

Cyclones dans une bulle de savon

T. MEUEL^a, H. KELLAY^a

a. *Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine*

Résumé :

Dans le film d'une demi bulle de savon chauffée à sa base, la convection thermique engendre un écoulement turbulent constitué de plumes de convection. Les plumes de convection donnent naissance à des vortex cohérents vers le sommet de la bulle. La trajectoire du centre de ces vortex est régie par une loi de puissance du déplacement quadratique moyen au cours du temps. Cette loi est valide de façon statistique pour les cyclones terrestres. Elle permet une prévision simple de leur trajectoire assortie de leur cône d'incertitude, nécessitant peu de puissance de calcul.

Abstract :

Turbulent flow in the film of a half soap bubble stem from thermal convection due to the heating at the bubble's equator. Thermal plumes rising from the equator can swirl around near the bubble top and form coherent vortices. The mean square displacement of the vortex center obeys a power law in time. This power law is statistically valid for a number of tropical cyclones. It allows a simple prediction scheme of hurricane's forecast cones.

Mots clefs : turbulence bidimensionnelle, vortex, cyclones

1 Introduction

Les cyclones tropicaux également connus sous le nom d'ouragans ou typhons sont des événements atmosphériques pouvant être dévastateurs, lors de leur passage sur des zones peuplées. Plusieurs modèles de prévision peuvent être utilisés pour prédire la trajectoire d'un cyclone tropical [1, 2]. Certains sont basés sur la connaissance des trajectoires des cyclones passées précédemment dans la zone géographique en question. D'autres modèles de prévisions utilisent des simulations numériques à grande échelle.[1] La trajectoire d'un cyclone tropical présente de grandes fluctuations autour d'une trajectoire moyenne rendant imprécis les modèles de prévisions et légitimant ainsi les approches de nature statistique. Ces fluctuations peuvent être dues à plusieurs facteurs tels que la proximité des terres et leur topographie, les variations à grande échelle de l'écoulement environnant ou encore les modifications de la structure du cyclone [1]. Les prévisions de trajectoire incluent généralement une estimation de l'écart de la trajectoire réelle par rapport à celle prédite sous forme de cône de prédiction de trajectoire. Ces derniers sont basés sur les statistiques d'écarts des trajectoires de cyclones précédents par rapport à leurs trajectoires prédites.

Nous montrons ici, pour les cyclones tropicaux, que les propriétés des fluctuations elles mêmes déterminent les couloirs possibles ou cônes de prévision de trajectoire. Ceci est basé sur de récentes observations suggérant que les fluctuations de la trajectoire de vortex génériques ou de cyclones tropicaux autour d'une trajectoire moyenne peuvent être modélisées à l'aide d'une loi universelle pour leur déplacement quadratique moyen. Cette loi apparaît pour le mouvement aléatoire de vortex génériques en écoulement bidimensionnel obtenus dans des expériences et simulations d'une demi bulle de savon chauffée à sa base [3, 4, 5]. Nous suggérons, en particulier, que les cônes de prévision de trajectoires aujourd'hui disponibles sont directement liés à cette mesure des fluctuations de trajectoire autour d'une moyenne. Ce déplacement quadratique moyen peut être mis sous la forme $\langle (X(t+t') - X(t))^2 \rangle \propto t^\alpha$ où l'exposant α peut prendre des valeurs plus petite (sous diffusion) ou plus grandes (super diffusion) que 1. Plusieurs exemples de comportements super diffusifs ont été observés expérimentalement

comme dans le cas d'un objet dans un écoulement turbulent. De tels comportements peuvent être reliés à l'interaction entre l'objet et le milieu environnant. Les vortex cohérents étudiés ici sont poussés aléatoirement par l'agitation turbulente de l'écoulement environnant.

2 Résultats

Afin d'introduire la notion de déplacement quadratique moyen et de montrer comment elle peut être appliquée aux cyclones tropicaux nous l'illustrons d'abord dans le cas d'expériences utilisant des bulles de savons. Lorsqu'une demi bulle de savon est chauffée par le bas à des températures entre $35^{\circ}C$ et $60^{\circ}C$, on peut observer de la convection thermique au niveau de l'équateur. A mesure que la température augmente les plumes thermiques émises depuis la partie chauffée de la demi bulle commencent à atteindre des latitudes plus élevées. Ces plumes produisent de temps en temps des vortex uniques de quelques centimètres de diamètre qui se déplacent aléatoirement sur la bulle. Ceci est illustré dans l'inset de la figure 1 où la trajectoire du vortex considéré présente des fluctuations importantes autour d'une position moyenne. La latitude et la longitude présentent ce comportement.

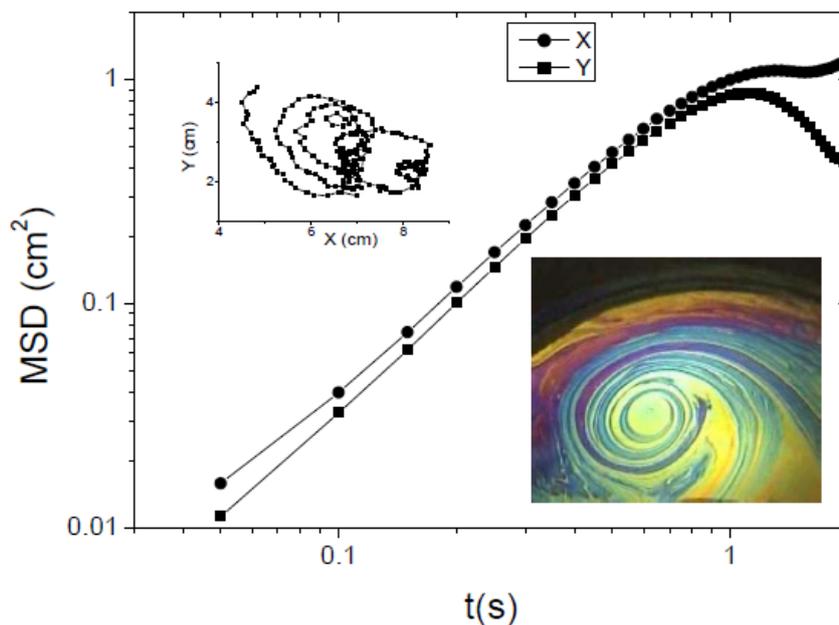


FIGURE 1 – Déplacement quadratique moyen pour deux vortex dans une demi bulle chauffée par le bas Insets : photo d'un vortex et sa trajectoire.

On peut déduire de ces signaux, les déplacements quadratiques moyens en longitude et latitude en fonction du temps $\langle (X(t+t') - X(t'))^2 \rangle$ pour lesquels on obtient une dépendance en loi de puissance avec un exposant supérieur à 1 (figure 1). Remarquez dans ce cas l'isotropie des fluctuations, la latitude et la longitude (notées X et Y) présentant à peu près les mêmes amplitudes pour le déplacement quadratique moyen. De plus l'exposant obtenu, qui vaut $\alpha = 1.6$, semble indépendant de la température et de la concentration en savon [3]. Cet exposant supérieur à 1 signe le comportement superdiffusif de ces vortex dû à de grands sauts aléatoires [3].

Peut on retrouver un tel comportement pour les cyclones tropicaux qui sont des vortex uniques à grande échelle? En fait les trajectoires des vortex génériques des écoulements turbulents bi-dimensionnels [3, 4, 5] et des cyclones tropicaux [3] montrent d'importantes fluctuations. Un déplacement le long d'une direction préférentielle à vitesse non nulle apparaît souvent dans le cas des cyclones tropicaux. Dans ce cas $X(t) = V_x t + \delta X(t)$ où V_x est la vitesse de dérive le long de la direction préférentielle ou dérive moyenne et $\delta X(t)$ l'écart à la direction préférentielle est la partie fluctuante. C'est le déplacement quadratique moyen de cette partie fluctuante qui suit une loi de puissance qui s'écrit : $\langle (\delta(t+t') - \delta(t'))^2 \rangle = A_c (t/t_c)^\alpha$. Les crochets représentent une moyenne sur le temps t' , δX est l'écart

à la trajectoire moyenne en longitude ou latitude. A_c est la valeur du déplacement quadratique moyen quand $t = t_c$ et t_c est une durée caractéristique. L'exposant α vaut environ 1.65 indiquant un comportement superdiffusif.

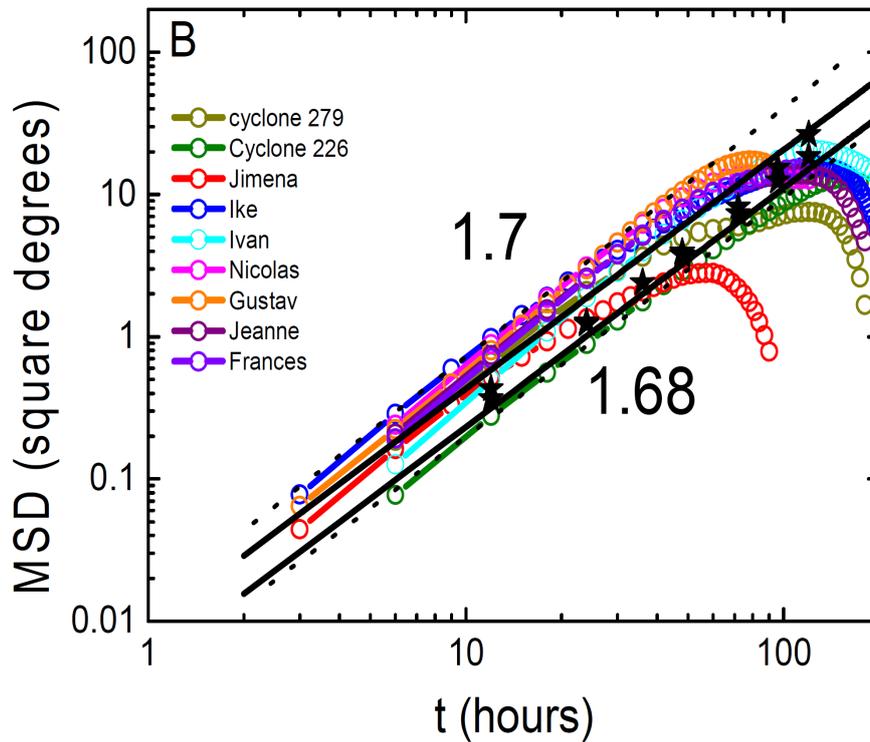


FIGURE 2 – Déplacement quadratique moyen en latitude en fonction du temps pour 9 cyclones différents. Les étoiles indiquent le carré du rayon en degré au carré du cercle utilisé pour calculer les cônes de prévision de trajectoires du National Hurricane Center.

Nous montrons ici, à travers l'analyse d'un ensemble de plus de 500 trajectoires de cyclones tropicaux de différents bassins, que cette loi est valide dans une grande majorité des cas. La latitude et la longitude de chaque cyclone furent tracées en fonction du temps séparément afin d'extraire la part fluctuante de la trajectoire. Un ajustement linéaire est effectué pour estimer la vitesse de dérive du cyclone en longitude et latitude. Cette dérive linéaire est alors soustraite de façon à ne conserver que la part fluctuante. On calcule ensuite les déplacements quadratiques moyens des parts fluctuantes en longitude et latitude. La représentation de l'évolution temporelle de ces déplacements quadratiques moyens permet de mesurer pour chaque cyclone l'exposant et la durée caractéristique de la loi de puissance α et t_c . On fixe $A_c = 10 \text{ degrés}^2$. On dispose alors des trois grandeurs caractérisant notre modèle simple : la vitesse de dérive, la durée caractéristique et l'exposant. Afin de vérifier la validité de ce modèle simple, on peut alors réaliser l'étude statistique de ces grandeurs pour chaque bassin séparément ou pour l'ensemble des bassins examinés.

Les résultats sont illustrés sous forme d'histogrammes des quantités extraites. Les histogrammes des exposants pour la longitude et la latitude montrent un pic de valeur bien définie 1.65 et malgré la dispersion des valeurs plus de 70% des cyclones (cf les probabilités cumulées en inset) sont bien décrit par un exposant compris entre 1.5 et 1.8. Aucune différence n'est observée entre la latitude et la longitude ni pour les différents bassins examinés.

Les histogrammes des durées caractéristiques montrent eux aussi, malgré la dispersion des valeurs, un pic bien défini mais avec une différence entre la longitude et la latitude (indiquant une anisotropie). Ce pic se situe à 40 heures pour la longitude et 60 heures pour la latitude. Les probabilités cumulées indiquent qu'environ 60% des cyclones ont des durées caractéristiques comprises entre 40 et 100 heures.

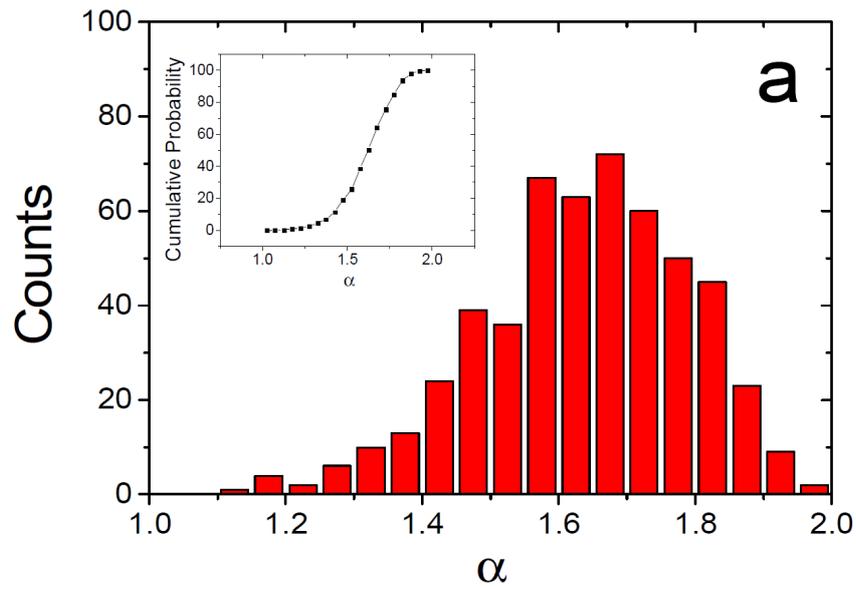


FIGURE 3 – Histogramme de l'exposant pour la longitude pour différent bassins cycloniques avec la probabilité cumulée. Valeur moyenne de l'exposant = 1.65

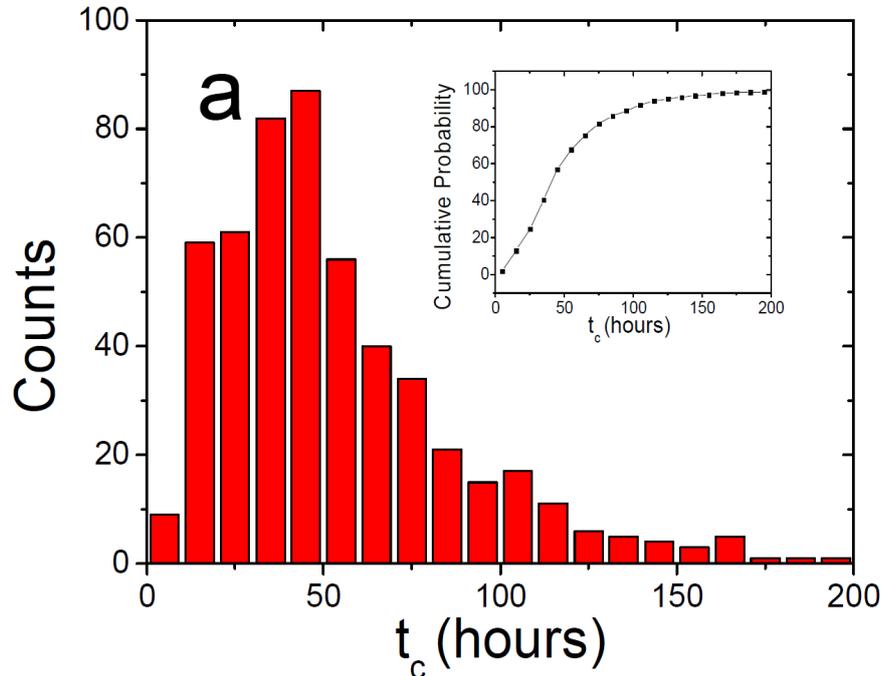


FIGURE 4 – Histogramme de la durée caractéristique t_c pour la longitude pour différent bassins cycloniques avec la probabilité cumulée. Valeur moyenne de $t_c = 55$ h

pour la latitude et 20 et 80 heures pour la longitude

3 Conclusions

Nous suggérons ici, que la loi de puissance révélée par une analyse extensive de trajectoires de cyclones tropicaux, peut être utilisée pour prédire, de façon simple et rapide les cônes de prévisions de trajectoires basés uniquement sur les fluctuations.

Supposons connues quelques positions du centre du cyclone précédents la prévision de trajectoire. Nous commençons par en tirer la tendance moyenne du mouvement. Le plus simple consiste à supposer que le cyclone poursuivra en ligne droite à la vitesse V_x donnée par les dernières positions en fonction du temps. La prévision donnée ici est linéaire mais en incluant les fluctuations on peut construire un cône de prévision de trajectoire. Le déplacement quadratique moyen est utilisé ici comme mesure de ces fluctuations et donc de l'incertitude de prévision. On peut écrire $X(t) = V_x t \pm \sqrt{A_c(t/t_c)^\alpha}$. Ici X désigne indifféremment la longitude et la latitude. La prévision démarre à $t = 0$ heure. Le premier terme constitue la prévision linéaire tandis que le deuxième mesure l'écart possible avec la trajectoire réelle. Les valeurs de α et t_c sont tirées de l'analyse statistique précédente.

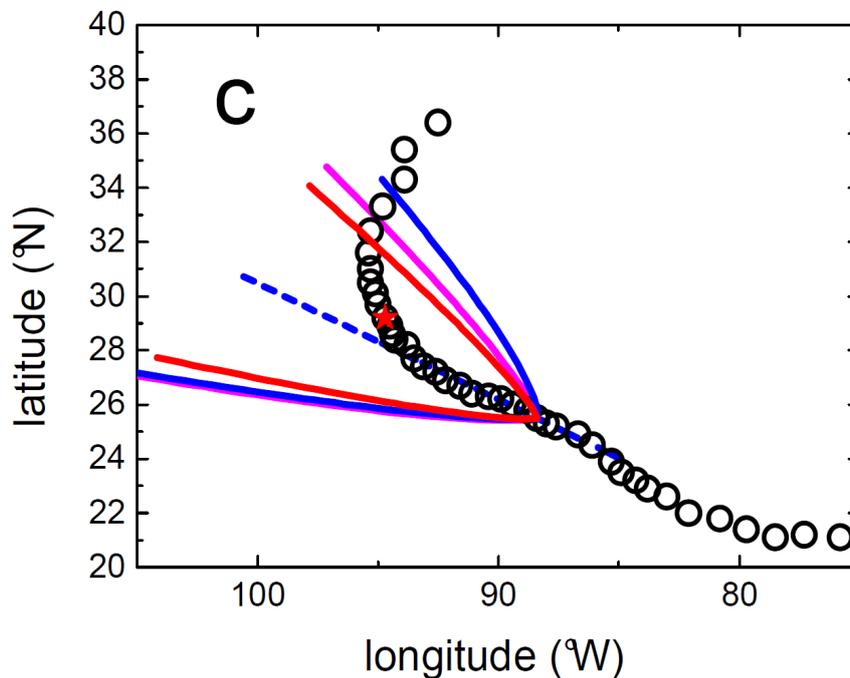


FIGURE 5 – Trajectoire de Ike (2008) latitude en fonction de la longitude : Pointillé bleu :prédiction linéaire 40 heures avant l'entrée sur les terres(étoile rouge). Cônes : Bleu :utilise la valeur moyenne de t_c pour le bassin atlantique. Magenta :utilise t_c calculé à partir du déplacement quadratique moyen de la trajectoire avant la date de prévision. Rouge : Cône prédit par le National Hurricane Center

Références

- [1] 'Global perspectives on Tropical Cyclones' Edited by J. C. L. Chan and J. D. Kepert World Scientific Publishing Co. 2010
- [2] K. Emanuel 1995 *Annu. Rev. Earth and Planet. Sci.*, **31**,75 (2003).
- [3] F. Seychelles, Y. Amarouchene, M. Bessafi, H. Kellay *Phys. Rev. Let.*, **100**,144501 (2008)
- [4] R. Kawahara and H. Nakanishi, *Journal of the Physical Society of Japan*, **76**,074001 (2007)
- [5] T. Yoshida, *Journal of the Physical Society of Japan* **78**,024004 (2009)