

Sujet de Thèse: Apport de l'activité ondulatoire tropicale pour la construction d'indices de cyclogenèse à l'échelle sub-saisonnière.

English Title : Contribution of tropical wave activity for the design of tropical cyclone genesis indices at subseasonal scale

Encadrement : Philippe Peyrillé, Fabrice Chauvin, Fleur Couvreur

Les cyclones tropicaux (TC) sont les phénomènes météorologiques les plus dévastateurs dans les zones tropicales à subtropicales. Comprendre l'évolution de leur genèse et de leur trajectoire dans un climat changeant est un sujet à fort enjeu. Les ondes équatoriales sont des perturbations de grande échelle typiques des tropiques qui présentent un caractère propagatif. Par leur signature convective et leur dynamique, elles constituent des prédicteurs à grande échelle des cyclones tropicaux, connus mais encore peu exploités, aussi bien pour la prévision à courte échéance que pour l'étude du climat.

Des études récentes ont montré le lien entre ondes équatoriales et cyclogenèse (Schrek et al 2012, Landu et al. 2020, Latos et al 2023, Feng et al 2023, Jonville et al 2025). Selon les bassins, entre 60 et 90 % des cyclones naissent de manière concomitante à au moins une onde équatoriale de type Mixed-Rossby Gravity ou Equatorial Rossby, dont 25 à 50% sont liés à l'occurrence d'au moins deux ondes (Feng et al 2023). Parmi l'ensemble des ondes équatoriales, certaines sont plus propices que d'autres à favoriser la cyclogenèse en modulant la convection ou directement le tourbillon durant des périodes allant du jour à la dizaine de jours.

Actuellement la cyclogenèse est exploré grâce à des indices de grande échelle, synthétisant notre connaissance des processus de formation. L'approche en indices a été utilisée depuis les années 1970 pour représenter la climatologie des cyclogenèses (Gray 1968, 1975, Royer et al. 1998, Emanuel and Nolan 2004), mais également leur variabilité interannuelle (Menkes al 2012) et leur réponse au changement climatique (Royer et al. 1998, Camargo et al, 2014). Cependant, une limite forte de cette approche est qu'elle ne prend pas en compte explicitement les ondes équatoriales et s'applique uniquement aux échelles saisonnières, alors que la cyclogenèse se joue à l'échelle de la journée. A titre d'exemple, ces indices évoluent vers des conditions plus favorables à la cyclogenèse alors que la fréquence des TC diminue en climat futur.

Le sujet de thèse proposé vise à identifier, dans les observations, le lien entre les propriétés des cyclones tropicaux (occurrence, trajectoire, intensité) et les ondes équatoriales dans les bassins d'intérêt pour Meteo-France. On adoptera l'approche par indicateurs de grande échelle pour relier l'activité cyclonique (genèse, trajectoire) à l'activité ondulatoire à partir des données journalières plutôt que saisonnière ou mensuelle comme traditionnellement fait dans la littérature; l'intérêt étant de rester au plus proche de l'évènement convectif.

La thèse s'inscrit dans le cadre du projet SOCLE-OM qui vise à développer des outils d'analyse utiles aux services climatiques dans les territoires d'Outre-Mer. L'intérêt de cette approche

est qu'elle sera facilement applicable aux projections multi-modèles dont la résolution spatiale ne permet pas forcément l'utilisation des algorithmes de "tracking objectif" des cyclones tropicaux. Dans ces dernières, les indicateurs "grande échelle" sont un moyen d'identification des cyclones à plus basse résolution qu'il sera intéressant d'évaluer grâce à la base multi-résolution de sorties de modèles fournie dans le projet SOCLE-OM. Une fois la méthodologie développée, on généralisera l'approche d'indicateurs de grande échelle aux autres phases du cycle de vie des cyclone tropicaux, comme l'intensification rapide, les trajectoires ou la pré-cyclogenèse. Enfin, on testera la robustesse de l'indicateur dans sa capacité à produire de la prévisibilité dans les différents bassins océaniques, et ce de l'échelle quotidienne jusqu'à la sensibilité climatique.

Les question abordées durant la thèse seront:

1/ Peut-on définir un indicateur de grande échelle de conditions favorables à la cyclogenèse (disponible à échelle journalière et à des résolutions assez lâches $\sim 1^\circ$) à partir des observations? Cet indicateur influence -t-il prioritairement la phase d'initiation des cyclones ou impacte-t-il également les différentes phases du cycle de vie des cyclones? En quoi cette réponse est-elle modulée en fonction des bassins cycloniques? Ces questions seront au coeur de la thèse.

2/ Cet indicateur permet-il d'identifier les cyclogenèses dans les simulations à résolution suffisamment fines pour les représenter explicitement? Est il adapté pour être utilisé comme un proxy de cyclogenèse dans des simulations à plus basses résolutions? En quoi cette réponse est-elle modulée en fonction des bassins cycloniques?

3/ Quelle est l'évolution climatique de cet indicateur selon les différents bassins?

4/ Cet indicateur peut il être utilisé pour la prévision saisonnière de la cyclogenèse et aider dans le processus d'alerte précoce? Une ouverture de la thèse sera d'appliquer l'indicateur à des enjeux climatiques (changement futur) ainsi qu'à des questions de prévisibilité en l'appliquant aux prévisions saisonnières.

English version :

Tropical cyclones (TCs) are the most devastating meteorological phenomena in tropical and subtropical areas. Understanding how they form and evolve in a changing climate is a key challenge. Equatorial waves are large-scale propagating disturbances typical of the tropics. Due to their convective signature and dynamics, they are large-scale predictors of tropical cyclones, which are known but still under-exploited, both for short-term forecasting and for climate studies.

Recent studies have shown the link between equatorial waves and cyclogenesis (Schrek et al 2012, Landu et al. 2020, Latos et al 2023, Feng et al 2023, Jonville et al 2025). Depending on the basin, between 60 and 90% of cyclones arise concurrently with at least one Mixed-Rossby Gravity or Equatorial Rossby type equatorial wave, of which 25 to 50% are linked to the occurrence of at least two waves (Feng et al 2023). Among all equatorial waves, some are more conducive than others to promoting cyclogenesis by modulating convection or directly modulating vorticity over periods ranging from one day to ten days.

Cyclogenesis is currently being explored using large-scale indices that synthesise our knowledge of the formation processes. The index approach has been used since the 1970s to represent the climatology of cyclogenesis (Gray 1968, 1975, Royer et al. 1998, Emanuel and Nolan 2004), but also their interannual variability (Menkes et al. 2012) and their response to climate change

(Royer et al. 1998, Camargo et al., 2014). However, a major limitation of this approach is that it does not explicitly take equatorial waves into account and applies only to seasonal scales, whereas cyclogenesis occurs on a daily scale. For example, these indices are shifting towards conditions more favourable to cyclogenesis, while the frequency of TCs is decreasing in the future climate.

The proposed thesis topic aims to identify, in observations, the link between the properties of tropical cyclones (occurrence, trajectory, intensity) and equatorial waves in the basins of interest to Meteo-France. We will adopt a large-scale indicator approach to link cyclonic activity (genesis, trajectory) to wave activity using daily data rather than seasonal or monthly data as is traditionally done in the literature; the advantage of this approach is that it remains as close as possible to the convective event.

The thesis is part of the SOCLE-OM project, which aims to develop analysis tools useful for climate services in overseas territories. The advantage of this approach is that it will be easily applicable to multi-model projections whose spatial resolution does not necessarily allow the use of 'objective tracking' algorithms for tropical cyclones. In the latter, 'large-scale' indicators are a means of identifying cyclones at lower resolution, that we will evaluate using the multi-resolution database of model outputs provided in the SOCLE-OM project. Once the methodology has been developed, the large-scale indicator approach will be generalised to other phases of the tropical cyclone life cycle, such as rapid intensification, trajectories and pre-cyclogenesis. Finally, we will test the robustness of the indicator in its ability to produce predictability in different ocean basins, from the daily scale to climate sensitivity.

The questions addressed in the thesis will be:

1/ Can we define a large-scale indicator of conditions favorable to cyclogenesis (available on a daily basis and at fairly coarse resolutions $\sim 1^\circ$) based on observations? Does this indicator primarily influence the initiation phase of cyclones or does it also impact the different phases of the cyclone life cycle? How does this response vary depending on the cyclone basin? These questions will be at the heart of the thesis.

2/ Does this indicator allow cyclogenesis to be identified in simulations with sufficiently fine resolution to represent it explicitly? Is it suitable for use as a proxy for cyclogenesis in lower resolution simulations? How does this response vary according to cyclone basins?

3/ How does this indicator evolve with climate change according to different basins?

4/ Can this indicator be used for sub-seasonal forecasting of cyclogenesis and assist in the early warning process? One avenue for the thesis will be to apply the indicator to climate issues (future change) as well as to predictability issues by applying it to sub-seasonal forecasts.

Translated with DeepL.com (free version)

Références bibliographiques :

Camargo, S. J., M. K. Tippet, A. H. Sobel, G. A. Vecchi, and M. Zhao, 2014: Testing the performance of tropical cyclone genesis indices in future climates using the HiRAM Model. *J. Climate*, 27, 9171-9196, doi:10.1175/JCLI-D-13-00505.1.

Emanuel, K. A. and D. S. Nolan, 2004: Tropical cyclone activity and the global climate system. 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, American Meteorological Society.

Feng X, Yang G-Y, Hodges K. I, Methven J, 2023: Equatorial waves as useful precursors to tropical cyclone occurrence and intensification

Gray, W. M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.* , 96, 669-700

Jonville T, Cornillault E, Lavaysse C, Peyrillé P, Flamant C, 2025: Distinguishing north and south African Easterly Waves with a spectral method: Implication for tropical cyclogenesis from mergers in the North Atlantic, *QJRMS*, <https://doi.org/10.1002/qj.4909>

Landu, K., Goyal, R., et Keshav, B. S., 2020: Role of multiple equatorial waves on cyclogenesis over Bay of Bengal. *Climate Dynamics* vol. 54, no 3, p. 2287-2296.

Latos, B., Peyrillé, P., Lefort, T., Baranowski, D. B., Flatau, M. K., Flatau, P. J., ... & Matthews, A. J. 2023. The role of tropical waves in the genesis of Tropical Cyclone Seroja in the Maritime Continent. *Nature Communications*, 14(1), 856.

Menkes, C. E., Lengaigne, M., Marchesiello, P., Jourdain, N. C., Vincent, E. M., Lefèvre, J., Chauvin F. & Royer, J. F., 2012.: Comparison of tropical cyclogenesis indices on seasonal to interannual timescales. *Climate dynamics*, 38(1), 301-321.

Royer, J. F., Chauvin, F., Timbal, B., Araspin, P., & Grimal, D. (1998). A GCM study of the impact of greenhouse gas increase on the frequency of occurrence of tropical cyclones. *Climatic Change*, 38(3), 307-343.

Schreck, C.J., Molinari, J. & Aiyyer, A., 2012: A global view of equatorial waves and tropical cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 140, 774–788.