

PROJET ACCLIMATE ETUDE SIM-CLIM

THEME 1 : ANNEXE 2

Pistes d'approfondissement et recommandations pour l'analyse des tendances observées dans la région COI

Table des matières

1. INTRODUCTION	3
2. LONGUES SERIES DE DONNEES	3
2.1 Quelques généralités sur l'homogénéisation.....	3
2.1.1 Analyse des métadonnées et contrôle de qualité.....	4
2.1.2 Création de séries de références.....	4
2.1.3 Détection des ruptures.....	5
2.1.4 Correction des données	5
2.2 Travaux d'homogénéisation lors de l'atelier ETCCDI.....	6
2.3 Autres travaux réalisés dans les pays.....	6
2.4 L'action COST-ES0601.....	7
2.5 Recommandations pour poursuivre le travail sur les séries de données de base	7
3. INDICATEURS ET INDICES CLIMATIQUES	9
3.1 Généralités.....	9
3.2 Exemples d'indicateurs et indices.....	9
3.2.1 Indicateurs caractérisant les extrêmes climatiques.....	9
3.2.2 En France, les indicateurs de l'ONERC.....	9

Projet COI – ACCLIMATE - Etude « faisabilité simulation climatique et base de données régionale »
Thème 1 – Annexe 2 : pistes d'approfondissement pour l'analyse des tendances climatiques observées sur la région COI



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

3.2.3	Surface océanique (Température et Niveau de la mer).....	9
3.2.4	Activité cyclonique	11
3.2.5	Sécheresses	12
3.2.6	Indices de circulation générale.....	13
3.3	Recommandations pour la région COI.....	14
3.3.1	indicateurs à « usage final ».....	14
3.3.2	Indices climatiques « amont ».....	16
4.	DONNEES SPATIALISEES EN POINTS DE GRILLE	16
4.1	Généralités.....	16
4.2	Les différents types de données disponibles dans les centres mondiaux pour l'analyse des tendances climatiques	17
4.2.1	Ré-analyses globales issues de la modélisation (NCEP , ECMWF ...)	17
4.2.2	Données en points de grille basées sur l'observation satellitaire.....	17
4.2.3	Autres données « élaborées ».....	18
4.3	Recommandations pour la région COI.....	18
4.3.1	Température.....	18
4.3.2	Précipitations.....	19
4.3.3	Vent	19
4.3.4	Régimes de temps et indices de circulation générale.....	20
4.3.5	Activité cyclonique	20
4.3.6	Houle	20

1. INTRODUCTION

Pour bien comprendre l'évolution actuelle du climat et estimer son évolution future, il est indispensable de connaître son évolution passée. Pour cela, les « tendances », c'est à dire l'approximation linéaire d'un paramètre sur une certaine période, représentent des indicateurs indispensables. Notamment pour :

- l'évaluation et la validation des modèles de climat et des méthodes de descente d'échelle.
- l'évaluation, dès à présent, de l'efficacité de certaines politiques d'adaptation face à certaines évolutions déjà observables et qui devraient se poursuivre voir s'accroître dans le futur.

Associées aux connaissances du climat et de ses modes de variabilité, elles permettent d'aborder la question de l'attribution des évolutions constatées et de leur compréhension.

L'analyse des tendances observées peut se faire :

- Directement à partir des paramètres climatologiques de base (Température, Précipitation, Vent...) mesurés au sol ou en altitude en un ou plusieurs points donnés. Cette approche nécessite de disposer de longues séries de données (> 30 ans). Ces longues séries doivent être homogénéisées pour permettre de ne conserver que les tendances en lien uniquement avec les évolutions du climat et sa variabilité naturelle.
- A partir d'indices ou indicateurs climatiques élaborés (calculés à partir des données de base homogènes) qui soient pertinents pour quantifier les effets du changement climatique sur notre environnement (cf. étude de vulnérabilité des pays COI menée dans le cadre du projet ACCLIMATE : ressource en eau, phénomènes extrêmes, santé, biodiversité....)
- A partir de données spatialisées (en point de grille) issues de la modélisation mais aussi de moyens d'observation moins conventionnels (produits satellites, radars ...). Cette approche permet une meilleure représentation de la variabilité spatiale des tendances et donc une approche régionale intéressante notamment dans une région constituée essentiellement d'états insulaires et dont la densité du réseau de mesure est trop inégale pour permettre la réalisation de produits spatialisés par simple interpolation.

Cette note a pour objet d'identifier, suivant ces trois approches, différentes pistes d'approfondissement pour continuer à progresser sur la mise en évidence de tendances à l'échelle de la région COI. Ce travail a également pour but de poser les bases d'un possible contenu d'une plateforme régionale d'échange de données.

2. LONGUES SERIES DE DONNEES

2.1 Quelques généralités sur l'homogénéisation

Analyser les évolutions climatiques à partir de mesures météorologiques exige de disposer de séries climatologiques suffisamment longues et dont les valeurs soient comparables dans le temps. S'il est assez facile de constituer des séries cinquantenaires, voire centenaires, il est rare que ces dernières soient utilisables en l'état :

- La qualité des données originales n'est pas toujours suffisante. Des erreurs de mesures ou de saisie peuvent avoir été introduites et les manques peuvent être fréquents.
- Les événements susceptibles d'introduire, dans les séries, des ruptures d'homogénéité, sont nombreux. Citons entre autres les déplacements des points de mesures ou la modification de leur environnement, les changements de capteurs ou d'observateurs, etc. Ces ruptures sont le plus souvent du même ordre de grandeur voire d'un ordre de grandeur supérieur que les phénomènes que l'on cherche à mettre en évidence.

Il est donc indispensable avant toute analyse d'une série climatologique de s'assurer préalablement de la qualité des données, de rechercher les ruptures d'homogénéité dans la série et de les corriger.

Ref. Biblio

Aguilar, E., I. Auer, M. Brunet, T. C. Peterson, and J. Wieringa (2003), Guidelines on climate metadata and homogenization, WMO - TD No. 1186, 55 pp., World Meteorol. Org., Geneva, Switzerland.

Selon le contexte (type de climat, paramètre et pas de temps considéré, densité du réseau, variabilité spatio-temporelle et distribution du paramètre, disponibilité des métadonnées...), la méthode ou technique d'homogénéisation la plus adaptée varie.

De manière générale, le processus d'homogénéisation se déroule suivant 4 étapes :

- Analyse des métadonnées et contrôle de qualité
- Création de séries de références
- Détection des ruptures
- Correction des données

Selon les étapes, le degré d'automatisation est variable mais dans tous les cas, l'expertise humaine est nécessaire.

2.1.1 Analyse des métadonnées et contrôle de qualité

La disponibilité de métadonnées complètes d'un poste est fondamentale pour la compréhension et la validation des éventuelles ruptures détectées par les logiciels d'homogénéisation. Une analyse des métadonnées en amont de la détection des ruptures permet d'anticiper les problèmes auxquels on risque d'être confronté dans la suite du processus. En parallèle, un contrôle de la qualité des séries étudiées est fondamental, le principe étant de vérifier le faible taux de données manquantes et d'éliminer les données erronées susceptibles de perturber les tests de détection statistiques appliqués ensuite.

2.1.2 Création de séries de références

Détecter des ruptures et corriger les données constitue un travail délicat car dans la majorité des cas, l'amplitude des inhomogénéités est du même ordre de grandeur que celles liées à la variabilité du climat. Ainsi, dans la mesure du possible, la constitution de séries de référence est recommandée. Cette série de référence doit avoir subi le même environnement climatique que la série que l'on cherche à homogénéiser sans en avoir subi les ruptures non climatiques.



Il existe plusieurs approches pour constituer une série de référence. La première est d'exploiter les postes voisins suffisamment corrélés avec la série que l'on souhaite homogénéiser. La deuxième est d'exploiter des séries de données d'un autre type (indépendantes) dont on sait qu'elles sont homogènes sur certaines périodes (données satellites, données de ré-analyse issues de la modélisation...).

La possibilité ou non de créer des séries de référence est très variable selon le contexte défini par la densité du réseau environnant, la variabilité spatio-temporelle du paramètre considéré et la couverture de la zone géographique étudiée en données élaborées issues de l'observation non conventionnelle (satellites, radars ...).

2.1.3 Détection des ruptures

Lorsqu'une série de référence a pu être constituée, la détection des ruptures se fait à partir de la série constituée soit par la différence des deux séries, soit par le rapport entre les deux séries selon la distribution du paramètre d'intérêt.

Lorsque la constitution de séries de référence est impossible, certaines méthodes permettent de s'en dispenser soit en réalisant des tests statistiques directement sur les données de la série analysée, soit par comparaison relative avec d'autres séries de données (processus itératif) d'un même environnement climatique (bien corrélées).

Lorsqu'une rupture est détectée, elle est confrontée aux métadonnées qui permettent d'attribuer (ou non) cette rupture à des facteurs non climatiques.

2.1.4 Correction des données

- Pas de temps mensuel, saisonnier ou annuel

La dernière étape consiste à corriger les données sur les portions définies comme inhomogènes lors de l'étape de détection. Communément, lorsque l'inhomogénéité est liée à une rupture brutale, on ajuste les données à corriger par un facteur obtenu à partir de la différence ou du rapport entre la moyenne de la partie jugée homogène et celle de la partie non homogène. Lorsque l'inhomogénéité se caractérise par une rupture lente ou une tendance progressive (liée à une urbanisation progressive de l'environnement par exemple), le principe est de dé-biaiser la portion jugée inhomogène à l'aide de la différence des tendances calculées entre les portions jugées homogènes et la portion que l'on souhaite dé-biaiser.

- Pas de temps quotidien

L'homogénéisation de séries de données quotidiennes s'avère beaucoup plus complexe et de nombreux efforts sont consentis à travers le monde pour explorer différentes approches. Une des raisons de ces difficultés est que ce processus touche aux valeurs extrêmes qui par définition se produisent très rarement ce qui rend compliqué et risqué l'application d'ajustements systématiques. Il n'y a pour le moment pas de consensus sur la stratégie à adopter même si des tentatives ont ponctuellement été faites notamment lors de l'atelier ETCCDI organisé à Maurice en 2009 dans le cadre du projet ACCLIMATE. A noter que l'action COST décrite au paragraphe 2.4 est notamment chargée d'émettre des recommandations concernant ce point sensible. De manière générale, il n'est

pas recommandé de procéder à des corrections sur des paramètres à forte variabilité spatiale comme c'est le cas pour les précipitations dans cette région tropicale.

2.2 Travaux d'homogénéisation lors de l'atelier ETCCDI

L'atelier ETCCDI, organisé par le projet ACCLIMATE de la COI en octobre 2009 à Maurice, a permis de réaliser un travail d'homogénéisation des données quotidiennes et mensuelles de température minimale et maximale et de précipitations de 5 pays membres de la COI (Comores, Madagascar, Maurice, Réunion et Seychelles). A partir de ce travail d'homogénéisation, un certain nombre d'indices climatiques a pu être calculé et a permis de mettre en avant quelques tendances observées sur la région en lien avec le changement climatique.

Les résultats issus de l'atelier ont fait l'objet d'une publication :

Vincent, L. A., et al. (2011), Observed trends in indices of daily and extreme temperature and precipitation for the countries of the western Indian Ocean, 1961–2008, J. Geophys. Res., 116, D10108, doi:10.1029/2010JD015303

Le logiciel utilisé était *RHtestsV3* développé par Xiaolan Wang et Yang Feng du Climate Research Division de Environnement Canada. Ce logiciel a permis de réaliser sur 68 séries de la zone :

- un contrôle de qualité : analyse visuelle, élimination des valeurs aberrantes, tests de dépassement de seuils ...
- la détection des ruptures sur les séries mensuelles. Cette détection a été réalisée essentiellement sur les séries de données elles-mêmes et très ponctuellement à l'aide des séries voisines. Ce travail a permis la mise en évidence d'un certain nombre de ruptures mais la qualité inégale des métadonnées disponibles n'a pas toujours permis de valider les ruptures détectées par le logiciel.
- Au final, 9 séries quotidiennes de température maximum ont été ajustées pour les ruptures les plus évidentes et expliquées par les métadonnées à l'aide d'une méthode de correction « quantile-quantile » nouvellement disponible dans le logiciel [Wang et al., 2010]. Les séries de précipitation et de températures minimum n'ont pas subi de corrections, l'attribution des ruptures détectées n'ayant pas pu être clairement établie (métadonnées incomplètes ou absentes)

Wang, X. L., H. Chen, Y. Wu, Y. Feng, and Q. Pu (2010), New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series, J. Appl. Meteorol. Climatol., 49, 2416–2436, doi:10.1175/2010JAMC2376.1.

2.3 Autres travaux réalisés dans les pays

A La Réunion, un travail d'homogénéisation sur 6 séries de températures maxima et minima mensuelles a été mené dans le cadre de l'étude réalisée par le bureau d'étude de Météo-France pour la Région Réunion.

Roy et al, 2009, Etude pour l'identification des évolutions et changements climatiques à La Réunion, Météo-France, DIRRE/BECLIM

Ce travail a été réalisé à l'aide du logiciel PRODIGE dont la base statistique a été développée à la Direction de la Climatologie à Météo-France.



Mestre O., 2000 : Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques. Thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier (Toulouse III).

L'homogénéisation de chaque série est réalisée en considérant un voisinage glissant constitué de séries correspondant à des postes géographiquement proches et « bien corrélés ». On travaille sur des séries de différences pour les températures et sur des séries de rapports pour les précipitations. Un travail est actuellement en cours pour homogénéiser une trentaine de séries de précipitations mensuelles de l'île de La Réunion toujours à partir du logiciel PRODIGE.

2.4 L'action COST-ES0601

http://www.homogenisation.org/v_02_15/

L'action européenne COST-ES0601 a pour principal objectif la définition d'une méthode générale pour l'homogénéisation des longues séries climatiques. L'action, lancée en 2007, est structurée en 5 groupes de travail :

- WG1 : inventaire des méthodes d'homogénéisation et préparation des jeux tests
- WG2 -3: comparaison et évaluation des méthodes de détection et correction pour les données mensuelles et annuelles
- WG4 : méthodes de correction des données quotidiennes
- WG5 : présentation et mise au point d'une méthode commune

Le lien suivant propose quelques recommandations pratiques concernant l'homogénéisation :

http://www.google.fr/url?sa=t&source=web&cd=2&ved=0CCEQhgIwAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.homogenisation.org%2Fadmin%2Fdocs%2F2010%252004%2520practical%2520recommendations%2520v3.doc&rct=j&q=practical%20recomnendations%20ES0601&ei=7Do5TpzdB4KAhQewo-CIAq&usq=AFQjCNG4BNGBpeyqlp1BHG1ZRMd_R06nRA&sig2=X-zXVP5yE8Y_idnNVE05Qw&cad=rja

2.5 Recommandations pour poursuivre le travail sur les séries de données de base

L'atelier ETCCDI de 2009 constitue incontestablement une première étape d'une approche régionale pour l'analyse des séries de données de base. Le temps imparti pour cet atelier n'a cependant pas permis de creuser suffisamment les problèmes d'homogénéisation qui peuvent être très couteuse en ressources suivant la méthodologie adoptée. Il a cependant permis de réaliser une première analyse régionale sur les tendances d'indices permettant la caractérisation des extrêmes de pluie et de température dont les résultats ont fait l'objet d'une publication.

Afin d'approfondir les travaux sur la question de l'homogénéité des séries, il semble utile de :

- Poursuivre le travail de récolte des métadonnées et de données anciennes afin d'allonger et de documenter au mieux les séries exploitées.

-
- Partager un certain nombre de longues séries de données dans une base de données et métadonnées régionale, un critère de « qualité » minimum devant probablement être défini pour que cette base soit raisonnablement homogène.
 - Réfléchir à la possibilité, à partir de cette base de données, de constituer des séries de référence.
 - Réfléchir à la possibilité de constituer des séries de référence à partir de données « indépendantes » comme par exemple des données de SST ré-analysées, l'homogénéité de ces données « indépendantes » étant un pré requis.
 - Reprendre le travail de détection des ruptures sur les données mensuelles ou annuelles en exploitant des séries de référence si disponibles, et sinon en tirant le bénéfice des postes des pays voisins lorsque leur environnement climatique est proche (critère de corrélation entre les séries). L'utilisation de logiciels d'homogénéisation permettant de travailler par comparaison entre les postes est souhaitable. Corriger les données mensuelles lorsqu'une rupture est attribuable de manière claire à un événement non climatique. Dans le doute, mieux vaut s'abstenir de corriger les données.
 - Pour les données quotidiennes, s'en tenir au travail réalisé lors de l'atelier ETCCDI dans l'attente d'éventuelles recommandations de l'action COST-ES0601
 - De manière générale, s'appuyer dans la mesure du possible sur les conclusions et recommandations issues des travaux de l'action COST-ES0601 quant à la méthodologie à suivre.
 - Elargir l'étude des longues séries à d'autres paramètres tels que le vent en exploitant éventuellement des données d'altitude issues des radiosondages (e.g . Tromelin).

3. INDICATEURS ET INDICES CLIMATIQUES

3.1 Généralités

On distingue l'indice climatique qui résulte d'un calcul plus ou moins élaboré à partir d'une combinaison de mesures de base et l'indicateur climatique qui caractérise les effets des aléas climatiques sur un système de manière plus indirecte. Dans la pratique, la distinction entre un indice et un indicateur n'est pas toujours évidente et ne présente pas toujours d'intérêt sachant qu'ils répondent au même besoin de caractériser ou quantifier les effets des aléas climatiques sur notre environnement au sens large.

3.2 Exemples d'indicateurs et indices

3.2.1 Indicateurs caractérisant les extrêmes climatiques

Des indices ont été définis pour l'analyse de l'impact du changement climatique sur des événements extrêmes. Ces indices, basés sur la température (nombre de jours de gel, nombre de jours sans dégel, nombre de jours avec température maximale supérieure à 25 °C, amplitude thermique, période de croissance, ...) ou les précipitations (nombre de jours de pluie, nombre de jours de fortes précipitations, nombre maximal de jours secs consécutifs, nombre maximal de jours de pluies consécutifs, ...), ont été principalement définis au sein de l'ETCCDI, et utilisés dans le cadre du projet EUMETNET ECA&D (<http://ecad.knmi.nl>) et du projet IMFREX (<http://imfrex.mediasfrance.org/>) du GICC. Les tendances sur ces différents indices ont été analysées lors de l'atelier ETCCDI de Maurice en 2009 pour la zone COI (Vincent & al, 2011).

D'autres indices du même type ont été définis dans le cadre du projet STARDEX :

http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Core_Indices.pdf

3.2.2 En France, les indicateurs de l'ONERC

L'ONERC est l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique en France. Il a défini une grande variété d'indicateurs en lien avec divers secteurs socio-économiques allant de l'agriculture et la forêt à la santé en passant par la biodiversité et les écosystèmes permettant un monitoring assez large des effets du changement climatique sur le territoire français. Une description de ces indicateurs est disponible sur le site de l'ONERC <http://www.onerc.org/indicateurs>

3.2.3 Surface océanique (Température et Niveau de la mer)

De manière générale, les indices permettant de suivre l'évolution de la température de surface de la mer sont élaborés à partir de la température moyenne sur une zone géographique définie en fonction du besoin.

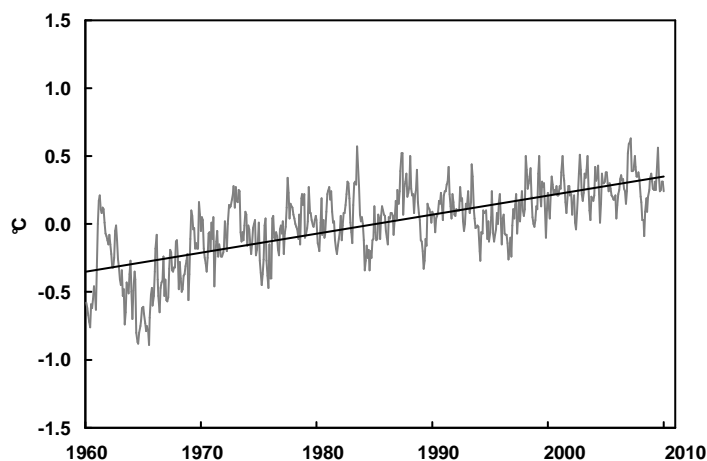


Figure 1 : Evolution de l'anomalie de température moyenne de surface de l'océan sur la zone définie par 30°E-701°E et 40°S-Equateur (période de référence 1971-2000). Série reconstituée dans le cadre de l'atelier ETCCDI de Maurice 2009 à partir de données ERSST (<http://www.ncdc.noaa.gov/ersst/index.php>)

Par ailleurs, certains indices permettent de mettre en évidence des grandes oscillations océaniques connues. Le dipôle de l'océan indien est une de ces oscillations. L'indice qui permet de caractériser et suivre ce phénomène est le DMI (Dipole Mode Index) défini comme la différence de température entre la température moyenne des boîtes WTIO et SETIO (cf. figure 2 ci-dessous).

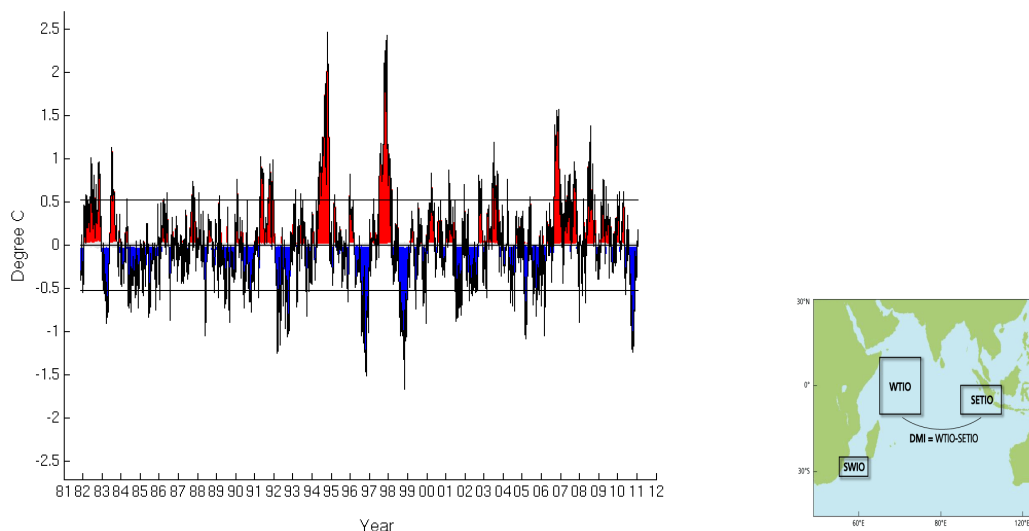


Figure 2 : Evolution de l'indice DMI entre 1981 et 2011. Ocean Observations Panel for Climate (http://ioc-goos-oopc.org/state_of_the_ocean/sur/ind/)

Le suivi du niveau de la mer est également une indication primordiale pour le suivi du changement climatique. Ce phénomène peut être suivi de la même manière que la SST. Les produits issus des mesures altimétriques depuis les satellites défilants permettent d'appréhender de manière précise la variabilité spatiale des tendances sur le niveau des mers et des océans.

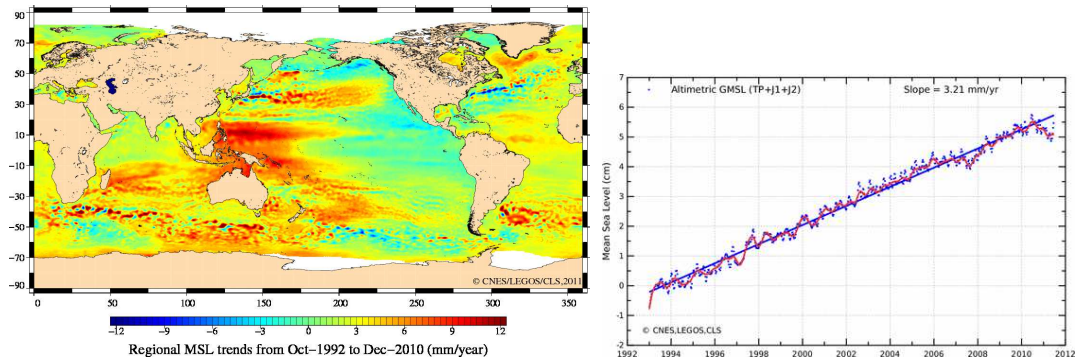


Figure 3 : Tendances du niveau moyen de la mer entre 1992 et 2010 (AVISO : <http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/ocean-indicators/mean-sea-level/index.html>)

3.2.4 Activité cyclonique

L'activité cyclonique est une caractéristique forte de la région COI. Son suivi dans le cadre du changement climatique est indispensable. Météo-France, en tant que centre régional de prévision de l'activité cyclonique pour la partie sud-ouest de l'Océan Indien, possède un historique des systèmes ayant affecté la région depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. Ces données souffrent cependant d'un problème d'homogénéité notamment en raison du manque d'observation en plein océan avant l'ère satellitaire qui a débuté au début des années 70s. Les seules données exploitables pour l'analyse de tendances fiables et donc pour le calcul d'indicateurs sont celles qui se situent après 1970 (environ 40 ans de données). D'autre part, l'activité cyclonique est, à l'échelle mondiale mais aussi des bassins cycloniques, marquée par une variabilité naturelle multi décennale ce qui complique d'autant plus la recherche d'un lien entre les tendances observées sur 30 ou 40 ans et le changement climatique.

Thomas R. Knutson et al. (2010), Tropical cyclones and climate change, Nature Geoscience 3, 157 - 163 ; Published online: 21 February 2010 | DOI:10.1038/NCEO779

Conscient de ces difficultés, des indices ou indicateurs d'activité cyclonique peuvent facilement être mis en œuvre tels que le nombre de systèmes sur une saison pour tel ou tel seuil d'intensité du système ou encore le nombre de jours d'activité sur une saison.

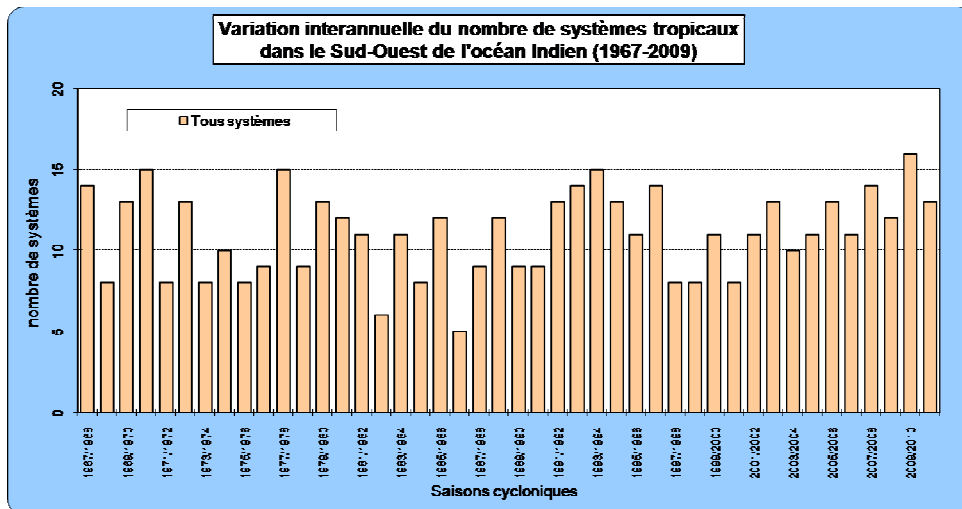
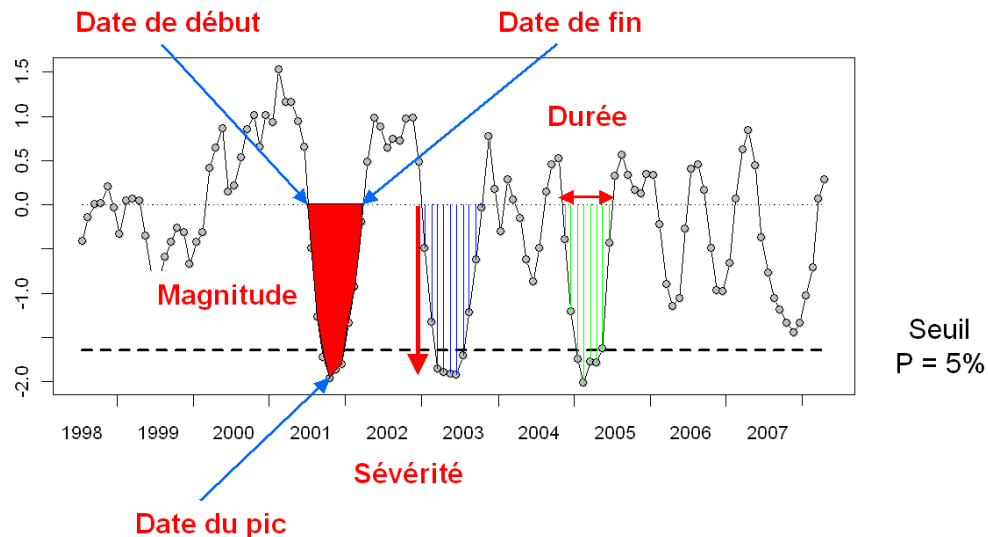


Figure 4 : nombre de systèmes tropicaux par saison cyclonique de 1967 à 2009 dans le Sud-Ouest de l'océan Indien

3.2.5 Sécheresses

On trouve de très nombreux indices ou indicateurs de par le monde permettant de caractériser les sécheresses qui sont directement à relier à la problématique de la ressource en eau, enjeu crucial de l'adaptation au changement climatique dans certaines parties du globe et en particulier dans certaines zones de la région COI.

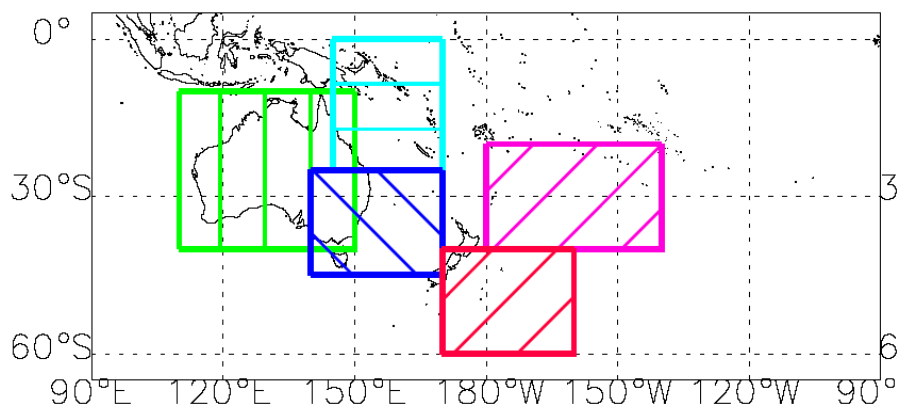
On citera pour exemple le SPI, Standard Precipitation Index, communément utilisé dans le monde et recommandé par l'OMM. Cet indicateur permet de caractériser les sécheresses météorologiques. Cet indice permet de traduire la pluviométrie cumulée sur une période allant de 1 à 24 mois sous forme de durée de retour de l'épisode.



D'autres indices comme ceux récemment proposés dans le cadre du projet Climsec (cf. prix Gerbier-Mum 2011 décerné par l'OMM) existent, prenant en compte d'autres paramètres comme la température, le rayonnement, le vent, ... et permettent de caractériser l'état de sécheresse des sols ou des rivières et pas uniquement le déficit pluviométrique.

3.2.6 Indices de circulation générale

Les indices de circulation générale permettent de décrire certaines caractéristiques du contexte de la circulation atmosphérique de grande échelle. Il existe de multiples façons de les définir. Le plus souvent, ils traduisent un écart d'un ou plusieurs paramètres météorologiques de grande échelle par rapport à un état moyen de l'atmosphère caractéristique du climat d'une région du globe ou des gradients géographiques ou verticaux caractéristiques des grandes circulations du système climatique. En Nouvelle Calédonie par exemple, 5 indices de circulation générale basés sur la pression moyenne pour 5 domaines géographiques (voir figure ci-dessous) sont utilisés pour réaliser de la descente d'échelle pour la prévision saisonnière.



Projet COI – ACCLIMATE - Etude « faisabilité simulation climatique et base de données régionale »
Thème 1 – Annexe 2 : pistes d'approfondissement pour l'analyse des tendances climatiques observées sur la région COI

Les indices de circulation peuvent également être définis en se basant sur des techniques de classification par régimes ou types de temps. On peut citer en exemple le régime de circulation NAO (North Atlantic Oscillation) utilisé pour la prévision saisonnière en Europe qui peut être caractérisé via des projections de géopotentiel (à 500 hPa) sur des structures spatiales tirées d'Analyses en Composantes Principales ou directement à partir de données de pression au niveau mer.

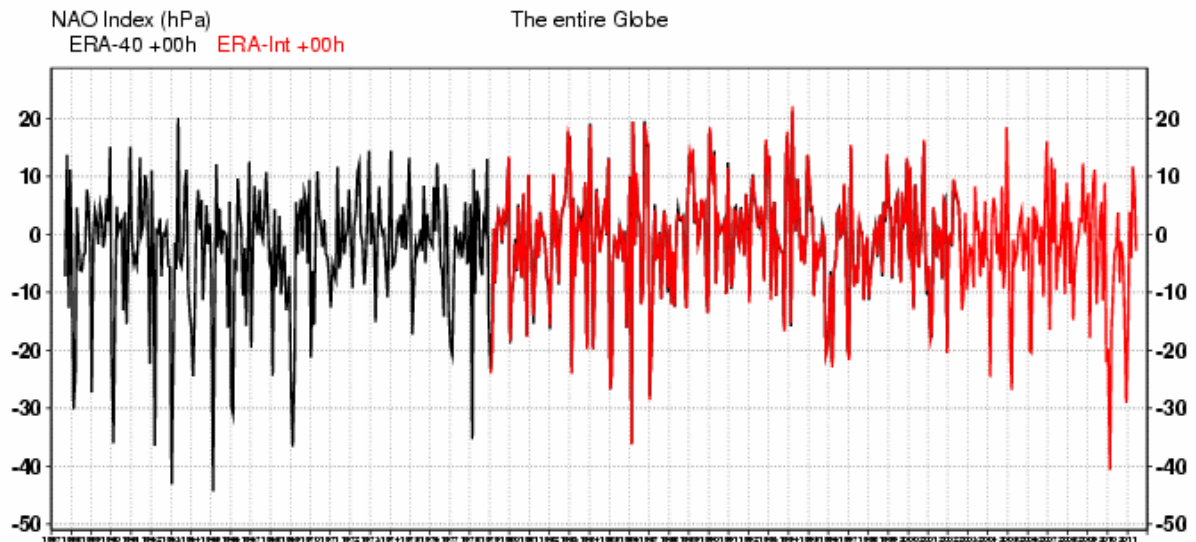


Figure 7 : Evolution de l'indice NAO période 1957-2011

http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/inspect/catalog/research/eraclim/timon/timon_clim/

3.3 Recommandations pour la région COI

Le chapitre précédent montre qu'il existe une grande variété d'indices ou indicateurs calculables. L'intérêt de calculer des indicateurs ou indices climatiques est double.

3.3.1 indicateurs à « usage final »

Le premier intérêt est de permettre un suivi direct des effets du changement climatique sur notre environnement. Ces indicateurs doivent alors être définis pour répondre au mieux aux différents enjeux régionaux identifiés pour la mise en place de politiques d'adaptation au changement climatique. Ces indicateurs ou indices sont donc « à usage final » pour les décideurs. La définition de ce type d'indicateurs ou indices doit être dans la mesure du possible le résultat d'une réflexion ou concertation entre les acteurs du climat et du secteur d'activité visé (santé, biodiversité, hydrologie, prévention des risques naturels...). Selon le secteur d'activité concerné, les indicateurs pertinents pour le suivre peuvent parfois fortement s'éloigner des « mesures » habituellement réalisées dans les services météorologiques. Dans cette étude, nous nous concentrons sur les produits « purement climatiques » mais il faut donc garder à l'esprit que des indicateurs, pour être efficaces, doivent parfois faire intervenir des données non « météorologiques » (cf. indicateurs de l'ONERC). Par

exemple, on pourrait imaginer pour la région COI un ou plusieurs indicateurs de surveillance des activités économiques sensibles au climat (e.g. import/export de certains produits, ...) car les états insulaires sont sans doute plus exposés que les autres aux aléas des pays « voisins » ou « partenaires ».

A ce jour, aucun indicateur climatique régional « COI » n'est réellement défini ou mis à disposition des décideurs. La mise à disposition d'un certain nombre d'indices ou indicateurs simples de l'évolution du climat sur la zone COI permettrait de clarifier le message passé aux « politiques ». En première approche et au vu des principaux enjeux régionaux, il semblerait utile pour la COI de définir des indicateurs en lien avec les enjeux suivants :

- **Risques naturels, phénomènes extrêmes :**
 - **Activité cyclonique :** malgré les difficultés rencontrées sur l'homogénéité des données dans le temps, il paraît intéressant de présenter le nombre de systèmes par saison ayant affecté le bassin, le nombre de systèmes ayant atteint tel ou tel stade d'intensité (à définir) ou encore le nombre de jours d'activité au-delà du seuil de tempête, cyclone voir cyclone intense, sur la période pour laquelle on considère les données comme suffisamment homogènes pour être exploitables pour l'analyse de tendances.
 - **Episodes de fortes pluies :** à partir des indices ETCCDI, redéfinir des seuils adaptés aux régimes pluviométriques de la région.
 - **Houles et surcotes cycloniques, houles australes :** réflexion à mener sur des indicateurs pertinents.
 - **Vagues de chaleur :** idem que pour les fortes pluies, travail de réflexion sur l'adéquation au contexte régional des seuils définis dans les indices ETCCDI.
- **Ressource en eau :**
 - **Sécheresses :** définir un indicateur calculable à l'échelle de la région permettant de caractériser les sécheresses et leur évolution (durée, amplitude, fréquence...). Le SPI semble être un bon candidat pour commencer.
 - **Risque incendie :** la possibilité de calculer l'indice de sécheresse (sous-indice de l'Indice Feu Météo IFM), basé sur la température et les précipitations, sur un certain nombre de postes est à étudier (intéressant notamment pour certaines régions de Madagascar).
- **Préservation de l'environnement et des milieux :**
 - **Température de surface de la mer :** bon marqueur de la tendance de température sur la région qui est en grande majorité une zone maritime. Il s'agit

de définir un ou plusieurs domaines géographiques sur lesquels on moyenne la SST.

- Température de l'air : critères ou seuils à définir en lien étroit avec chaque problématique (espèces invasives, maladies et parasitismes ...).
- Indicateurs environnementaux éventuels (divers indicateurs liés à la biosphère, acidité des océans, végétation, ...)
- **Souveraineté territoriale** : Un indicateur régional ou plusieurs indicateurs couvrant des sous-domaines de la région, permettant un monitoring efficace de l'évolution du niveau de l'océan, paraît indispensable.
- **Santé publique** : pas d'indicateur simple et facilement interprétable en termes de santé publique. Les effets sont souvent indirects. La définition d'indices ou indicateurs est à réfléchir au cas par cas avec les acteurs du milieu de la santé.

3.3.2 Indices climatiques « amont »

Le deuxième intérêt est de permettre de progresser dans la connaissance de la variabilité du climat à grande échelle et de ses interactions avec l'échelle régionale ou locale, mais aussi de définir des méthodes de descente d'échelle statistiques adaptées au contexte climatique et géographique de la région visée (type de climat, insularité, présence de relief, principaux centres d'actions...). Ces indices peuvent être qualifiés d'indices « **amont** » dans le sens où ils ne sont pas directement exploitables pour la prise de décision. Le choix et la définition d'indices climatiques « amonts » adaptés à la région COI nécessitera très certainement la mise en place d'études de sensibilité pour évaluer leur capacité à expliquer la variabilité du climat régional voire local. A ce titre, l'utilisation de la prévision saisonnière comme « laboratoire de tests » est tout à fait adaptée et recommandée.

4. DONNEES SPATIALISEES EN POINTS DE GRILLE

4.1 Généralités

Les données en point de grille ou spatialisées peuvent être générées à partir de modèles atmosphériques et océaniques (ré-analyses) ou à partir de données d'observation non conventionnelles (satellites, radars...). Ce type de données présente l'avantage d'une certaine homogénéité spatiale permettant la couverture de zones dépourvues de moyens d'observation classiques. L'élaboration de ces produits est souvent complexe et coûteuse. Le plus souvent, ces données sont disponibles dans les centres météorologiques régionaux et mondiaux. Ils sont particulièrement adaptés pour le suivi climatique à l'échelle régionale.

4.2 Les différents types de données disponibles dans les centres mondiaux pour l'analyse des tendances climatiques

4.2.1 Ré-analyses globales issues de la modélisation (NCEP , ECMWF ...)

Ces ré-analyses proposent un grand nombre de champs atmosphériques et océaniques avec des résolutions horizontales de l'ordre de 1 à 2 degrés sur l'ensemble du globe. Sur la verticale, les paramètres atmosphériques principaux sont disponibles sur une vingtaine de niveaux allant de la surface terrestre à la stratosphère. Enfin, les données sont disponibles au pas de temps quotidien (4 réseaux par jour) ou mensuel.

Ces données sont élaborées par des modèles numériques par assimilation de données d'observations du réseau de mesure traditionnel et de données d'observations plus élaborées (satellites...). La qualité et la profondeur des séries de données climatologiques de base est donc un gage de qualité et d'homogénéité des données ré-analysées.

On citera pour exemple la ré-analyse ERA-40 du centre européen de prévision (ECMWF) qui couvre la période 1957-2001 ainsi que la ré-analyse ERA-interim qui couvre la période 1989-2008 (prochainement étendue jusqu'en 1979) avec une meilleure résolution et une assimilation de données plus complète (<http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/index>). Le NCEP (US) propose également une ré-analyse globale couvrant la période 1948-2011 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>).

Pour la partie purement océanique, on peut citer le centre MERCATOR qui produit des données de ré-analyse globales (<http://www.mercator-ocean.fr/fre/>) mais sa profondeur est insuffisante pour l'analyse des évolutions du climat.

A noter de manière additionnelle la ré-analyse du XXème siècle de la NOAA disponible depuis peu et dans un futur pas trop éloigné (quelques années) la ré-analyse ERA-Clim, produit par le CEPMMT, qui devrait couvrir au moins 75 ans.

4.2.2 Données en points de grille basées sur l'observation satellitaire

L'observation de l'atmosphère et de la surface terrestre par les satellites offre une très grande variété de possibilités de mesures plus ou moins élaborées en fonction des traitements réalisés en aval de l'observation. Contrairement aux données de ré-analyses, les séries de données d'observations directement issues de l'observation satellitaire sont en général relativement courtes et donc le plus souvent difficiles à exploiter pour la mise en évidence de tendances climatiques. Ces données sont cependant beaucoup utilisées pour des activités de suivi climatique « temps réel ». Elles sont également très utiles pour l'initialisation des modèles de climat couplés océan-atmosphère.

Il existe plusieurs centres mondiaux ou régionaux d'exploitation des données satellitaires. Pour exemple, on peut citer le centre AVISO qui propose des produits et données altimétriques utiles pour

la caractérisation de phénomènes climatiques en lien direct avec la température de surface de l'océan et donc du niveau de la mer (<http://www.aviso.oceanobs.com/fr/applications/climat/index.html>). On peut également citer le Centre de Météorologie Spatial de Météo-France à Lannion, EUMETSAT, NASA ...

4.2.3 Autres données « élaborées »

D'autres produits sont reconstitués sur des périodes variables en exploitant des données de diverses origines (observations in situ, ré-analyses modèles, données satellitaires...).

On peut citer en exemple les données de précipitations reconstituées au sein GPCP (Global Precipitation Climate Center) qui propose une analyse globale des précipitations mensuelles de 1979 à nos jours (2,5°x2,5°) ainsi que des précipitations quotidiennes de 1997 à nos jours (1°x1°). Elles sont fabriquées en tirant le maximum de l'ensemble des données disponibles issues des postes pluviométriques terrestres et des satellites à orbite polaire ou géostationnaires (canaux micro-onde et infrarouge...). Plus de détails sur : <http://precip.gsfc.nasa.gov/index.html>

Les données ERSST proposent une reconstitution en points de grille de la Température de Surface de la Mer (TSM) entre 1880 et nos jours (2°x2°). Ces données ont été reconstituées à partir des mesures in situ et satellitaires. La grande profondeur de cette archive impose de se pencher sur l'homogénéité de la série avant toute exploitation en terme de tendance. Plus de détails : <http://www.ncdc.noaa.gov/ersst/>

On peut également citer les données OISST (Optimum Interpolation of Sea Surface Temperature) de la NOAA qui propose une reconstitution globale des TSM (résolution 1°x1°) depuis 1981 au pas de temps mensuel et 1989 au pas de temps hebdomadaire.

4.3 Recommandations pour la région COI

Les données en points de grille offrent de nombreuses possibilités pour l'étude du climat. Elles sont particulièrement utiles lorsque la densité ou la qualité du réseau d'observation terrestre est insuffisante ce qui est souvent le cas pour la région COI constituée essentiellement de zones maritimes dépourvues d'observation in situ.

La question de l'homogénéité des séries de données reste valable pour les données en point de grille. En particulier, l'avènement et la progression très rapide des techniques d'observation par satellite peut être source de ruptures d'homogénéité. L'exploitation de ce type de données pour l'analyse des tendances doit faire l'objet d'un questionnement sur l'homogénéité des données. L'incertitude liée à ces questions doit être documentée.

4.3.1 Température

Les données en points de grille de température de surface de la mer (ERSST, OISST...) pourraient être valorisées pour l'analyse des tendances. Dans le processus d'homogénéisation des données

mensuelles de températures, elles représentent une source de données indépendantes (vis-à-vis des mesures traditionnelles) et pourraient permettre de constituer des séries de référence assez homogènes partant de l'hypothèse que, pour la zone COI, la température des petits états insulaires est fortement contrainte par la SST. A creuser...

4.3.2 Précipitations

Les données GPCP pourraient être exploitées pour la caractérisation des sécheresses notamment sur Madagascar dont l'étendue géographique est compatible avec la résolution horizontale des données (2,5°) mais aussi sur les états insulaires dont le relief est peu marqué. Ces données paraissent moins adaptées pour La Réunion par exemple où le relief marqué provoque une très forte variabilité spatiale des précipitations.

On pourra également réfléchir à l'opportunité d'exploiter ces données pour l'analyse des tendances sur les épisodes de pluies extrêmes (seuils à redéfinir en lien avec la faible résolution horizontale des données) à l'aide d'indices type ETCCDI et à confronter ensuite avec les tendances établies à partir des données d'observation in situ.

Plus en marge, on pourrait imaginer de travailler sur l'intensité des pluies à l'intérieur des systèmes tropicaux à partir des données GPCP.

Enfin, ces données sont particulièrement adaptées pour l'évaluation et la validation des modèles climatiques globaux dont les résolutions horizontales sont comparables à celle des données GPCP.

4.3.3 Vent

Le climat de la région COI est fortement contraint par le régime d'alizé qui affecte la zone une grande partie de l'année. L'étude des tendances observées sur ces régimes de vent mais aussi, pourquoi pas d'autres régimes tel que le flux de mousson trans-équatorial en période d'été austral paraît intéressante pour caractériser l'évolution du climat régional.

La densité du réseau de mesure de vent est en général plus faible que pour la température et les précipitations. De plus, les séries de mesure de vent présentent plus facilement des ruptures d'homogénéité notamment en lien avec les évolutions rapides de l'environnement de mesure (croissance rapide de la végétation en milieu tropical...) et les changements de capteurs.

Partant de ce constat, et même si un travail est à accomplir sur l'analyse des séries de mesure de vent, les données de vent issues des ré-analyses modèles (ECMWF, NCEP) présentent l'intérêt d'une couverture spatiale homogène et, sur les zones maritimes, sont directement contraintes par les grands centres d'action type anticyclone des Mascareignes. La fiabilité de ces données est donc à priori bonne en dehors des zones perturbées par le relief (à vérifier quand même notamment en s'appuyant sur des séries de données de vent issues des radiosondages).

4.3.4 Régimes de temps et indices de circulation générale

Les données ré-analysées issues de la modélisation sont typiquement utilisées pour déterminer des indices de circulation générale caractéristiques du climat régional avec une bonne capacité à expliquer la variabilité du climat régional et/ou local. En particulier, la mise en œuvre de techniques de classification automatique par régime ou type de temps est une manière de caractériser le climat d'une région. Cette caractérisation permet ensuite, le cas échéant, de faire apparaître des évolutions dans la fréquence d'apparition ou dans l'intensité des différents régimes de temps. La mise en application de méthodes similaires sur la région COI pourrait ensuite trouver une multitude d'applications que ce soit pour la validation des modèles de climat, pour la définition de méthodes de descente d'échelle statistiques efficaces ou pour la compréhension des modes de variabilité du climat régional. Ce travail pourrait ensuite être valorisé pour l'analyse des tendances futures issues des modèles climatiques globaux (prévision saisonnière, changement climatique, prévision décennale...).

4.3.5 Activité cyclonique

Partant du constat que l'analyse des tendances sur l'activité cyclonique en s'appuyant directement sur les données d'observations se trouve confrontée au problème d'homogénéité des données juxtaposé à une variabilité naturelle multi décennale, le problème pourrait être approché d'une manière plus indirecte. En effet, l'activité cyclonique étant tributaire du contexte météorologique de grande échelle, elle peut être diagnostiquée à partir de critères de grande échelle correctement calibrés et reconstitués à partir des jeux de ré-analyse des modèles atmosphériques (cf. §4.2.1). On peut citer en exemple les critères définis dans le cadre de la prévision saisonnière d'activité cyclonique réalisée au CEPMMT (dans le cadre EURO-SIP).

Vitard and Stockdale (2001) Seasonal Forecasting of tropical storms using coupled GCM integrations - MWR, 129, 2521-2537

4.3.6 Houle

Les archives ERA-40 et ERA-interim proposent des données de houle. Ces données permettent de travailler notamment sur les houles australes qui devraient à priori être bien représentées dans les modèles utilisés pour reconstituer ces données. Une étude sur la pertinence de ces données par confrontation avec des données observées est cependant nécessaire.

En revanche, elles ne permettent pas l'étude des houles cycloniques, les cyclones n'étant pas reproduits de manière réaliste dans ces modèles.