

» Cyclones quand les traqueurs ... se détraquent !

Les enjeux d'une bonne prévision de trajectoire et d'intensité de cyclones sont considérables sur la sécurité des personnes et des biens. Des outils d'aide à la prévision sont rendus nécessaires par le nombre élevé de modèles numériques disponibles pour prévoir l'évolution d'un cyclone. Aujourd'hui, chaque centre météorologique en charge de veille cyclonique possède ses propres outils de restitution automatique de trajectoire et d'intensité associés appelés traqueurs. A la Cellule Recherche Cyclones, les traqueurs utilisés ont des

défauts bien identifiés sur terre et lorsque les systèmes sont peu intenses. Pour pallier ces défauts, une étude préliminaire sur plusieurs paramètres météorologiques a été menée. Le traqueur proposé par la suite utilise le géopotential en altitude en remplacement de la pression au niveau de la mer pour se placer hors influence du relief. Il affine la position en surface du centre du système avec la force du vent en basses couches. Pour des perturbations passant sur terre, il se démarque avec un positionnement plus réaliste.

Lorsqu'un cyclone passe sur terre, le traqueur – outil informatique de prévision de trajectoire – perd sa trace. Objectif de la Cellule Recherche Cyclones : analyser les défauts du traqueur actuel pour l'améliorer dans la phase du cyclone la plus critique pour les populations.

D'après la définition du vocabulaire météorologique international (Organisation Météorologique Mondiale, 1992), un cyclone est une « perturbation d'échelle synoptique non accompagnée d'un système frontal prenant naissance au-dessus des eaux tropicales ou subtropicales et présentant une activité convective organisée et une circulation cyclonique, plus intense en surface qu'en altitude. ». Concrètement, un cyclone possède trois régions principales : des bandes spiralées, un mur et un œil. Avec un diamètre de 1000 km en moyenne, un tel système est facilement repérable grâce à la technologie satellitaire (voir encadré ci-contre).



L'atmosphère découpée en boîtes dans les modèles numériques.

Structure d'un cyclone

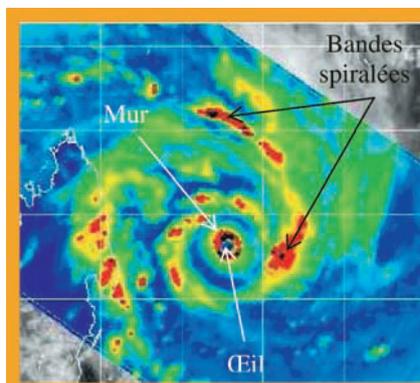


Image du satellite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) canal micro-ondes 85 GHz du 06 mars 2004 de 08h01 UTC, cyclone GAFILO

Œil

De forme circulaire ou elliptique, son rayon atteint 5 à 50 km. C'est la région la plus chaude du cyclone, dégagée et sèche en moyenne et haute troposphère mais presque saturée en humidité dans les basses couches. C'est dans l'œil qu'on enregistre le minimum de pression réduite au niveau de la mer (PMER - Pression enregistrée à une altitude « z » qui est ramenée à une altitude 0 mètre), le maximum de tourbillon relatif en valeur absolue. Le vent est minimal et souffle à 20 km/h environ.

Mur

Zone formée de Cumulonimbus pouvant atteindre 15 à 18 km d'extension verticale distante d'environ 50 km du centre du cyclone. C'est l'endroit où les précipitations sont les plus intenses et où les vents horizontaux et verticaux sont les plus forts. Les vents maximaux se situent vers 1 km d'altitude et décroissent avec l'altitude.

Bandes spiralées

En dehors du mur de l'œil, la convection profonde s'organise en longues bandes spiralées étroites autour de l'œil. Ce sont des cellules convectives très intenses et en perpétuel renouvellement où les particules d'air subissent plusieurs ascendances et subsidences (mouvements descendants).

Prévision numérique

S'il est relativement aisé pour les prévisionnistes de pointer le centre du cyclone en temps réel, prévoir sa trajectoire relève de l'expertise la plus poussée. Pour s'atteler à cette tâche, ils ont recours à de nombreux modèles numériques, adaptés aux latitudes tropicales. Ces derniers assimilent une grande quantité de données observées (images satellites, mesures au sol et en altitude, etc.) et fournissent, grâce aux supercalculateurs, des cartes de différents paramètres météorologiques à l'aide des équations régissant les lois de l'atmosphère.



Le supercalculateur NEC-SX8R de Météo-France

On obtient donc autant de cartes que de paramètres (vent, pression, température, humidité, etc.) multipliés par les niveaux d'altitude, et ce à chaque échéance temporelle (toutes les trois ou six heures selon les modèles). A titre d'exemple, pour le modèle Arpège-Tropiques – développé par Météo-France – 51 paramètres sont disponibles pour 37 niveaux de 00 à 102 heures d'échéances par pas de 06 heures, ce qui représente 32079 cartes différentes ! Le prévisionniste doit alors faire le tri pour ne retenir que les paramètres les plus pertinents, ceux qui présentent une signature du cyclone bien marquée.

À la traque du cyclone

Les recherches effectuées par Alexandre ALBERT-AGUILAR et Matthieu SOREL au sein de la C.R.C. (Cellule Recherche Cyclone de la Réunion, ndlr) et encadrées par Rémy LEE-AH-SIEM et Samuel WESTRELIN portent sur l'«étude de la sensibilité de la trajectoire des cyclones aux traqueurs automatiques».

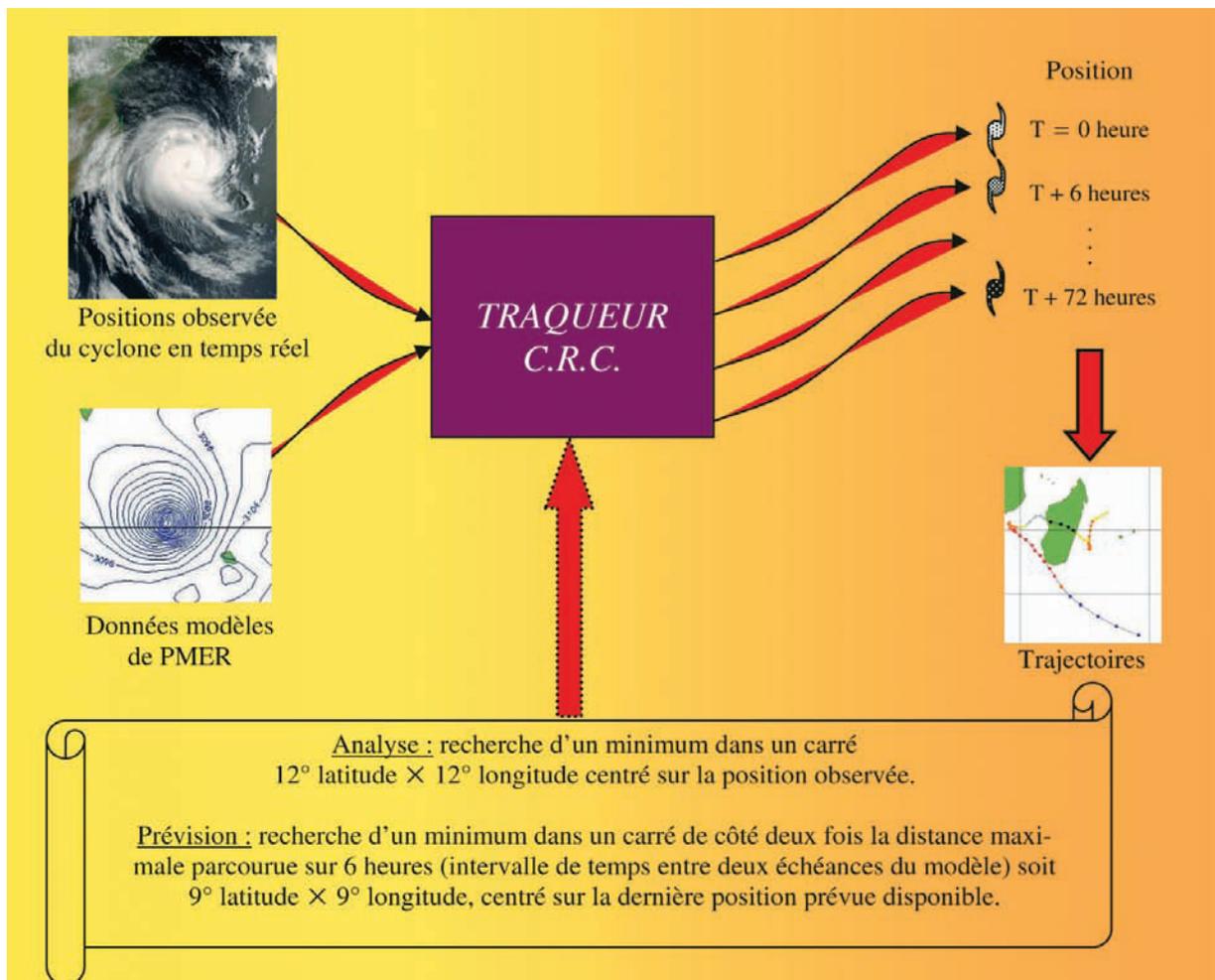
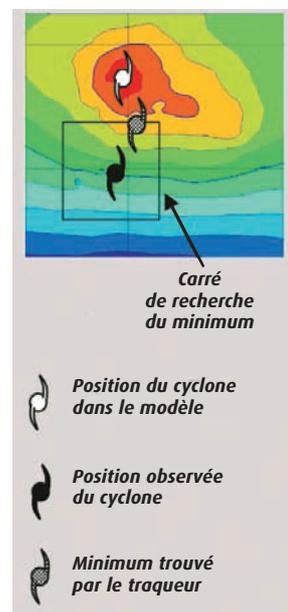
Derrière cet énoncé impénétrable se cachent des heures de documentation, de décryptage/programmation informatique, et d'analyses pour répondre aux interrogations suivantes : comment fonctionne un traqueur ? Comment traite-t-il les données du modèle ? Comment peut-il restituer la trajectoire d'un cyclone tropical ?

A partir de la dernière position observée du système tropical, le but est de chercher si le modèle détecte ce cyclone dans un carré centré autour de ce point. Plus précisément (**voir schéma en bas de page**) le traqueur recherche dans un carré un minimum de pression réduite au niveau de la mer (PMER) dans les données du modèle qu'il retient comme position du cyclone.

Au temps $t=0$ (dit analyse), le carré est centré sur la position observée et a pour côté 12° latitude \times 12° longitude. Pour les prévisions, le carré est centré sur la dernière position mémorisée du système et a pour côté 9° , soit deux fois la distance parcourue entre deux échéances (six heures) ; la vitesse maximale supposée de déplacement du système étant de 80 km/h, ce qui est largement supérieur à la réalité. En choisissant une vitesse aussi élevée, on est certain que le système est inclus dans le carré de recherche. La position du minimum est ensuite affinée par un algorithme idéal de lissage par splines.

Le traqueur fonctionne lorsque les données modèles de PMER restent dans la limite de seuils préétablis empiriquement. Le seuil de PMER est de 1005 hPa. Au-delà de cette pression, le traqueur ne fournit plus de positions pour le système. On estime que le modèle n'a pas de signature suffisante pour pouvoir considérer le système comme perturbé tropical. Il en est de même lorsque le traqueur trouve une position qui est située au bord du carré de recherche : on considère

que le centre du cyclone est à l'extérieur du carré de recherche (cf. figure ci-dessous). Dans ce cas, le traqueur ne retient pas la position du minimum (position manquante).



Des performances contrastées Le traqueur actuel

Rappelons que le but du traqueur est d'exploiter les données des modèles pour fournir la meilleure trajectoire possible. Ces données, même à l'analyse (temps $t=0$), sont entachées d'erreur (de l'ordre de 50 à 150 km.). L'étude consiste ici à évaluer le traqueur en laissant de côté l'erreur intrinsèque des modèles. Pour y parvenir, il a fallu contrôler sur un échantillon représentatif de cyclones du bassin sud-ouest de l'océan indien, que les positions trouvées par le traqueur correspondaient à un signal cohérent dans le modèle. C'est-à-dire à un minimum de PMER physiquement réaliste pour correspondre à la position du centre du cyclone. Les résultats sont édifiants !

Prenons l'exemple du cyclone tropical BOLOESTSE qui a sévi sur le bassin sud-ouest de l'océan indien entre le 20 janvier et le 06 février 2006. Lorsqu'il atteint le stade de cyclone sur mer, (**figure A**), le gradient de pression est très important (les isobares sont très serrées) : le minimum est bien localisé, le traqueur peut donc donner une position cohérente du centre du cyclone dans le modèle. En revanche, lorsque le cyclone est sur terre (**figure B**), le gradient est très lâche (il n'y a qu'une seule isobare). Le minimum se retrouve alors noyé dans une vaste zone où les valeurs de PMER sont homogènes. Le traqueur détermine la position du minimum mathématique qui ne représente pas une structure dépressionnaire physique. Ce minimum n'est donc pas assurément le centre de BOLOESTSE.

utilise des données inexploitable sur terre

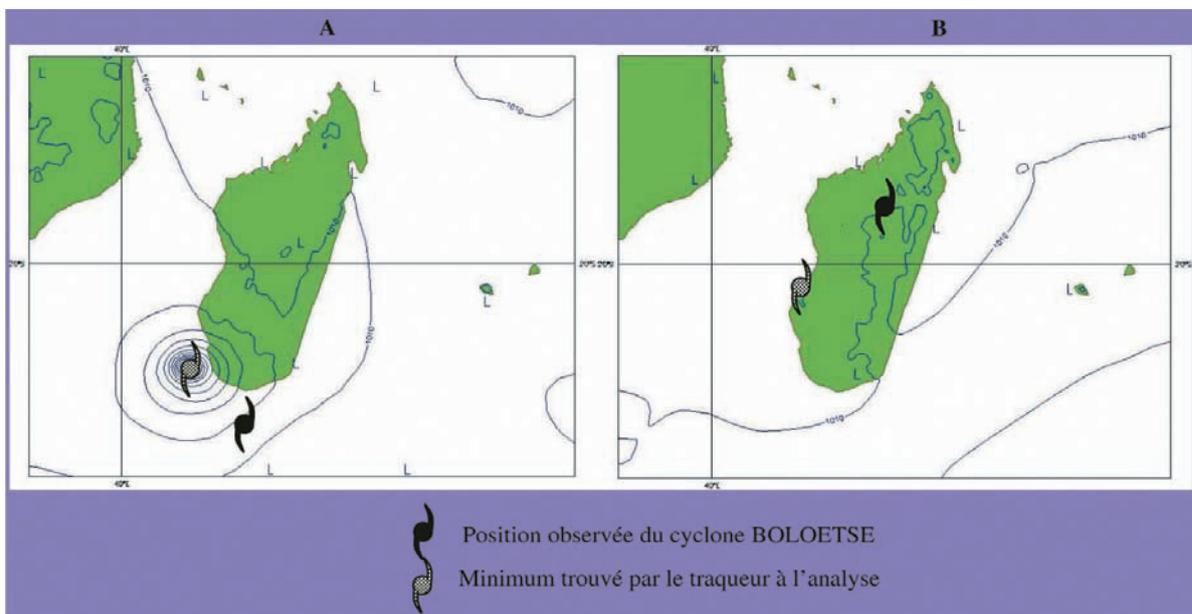
Ce problème a été constaté de manière récurrente sur tous les systèmes passant sur terre. L'explication vient du fait que lorsqu'un système atterrit, il s'affaiblit considérablement. Cet affaiblissement est dû principalement à la coupure des flux énergétiques et aux frottements plus importants sur terre que sur mer. Or, moins le système est actif, plus son signal est atténué et plus son suivi par le traqueur est délicat. A cet effet, s'ajoute l'influence du relief. Dans le bassin sud-ouest de l'océan indien, l'Afrique orientale, Madagascar et La Réunion possèdent des massifs montagneux élevés. Or il est déraisonnable de ramener des pressions atmosphériques au niveau de la mer pour des altitudes élevées. D'ailleurs l'O.M.M. (Organisation Météorologique Mondiale) stipule que seules sont réduites au niveau de la mer, les pressions atmosphériques enregistrées par des stations dont l'altitude n'excède pas 750 m. Outre cette règle, la résolution trop faible des modèles (10 à 50 km) entraîne une mauvaise représentation du relief qui nuit au champ de PMER.

Ces considérations montrent que le principal défaut du traqueur actuel est qu'il utilise des données de PMER inexploitable sur terre.

A la recherche de traces infailibles

Un cyclone sur terre est invisible dans le champ de PMER. « Mais pourquoi se contenter de suivre uniquement ce paramètre alors que tant d'autres peuvent caractériser le centre d'un système perturbé tropical ? » s'exclament en cœur Matthieu et Alexandre. C'est tout l'enjeu de leur projet de fin d'études. La structure du cyclone (**cf. encadré p.12**) nous montre que le tourbillon, la température, le vent horizontal, les vitesses verticales sont autant de traceurs potentiels. La pression peut être reprise, mais à un niveau au-dessus du relief pour s'affranchir de l'influence de ce dernier. Au préalable, il a fallu réaliser toute une batterie de tests sur ces différents paramètres afin d'évaluer leur pertinence de caractérisation du centre d'un cyclone. Seuls seront retenus ceux pour lesquels la signature cyclonique sera très nette. Devant le temps de calcul de telles opérations, nos apprentis météorologues ont dû se restreindre à un unique système. Le cyclone tropical BOLOESTSE a été immédiatement retenu car il présente l'intérêt d'une trajectoire chaotique et à la particularité de circuler au-dessus du relief de Madagascar. De plus, il passe par tous les stades d'intensité jusqu'à celui de cyclone tropical, ce qui fait de lui un exemple idéal et qui synthétise la plupart des comportements possibles d'un cyclone.

modèle Aladin-Réunion



Avant de tester le traqueur sur BOLOETSE avec d'autres paramètres, il paraît d'abord judicieux de s'intéresser à un champ équivalent à PMER pris à un niveau supérieur : le géopotential. Ainsi on s'affranchit du relief qui bruite le signal. Reste à choisir l'altitude. Il faut se placer le plus bas possible car c'est le centre du cyclone en surface qui est recherché, mais il faut arriver à se placer au-dessus du relief pour éviter toute dégradation du signal. Le niveau 700 hPa permet de s'élever à plus de 3000 mètres d'altitude et donc systématiquement au-dessus du relief de Madagascar et de beaucoup d'autres massifs dans le monde. Entre le minimum de géopotential de 700 hPa projeté en surface et le minimum de PMER, le décalage de position est infime (de l'ordre du kilomètre). Ce niveau apparaît ainsi comme le meilleur compromis possible.

Le minimum de géopotential ressort sans ambiguïté, même sur terre où les isohypses – lignes de géopotentials de mêmes valeurs – sont fermées et délimitent le centre du cyclone (cf. vignettes Z700).

Ce résultat très encourageant a incité nos stagiaires météo à poursuivre leurs recherches. La suite logique a été d'étudier le vent qui découle du géopotential. A un niveau donné, plus les isohypses sont resserrées (on par-

le alors de fort gradient de géopotential), plus le vent est fort.

Cependant les résultats des tests effectués sur la recherche d'un maximum de vent à 700 hPa sont décevants, en particulier sur terre où le gradient de géopotential n'est pas assez fort. Pour autant, ce paramètre n'est pas écarté, car la théorie met en évidence une structure du vent bien particulière : le vent est minimal au centre de l'œil (seulement 20 km/h en moyenne), et maximal dans le mur de l'œil à 1 km d'altitude (soit environ à 925 hPa). L'idée est simple : rechercher le minimum de vent à 925 hPa qui devrait être facilement repérable car entouré de vents très forts. La trajectoire restituée par le traqueur est trop chaotique, avec des sauts de position invraisemblables. Cet échec est en partie dû à la trop grande taille du carré de recherche. Le traqueur retient un minimum de vent à l'extérieur du cyclone, plus faible que celui au centre du cyclone.

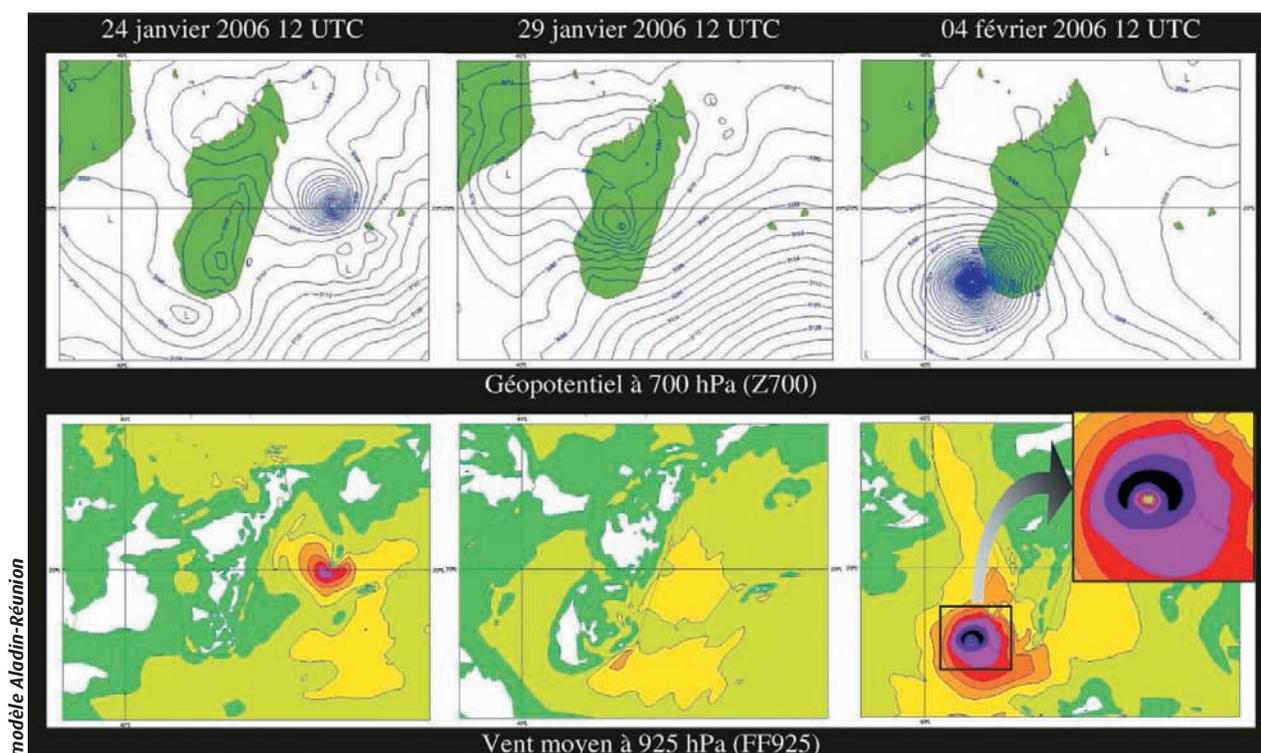
Le traqueur est ensuite testé avec le maximum de vent qui donne une trajectoire plus lissée, mais seulement lorsque le cyclone est mature et qu'il est sur mer. En outre, les positions trouvées correspondent au mur de l'œil (décalage d'environ 50 km par rapport au centre de l'œil). Pour pallier ces défauts, l'idée est de combiner les deux paramètres : le traqueur détermi-

ne d'abord dans le carré de recherche initial centré sur la dernière position observée du cyclone, le maximum de vent. Puis dans un carré de recherche plus petit (pour ne pas sortir du centre), centré sur ce maximum, il recherche le minimum de vent.

Cette combinaison donne des résultats très prometteurs au moment où BOLOETSE est un cyclone mature (04 février 2006). Lorsque le système a une faible intensité et a fortiori sur terre, la combinaison de vent n'a plus lieu d'être (cf. vignettes FF925).

Quel que soit leur niveau, les autres paramètres – le tourbillon, la température, les vitesses verticales – d'une part sont inexploitable sur terre et pour de faibles intensités, d'autre part, l'absence de structure cyclonique évidente en phase mature est réhabilitaire. Après, un test sur toute la saison cyclonique 2006-2007 le géopotential Z700 est retenu, comme paramètre utilisable dans tous les cas de figure. Dans le but d'optimiser les performances du nouveau traqueur, un masque terre-mer a été intégré. Il permet de prendre en compte la combinaison de vent afin de gagner en précision sur la localisation du centre du système en surface si celui-ci est sur mer.

Le temps est venu de faire connaissance avec masaa, le traqueur développé par Alexandre et Matthieu !



Masaa, petit dernier de la CRC (cf. encadré)

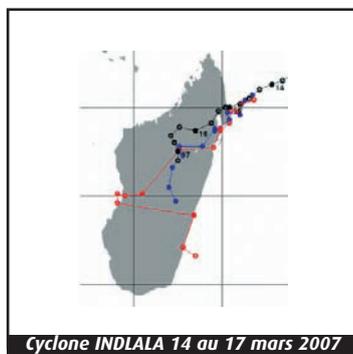
Choisir une taille adéquate pour le carré de recherche est primordial. Un carré de recherche trop vaste n'exclut pas le risque de traquer un autre système. Du fait de l'erreur du modèle, un carré de recherche trop petit n'englobera pas le système. 5° est donc un bon compromis pour tenir compte de l'erreur du modèle (autorise 280 km d'écart à l'analyse) sans risquer de détecter un autre système. De plus, climatologiquement, la vitesse maximale de déplacement des systèmes tropicaux n'excède pas 35 km/h. La vitesse maximale de déplacement du système est alors fixée à 40 km/h (soit un carré de 4,5° de côté pour un pas de temps de six heures en mode prévision).

La première étape consiste à chercher le minimum de géopotential dans le premier carré de recherche (de côté 5° en analyse et 4,5° en prévision). Si le minimum de géopotential se situe sur mer, la taille du carré de recherche est resserrée de moitié autour du minimum de Z700 pour trouver un maximum de vent à 925 hPa (étape 2). Le processus est réitéré en cherchant un minimum de vent dans un carré de 1° de côté, centré sur la position du maximum pour trouver le centre du cyclone (étape 3). Le carré est très petit pour éviter de trouver un minimum décorrélé de l'œil du cyclone. 1° est une taille adéquate car le mur de l'œil se situe à moins de 50 km du centre du système. Enfin, pour tenir compte des tests précédents : le vent sur terre n'est pas utilisé (masque terre-mer) car trop sensible au relief. De même lorsque le système est de faible intensité (seuils empiriques >20 m.s⁻¹ pour le maximum et <12 m.s⁻¹ pour le minimum).

Le comportement de masaa a ensuite été étudié sur un large panel de systèmes tropicaux, saisons cycloniques de 2003 à 2007 avec les modèles Aladin-Réunion et CEPMMT.

Nouveaux espoirs pour la prévision cyclonique

C'est sur des systèmes passant sur terre que masaa se démarque du traqueur de la C.R.C. Son erreur de position est deux fois moindre dans les premières échéances (125 km à l'analyse contre 250 pour le traqueur opérationnel). Pour des échéances plus lointaines (t >48h), la différence est moins marquée. En outre, masaa diminue nettement les fortes erreurs artificielles sur terre (80% des erreurs sont inférieures à 277 km contre 356 km pour le traqueur actuel). Ces statistiques confirment que le géopotential est bien plus pertinent que la PMER pour suivre des systèmes perturbés tropicaux



passant sur terre. Ci-dessus, le comportement chaotique de la trajectoire obtenue avec le traqueur de la C.R.C. (en rouge) se visualise très bien. Avec PMER, la trajectoire zigzague artificiellement autour du relief de Madagascar alors que masaa (en bleu), utilisé avec le géopotential Z700 est capable de positionner le météore (en noir) sur ce même relief.

Cependant, masaa est perfectible : une amélioration majeure serait qu'il recherche, sans point de départ, la présence de systèmes perturbés tropicaux dans le bassin. Les paramètres non retenus (cœur chaud par exemple) lors de l'étude préliminaire auraient un intérêt évident pour authentifier la présence d'une structure cyclonique. Bon vent à masaa qui devrait devenir prochainement le traqueur opérationnel de la C.R.C.

.....MASAA

ANATOMIE DE MASAA

T_C: Taille du carré de recherche
C_C: Centre du carré de recherche

Etape 1 : Recherche du minimum de Z700 (Z700_MIN)

t = 0 { T_C: 5° latitude x 5° longitude
C_C: dernière position observée
t > 0 { T_C: 4,5° latitude x 4,5° longitude
C_C: position précédente du système
Conditions : néant

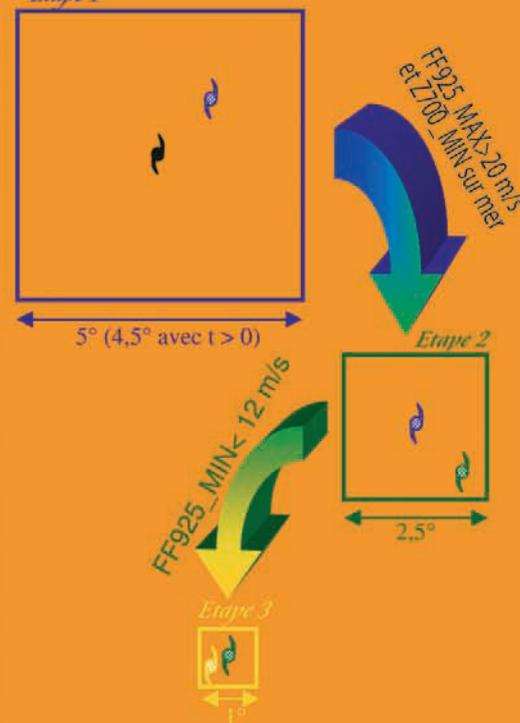
Etape 2: Recherche du maximum de FF925 (FF925_MAX)

T_C: 2,5° latitude x 2,5° longitude
C_C: position de Z700_MIN
Conditions : FF925 > 20 m/s et Z700_MIN sur mer

Etape 3: Recherche du minimum de FF925 (FF925_MIN)

T_C: 1° latitude x 1° longitude
C_C: position de FF925_MAX
Conditions : FF925 < 12 m/s

Etape 1



- position observée du système
- position du minimum de géopotential
- position du maximum d'intensité de vent
- position du minimum d'intensité de vent