phi}{\int_{\phi_1}^{\phi_2} [\cos(\phi)P]^{10} d\phi} \quad [1]$$

Avec :

- P le champ d'entrée
- ϕ_1 et ϕ_2 les latitudes entre lesquelles on recherche le maximum de la position du champ d'entrée

Cette formule permet d'obtenir la latitude où le champ d'entrée est maximale. Ici, l'utilisation de la formule est adaptée pour notre étude. Le champ d'entrée pris en compte correspond au champ $Conv850 \times Div200$ entre les latitudes $\phi_1=23^\circ\text{S}$ et $\phi_2=0^\circ$. Si pour une longitude donnée, le champ $Conv850 \times Div200$ vaut 0 pour chaque latitude entre 0° et 23°S alors le champ d'entrée pris pour cette longitude est le champ de précipitations. En appliquant la formule [1] pour chaque longitude, on obtient la courbe bleue sur les Figures 2.3. Même si le champ $Conv850 \times Div200$ permet de supprimer une grande partie des phénomènes de petite échelle, certains subsistent (ceux liés aux cyclones par exemple). Par conséquent la courbe bleue est bruitée et elle varie d'un point à l'autre. En effet, en regardant la Figure 2.3b, entre les longitudes 65°E et 70°E, le maximum du champ est localisé vers 23°S bien que la zone qu'il

détecte à 23°S ne corresponde pas à la ZCIT mais à un autre phénomène qui a lieu dans le bassin. En réalité la ZCIT semble plutôt localisée aux alentours de 10°S. Les trois prochaines étapes de la méthode consistent à lisser la courbe bleue.

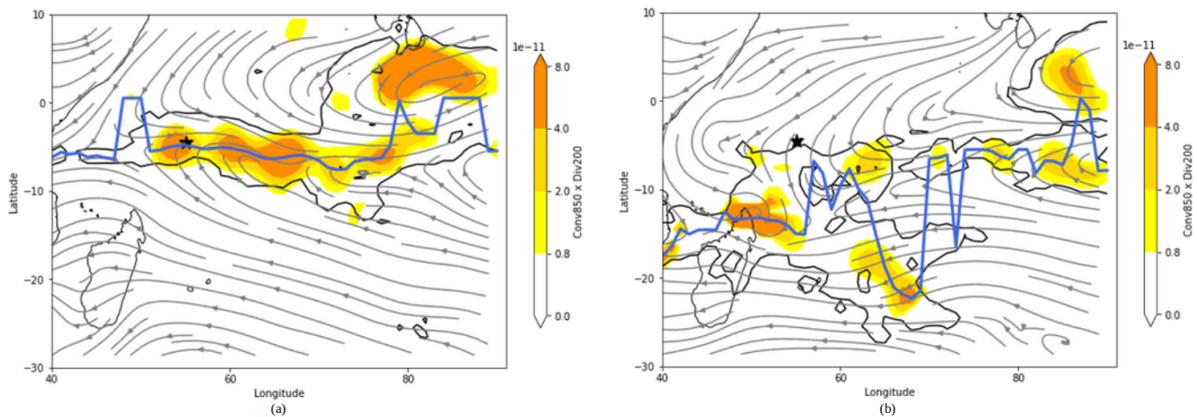


FIGURE 2.3 – Deux exemples d'application de la formule sur le champ $Conv850 \times Div200$ (en couleur) pour la deuxième semaine du 12/2021 (a) et la deuxième semaine du 03/2022 (b). Les précipitations à 50mm sont représentées en contour noir, le flux correspond aux lignes grises, la ligne bleue représente le maximum du champ $Conv850 \times Div200$ et l'étoile noire localise les Seychelles.

2.3.3 Etape n°3 : Chercher l'intervalle de latitude le plus fréquent

Cette étape consiste à chercher la plage de latitude la plus fréquente parmi les maxima qui forment la ligne bleue. Pour cela, des intervalles de 5° de latitude entre les latitudes 0° et 20°S et un de 3° entre 20°S et 23°S sont créés. Ensuite, chaque point de la ligne bleue est mis dans l'intervalle auquel il appartient puis l'algorithme regarde dans quel intervalle se situe le plus grand nombre de points. La Figure 2.4 reprend l'exemple de la Figure 2.3b. La majorité des points est située dans l'intervalle 5°S et 10°S.

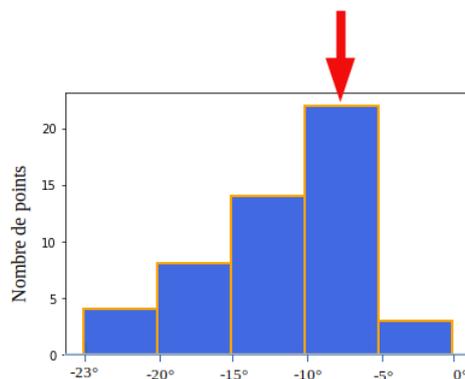


FIGURE 2.4 – Histogramme représentant le nombre de points dans chaque intervalle de latitude compris entre 0° et 23°S (exemple avec la deuxième semaine du 03/2022).

2.3.4 Etape n°4 : Trouver les "points de confiance"

Grâce à l'information donnée par l'étape n°3, on va pouvoir déterminer "un point de confiance" qui va servir de premier point pour construire la ZCIT de proche en proche. La quatrième étape consiste ainsi à trouver le premier point de la ligne bleue, calculée lors l'étape n°2 (cf Section 2.3.2), qui fait partie de l'intervalle de latitude le plus représenté trouvé dans l'étape n°3. Cette étape est réalisée deux fois : en partant de l'ouest du bassin puis en partant

de l'est du bassin. Cela permet d'obtenir en réalité deux points de confiance et d'avoir ainsi deux diagnostics. Toujours en prenant l'exemple de la deuxième semaine du mois de mars 2022, les deux points de confiance sont marqués par le point rouge sur la Figure 2.5.

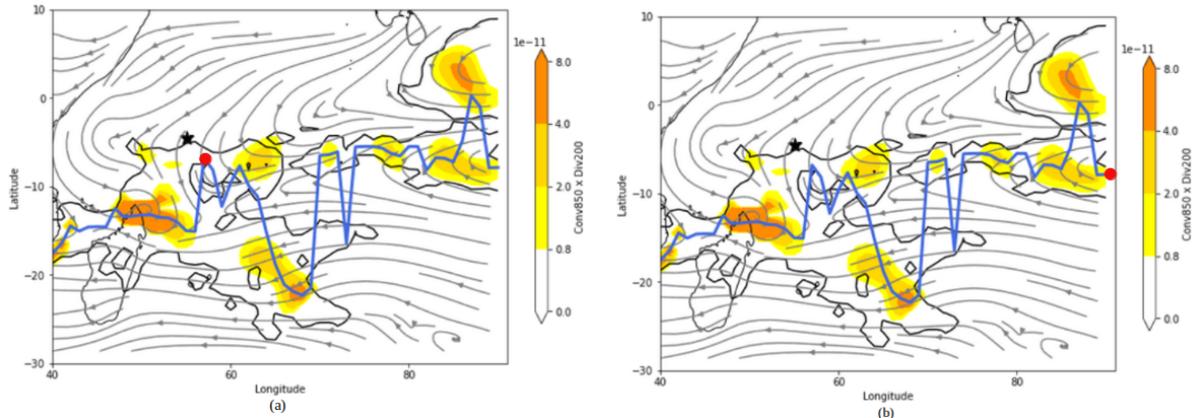


FIGURE 2.5 – Détermination du "point de confiance" (en rouge) en partant de l'ouest du bassin (a) et en partant de l'est du bassin (b). Les précipitations à 50mm sont représentées en contour noir, le flux correspond aux lignes grises, la ligne bleue représente le maximum du champ $Conv850 \times Div200$ et l'étoile noire localise les Seychelles.

2.3.5 Etape n° 5 : Calcul du maximum du champ dans un intervalle réduit

A partir de ce point de confiance (n), la position du point suivant (n+1) est calculée en se servant de la formule [1] mais cette fois en l'utilisant entre les latitudes $\phi_1 = \phi_n - 2^\circ$ et $\phi_2 = \phi_n + 2^\circ$ avec ϕ_n la latitude du point de confiance. Le champ en entrée reste le champ $Conv850 \times Div200$ sauf si le champ est nul sur une longitude, dans ce cas là le champ d'entrée est le champ de précipitation. Une fois la position du point (n+1) déterminée, la position du point (n+2) est calculée à partir de la latitude du point (n+1) et ainsi de suite. Cette méthode est appliquée de part et d'autre du point de confiance. Cela permet d'obtenir un nouveau diagnostic, moins bruité et plus lisse que le diagnostic de l'étape n°2 (cf Figure 2.6). Ces deux nouveaux diagnostics correspondent à la courbe violette de la Figure 2.6a et à la courbe verte de la Figure 2.6b.

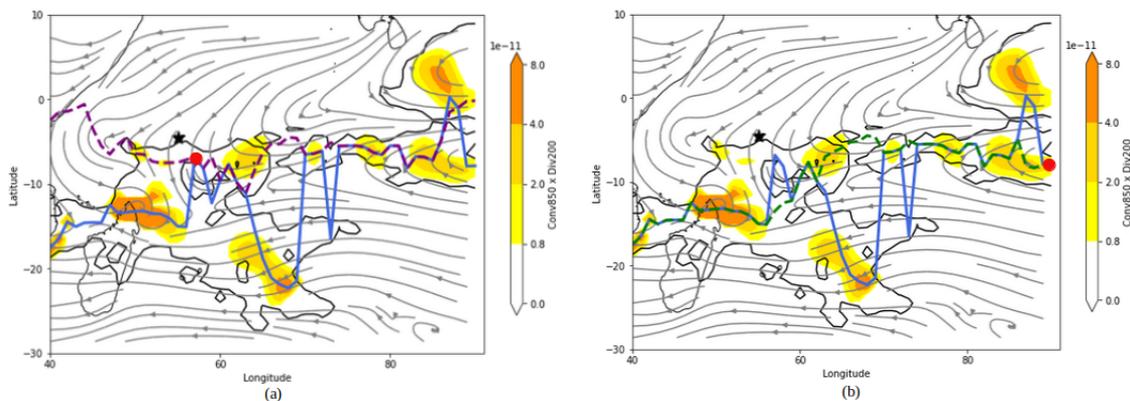


FIGURE 2.6 – Nouveaux diagnostics en partant (a) de l'ouest du bassin (ligne violette) et en partant (b) de l'est du bassin (ligne verte). Les précipitations à 50mm sont représentées en contour noir, les lignes de flux sont tracées en gris, la ligne bleue représente le maximum du champ $Conv850 \times Div200$ et l'étoile noire localise les Seychelles.

2.3.6 Etape n°6 : Choisir le meilleur diagnostic à l'aide des précipitations

En regardant la Figure 2.6a, on observe que la ligne violette, correspondant au diagnostic automatique de la ZCIT, s'écarte de la véritable position de la ZCIT entre les longitudes 40°E et 60°E. C'est une limite de la méthode mise en place. En effet, lorsque le diagnostic prend le mauvais chemin il est alors compliqué de retrouver la bonne position de la ZCIT. En revanche, quand on regarde le diagnostic de la Figure 2.6a, on remarque qu'il est juste. La dernière étape de cette méthode consiste à garder uniquement le meilleur diagnostic. Pour cela, l'algorithme se base sur un critère thermodynamique : le paramètre de précipitation. Le diagnostic présentant le plus grand nombre de points en accord avec le champ de précipitations sera alors choisi. Seules les précipitations supérieures à 50mm sont retenues. En appliquant cette dernière étape à notre exemple, le diagnostic en vert est conservé (cf graphe de droite sur la Figure 2.7). La méthode de détection automatique de la ZCIT fonctionne bien pour cet exemple. La fiabilité du diagnostic reste à évaluer, c'est ce qui a été fait dans le chapitre 4.

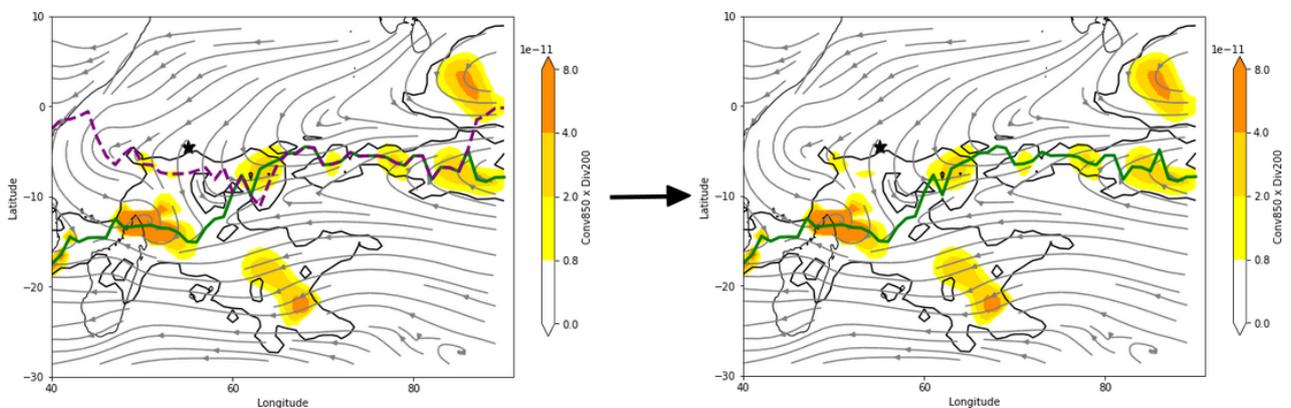


FIGURE 2.7 – Résultat de l'étape n°5 (à gauche) avec les deux diagnostics de ZCIT (ligne verte et violette) et diagnostic final (ligne verte) de ZCIT (à droite)(exemple de la deuxième semaine du mois de mars 2022). Les précipitations à 50mm sont représentées en contour noir, le flux correspond aux lignes grises, la ligne bleue représente le maximum du champ $Conv850 \times Div200$ et l'étoile noire localise les Seychelles.

3 | Climatologie

Ce chapitre est consacré à la climatologie. Il a pour but de présenter la climatologie du basculement de flux de mousson ainsi que de la localisation de la ZCIT dans le nord du bassin SOOI à l'échelle mensuelle. La climatologie est réalisée à partir des données ERA5 (HERSBACH ET AL. et al., 2020) sur la période 1979-2021.

3.1 Climatologie de l'indice de flux de mousson sur la période 1979-2021

Le changement de signe de l'indice de flux de mousson est un indicateur de l'arrivée de la ZCIT dans le bassin. En effet, le basculement du flux de mousson s'accompagne d'un flux de nord-est induisant une zone de convergence avec le flux d'alizé de sud-est. La Figure 3.1 montre l'évolution de l'indice de flux de mousson entre 2019 et 2022. On remarque une variation interannuelle du basculement du flux de mousson. La courbe noire représente la moyenne de l'indice de flux de mousson sur la période 1979-2021 et la ligne bleue représente l'indice de flux de mousson pour chaque semaine de 2019 à 2022. En moyenne, le flux de nord-est arrive dans le bassin à la mi-novembre. On observe que, pour les années 2019 et 2020, le basculement du flux de mousson s'est déroulé respectivement la quatrième semaine du mois de novembre et la deuxième semaine du mois de novembre. En revanche, pour 2021, le basculement s'est produit plus tard que la normale puisqu'il a eu lieu pendant la deuxième semaine du mois de décembre. La Figure 3.1 montre également que la migration de la ZCIT vers l'hémisphère nord se produit en moyenne fin mars. Pour les trois dernières années, elle s'est produite entre fin mars et début avril.

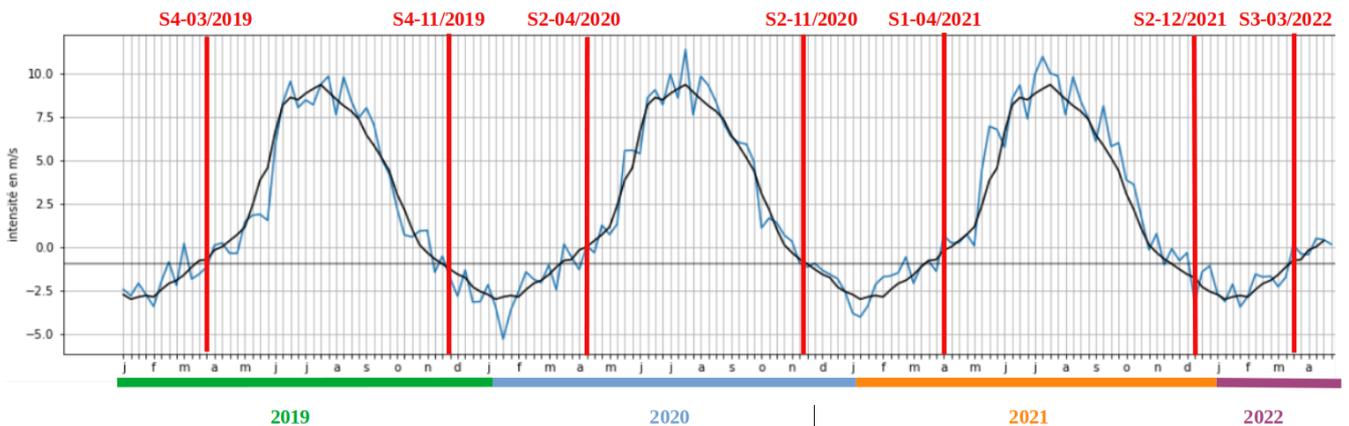


FIGURE 3.1 – Représentation de l'indice de flux de mousson pour chaque semaine de janvier 2019 à avril 2022 (en bleu) et de la moyenne de l'indice de flux de mousson sur la période 1979-2021 (en noir).

3.2 Climatologie mensuelle de la position de la ZCIT sur la période 1979-2021

Une climatologie mensuelle de la position de la ZCIT sur 42 ans a été effectuée à partir de la méthode automatique développée dans la Section 2.3. La Figure 3.2 représente cette climatologie pour les mois d'octobre à mai. La climatologie montre la variation méridionale de la ZCIT dans le bassin avec la saison. La ligne continue noire représente la position de la ZCIT et les lignes en pointillées noires l'écart type. Elle arrive dans le bassin au mois de novembre (cf Figure 3.2b). Ensuite, elle s'établit au sud des Seychelles pendant le mois de décembre (cf Figure 3.2c) et reste installée dans l'hémisphère sud, proche de la latitude 10°S, jusqu'au mois de mars (cf Figure 3.2f). Elle finit par remonter vers le nord courant avril (cf Figure 3.2g) avant de disparaître dans l'hémisphère nord à partir du mois de mai (cf Figure 3.2h). En ce qui concerne l'activité de la ZCIT, elle s'intensifie doucement jusqu'à atteindre son pic d'activité pendant le mois de janvier (cf Figure 3.2d) avec un cumul moyen de précipitations de 320 mm. Ces résultats sont en accord avec la littérature (BERRY & REEDER, 2014; KESHTGAR & AL., 2020; WALISER & GAUTIER, 1993).

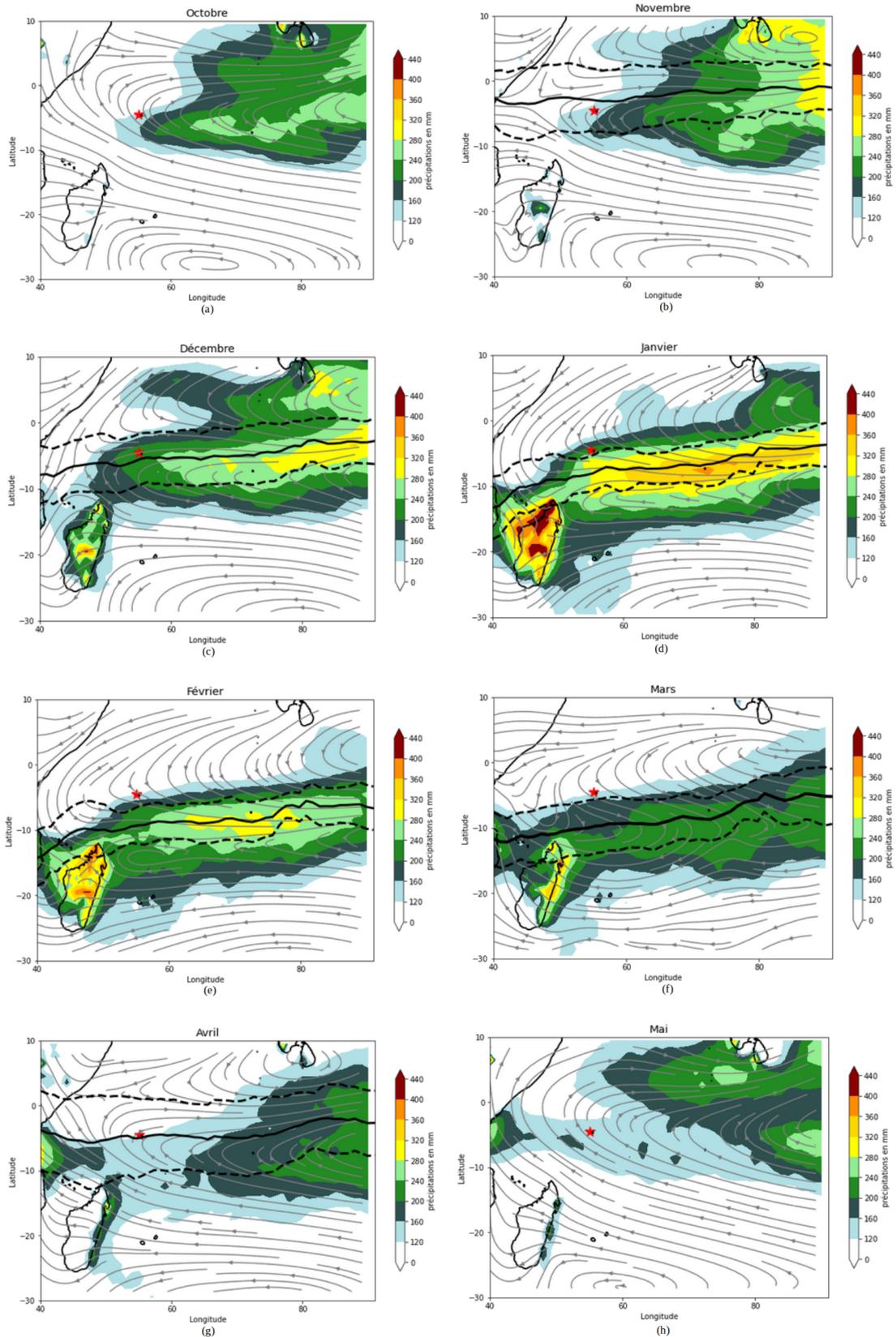


FIGURE 3.2 – Climatologie mensuelle de la position de la ZCIT sur le nord du bassin sud-ouest de l'océan Indien allant du mois d'octobre (a) au mois de mai (h). La position moyenne de la ZCIT correspond à la ligne continue noire et l'écart type aux lignes en pointillées noires. Les précipitations accumulées sur un mois sont représentées en couleurs (en mm) et les Seychelles sont indiquées par l'étoile en rouge.

4 | Application à la prévision d'ensemble

Dans cette partie, on applique la méthode de détection automatique à la prévision d'ensemble étendue du CEPMMT. A partir de ces données, un produit de probabilité a été développé pour prévoir la localisation et l'intensité de la ZCIT à l'échelle mensuelle. Ici, on reviendra sur la prévisibilité du démarrage de la saison des pluies en 2021 sur les Seychelles. Les résultats seront ensuite comparés avec les ré-analyses ERA5, servant de référence, et les observations des précipitations sur les Seychelles. Enfin, un score permettant de faire une première évaluation des incertitudes sur le produit sera présenté.

4.1 Rejeu de situation : l'arrivée de la ZCIT 2021

Dans cette section, un outil a été développé pour permettre aux prévisionnistes et aux utilisateurs de localiser la ZCIT et d'estimer son intensité à l'échelle intra-saisonnière. Afin d'évaluer le produit, on fait ce que l'on appelle un "rejeu de situation" du passage de la ZCIT sur les Seychelles pour l'année 2021, c'est-à-dire que l'on récupère les simulations (appelées communément run) du modèle de prévision tels qu'ils étaient disponibles à cette période. Pour réaliser ce rejeu, nous allons comparer la prévision du basculement du flux de mousson, observé la deuxième semaine du mois de décembre (cf Section 3.1). Nous pourrions ainsi dire si le produit a prévu ce basculement sur la bonne période et, si oui, à partir de quelle échéance il l'a anticipé. Le CEPMMT fait tourner son modèle de prévision d'ensemble à échéances étendues (jusqu'à 46 jours de prévision) et fournit les données qui permettent de fabriquer le produit de probabilité observé sur la Figure 4.1. La semaine **S1** correspond à la semaine en cours, la semaine **S2** correspond à la prévision de la semaine suivante et ainsi de suite jusqu'à l'échéance +4 semaines (correspondant à la semaine **S5**). La plage de couleur représente la densité de probabilité de la position de la ZCIT sur le bassin. Plus la densité est élevée, plus les membres sont en accord sur la position de la ZCIT et donc meilleure est la confiance. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres qui réalisent un diagnostic de ZCIT. Le nombre ne peut pas dépasser 50 puisque l'EPS comporte 50 membres + 1 run de contrôle. La médiane des membres (en bordeaux) s'affiche lorsqu'au moins 35 membres diagnostiquent une ZCIT. Enfin, afin d'estimer l'activité de la ZCIT, on ajoute le champ de précipitations représenté par les contours en pointillés noirs (resp. continus bleus) pour le cumul de précipitation de 50mm (resp. 100mm).

Maintenant, mettons nous dans la peau d'un prévisionniste ou d'un autre type d'utilisateur (un acteur de la gestion de ressources en eau par exemple)! Nous sommes le lundi 18 octobre 2021 et les graphiques de la Figure 4.1 sortent. Pour rappel, en moyenne la ZCIT arrive dans le bassin à la mi-novembre (cf Section 3.1). Sur ces figures, la densité de probabilité des diagnostics de position de la ZCIT (dans la suite on parlera de panache) est très dispersée pour les semaines de prévision à venir en raison du peu de nombres de membres (inférieur à 22) qui réalisent un diagnostic de ZCIT. De plus, l'activité pluvieuse est assez faible et n'atteint pas encore les Seychelles (sauf pour la dernière semaine **S5** de prévision). Le bassin semble donc rester dans une configuration de TPE pour les semaines à venir. Les runs du 25 octobre 2021 (cf Figure A.1)

et du 1^{er} novembre 2021 (cf Figure A.2), qui sont affichés dans l'annexe A, confirment ce retard de ZCIT. En revanche, un premier signal un peu plus dense apparaît à partir de la semaine du 22 au 28 novembre 2021, avec un nombre de membres (37) plus important et avec des précipitations associées supérieures ou égales à 50 mm.

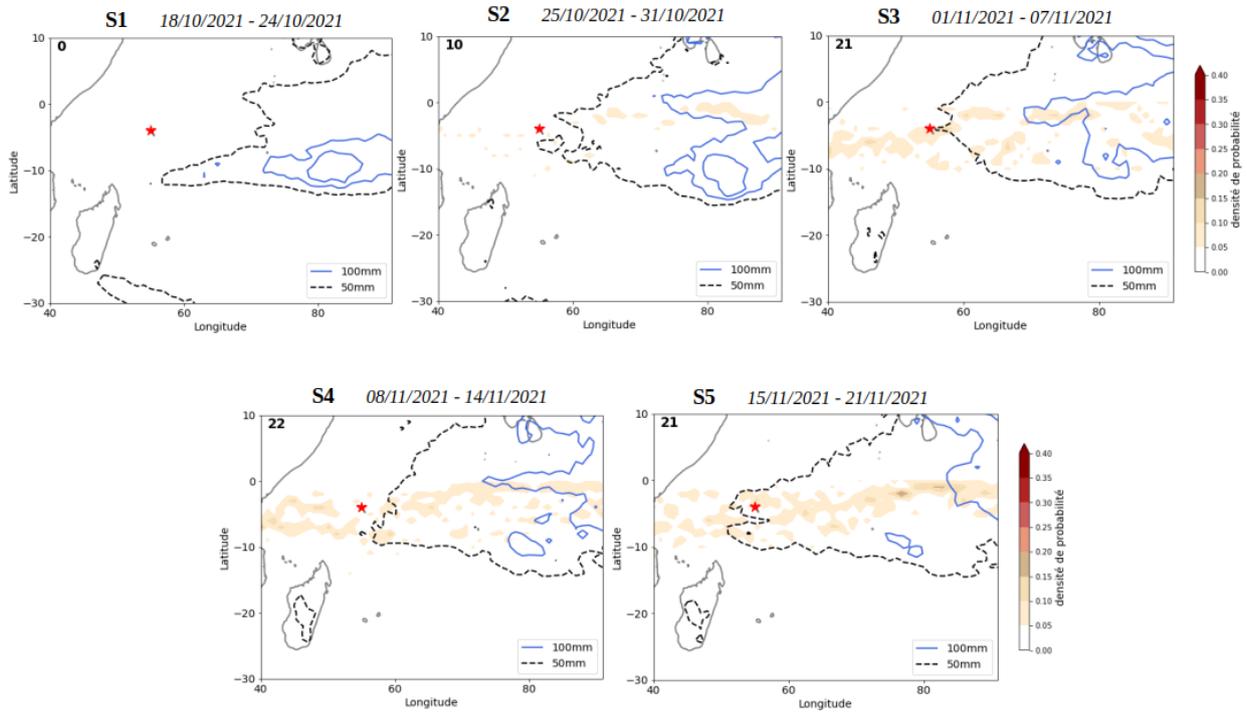


FIGURE 4.1 – Prévisions hebdomadaires de la position de la ZCIT dans le bassin à partir de la prévision d'ensemble du CEPMMT (run du 18/10/2021). La plage de couleurs représente la densité de probabilité des diagnostics. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres établissant un diagnostic de ZCIT. Les précipitations prévues par le CEPMMT à 50 mm et 100 mm sont représentées respectivement par les contours en pointillés noirs et en bleu. L'étoile rouge représente les îles principales des Seychelles.

Maintenant, on s'intéresse à la prévisibilité de la deuxième semaine du mois de décembre 2021. Avec le run du 8 novembre 2021 (cf Figure 4.2), la semaine du 22 au 28 novembre 2021 présente un panache étendu, avec toujours de faibles précipitations associées n'excédant pas les 100 mm. Pour les deux semaines suivantes **S4** et **S5**, quasiment la totalité des membres, au nombre de 45 et 43, font un diagnostic de ZCIT. Une densité plus importante se dessine autour des Seychelles. La semaine du 6 au 12 décembre 2021, correspondant à la semaine **S5**, présente une ZCIT avec plus d'activité que la semaine précédente. Il semble tout de même préférable d'attendre les runs suivants car à l'échéance **S+4**, l'incertitude est encore grande.

Le run suivant (cf Figure 4.3) informe le prévisionniste que la saison des pluies ne débutera pas la semaine du 22 novembre au 29 novembre 2021 puisque la ZCIT n'est plus active. Pour la semaine qui nous importe, ici elle correspond à la semaine **S4**, le signal est beaucoup plus faible qu'avec le run précédent. Les membres sont plus éparpillés et moins nombreux et l'intensité des précipitations s'est affaiblie. En se fiant au modèle, le début de la saison des pluies sur les Seychelles semblerait démarrer la semaine du 13 au 20 décembre 2021.

Une semaine plus tard, l'échéance se rapproche (cf Figure 4.4), la semaine du 6 au 12 décembre 2021 correspond à la semaine **S3**. On a de nouveau un bon signal avec 42 membres qui réalisent un diagnostic de position de ZCIT. Une ligne de densité plus forte se profile et on remarque la présence d'une petite zone de précipitations de 100 mm. En se penchant sur la semaine S2, les Seychelles devraient être concernées par quelques précipitations mais la

position de la ZCIT semble localisée légèrement au nord. Cette information va venir apporter une confiance supplémentaire sur le fait que la ZCIT est susceptible de passer la semaine **S3**.

On arrive à une semaine d'échéance. Le run du 29 novembre 2021 (cf Figure 4.5) va venir confirmer l'arrivée de la ZCIT pour la deuxième semaine du mois décembre. Le panache présente un bon accord entre les différents diagnostics et elle semble particulièrement active avec cette zone de précipitations à 100 mm qui s'est élargie contrairement au run précédent. Cette confiance va être d'autant plus appuyée car, en regardant la semaine en cours **S1**, la ZCIT est localisée juste au nord des Seychelles, annonçant l'arrivée de la ZCIT dans les prochains jours.

Enfin, les résultats du dernier run (celui du 6 décembre 2021) sont représentés sur la Figure 4.6. La semaine du 6 décembre 2021 est la semaine en cours, les prévisions sont toujours en accord avec les deux runs précédents sur la localisation de ZCIT. Les pluies se sont encore intensifiées avec des cumuls montant jusqu'à 175 mm. Le démarrage de la saison des pluies pour les Seychelles s'annonce être pour cette semaine là. Il est intéressant de noter pour les deux semaines suivantes **S2** et **S3**, que les prévisions montrent une ZCIT qui devrait s'affaiblir (précipitations inférieure à 100mm) avant de se réintensifier fin décembre 2021/début janvier 2022 (semaine **S4**).

Le prévisionniste ou l'utilisateur aurait vu une ZCIT à partir du run du 22 novembre 2021 pour la semaine du 6 au 12 décembre 2021 (à deux semaines d'échéances). Avec le run suivant, donc à une semaine d'échéance, la même information est retrouvée avec une intensité plus importante ce qui permet d'augmenter la confiance du prévisionniste sur le passage de la ZCIT prévu pour la deuxième semaine du mois décembre 2021. De plus, le retard par rapport à la normale était vu avec plus d'un mois d'avance. Nous allons maintenant comparer les résultats de la prévision d'ensemble avec les données ERA5 et les observations des Seychelles, c'est l'objectif dans la partie 4.2.

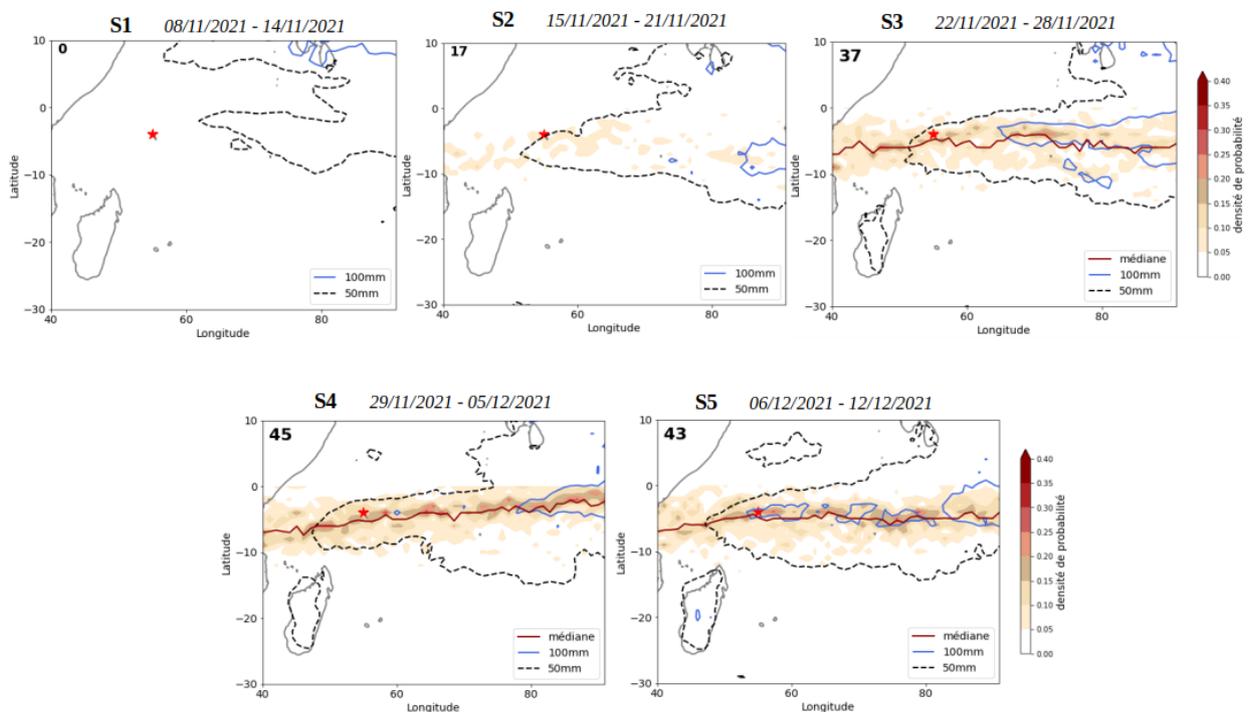


FIGURE 4.2 – Prédiction hebdomadaire de la position de la ZCIT dans le bassin à partir de la prévision d'ensemble du CEPMMT (run du 08/11/2021). Le plage de couleurs représente la densité de probabilité des diagnostics. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres établissant un diagnostic de ZCIT. Les précipitations prévues par le CEPMMT à 50 mm et 100 mm sont représentées respectivement par les contours en pointillés noirs et en bleu. L'étoile rouge représente les îles principales des Seychelles.

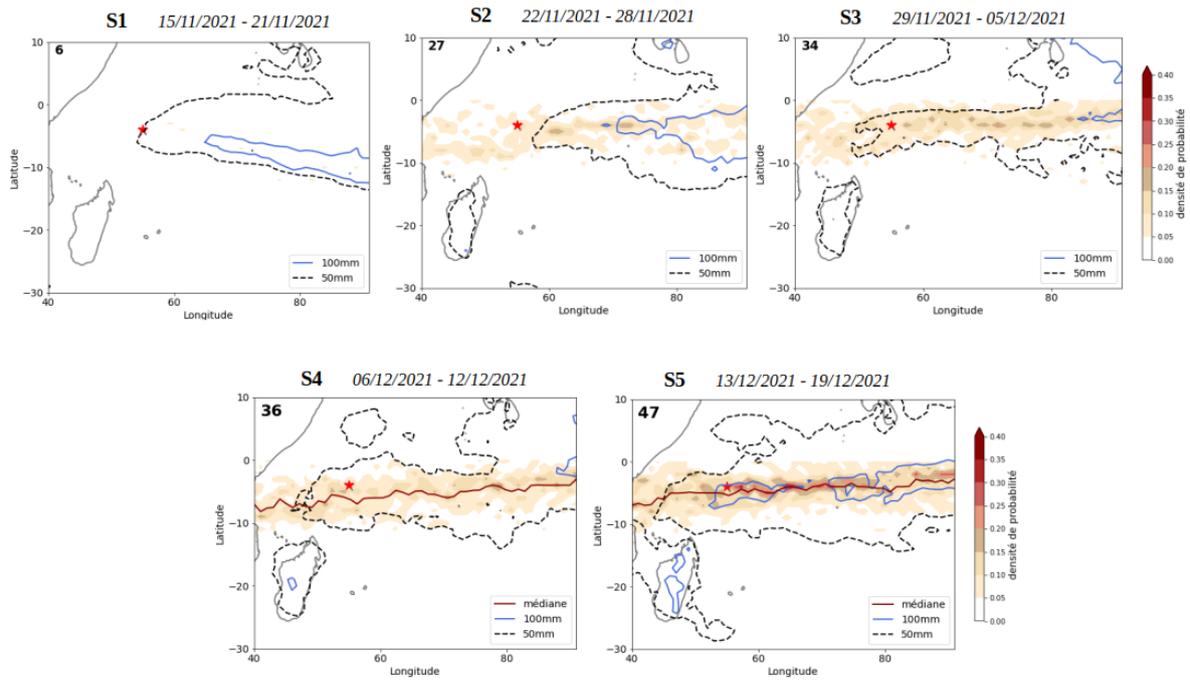


FIGURE 4.3 – *Prévision hebdomadaire de la position de la ZCIT dans le bassin à partir de la prévision d'ensemble du CEPMMT (run du 15/11/2021). La plage de couleurs représente la densité de probabilité des diagnostics. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres établissant un diagnostic de ZCIT. Les précipitations prévues par le CEPMMT à 50 mm et 100 mm sont représentées respectivement par les contours en pointillés noirs et en bleu. L'étoile rouge représente les îles principales des Seychelles.*

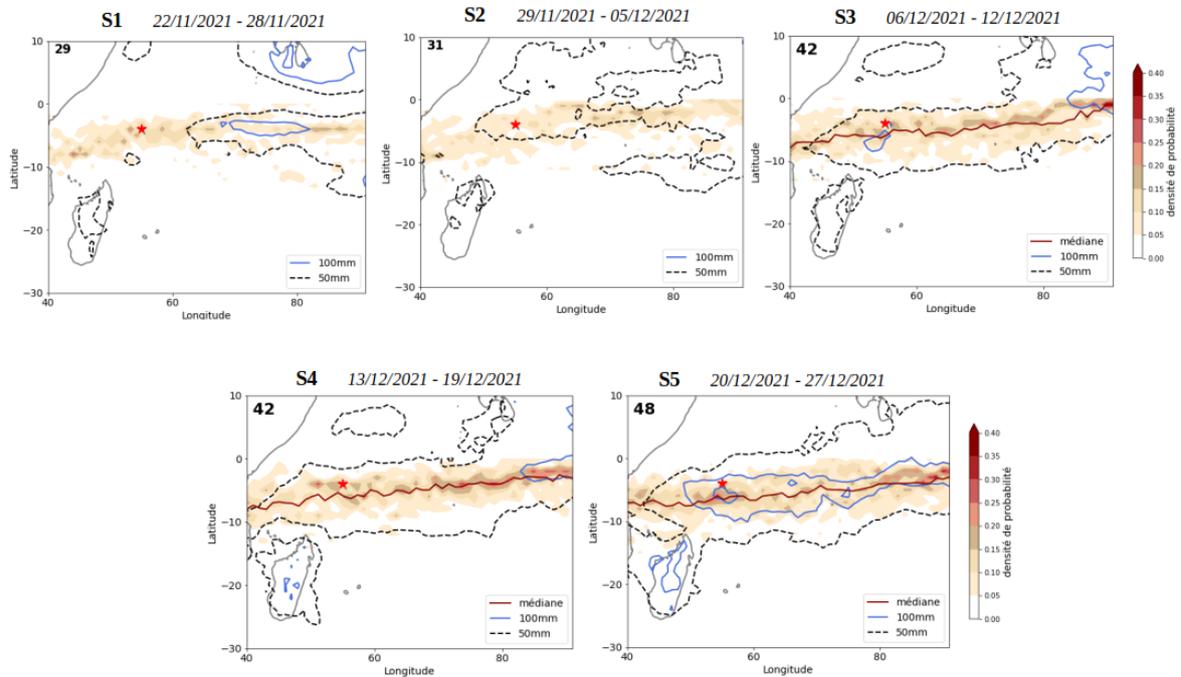


FIGURE 4.4 – *Prévision hebdomadaire de la position de la ZCIT dans le bassin à partir de la prévision d'ensemble du CEPMMT (run du 22/11/2021). La plage de couleurs représente la densité de probabilité des diagnostics. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres établissant un diagnostic de ZCIT. Les précipitations prévues par le CEPMMT à 50 mm et 100 mm sont représentées respectivement par les contours en pointillés noirs et en bleu. L'étoile rouge représente les îles principales des Seychelles.*

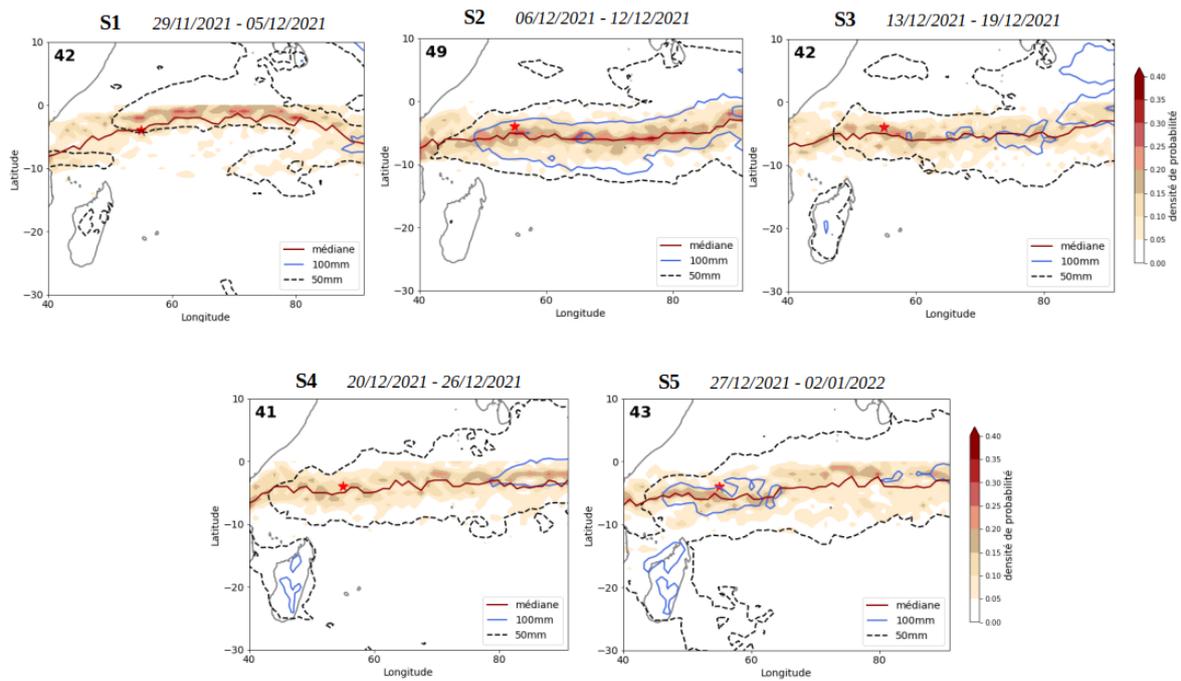


FIGURE 4.5 – Prévision hebdomadaire de la position de la ZCIT dans le bassin à partir de la prévision d'ensemble du CEPMMT (run du 29/11/2021). La plage de couleurs représente la densité de probabilité des diagnostics. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres établissant un diagnostic de ZCIT. Les précipitations prévues par le CEPMMT à 50 mm et 100 mm sont représentées respectivement par les contours en pointillés noirs et en bleu. L'étoile rouge représente les îles principales des Seychelles.

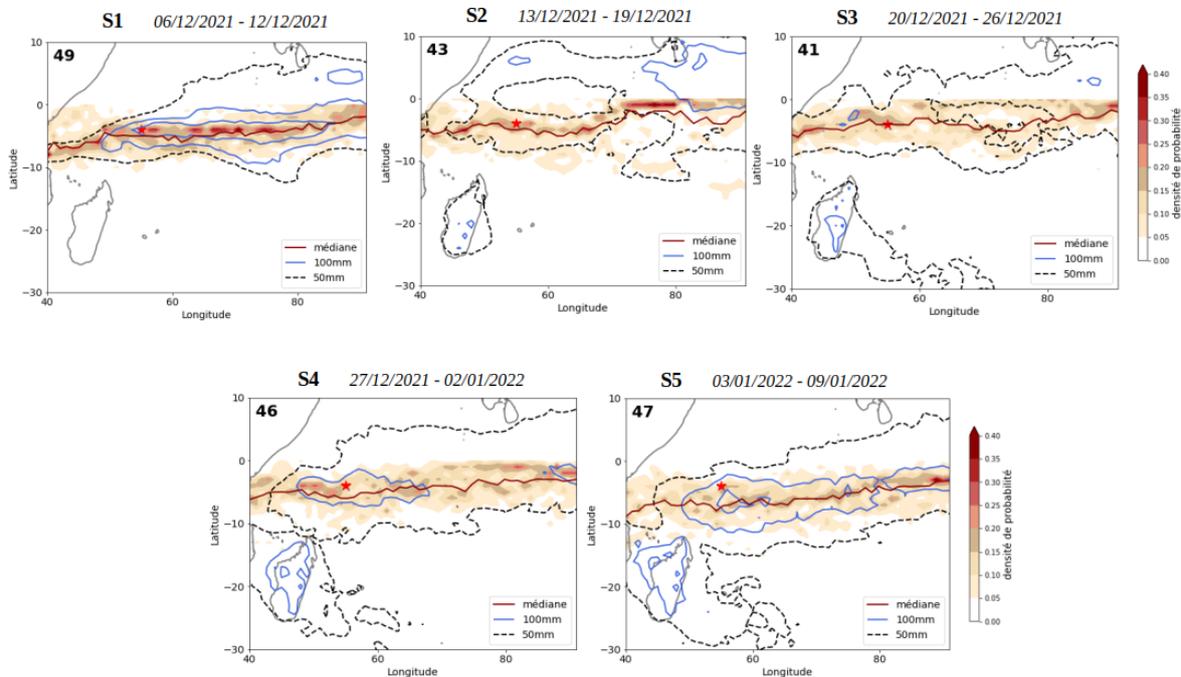


FIGURE 4.6 – Prévision hebdomadaire de la position de la ZCIT dans le bassin à partir de la prévision d'ensemble du CEPMMT (run du 06/12/2021). La plage de couleurs représente la densité de probabilité des diagnostics. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres établissant un diagnostic de ZCIT. Les précipitations prévues par le CEPMMT à 50 mm et 100 mm sont représentées respectivement par les contours en pointillés noirs et en bleu. L'étoile rouge représente les îles principales des Seychelles.

4.2 Vérification avec les données ERA5 et les stations météorologiques des Seychelles

On choisit ERA5 comme référence, c'est-à-dire qu'on considère qu'il représente la "réalité". Les réanalyses offrent une meilleure couverture spatiale et temporelle et plus régulière que les observations qui sont plus ponctuelles. Pour obtenir cet état de l'atmosphère en tout point, les informations issues d'un modèle de prévision et des observations sont combinées par les techniques d'assimilation de données. L'assimilation de données combine donc également les erreurs des modèles et celles des observations. A noter toutefois que même si les réanalyses se rapprochent le plus possible de la réalité, elles ne sont pas parfaites. Grâce au partenariat entre le LACy et le SMA dans le cadre du projet PISSARO, cette étude a bénéficié des observations des stations météorologiques des Seychelles. Ces observations vont permettre d'évaluer la réanalyse ERA5 sur ce rejeu de situation de 2021. La Figure 4.7 représente l'accumulation des précipitations sur 7 jours avec ERA5 (à gauche) et avec les données pluviométriques des Seychelles (à droite). Le retard du passage de la ZCIT prévu par le modèle EPS est confirmé par les réanalyses ERA5 et les observations des Seychelles. En effet les Figures 4.7a et 4.7b montrent l'absence de précipitations sur l'archipel pour ces deux semaines là. La ZCIT est bien passée au-dessus des Seychelles la semaine du 6 au 13 décembre 2021. Le pic d'intensité est bien observé par ERA5 et les observations (cf Figure 4.7c). Le timing et l'intensité de la ZCIT ont été bien prévus par la prévision d'ensemble du CEPMMT à deux semaines d'échéances (cf Partie 4.1). Enfin, un autre phénomène bien prévu par les deux derniers runs de la prévision d'ensemble (cf Figures 4.5 et 4.6) était l'affaiblissement de la ZCIT la semaine du 13 décembre au 20 décembre 2021. En effet, là encore ERA5 ainsi que les observations montrent une remontée de la ZCIT au nord des Seychelles et une diminution des précipitations.

Ce cas de rejeu a permis de faire une première évaluation du produit proposé dans cete étude. L'arrivée de la ZCIT dans le bassin a été bien prévue par la prévision d'ensemble étendue du CEPMMT, avec une anticipation à deux semaines. La réanalyse ERA5 et les observations ont validé cette prévision. Le démarrage de la saison des pluies associées à la ZCIT sur les Seychelles a bien eu lieu la semaine du 6 au 13 décembre 2021.

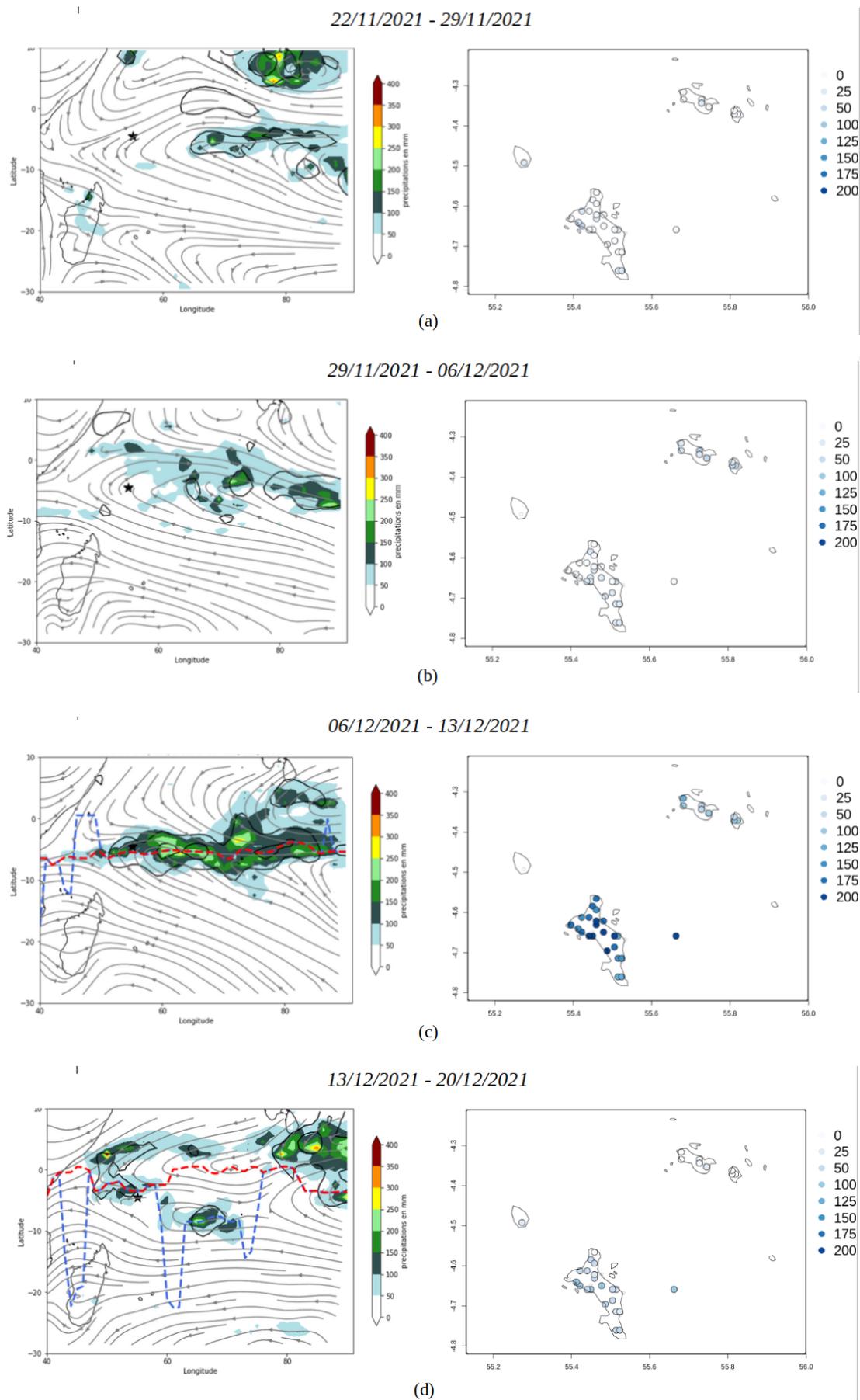


FIGURE 4.7 – Représentation des précipitations accumulées sur une semaine en mm avec ERA5 (à gauche) et avec les observations des Seychelles (à droite) allant du 22/11/2021-29/11/2021 (a) jusqu'au 13/12/2021-20/12/2021 (d).

4.3 Elaboration d'un score permettant d'évaluer le produit sur les Seychelles

Une évaluation plus poussée a été réalisée afin d'estimer les incertitudes associées à la position de la ZCIT prévue par rapport au diagnostic obtenu dans les réanalyses. Un score a donc été établi pour réaliser cette première évaluation. Il se concentre sur l'archipel des Seychelles, plus particulièrement sur le passage de la ZCIT au-dessus des Seychelles dans le sens de migration nord/sud. Nous nous sommes donc focalisés sur les semaines des mois de novembre et décembre. Les Seychelles sont composées de 115 îles. Les îles principales sont localisées entre les latitudes 4°S et 5°S et les longitudes 55°E et 56°E, ce sont ces îles là qui nous intéressent car c'est là que se concentre la majorité de la population. Le domaine sur lequel on va détecter les diagnostics de ZCIT prévue et observée est illustré par la Figure 4.8. Il s'étend de la latitude 2°S à 7°S et de la longitude 50°E à 65°E. La latitude 5° a été choisie car la ZCIT est une bande nuageuse de convection profonde s'étalant sur quelques centaines de kilomètres du nord au sud. Si un diagnostic est situé à 2°S ou 7°S alors on considère que les Seychelles sont concernées par la ZCIT. Ensuite, on regarde le diagnostic obtenu dans les réanalyses et la médiane des diagnostics prévue par la prévision d'ensemble. On considère que si plus de la moitié du diagnostic est localisée dans le domaine alors il y a une ZCIT. Ainsi trois cas de figures sont possibles :

1. Une ZCIT avec ERA5 et EPS **OU** pas de ZCIT avec ERA5 et EPS : bonne prévision (cf Figure 4.8a)
2. Pas de ZCIT avec ERA5 et une ZCIT avec EPS : fausse alarme (cf Figure 4.8b)
3. Une ZCIT avec ERA5 et pas de ZCIT avec EPS : non détection (cf Figure 4.8c)

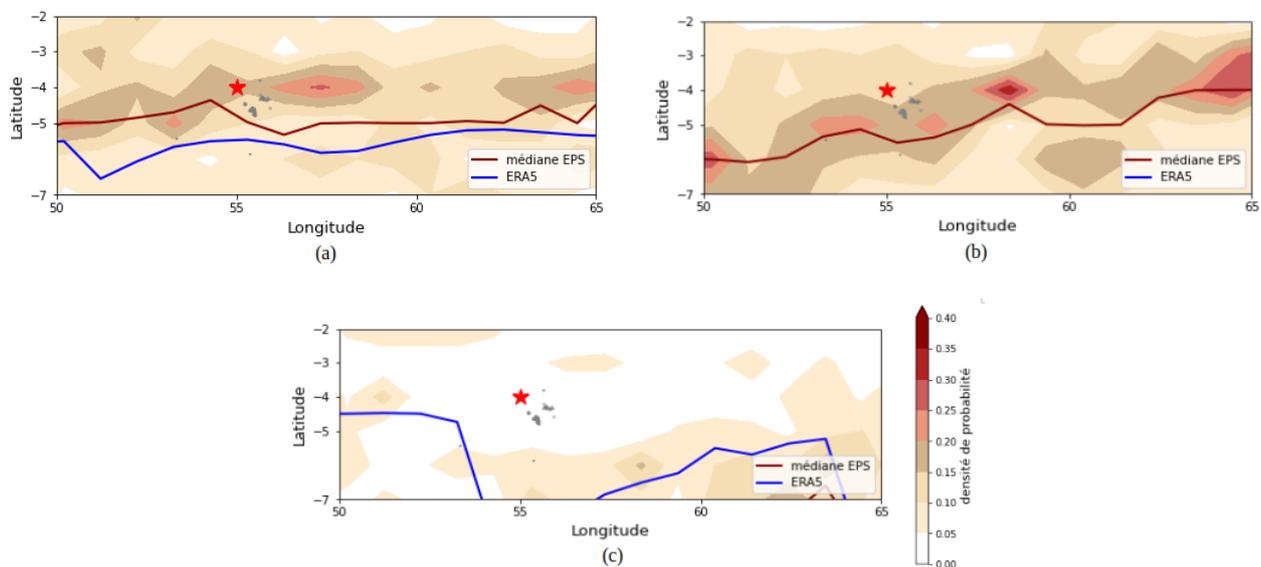


FIGURE 4.8 – Représentation du score dans les trois cas de figure possibles (a) bonne prévision (run du 08/11/2021 échéance 4 semaines), (b) fausse alarme (run du 08/11/2021 échéance 3 semaines) et (c) non détection (run du 17/12/2018 échéance 1 semaine).

La Figure 4.9 représente le résultat de ce score pour chaque année allant de 2017 à 2021 (cf Figures 4.9a-4.9e) et pour la totalité des semaines de prévision (44 semaines) de ces 5 années (cf Figure 4.9f). De manière générale, on remarque que le nombre de bonnes prévisions est bon et que le taux de fausses alarmes augmente avec les échéances. Ce résultat est en accord

avec la prévisibilité qui se dégrade avec l'échéance de prévision dans les modèles. Enfin on remarque que le taux de non détection est relativement faible pour toutes les échéances mais il est légèrement plus fort pour la courte échéance. Le taux plus élevé de non détection pour la semaine 1 n'a pas pu être analysé en profondeur pendant le stage mais il le sera dans la suite du projet PISSARO. Par ailleurs, on remarque que pour l'année 2020 et 2021, les scores sont très bons avec respectivement une unique et aucune non détection de la part du modèle et une légère hausse du taux de fausse alarme pour les longues échéances en lien avec la performance du modèle EPS. Pour les autres années, le taux de non détection est plus important, notamment pour la **S1** de l'année 2019.

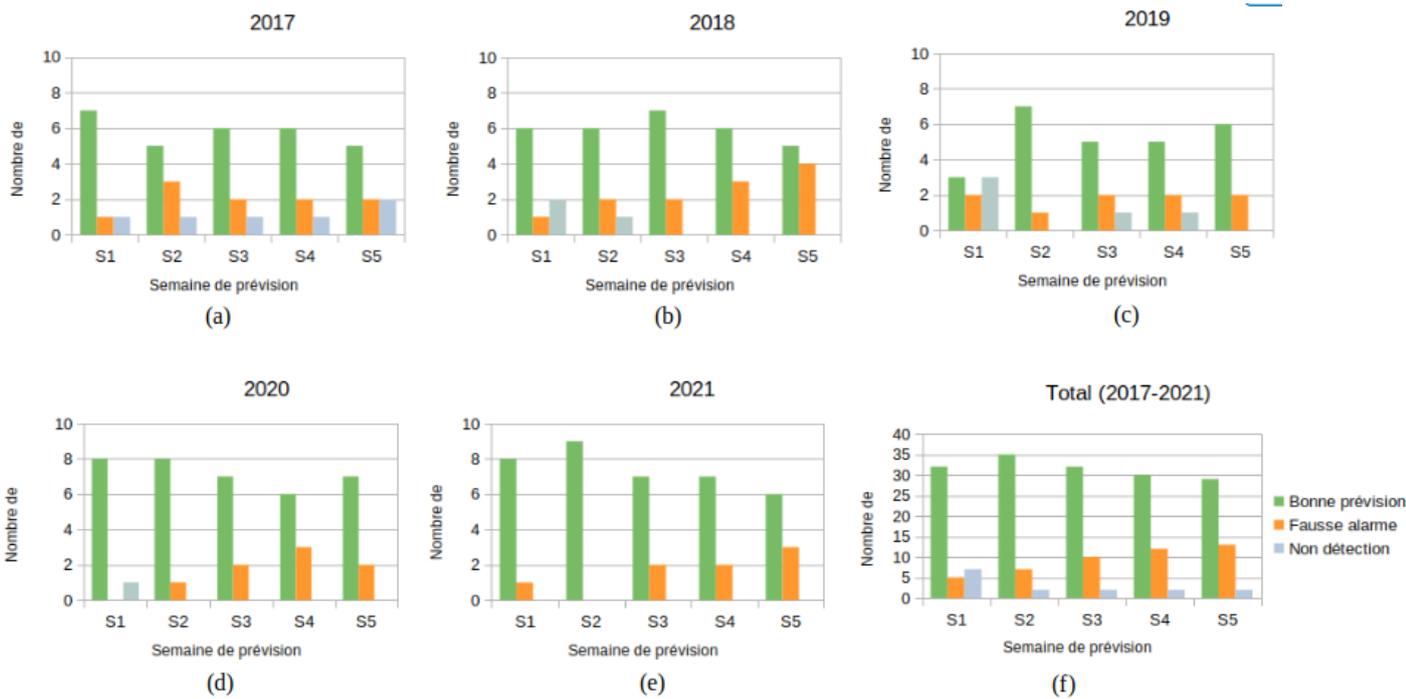


FIGURE 4.9 – Score sur le produit probabiliste prévoyant la position de la ZCIT évalué au-dessus des Seychelles pour les années allant de 2017 (a) à 2021 (e).

Enfin, le Tableau 4.10 se focalise sur le premier passage de la ZCIT pour chaque année allant de 2017 à 2021. Il permet de voir comment était anticipé le démarrage de la saison des pluies sur les Seychelles par le modèle EPS. On remarque que pour l'année 2017, le modèle n'a jamais détecté l'arrivée de la ZCIT quelle que soit l'échéance. En revanche, l'année 2021 est une excellente année puisque les prévisions ont toujours été bonnes concernant l'arrivée de la ZCIT. Une information que l'on retrouve dans le tableau est la non détection de la ZCIT par le modèle EPS à courte échéance (**S1**). Ce résultat est surprenant car c'est pour cette échéance que le modèle est censé être le meilleur puisqu'il est au plus proche des observations. Ce phénomène semble être lié à l'indice de flux de mousson. En effet, le modèle ne diagnostique pas de ZCIT et cela est dû au manque de membres qui réalisent un diagnostic de ZCIT. Des recherches plus appuyées devront être menées pour comprendre ce phénomène.

Ces résultats sont tout de même encourageant pour le produit. D'autres scores devront être établis pour évaluer le produit sur d'autres régions que les Seychelles. De plus, il sera mis à disposition des prévisionnistes des Seychelles et de la Réunion dès la saison prochaine pour qu'ils puissent évaluer le produit en conditions opérationnelles.

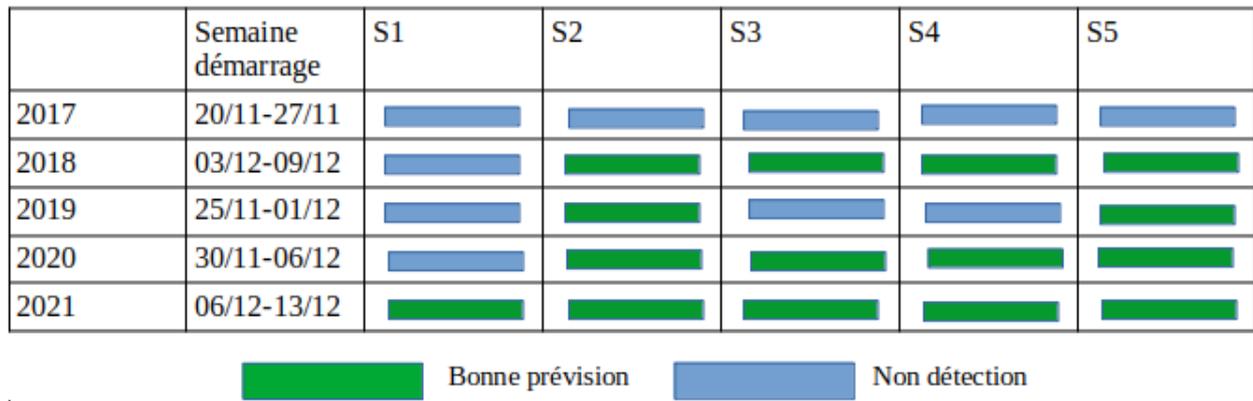


FIGURE 4.10 – *Score sur le premier passage de la ZCIT au-dessus des Seychelles pour les années allant de 2017 à 2021.*

5 | Conclusion et perspectives

Dans le cadre de cette étude, une méthode automatique a été développée pour localiser la ZCIT à l'échelle hebdomadaire dans le nord du bassin sud-ouest de l'océan Indien en se basant sur les champs de vents zonaux (u) et méridionaux (v) à 850hPa et à 200hPa et le champ de précipitations. Appliquée aux réanalyses ERA5, cette méthode a permis d'établir une climatologie mensuelle de la position de la ZCIT dans cette région. La variation saisonnière de la position de la ZCIT illustrée par cette climatologie est en accord avec la littérature (BERRY & REEDER, 2014; WALISER & GAUTIER, 1993). L'arrivée de la ZCIT dans le bassin survient pendant le mois de novembre. Ensuite, elle s'installe dans l'hémisphère sud de décembre à mars puis elle se dirige doucement vers le nord courant avril avant de migrer totalement dans l'hémisphère nord en mai.

Une des principales raisons du développement de cette méthode était de pouvoir l'utiliser pour la prévision opérationnelle. C'est d'ailleurs pour cette raison que nous utilisons des champs de sorties de modèles pour localiser la ZCIT. Un produit probabiliste a donc été développé à partir des prévisions d'ensemble étendues du CEPMMT. Une évaluation de ce produit a été réalisée sur le cas d'un rejeu de situation : celui du démarrage de la saison des pluies de 2021 pour les Seychelles. Les résultats se sont révélés concluants, avec une prévisibilité de l'arrivée de la ZCIT sur le bassin de deux semaines et une bonne anticipation du retard de la ZCIT pour l'année 2021 (un mois en avance). La réanalyse ERA5 et les observations ont permis de valider la prévision en montrant le passage de la ZCIT sur les Seychelles la deuxième semaine du mois de décembre, soit trois semaines en retard par rapport à la climatologie. Un score focalisé sur les Seychelles a été établi afin d'évaluer les incertitudes associées au produit de prévision sur plusieurs années. Les résultats sont encourageants montrant un bon taux de bonnes prévisions et un nombre de fausses alarmes bas mais augmentant avec les échéances. Le taux de non détection est relativement faible quelle que soit l'échéance sauf pour la plus courte échéance où il est plus important. Ce résultat est encore inexplicable et devra être analysé plus en profondeur dans la suite du projet PISSARO. Ce produit a été présenté aux prévisionnistes du SMA et de la DIROI dans le cadre de l'atelier PISSARO qui s'est déroulé en juin 2022. Suite à cette présentation, il a été acté que le produit serait testé dès la saison suivante. Il sera consulté par les prévisionnistes du SMA en conditions opérationnelles et sera intégré à l'activité expérimentale de briefing mensuel de suivi de la MJO et des ondes équatoriales pour la prévision mensuelle de l'activité cyclonique et des régimes de temps dans le sud-ouest de l'océan Indien. Cette activité est menée à la DIROI depuis 2018 pendant la saison cyclonique et accompagnée par le projet PISSARO depuis 2020 pour le développement de produits susceptibles d'être utilisés par les prévisionnistes pour soutenir leur analyse.

Concernant les perspectives, des rejeux de situations sur les années précédentes vont être réalisés pour évaluer la prévisibilité de la ZCIT à l'échelle intra-saisonnière. D'autres scores vont être établis pour permettre une estimation plus précise des incertitudes associées à la position de la ZCIT diagnostiquée dans les prévisions par rapport au diagnostic obtenu dans les réanalyses. D'autre part, il serait intéressant d'observer le lien entre la position de la ZCIT dans le bassin et certains indices tels que l'IOD, l'ENSO ou encore la MJO (ADAM & AL., 2016b; BERRY & REEDER, 2014) pour identifier les facteurs qui la pilotent.

Bibliographie

- ADAM & AL., T. S., Tobias Bischoff. (2016a). Seasonal and interannual variations of the energy flux equator and itcz. part i : zonally averaged itcz position. *Journal of Climate*, 29(9), 3219-3230. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0512.1>
- ADAM & AL., T. S., Tobias Bischoff. (2016b). Seasonal and interannual variations of the energy flux equator and itcz. part ii : zonally varying shifts of the itcz. *Journal of Climate*, 29(12), 7281-7293. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0710.1>
- BERRY & REEDER. (2014). Objective identification of the intertropical convergence zone : climatology and trends from the era-iterim. *Journal of Climate*, 27, 1894-1908. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00339.1>
- BEUCHER, F. (2010). *Météorologie tropicale : des alizés au cyclone tropical* [OCLC : 762578850]. Météo France.
- CHAN & EVANS. (2002). Comparison of th structure of the itcz in the west pacific during the boreal summers of 1989-1993 using amip simulations and ecmwf reanalysis. *Journal of Climate*, 15(19), 3549-3568. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<3549:COTSOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<3549:COTSOT>2.0.CO;2)
- GU, AL., R. & A.H.SOBEL. (2004). The eastern pacific itcz during the boreal spring. *Journal of the atmospheric science*, 62(22), 1157-1174. <https://doi.org/10.1175/JAS3402.1>
- HERSBACH ET AL., H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., ABDALLA, S., ABELLAN, X., BALSAMO, G., BECHTOLD, P., BIAVATI, G., BIDLOT, J., BONAVITA, M., ... THÉPAUT, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- JUMEAUX & AL., D. R., Hubert Quetelard. (2011). *Atlas climatique de la Réunion*. Météo France.
- KANG & HELD. (2008). The response of the itcz to extratropical thermal forcing : idealized slab-ocean experiments with a gcm. *Journal of Climate*, 21(11), 3521-3532. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI2146.1>
- KESHTGAR & AL., P. I., Omid Alizadeh-Choobari. (2020). Seasonal and interannual variations of the intertropical convergence zone over the indian ocean based on an energetic perspective. *Climate Dynamics*, 54(3), 3268-3639. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05195-5>
- LORENZ. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(11), 130-141.
- PALMER & AL. (1993). Ensemble prediction. ecmwf seminar proceedings validation of models over europe. *ECMWF, Shinfield Park, Reading*, 1.
- SCHNEIDER & AL., G. H., T. Bischoff. (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513(10), 43-53. <https://doi.org/10.1038/nature13636>
- TRACTON & KALNAY. (1993). Operational ensemble forecast prediction at the national meteorological center : practical aspects. *Weather and Forecasting*, (8), 379-398.

- VITART & AL., A. C. (2017). The sub-seasonal to seasonal prediction (s2s) project database. *American Meteorological Society*, 98(10), 163-173. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>
- WALISER & GAUTIER. (1993). A satellite-derived climatology of the itcz. *Journal of Climate*, 32(12), 2162-2174. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2)
- WELLER & AL., S.-K. M., Wenju Cai. (2014). More-frequent extreme northward shifts of eastern indian ocean tropical convergence under greenhouse warming. *Scientific Reports*, 4(7). <https://doi.org/10.1038/srep06087>

A | Annexes

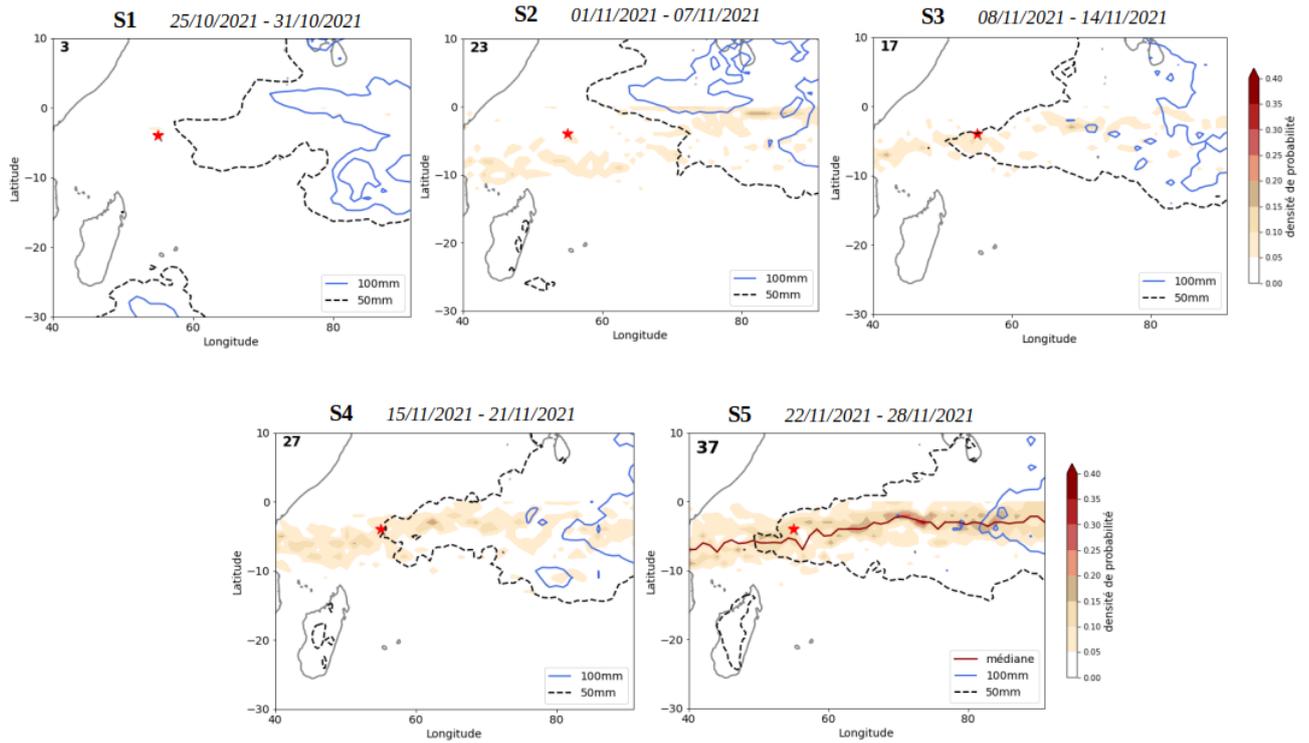


FIGURE A.1 – Prédiction hebdomadaire de la position de la ZCIT dans le bassin à partir de la prévision d'ensemble du CEPMMT (run du 25/10/2021). Le panache de couleurs représente la densité de probabilité des diagnostics. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres établissant un diagnostic de ZCIT. Les précipitations prévues par le CEPMMT à 50 mm et 100 mm sont représentées respectivement par les contours en pointillés noirs et en bleu. L'étoile rouge représente les îles principales des Seychelles.

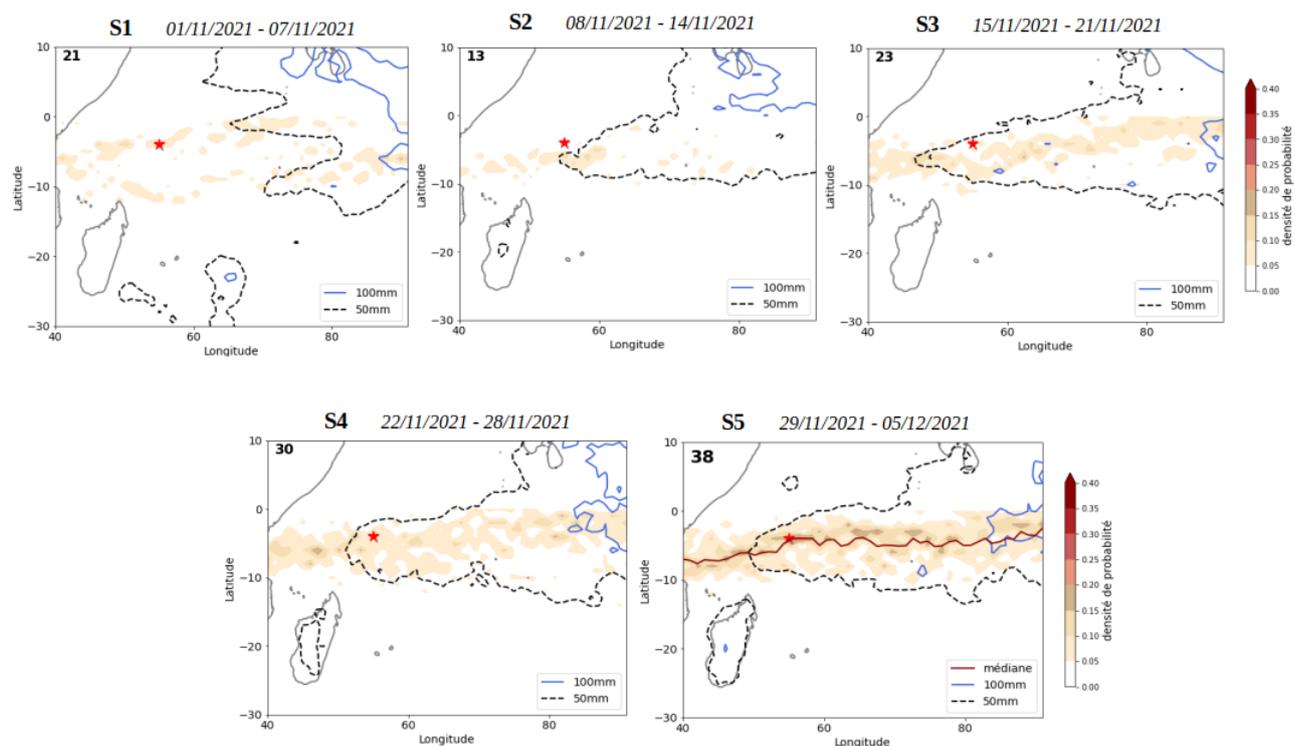


FIGURE A.2 – Prédiction hebdomadaire de la position de la ZCIT dans le bassin à partir de la prévision d'ensemble du CEPMMT (run du 01/11/2021). Le panache de couleurs représente la densité de probabilité des diagnostics. Le chiffre en haut à gauche correspond au nombre de membres établissant un diagnostic de ZCIT. Les précipitations prévues par le CEPMMT à 50 mm et 100 mm sont représentées respectivement par les contours en pointillés noirs et en bleu. L'étoile rouge représente les îles principales des Seychelles.