

**EN-CAPE 17.248 C – V0**

**Détermination du vent de référence  
Eurocode pour la Nouvelle Calédonie**

*Julien GUILHOT*

**Direction Climatologie – Aérodynamique – Pollution – Epuration**

EN-CAPE 17.248 C – V0

# Détermination du vent de référence Eurocode pour la Nouvelle Calédonie

*Julien GUILHOT*

Direction Climatologie – Aérodynamique

Pollution – Epuration

*Cette étude a été réalisée  
à la demande du Gouvernement de la Nouvelle Calédonie  
suivant la commande N° N°17DAP00005  
en date du 10/03/2017  
Offre n° 8611-02 Volet 1*

*Nantes, le 21 décembre 2017*



**Julien GUILHOT**  
Ingénieur  
Climatologie-Aérodynamique-  
Pollution-Epuration



**Sylvain AGUINAGA**  
Chef de division  
Modélisation Numérique  
Climatologie-Aérodynamique-  
Pollution-Epuration

*Mots clés : statistique - valeur extrême - vitesse vent - cyclone tropical -  
méthode Monte-Carlo - DOM TOM*

*Nbre de pages : 28*

*Version n° : 0*

**CSTB**  
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT  
11 rue Henri Picherit – BP 82341 – 44323 Nantes cedex 3  
Tél. : +33 (0)2 40 37 20 00 – Siret 775 688 229 00035 – [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)  
Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2  
Établissement public à caractère industriel et commercial – RCS Meaux 775 688 229 – TVA FR 70 775 688 229  
MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / NANTES / SOPHIA ANTIPOLIS

# TABLE DES MATIERES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LES CYCLONES TROPICAUX .....</b>	<b>2</b>
2.1    CONDITIONS, LIEUX ET PERIODES DE FORMATION DES CYCLONES .....	2
2.2    LA STRUCTURE D'UN CYCLONE .....	2
2.3    LE VENT DE GRADIENT .....	3
2.4    LE VENT MOYEN A 10M .....	4
2.5    LE PARAMETRE DE HOLLAND .....	5
<b>3. LES DONNEES METEOROLOGIQUES .....</b>	<b>8</b>
3.1    LES OBSERVATIONS FOURNIES PAR METEO-FRANCE .....	8
3.2    LES OBSERVATIONS ISSUES DE LA JTWC .....	8
3.3    LES PARAMETRES CALCULES .....	10
3.4    LES SYSTEMES SUSAN ET PAM .....	11
<b>4. AJUSTEMENTS DES SERIES DE DONNEES .....</b>	<b>13</b>
4.1    LE NOMBRE D'EVENEMENTS PAR AN ( $N_c$ ) .....	13
4.2    LA VITESSE DE DEPLACEMENT DU SYSTEME ( $T$ ) .....	14
4.3    LA DIFFERENCE DE PRESSION ( $\Delta P$ ) .....	15
4.4    LA DISTANCE DU CENTRE DU CYCLONE ( $R$ ) .....	17
4.5    LE RAYON DE VITESSE MAXIMALE ( $R$ ) .....	17
4.6    L'ANGLE D'APPROCHE ( $\theta$ ) .....	18
<b>5. SIMULATIONS DE MONTE-CARLO .....</b>	<b>20</b>
5.1    PROCEDURE DE LA SIMULATION .....	20
5.2    PARAMETRES DE LA SIMULATION .....	21
5.3    LIMITATIONS DE CERTAINS PARAMETRES ISSUES DES LOIS PROBABILISTES.....	21
<b>6. CALCUL DES VITESSES DE REFERENCE ASSOCIEES A DES PERIODES DE RETOUR .....</b>	<b>22</b>
6.1    CALCUL D'UNE PERIODE DE RETOUR .....	22
6.2    RESULTATS .....	22
6.3    COMPARAISON AVEC LES REFERENCES REGIONALES.....	24
<b>7. CONCLUSION .....</b>	<b>26</b>
<b>8. REFERENCES .....</b>	<b>27</b>

## 1. INTRODUCTION

Sur le territoire de la Nouvelle Calédonie, la prescription faisant aujourd'hui autorité pour le dimensionnement au vent des bâtiments est la suivante : « *Pour tout calcul de structure, la valeur de base de la vitesse de référence du vent  $V_{b,0}$  en Nouvelle Calédonie est fixée à 32 m/s.* »

Cette vitesse de référence de 32 m/s est une vitesse moyenne sur 10 minutes à 10 mètres de hauteur sur terrain plat de type rase-campagne, associée à une période de retour de 50 ans, soit tel que défini par les normes (Eurocode 1, février 2005) et (Annexe Nationale, février 2005). Sa transposition au niveau de la mer conduit à une valeur d'environ 40 m/s, ce qui correspond aux conclusions des travaux menés par le CSTB dans les années 80.

Néanmoins depuis plus de 30 ans, les connaissances relatives à la modélisation des cyclones tropicaux se sont enrichies et la base de données météorologiques associée à ces phénomènes est aujourd'hui plus précise et plus complète. Il apparaît donc pertinent de réaliser une nouvelle étude de calcul du vent de référence en Nouvelle Calédonie qui permettrait soit de conforter la valeur actuellement prescrite, soit de l'actualiser.

La détermination de cette valeur de référence ( $V_{b,0}$  au sens de l'Eurocode 1) s'appuie sur la réalisation de simulations de Monte-Carlo (simulation d'un grand nombre de cyclones et tempêtes tropicales virtuels calibrés sur des événements observés) associées à des analyses statistiques. Il s'agit, à partir de données météorologiques relevées sur la plus longue période d'observation possible, d'établir des lois de distributions des différents paramètres caractéristiques des cyclones et des tempêtes tropicales (nombre d'événements par an, vitesse déplacement du système, différence de pression, distance du centre du cyclone par rapport à l'île, rayon de vitesse maximale et angle d'approche), afin de simuler les vents extrêmes pouvant approcher l'île. Une analyse statistique des données obtenues permet ensuite d'aboutir à des vitesses de vent associées à des périodes de retour, dont le vent de référence Eurocode associé à la période de retour de 50 ans.

L'étude mise en œuvre ici est globalement semblable à celle réalisée en 1986 pour définir les vents de références dans la plupart des DOM (Delaunay, 1986) et en 2012 pour Mayotte (Guilhot, 2012).

## 2. LES CYCLONES TROPICAUX

La Nouvelle Calédonie est située dans une région sujette aux cyclones tropicaux, ce sont alors ces phénomènes qui sont à l'origine des vents extrêmes pouvant survenir sur ce territoire et donc ceux qui doivent être caractérisés ici.

### 2.1 Conditions, lieux et périodes de formation des cyclones

Bien que difficilement prévisibles, les conditions, lieux et formations des cyclones sont aujourd'hui bien connus (Météo-France, 2017).

Ainsi, un cyclone prend toujours naissance au-dessus d'un océan au niveau d'une zone perturbée telle qu'un amas nuageux, une ligne de grains ou encore une onde tropicale. De plus, 3 conditions sont absolument nécessaires à sa formation :

- une eau chaude, l'océan doit avoir une température d'au moins 26°C sur au moins 50 mètres de profondeur,
- des vents homogènes, c'est-à-dire correspondant à un profil régulier (en force et en direction) de la surface de l'eau jusqu'à 12 à 15km d'altitude,
- une force de Coriolis suffisante, c'est-à-dire que la zone de formation ne peut se trouver trop près de l'équateur, la latitude doit être au moins de 6° Nord ou Sud.

Une fois ces conditions réunies, un courant d'air ascendant peut se mettre en place, provoquant une baisse de pression au niveau de la mer et donc la formation du cyclone.

L'emplacement de la Nouvelle Calédonie fait ainsi partie des zones du globe favorables à l'apparition et aux développements de ces phénomènes. La saison cyclonique s'étend dans cette région d'octobre à mai, avec un pic d'activité pour les 3 premiers mois de l'année. En moyenne, 3 cyclones par an sont recensés dans cette zone, la plupart du temps, leur trajectoire reste aléatoire.

### 2.2 La structure d'un cyclone

Un cyclone se présente sous la forme d'une énorme masse nuageuse, organisée en bandes spiralées qui convergent vers le centre du système appelé "œil" et pouvant s'étendre sur un diamètre de 300 à 500km de diamètre. Dans le cas de la Nouvelle Calédonie (hémisphère Sud), les vents tournent autour du cyclone dans le sens des aiguilles d'une montre.

La structure d'un cyclone n'est pas symétrique par rapport à son œil. En effet sa vitesse de déplacement, commandée essentiellement par l'environnement météorologique de grande échelle, favorise ou ralentit la vitesse de vent cyclonique suivant la position par rapport à la trajectoire. On distingue alors le demi-cercle dit "dangereux" du demi-cercle "manœuvrable" (Delaunay, 1986).

La Figure 1 ci-dessous représente la structure schématisée d'un cyclone de l'hémisphère sud dans un plan horizontal. Sur cette figure,  $R$  correspond au rayon de vitesse maximale du système,  $r$  à la distance entre le centre du système et l'île, et  $\theta$  l'angle d'attaque du cyclone sur l'île.

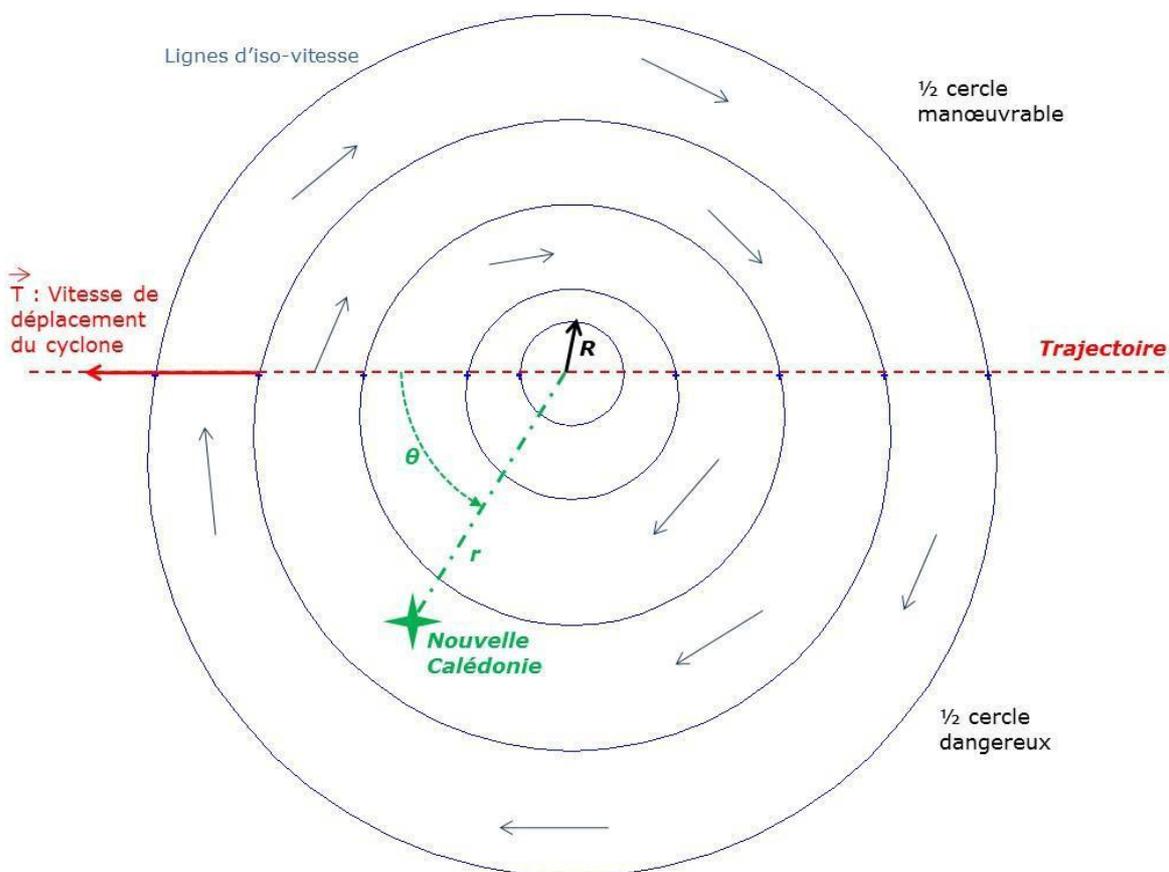


Figure 1: Schéma du champ de vent

### 2.3 Le vent de gradient

On suppose ici que le système est stationnaire. Selon (Georgiou P.N., 1983), les forces agissant sur l'air sont alors : la force exercée par le gradient de pression horizontal, celle due à l'accélération de Coriolis et celle résultant de l'accélération centrifuge. L'équilibre de ces forces permet alors d'écrire que le vent en altitude (c'est-à-dire où les forces de frottement sont négligeables), noté  $V_g$ , et également appelé vent de gradient, satisfait en un site donné l'équation suivante :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = f V_g + \frac{V_g^2}{r} \quad (1)$$

Avec :

- $\rho$  la masse volumique de l'air,
- $P$  la pression de l'air au point étudié,
- $r$  la distance entre le centre du système et le point étudié,
- $f$  le paramètre de Coriolis,

- T la vitesse de déplacement du cyclone,
- $\theta$  l'angle d'attaque du système au point considéré (tel que représenté Figure 1).

Le vent de gradient  $V_g$  peut alors être obtenu à partir de cette équation à condition de connaître le champ de pression. La très grande majorité des études concernant la modélisation des cyclones (par exemple (Georgiou P.N., 1983), (Harper, 1999) et (Lee K.H., 1980)) utilise alors la formule proposée par (Holland, 1980) :

$$V_g = \frac{1}{B} \left( \frac{\Delta P}{P_n - P_c} \right)^{1/B} \quad (2)$$

Où :

- $P_c$  est la pression au centre du cyclone,
- R le rayon de la vitesse maximale,
- $\Delta P = P_n - P_c$  avec  $P_n$  la pression "normale" hors du système,
- B une constante ou loi, appelée paramètre de Holland.

La caractérisation du paramètre de Holland constitue l'une des principales difficultés de la modélisation (Vickery P.J. e. a., 2009), ce point est détaillé dans la partie 2.5 du présent rapport.

La dérivation de l'équation (2) permet d'aboutir à l'expression ci-dessous :

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\Delta P}{R} \left( \frac{r}{R} \right)^{2B-1} \quad (3)$$

A partir de (1) et (3), on obtient alors :

$$\frac{dV_g}{dr} = \frac{1}{B} \left( \frac{\Delta P}{P_n - P_c} \right)^{1/B} \left( \frac{r}{R} \right)^{2B-1} \quad (4)$$

En posant  $\frac{dV_g}{dr} = -\frac{V_g}{r}$ , la vitesse  $V_g$  est alors donnée par la formule :

$$V_g = \frac{1}{B} \left( \frac{\Delta P}{P_n - P_c} \right)^{1/B} \left( \frac{r}{R} \right)^{2B-1} \quad (5)$$

Ce modèle initialement proposé par (Georgiou P.N., 1983) permet d'estimer le vent de gradient  $V_g$  à une distance r de l'œil du cyclone en fonction des différents paramètres décrits.

## 2.4 Le vent moyen à 10m

Pour obtenir une vitesse de référence  $V_{ref}$  de type Eurocode (soit une vitesse de vent à 10 mètres au-dessus du sol pour un site plat de rugosité rase-campagne) à partir de la vitesse  $V_g$ , deux étapes sont nécessaires :

- Calculer le gradient de vent vertical permettant de calculer  $V_{10}$ , la vitesse à 10m au-dessus de la mer, en fonction de  $V_g$ ,
- Estimer le coefficient  $V_{ref}/V_{10}$  donnant la réduction de la vitesse moyenne à 10m lors du passage Mer-Terre.

L'évaluation du rapport  $C_0 = V_{10}/V_g$  a fait l'objet de nombreuses publications depuis le milieu des années 70 (Vickery P.J. e. a., 2009). Suivant les sources, on peut ainsi trouver des valeurs variant

de 0.650 à 0.950. Néanmoins dans les faits,  $C_0$  n'est pas une valeur constante et dépend de chaque système cyclonique considéré. Dans les cas présent, nous avons retenu la valeur la plus fréquemment citée dans la littérature, à savoir  **$C_0=0.845$** .

En ce qui concerne le passage d'une vitesse mer à une vitesse rase-campagne, l'application de l'Eurocode conduit à une réduction de 18.6% à 10 mètres. Cependant, les relations proposées par l'Eurocode n'ont pas été établies pour des vents cycloniques. La littérature scientifique s'est également beaucoup intéressée au sujet, depuis (E. Simiu, 1976) jusqu'à (Powell M.D., 2005). Globalement, la diminution du vent cyclonique lors du passage de la mer sur la terre semble un peu plus faible que celle fournie par la formule de l'Eurocode et ce facteur semble fortement lié à l'intensité du phénomène. Les valeurs issues de la littérature varient alors entre 10 et 20% de diminution de la vitesse au niveau des côtes. Plus le cyclone est intense, plus cette diminution est faible. Là encore, nous choisissons de retenir la valeur la plus fréquemment utilisée, à savoir une diminution de **14%**.

Enfin, il convient de noter que les vitesses de référence données dans l'Annexe Nationale sont généralement utilisées pour calculer une pression de référence  $P_{ref}$  à partir de la formule :

$$P_{ref} = \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2$$

Conformément à l'usage, la masse volumique de l'air considérée ici pour la modélisation de cyclones tropicaux est fixée à  $1.15 \text{ kg/m}^3$ , alors que (Annexe Nationale, février 2005) stipule d'appliquer une valeur de  $\rho$  de  $1.225 \text{ kg/m}^3$ . La vitesse  $V_{b,0}$  déterminée dans la présente étude ayant pour vocation d'être appliquée dans le cadre de (Eurocode 1, février 2005), il convient donc prendre en compte l'effet de cette différence de valeur de la masse volumique de l'air. L'impact de cette différence doit être pris en compte au niveau des pressions de référence.

Ainsi, le fait de considérer une masse volumique de l'air de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  dans le cas des cyclones tropicaux conduit, pour conserver une pression de référence identique, à diminuer la vitesse de

référence associée d'un coefficient :  $\sqrt{1.225/1.15}=0.989$ .

Au final, on obtient :  **$V_{ref}/V_g = 0.704$** .

## 2.5 Le paramètre de Holland

Malheureusement il n'existe pas à ce jour de loi établie permettant de connaître précisément la valeur du paramètre de Holland (Levinson D.H., 2010). S'il est admis qu'il reste compris entre 0.5 et 2.5, il semble dépendre de chaque cyclone. Différents travaux basés sur des observations météorologiques ont proposées des lois empiriques permettant de calculer B. Néanmoins, ces lois diffèrent notablement les unes des autres suivant les régions du globe pour lesquelles elles ont été déterminées. Ainsi, on a :

- (Harper B.A., 1999) proposent  $B = 2.0 - 160^{-0.001}$  pour les côtes de l'Australie.

- (Powell M.D., 2005) donnent  $B = 1.881 - 0.00557 * \psi - 0.01097 * \psi^2$  aux alentours de la

Floride (avec  $\psi$  correspondant à la latitude en degrés),

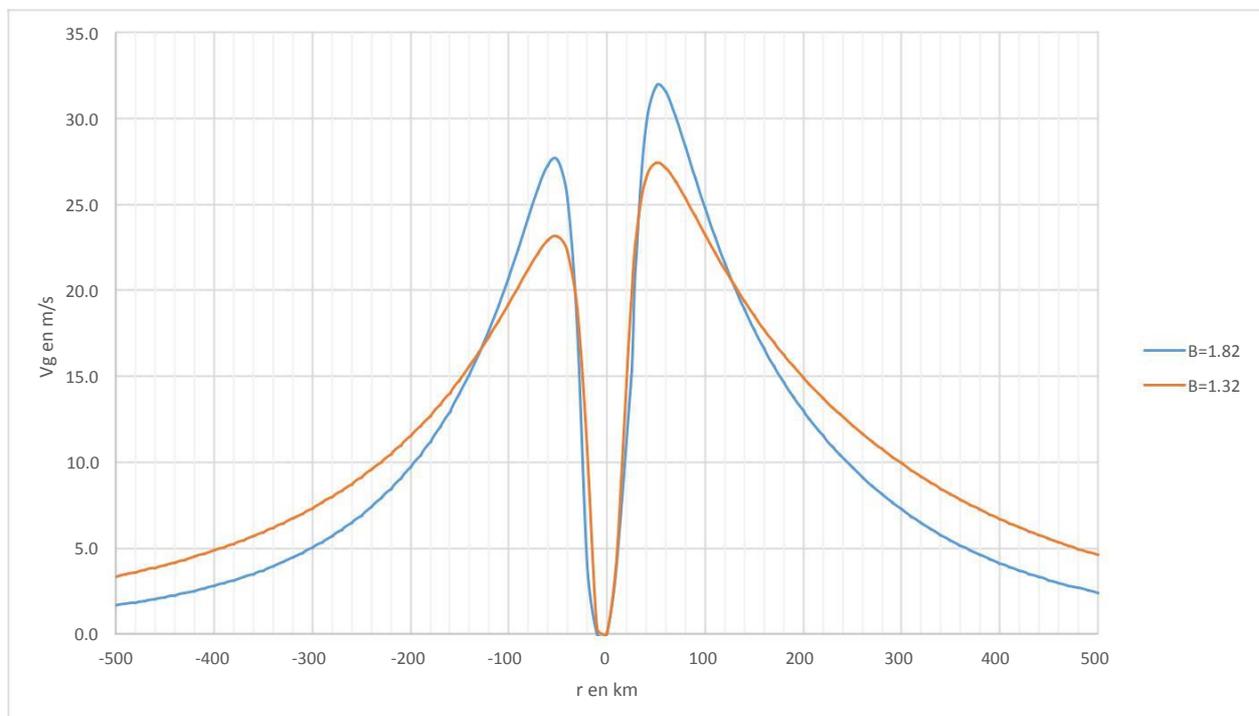
- (Vickery P.J., 2008) établissent pour la zone du Golfe du Mexique la formule suivante :  $B = 1.883 - 0.326 * \sqrt{\psi}$ ,

- (Wang Y., 2012) proposent au niveau du Texas d'utiliser  $B = 1.38 + 0.00184\Delta - 0.00309 * \psi$ ,

- dans la zone du Sud-est de la Chine, (Xiao X.F., 2011) proposent une loi du type :  $\ln V_g = \ln V_{max} + B \ln \left( \frac{r}{r_0} \right)$ , mais avec une corrélation qui paraît faible,

- (Willboughby H.E., 2004), par comparaison avec un grand nombre d'observations météorologiques dans l'hémisphère Nord, ont obtenu :  $B = 0.866 + 0.0177 * V_{max} - 0.0094 * \psi$ .

L'application de ces différentes lois au cas de la Nouvelle Calédonie (à partir des valeurs moyennes observées) conduit à un paramètre de Holland variant entre 1.32 et 1.82. Or le calcul du vent de gradient est particulièrement sensible à la valeur de ce paramètre. En effet plus la valeur de B est élevée, plus la vitesse maximale est importante, et plus sa décroissance est rapide au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'œil du système, comme le montre la figure 2 ci-dessous représentant l'évolution de  $V_g$  en fonction de la distance à l'œil pour  $B=1.32$  et  $B=1.82$ .



**Figure 2 :  $V_g$  en fonction de  $r$  pour 2 valeurs de B**

Pour déterminer la valeur du paramètre de Holland, il paraît donc nécessaire de recourir à des données observées permettant de caractériser au mieux les cyclones de la zone qui nous intéresse. Néanmoins, ces données ne sont pas à notre disposition concernant l'île de la Nouvelle Calédonie.

Dans l'étude ayant permis d'établir la vitesse de référence pour les DOM -TOM (Delaunay, 1986), la valeur de B était fixée à 1.0. Cette valeur était utilisée de manière globale, aussi bien pour les Antilles que pour la Réunion, ou encore la Nouvelle Calédonie. La pertinence de ce choix avait été justifiée par une comparaison avec des mesures de pression en période cyclonique. Néanmoins, la valeur de la pression est beaucoup moins impactée par le paramètre de Holland que la vitesse du vent de gradient.

A partir des données météorologiques de pression obtenues via le site de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pour la station de Nouméa, nous avons essayé d'établir des corrélations permettant d'optimiser la valeur de ce paramètre B. Cependant, aucune adéquation satisfaisante n'a pu être obtenue.

En l'absence d'informations complémentaires relatives à la modélisation du paramètre B de Holland, 3 approches ont alors été retenue :

- 1)  $B = 1.00$ , valeur retenue par (Delaunay, 1986) pour les calculs des vents de références dans la plupart des DOM-TOM,
- 2)  $B = 1.15$ , valeur retenue par (Guilhot, 2012) pour le calcul du vent de référence à Mayotte,
- 3)  $B = 2.0 - \frac{900}{160}$ , selon la formule de Harper and Holland, seule formule de la littérature établie pour une zone relativement proche de la Nouvelle Calédonie (côtes australiennes).

### 3. LES DONNEES METEOROLOGIQUES

L'étude réalisée ici est basée sur l'utilisation d'observations météorologiques. Ces données proviennent de plusieurs sources différentes, dont certaines ont été calculées dans le cadre de cette étude.

#### 3.1 Les observations fournies par Météo-France

Ces observations, fournies par la direction régionale de Météo-France en Nouvelle Calédonie, constituent la base climatologique de l'étude. La période considérée s'étend de 1977 à 2017 et comprend 39 saisons cycloniques complètes. Les données concernent les systèmes étant passés lors de cette période à moins de 1000 kilomètres de l'île de la Nouvelle Calédonie.

Au total, 182 systèmes sont référencés. Pour chacun de ces systèmes, Météo-France fournit notamment les paramètres suivants :

- le nom du système concerné,
- sa position,
- la date associée,
- la pression minimale au centre du système,
- la vitesse moyenne maximale du vent.

#### 3.2 Les observations issues de la JTWC

Parmi, les paramètres physiques manquants de la base de données précédente figurent le rayon de vitesse maximale. Or ce dernier est nécessaire à la bonne modélisation des cyclones (cf. 2.3). Par ailleurs, la base de données du Joint Typhoon Warning Center (JTWC Southern Hemisphere Best Track Data, 2017) propose des données conséquentes sur un très grand nombre de phénomènes cycloniques, notamment pour l'hémisphère Sud. On y trouve notamment des valeurs de rayon de vent maximal.

L'ensemble des données des phénomènes ayant approché la Nouvelle Calédonie à moins de 1000 km a été récupéré pour la période 2002-2014. Cette période de référence a été choisie car d'une part à partir de 2002 les valeurs de rayon de vent maximal peuvent être considérées comme fiables, et d'autre part, la base de données n'est aujourd'hui disponible que jusqu'en 2014. Sur cette période, 27 systèmes ont pu être recensés avec le paramètre « rayon de vent maximal ».

De plus, une comparaison des valeurs proposées par les 2 bases de données a été réalisée. Les corrélations obtenues sur le paramètre P (différence de pression) et les vitesses maximales montrent une bonne adéquation entre les données issues de Météo-France et la JTWC pour la période 2002-2014. L'utilisation des valeurs du rayon de vent maximal provenant de la JTWC constitue donc une approche pertinente. Il s'agit alors des observations qui seront utilisées dans la suite de l'étude. Pour les autres paramètres, les données Météo-France sont conservées, car supposées plus précises.

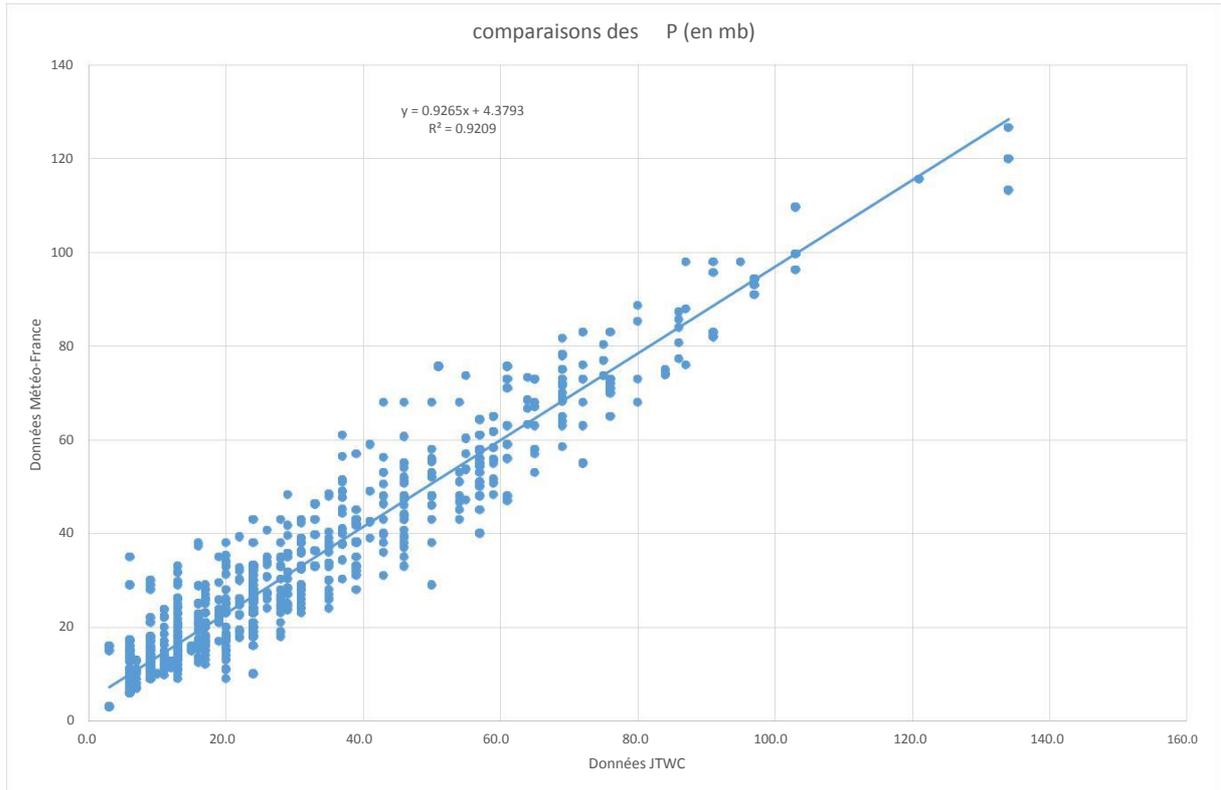


Figure 3 : comparaison des données P

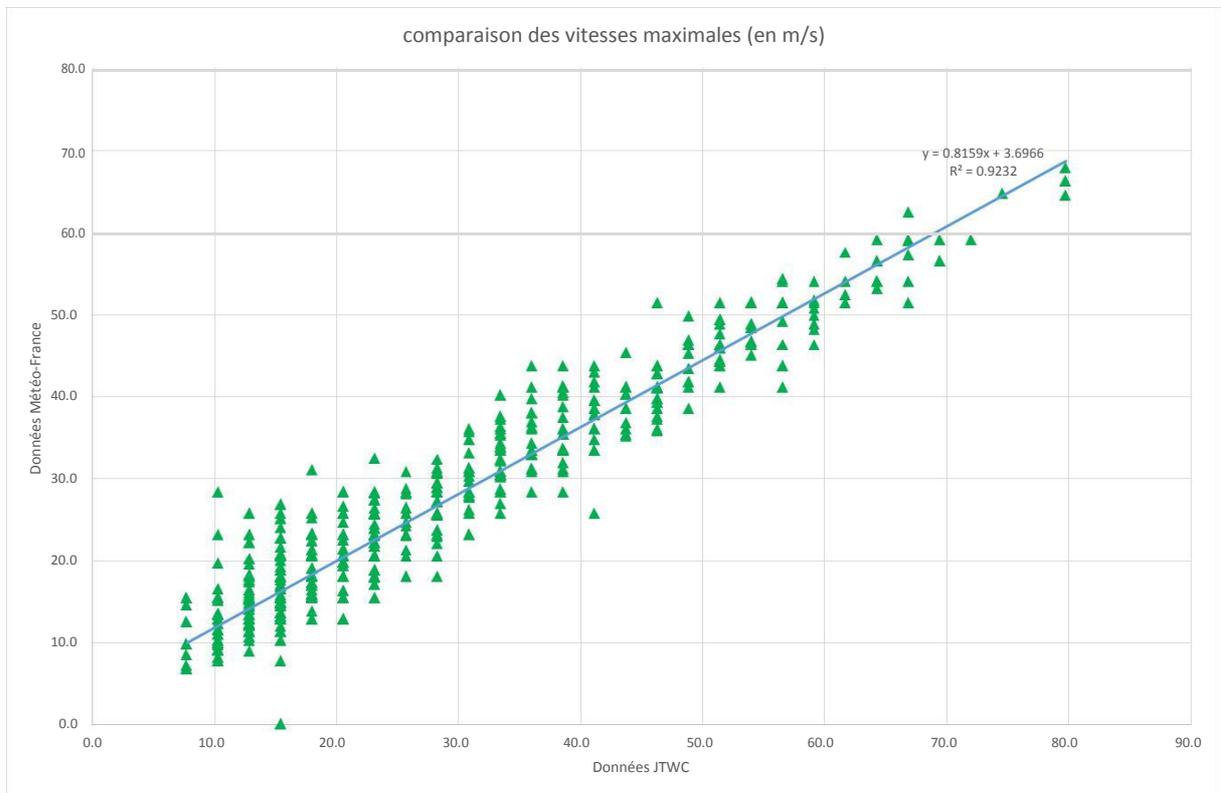


Figure 4 : comparaison des vitesses maximales

### 3.3 Les paramètres calculés

Les 3 paramètres encore manquants ( $T$  : vitesse de déplacement du cyclone,  $r$  : distance par rapport à l'île et  $\theta$  : angle d'approche) sont déduits des observations déjà disponibles.

La **vitesse de déplacement**  $T$  est calculée (en m/s) en considérant la distance parcourue par le système entre 2 points de mesure divisée par l'intervalle de temps associé (pour un même système). On suppose alors que la Terre est parfaitement ronde, avec un rayon de 6378km et que le système se déplace en ligne droite entre 2 points d'enregistrement.

La **distance par rapport à l'île**  $r$  (en km) est calculée en assimilant l'île à un segment  $[AB]$ . C'est la distance minimale entre la position du centre du système et ce segment qui est retenue pour chaque enregistrement.

L'**angle d'approche**  $\theta$  est calculé entre la direction de la trajectoire du cyclone et de la distance minimale par rapport au segment représentant l'île. La valeur de  $\sin(\theta)$  est positive dans le demi-cercle dit dangereux.

La Figure 5 ci-dessous propose une représentation de ces 3 paramètres à travers l'exemple de la trajectoire de LUSI (schématisée en orange) en 2014.

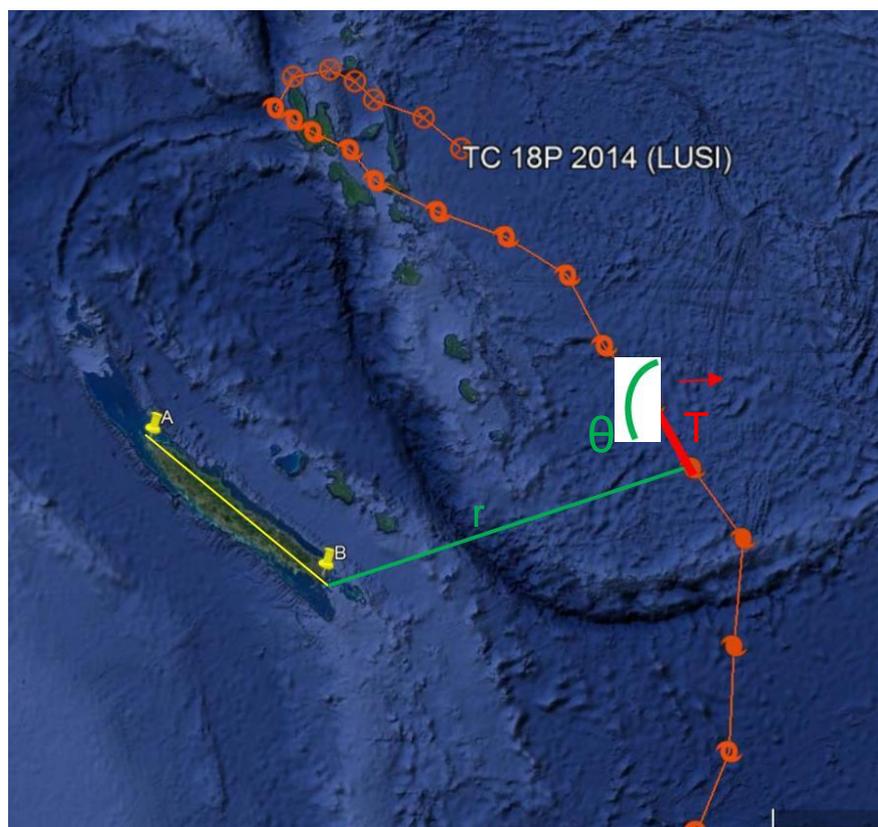


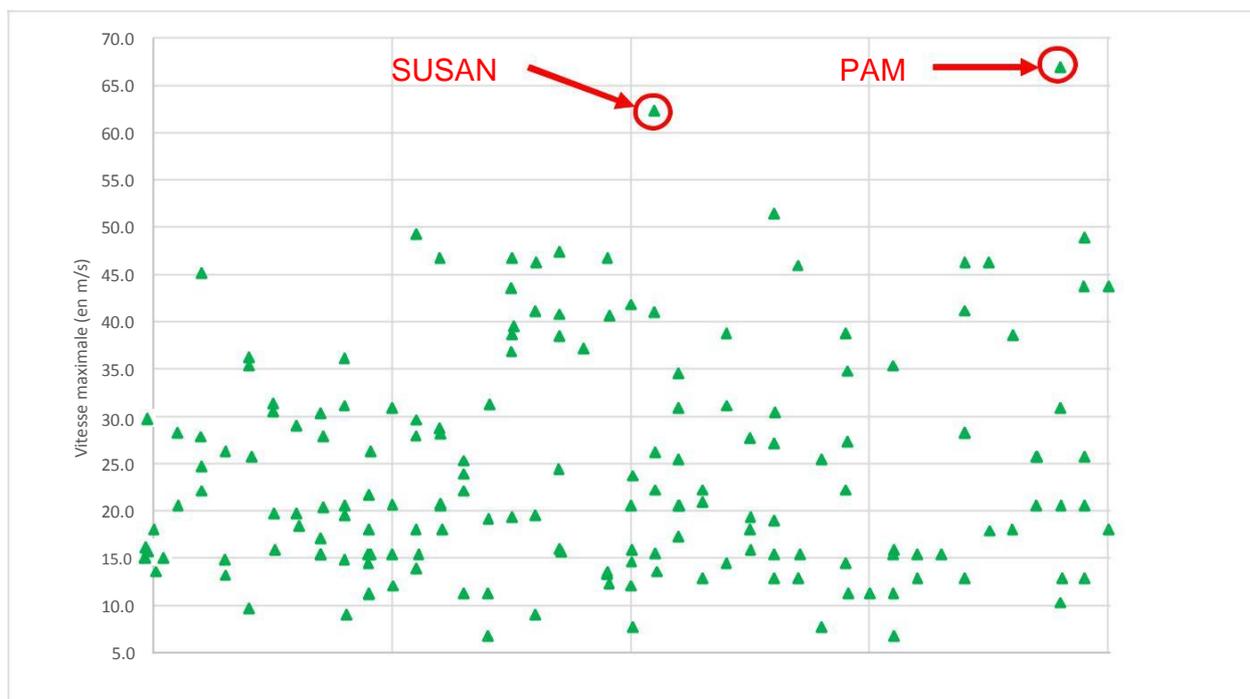
Figure 5 : représentation des paramètres  $T$ ,  $r$  et  $\theta$   
à travers l'exemple de la trajectoire de LUSI en 2014

### 3.4 Les systèmes SUSAN et PAM

Une première analyse des systèmes recensés montrent que la base de données ainsi constituée comprend 2 cyclones dont les vitesses moyennes maximales sont particulièrement sévères, lors de leur passage au plus près de la Nouvelle Calédonie, par rapport au reste de l'échantillon. Ces 2 phénomènes notables sont :

- SUSAN en janvier 1998,
- PAM en mars 2015.

Les vitesses obtenues sont environ 15% supérieures à la 3<sup>ème</sup> valeur la plus élevée de l'échantillon, comme le montre la Figure 6 qui représente l'ensemble des vitesses maximales des systèmes de la base de données (lors de leur passage au plus près de l'île).



**Figure 6 : représentation des vitesses maximales de tous les systèmes de la base de données**

Une analyse plus précise de ces 2 cyclones montre que ces fortes vitesses proviennent essentiellement des valeurs de pression « hors norme » associées. La Figure 7 met en évidence cette particularité, en représentant les différences de pression  $P$  retenues pour l'ensemble des systèmes. Là encore, les phénomènes SUSAN et PAM se démarquent très nettement.

Se pose alors la question de la prise en compte ou non de ces 2 phénomènes pour la suite de l'étude. En effet, considérer ces 2 cyclones particuliers (c'est-à-dire les valeurs de pression associées) conduira forcément à une estimation de la valeur  $V_{b,0}$  plus conséquente. D'un côté, il est vrai que ces 2 valeurs semblent avoir réellement existées, il est donc difficilement justifiable de les écarter. De l'autre, il est possible d'estimer qu'elles sont la conséquence de phénomènes

particulièrement rares et hors norme, et donc que leur prise en compte serait bien trop sévère pour la détermination d'une variable associée à une période de retour de 50 ans.

A titre d'information, la même problématique s'était posée lors de l'établissement de la carte des vents de référence sur la Métropole, la question concernait alors les vitesses de vent des tempêtes de décembre 1999. Au terme du débat, ces valeurs n'avaient pas été conservées dans les échantillons de données météorologiques utilisés.

Dans la suite, les 2 options seront évaluées.

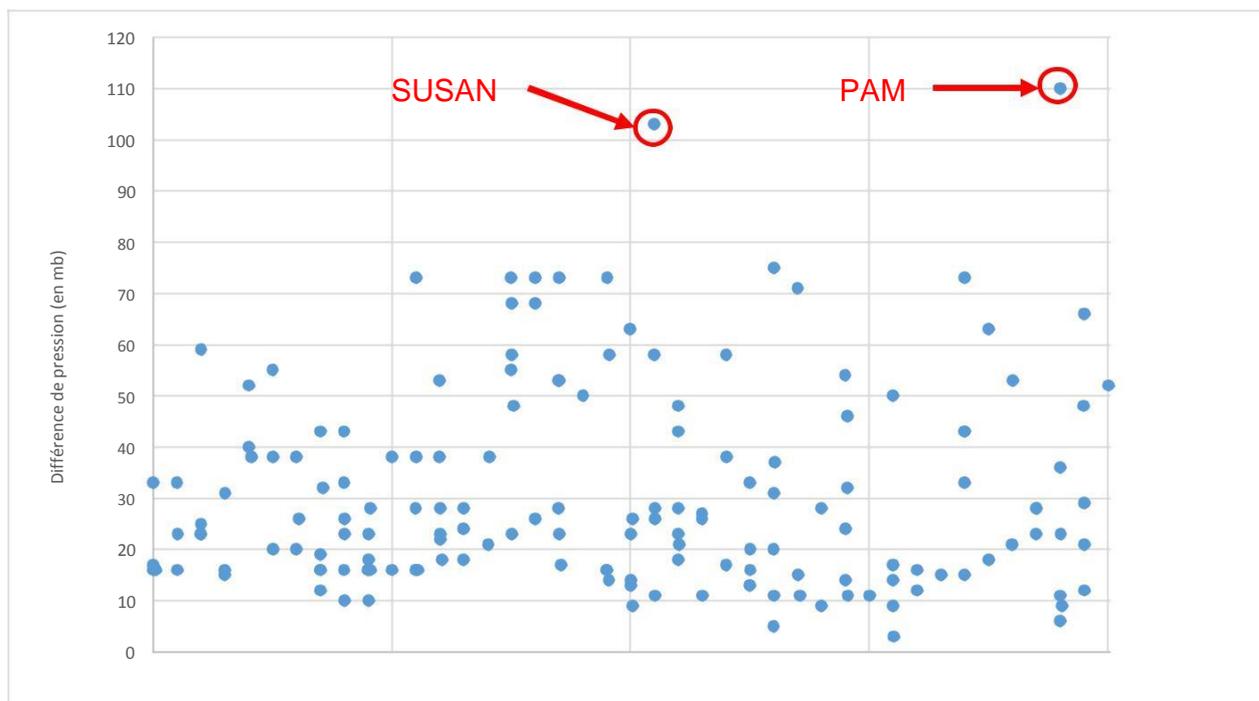


Figure 7 : représentation des vitesses maximales de tous les systèmes de la base de données

## 4. AJUSTEMENTS DES SERIES DE DONNEES

Pour permettre la réalisation des simulations de Monte-Carlo, les séries de données considérées ci-dessus doivent être ajustées suivant des lois de probabilité. Dans cette partie sont alors présentés les différents ajustements réalisés pour chaque paramètre utile à la modélisation des cyclones.

Pour chacun des paramètres, différents types de loi sont testées en utilisant plusieurs méthode d'ajustement : méthode des moments (MOM), des moindres carrés (LS) ou du maximum de vraisemblance (MLE), afin de conserver le résultat le plus réaliste. De plus, pour assurer la pertinence des choix retenus, des tests d'adéquation sont également réalisés dans chaque cas: test du  $\chi^2$ , test de Kolmogorov-Smirnov, test de Shapiro-Wilk, calcul du coefficient de détermination...

Pour les paramètres  $N_c$  (nombre d'évènements par an) et  $r$  (distance par rapport à l'île), seules les systèmes ayant approchés l'île à moins de 500 km ont été retenus.

### 4.1 Le nombre d'événements par an ( $N_c$ )

117 événements ont été considérés sur une période de 39 saisons cycloniques, ce qui conduit à un nombre d'événement par an  $N_c$  moyen de : 3.0.

La répartition des événements sur cette période est alors de :

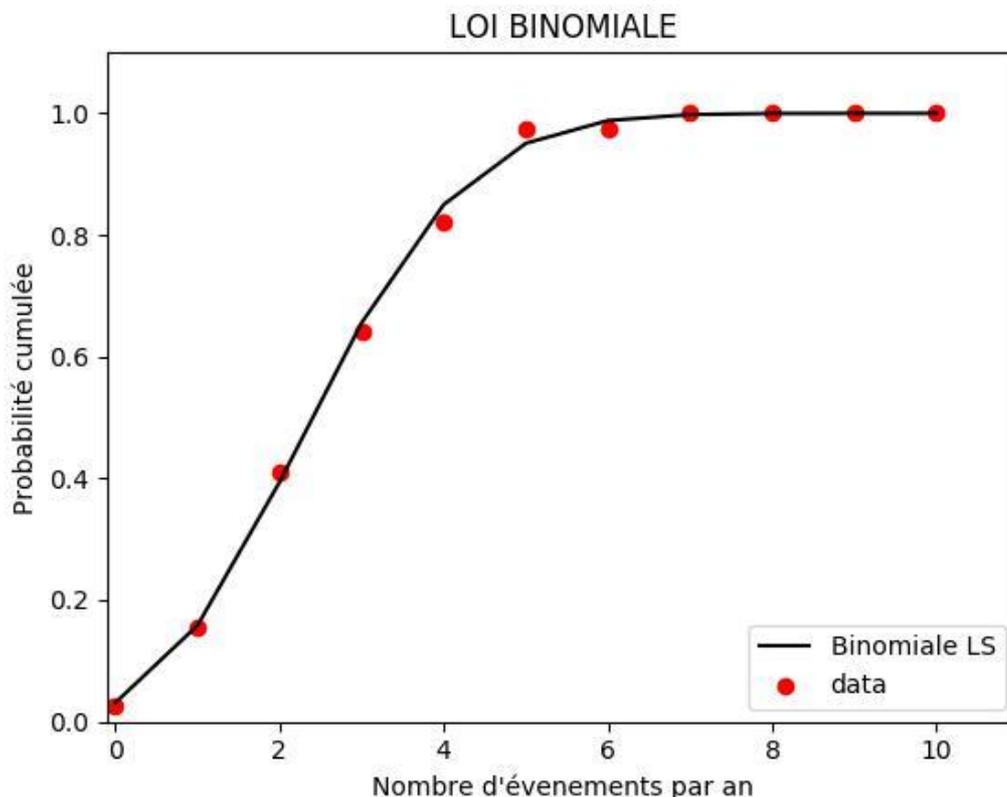
- 1 année sans aucun événement,
- 5 années avec 1 seul événement,
- 10 années avec 2 événements,
- 9 années avec 3 événements,
- 7 années avec 4 événements,
- 6 années avec 5 événements,
- aucune année avec 6 événements,
- 1 année avec 7 événements,
- aucune année avec plus de 7 événements.

Pour cette série, la loi binomiale (de paramètre  $n$  et  $p$ ) a été retenue. La fonction de probabilité de cette loi s'écrit :

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

Les valeurs obtenues pour les 2 paramètres sont :  $n=11$  et  $p=0.273$ .

La comparaison entre les données ajustées (série « Binomiale LS ») et celles observées (série « data ») est présentée Figure 8.



**Figure 8 : ajustement des  $N_c$  par une loi Binomiale  
avec la méthode des moindres carrés (LS)**

## 4.2 La vitesse de déplacement du système (T)

En ce qui concerne la vitesse déplacement du système, notée T, on dispose de 176 données. La moyenne associée à l'échantillon est de 6.09 m/s.

Différentes lois de probabilité ont été testées pour ajuster cette série transposée de km/h en m/s. Au vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d'adéquation, la loi de Weibull a été retenue.

La fonction de répartition de la loi de Weibull s'écrit :

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k}$$

Où A est un paramètre d'échelle et k un paramètre de forme.

Les valeurs des paramètres A et k ont été estimés par la méthode du maximum de vraisemblance donnant : A = 6.876 et k = 2.105.

La Figure 9 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi de Weibull utilisée (notée MLE et tracée en jaune), et des fréquences cumulées issues des observations (notée data).

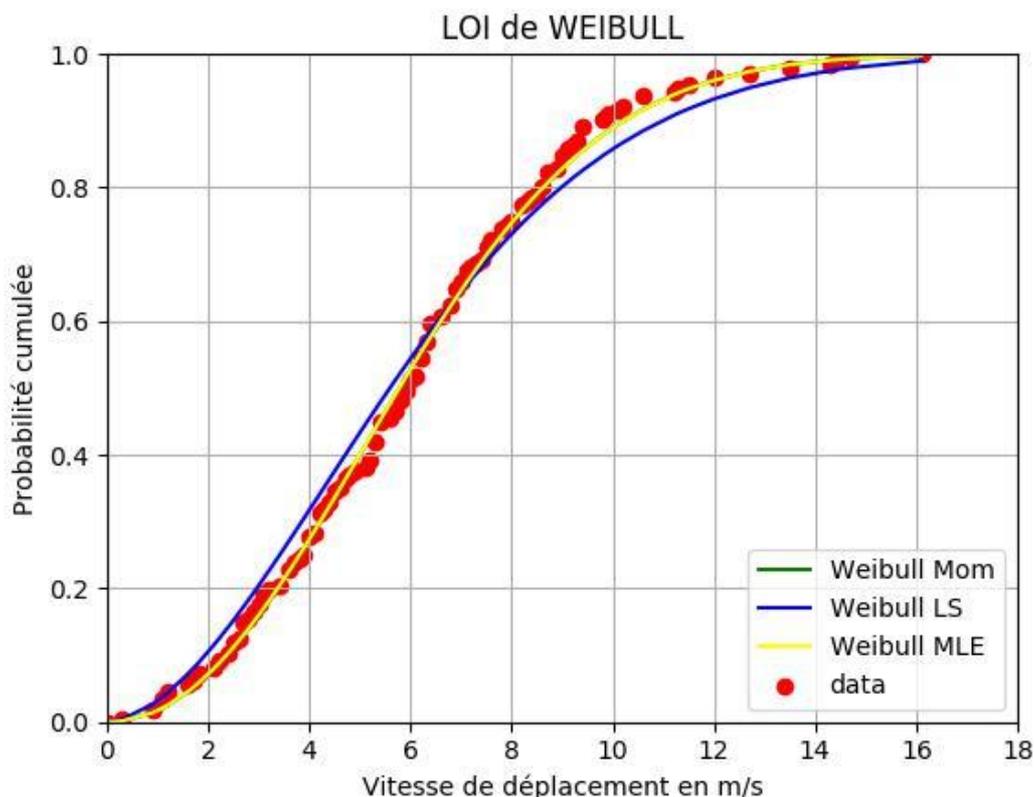


Figure 9 : ajustements des vitesses T par une loi de Weibull

### 4.3 La différence de pression ( $\Delta P$ )

La série de pression au centre des cyclones n'a pas été exploitée directement car la variable qui nous intéresse pour la modélisation est plutôt la différence de pression  $\Delta P$  entre la pression "normale" à l'extérieur du cyclone  $P_n$  et celle obtenue en son centre  $P_0$ .

Ici, la valeur de la pression "normale" a été fixée d'après l'usage, soit à  $P_n = 1013$  mb.

On dispose ici d'une série de 161 données, en considérant les événements SUSAN et PAM (159 dans le cas contraire). La série complète correspond à une valeur moyenne de  $\Delta P = 30.8$  mb.

Cette moyenne descend à 29.9 mb, lorsque les 2 valeurs fortes sont écartées.

Pour les 2 séries (avec et sans SUSAN et PAM), la meilleure approximation de  $\Delta P$  est également obtenue avec une loi de Weibull, en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance.

Les valeurs des paramètres obtenus sont :

- $A = 34.186$  et  $k = 1.69$  pour la série complète,
- $A = 33.829$  et  $k = 1.79$  pour la série sans SUSAN et PAM.

Les Figure 10 et Figure 11 propose la représentation de la fonction de répartition de la loi de Weibull ajustée par le maximum de vraisemblance (notée MLE et tracée en jaune) et des fréquences cumulées issues des observations (notée data), respectivement pour la série complète et celle sans SUSAN et PAM.

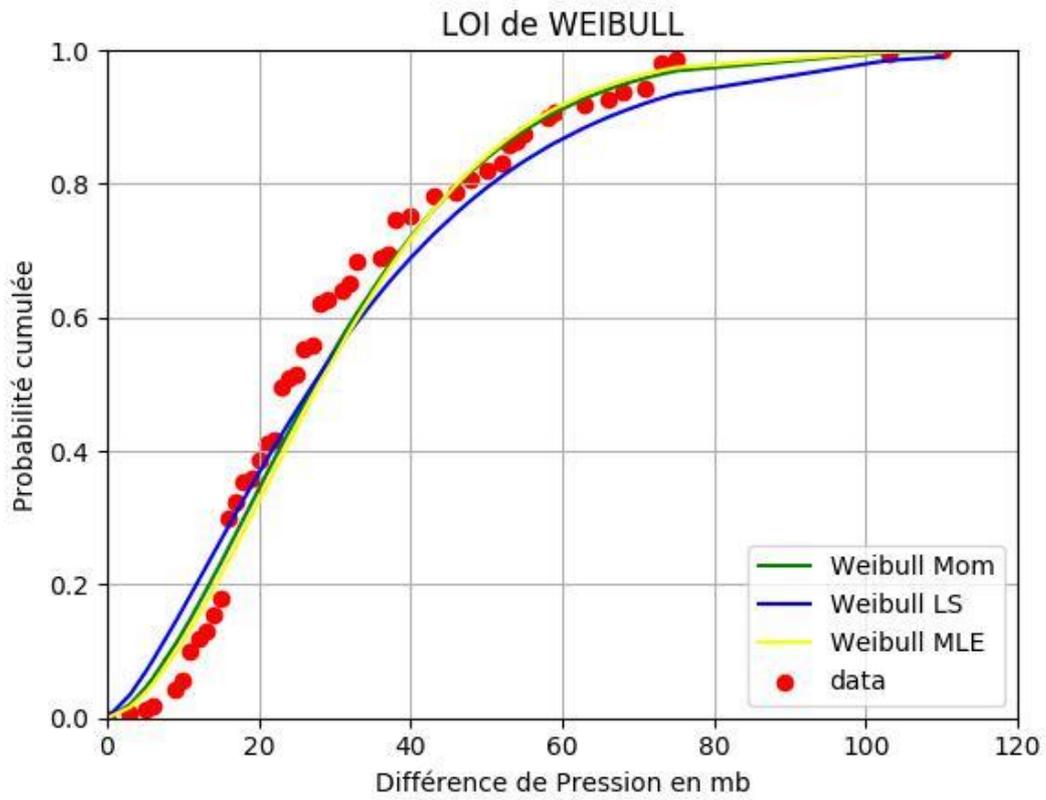


Figure 10 : ajustement de  $\Delta P$  par une loi de Weibull pour la série complète

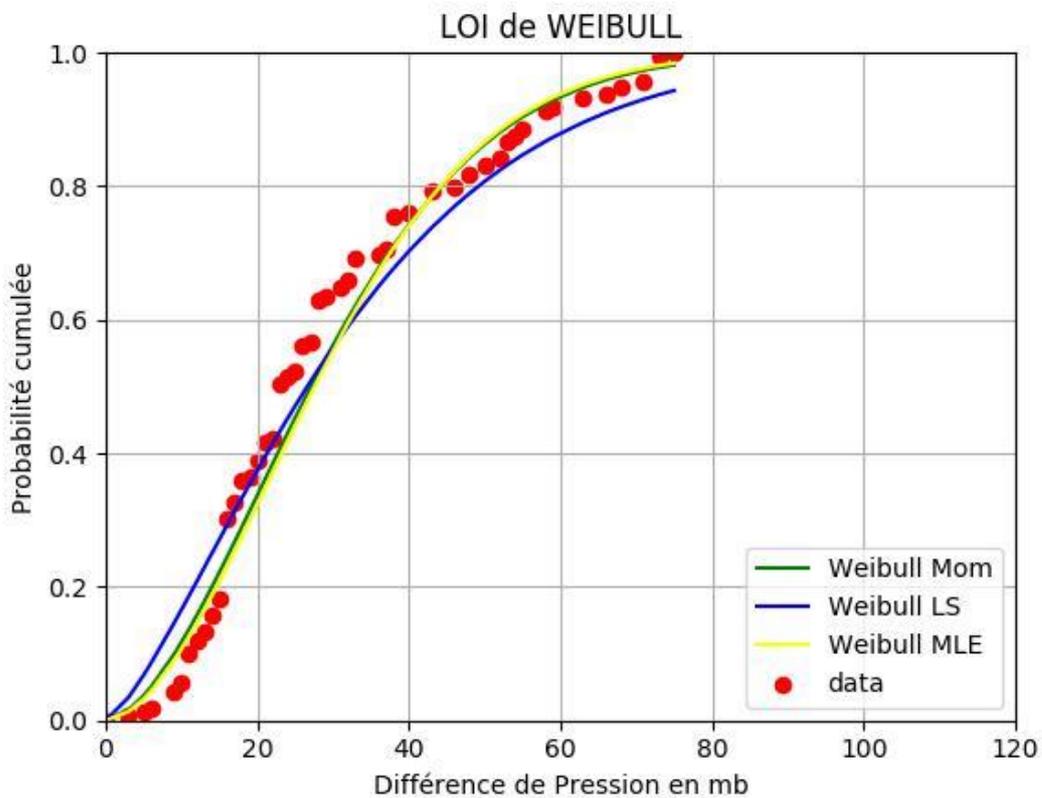


Figure 11 : ajustement de  $\Delta P$  par une loi de Weibull pour la série sans SUSAN et PAM

### 4.4 La distance du centre du cyclone (r)

En ce qui concerne la distance du centre du cyclone par rapport à l’île, notée r, on dispose de 125 données. La moyenne associée à l’échantillon est de 206km.

L’ajustement des données a cette fois été réalisé suivant une loi polynomiale d’ordre 2, les autres lois testées n’ayant pas donné satisfaction. Les coefficients ont été évalués par la méthode des moindres carrés (le coefficient de détermination associé est très satisfaisant R<sup>2</sup>=99.56%). La fonction de répartition obtenue valable pour x compris entre 0 et +500 km s’écrit :

$$f(x) = -2.10 \cdot 10^{-6} x^2 + 0.027 x + 0.0635$$

La Figure 11 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi utilisée (trait jaune) et des fréquences cumulées issues des observations (points bleus).

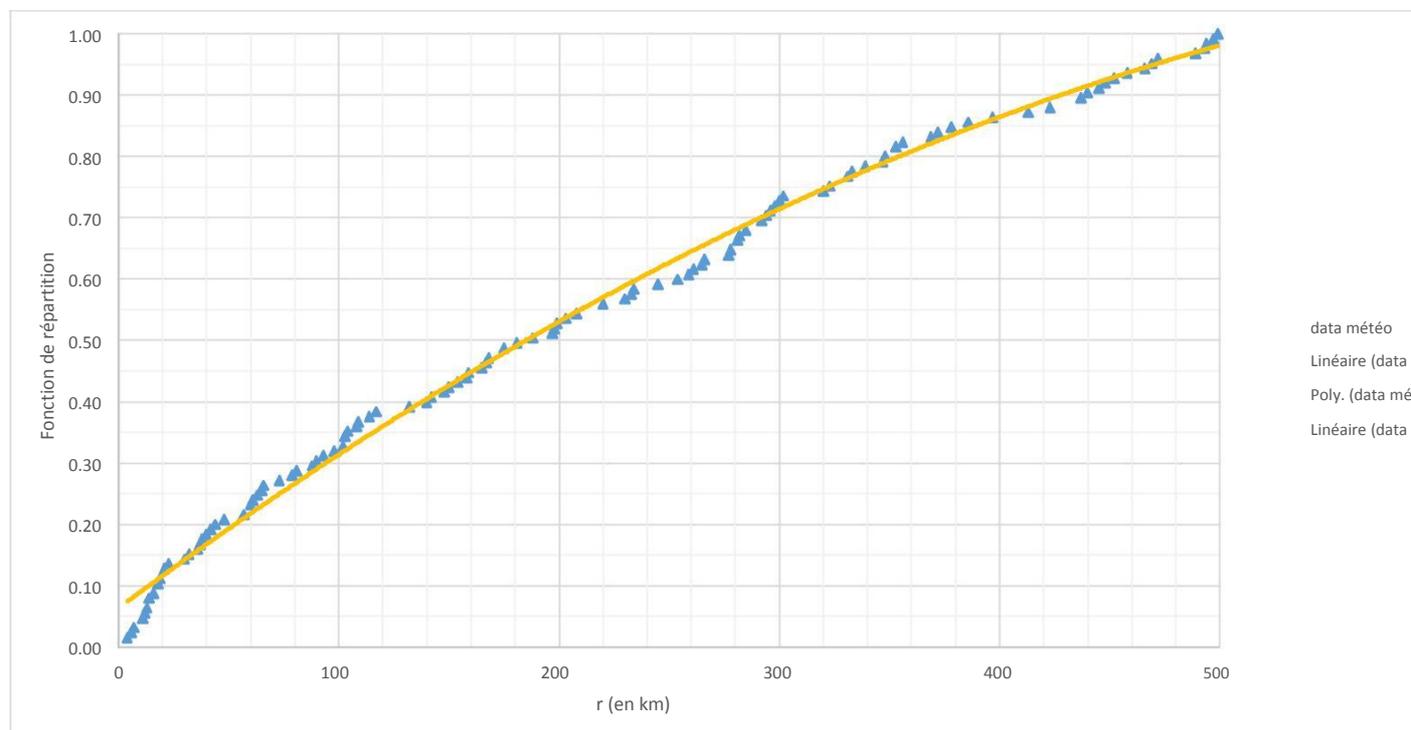


Figure 12 : ajustement de la distance r par une loi polynomiale

### 4.5 Le rayon de vitesse maximale (R)

La série « rayon de vitesse maximale » (paramètre noté R) dispose de 27 données. Sa valeur moyenne est de 53.8 km.

Au vue des graphiques des ajustements obtenus et des résultats de plusieurs tests d’adéquation, une loi normale a été retenue. La fonction de densité de la loi normale de paramètres σ et μ s’écrit :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Les valeurs des paramètres  $\sigma$  et  $\mu$  conservés ont ici été estimés par la méthode des moindres carrés, donnant :  $\sigma = 21.951$  et  $\mu = 48.024$ .

La Figure 13 ci-dessous donne la représentation de la fonction de répartition de la loi normale utilisée (notée LS et tracée en bleu) et des fréquences cumulées issues des observations (notée « data »).

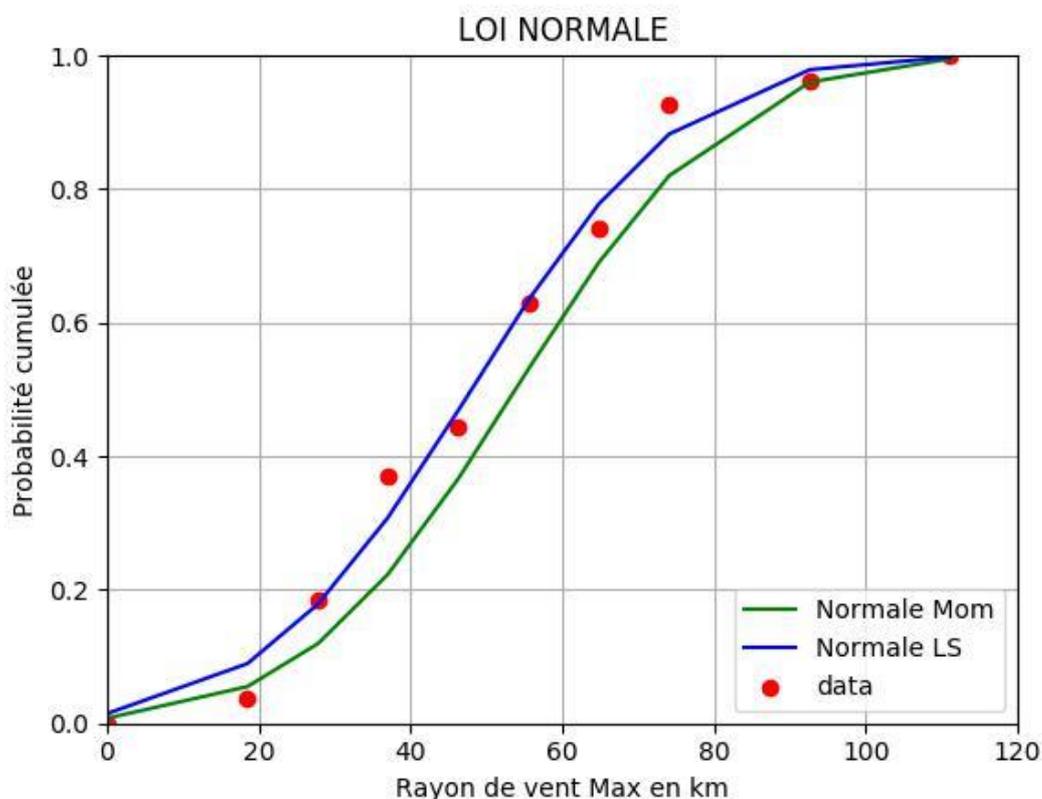


Figure 13 : ajustement du paramètre R par une loi log-normale

#### 4.6 L'angle d'approche ( $\theta$ )

La valeur de  $\sin(\theta)$  est positive dans le demi-cercle dangereux et négative au sein du demi-cercle manœuvrable du cyclone. Son signe est donc directement lié à la direction de la trajectoire du cyclone et à la position de l'œil par rapport à l'île. La série considérée est alors issue des données de la base Météo-France où figurent les trajectoires de l'ensemble des systèmes. Parmi ces données, 119 valeurs de  $\sin(\theta)$  ont paru exploitables. Les probabilités d'occurrence de ces valeurs ont été calculées par pas de 0.10, permettant d'obtenir la Figure 14 ci-après.

Cette figure semble confirmer le choix d'une distribution de type bimodale proposée pour ce paramètre dans plusieurs travaux : (Xiao X.F., 2011), (Georgiou P.N., 1983) et (Batts M.E., 1980).

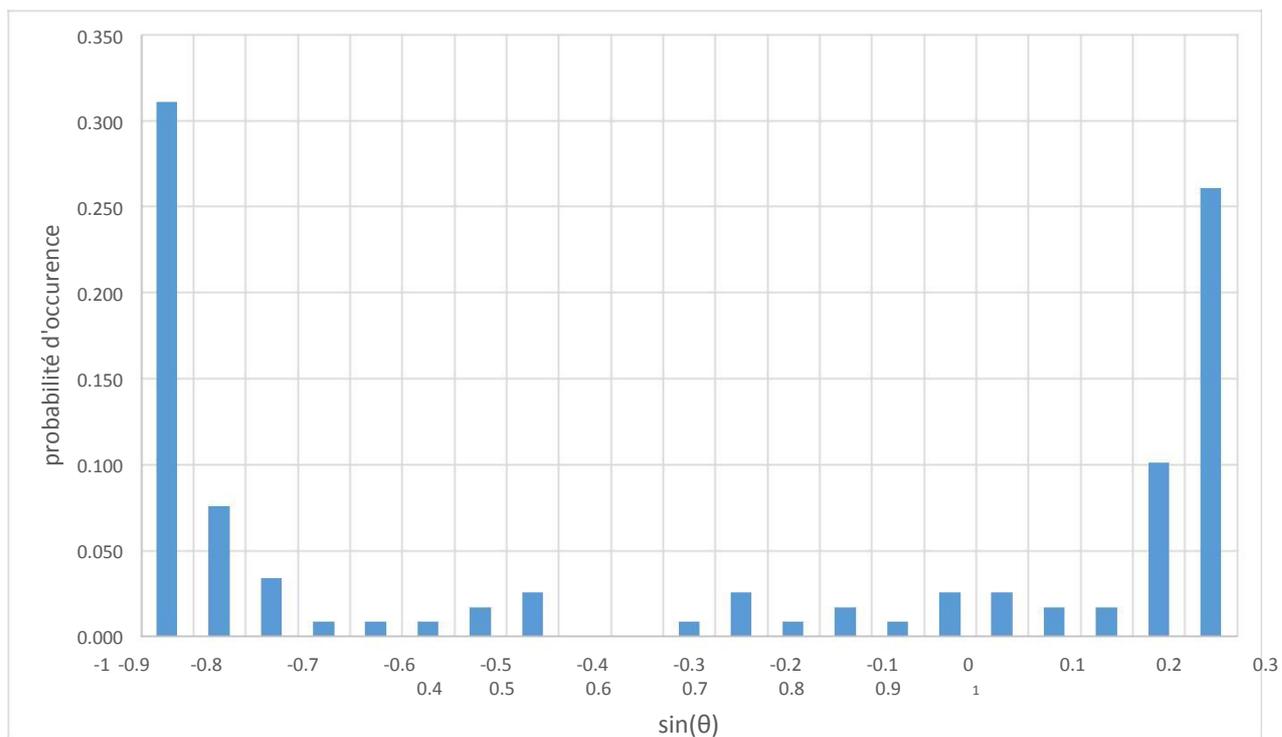


Figure 14 : densité de  $\sin(\theta)$  issue des observations

## 5. SIMULATIONS DE MONTE-CARLO

A partir du modèle de cyclone détaillé dans la partie 2 et des ajustements établis dans la partie 4 du présent rapport, des simulations de Monte-Carlo ont été réalisées afin d'obtenir des séries de vitesse de référence maximales annuelles pour un grand nombre d'années.

### 5.1 Procédure de la simulation

La simulation de Monte-Carlo consiste donc à simuler un grand nombre  $N$  de saisons cycloniques sur la Nouvelle Calédonie, et d'en extraire pour chaque année où au moins un cyclone a été simulé, la vitesse maximale obtenue sur le site.

Ainsi pour chaque saison simulée, on tire au sort le nombre  $N_c$  de phénomène passant au voisinage de l'île. Si  $N_c$  est nul, on passe directement à la simulation de l'année suivante. Sinon, on tire au sort les différents paramètres  $R$ ,  $T$ ,  $\Delta P$ ,  $r$  et  $\sin(\theta)$  permettant de calculer une vitesse de gradient pour le phénomène simulé, puis d'en déduire la vitesse de référence associée. L'opération est répétée  $N_c$  fois, soit autant de fois qu'il y a de cyclones dans la saison concernée. Pour chaque année simulée où  $N_c$  est non nul, la vitesse de référence maximale obtenue au niveau du site est conservée. Cette procédure est illustrée Figure 15.

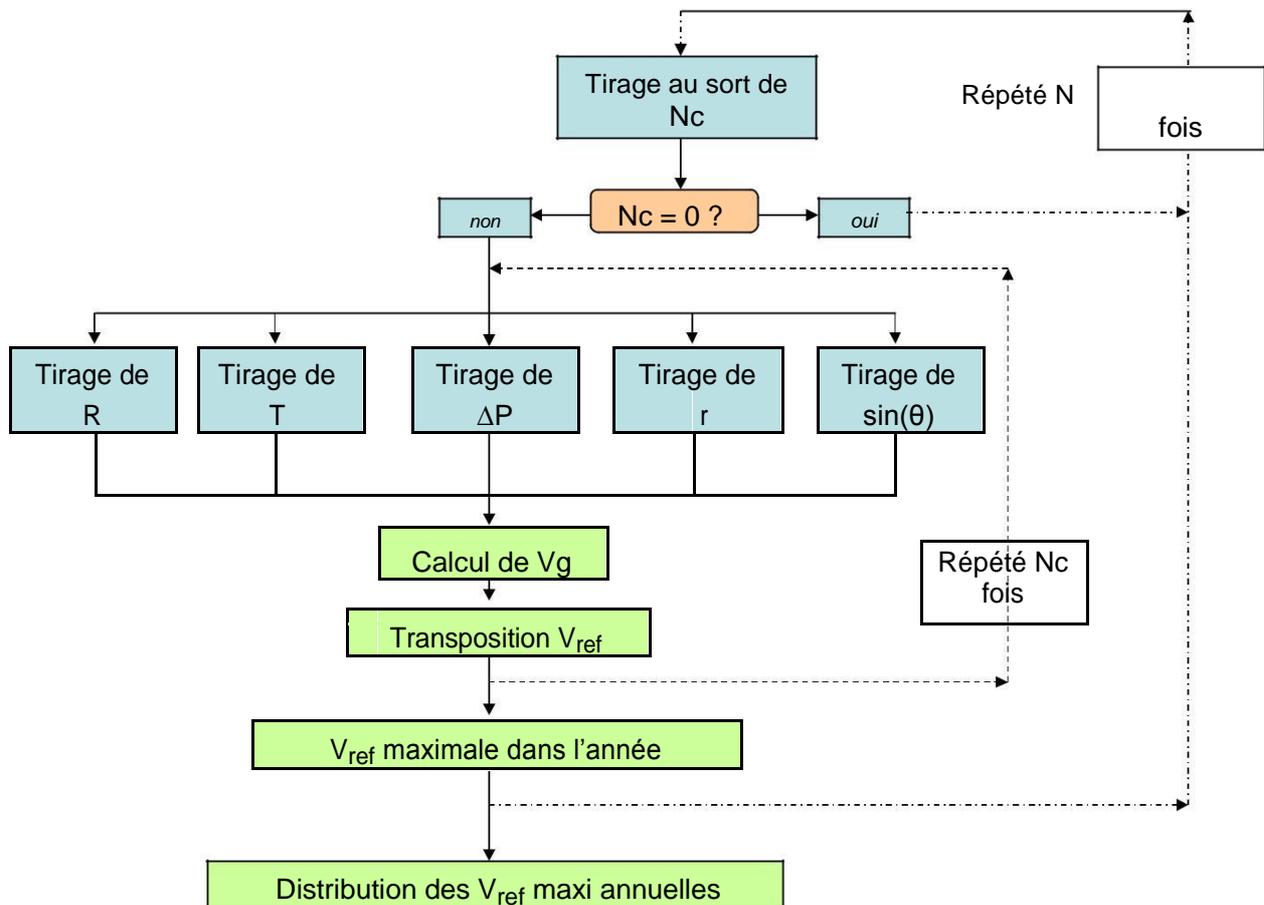


Figure 15 : procédure de simulation

En fin de simulation, une distribution des vitesses de référence maximales annuelles dues aux cyclones tropicaux affectant la Nouvelle Calédonie est alors obtenue. Par vitesse de référence, on entend ici une vitesse moyenne à 10m pour un site plat de type rase-campagne.

## 5.2 Paramètres de la simulation

Les différents paramètres utilisés pour la simulation sont résumés ci-dessous :

- $N = 200\,000$ , nombre de saisons simulées,
- $f = -5.543 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , paramètre de Coriolis,
- $\rho = 1.15 \text{ kg/m}^3$ , densité de l'air.

Pour le paramètre de Holland B, 3 valeurs ont été appliquées (cf. 2.5) suivant 3 simulations différentes :  $B=1.00$ ,  $B=1.15$  et  $= 2.0 - \frac{200}{160}$ , selon la formule de Harper and Holland.

Pour le tirage au sort des différents paramètres, les lois sont celles déterminées précédemment à partir des données météo, à savoir :

- une loi binomiale de paramètres  $n=11$  et  $p=0.273$  pour  $N_c$ ,
- une loi normale avec  $\sigma = 21.951$  et  $\mu = 48.024$  pour  $R$ ,
- une loi de Weibull avec  $A = 6.876$  et  $k = 2.105$  pour  $T$ ,
- une loi de Weibull pour  $\Delta P$  dont les valeurs de paramètres varient suivant que les cyclones SUSAN et PAM sont ou non pris en compte,
- une loi linéaire pour  $r$  avec les propriétés données en 4.4,
- une loi de type bimodale pour  $\sin(\theta)$  (cf.4.6).

## 5.3 Limitations de certains paramètres issues des lois probabilistes

Lors des tirages aléatoires de la simulation, afin de conserver des valeurs physiquement réalistes des différents paramètres, ces derniers ont été bornés en utilisant les valeurs proposées dans la littérature ( (Xiao X.F., 2011) et (Batts M.E., 1980)). Ainsi, la valeur de  $\Delta P$  maximale autorisée est 135 hPa,  $R$  reste compris entre 8 et 120km, et  $T$  peut évoluer entre 0.5 et 20m/s.

Au total, 6 simulations sont alors réalisées :

- 3 associées à la série  $\Delta P$  complète, en considérant les 3 options retenues pour  $B$ ,
- 3 associées à la série  $\Delta P$  sans les 2 valeurs correspondant à SUSAN et PAM, en considérant les 3 options retenues pour  $B$ .

## 6. CALCUL DES VITESSES DE REFERENCE ASSOCIEES A DES PERIODES DE RETOUR

Chaque simulation de Monte-Carlo réalisée fournit une distribution des vitesses de référence maximales annuelles. Ces distributions peuvent maintenant être exploitées pour déterminer des niveaux de vitesses associés à des périodes de retour, et plus particulièrement la période de retour 50 ans, correspondant à  $V_{b,0}$

### 6.1 Calcul d'une période de retour

Les distributions obtenues sont suffisamment conséquentes (200 000 années simulées) pour fournir des profils de fonction de répartition  $F(X)$  quasiment continue, comme le montre les exemples des Figure 16 et Figure 17 Figure 16 : .

La notion de période de retour  $T$  (en années) est égale à la valeur moyenne de la période séparant deux dépassements de la vitesse  $x$  ;  $T$  s'exprime en années et est donnée par :

$$T = \frac{1}{1 - F(X)}$$

Cependant, ici, la distribution obtenue par simulation de Monte-Carlo concerne uniquement les années où des cyclones ont été simulés à proximité de la Nouvelle Calédonie. Pour calculer une vitesse de vent associée à une période de retour, il faut alors prendre en compte les années sans cyclones.

Soit  $q$  la probabilité qu'une saison n'ait donné lieu à aucun cyclone approchant l'île à moins de 500 km. Les résultats des simulations donnent  $q=0.03$ . Alors, la vitesse maximale de référence  $X_T$  pour une période de retour  $T$  exprimée en années sera déduite de la valeur de  $F(X_T)$  tel que :

$$F(X_T) = \frac{1 - 1 - q}{T}$$

### 6.2 Résultats

Les vitesses obtenues avec les 6 simulations sont consignées dans le Tableau 1. Les vitesses sont exprimées en m/s. La colonne intitulée « HH » signifie que la formule de Harper and Holland est appliquée pour le calcul de  $B$ . La valeur à considérer pour  $V_{b,0}$  est celle associées à la période de retour 50 ans (en gras et en rouge).

Globalement, la non-prise en compte de SUSAN et PAM permet d'abaisser la valeur de référence d'environ 1m/s. L'influence du paramètre  $B$  est quant à elle beaucoup plus déterminante. L'application de la formule de Harper et Holland conduit à des valeurs notablement plus élevées que les valeurs de 1.00 et 1.15 utilisées pour les calculs de vent de référence dans les autres DOM-TOM.

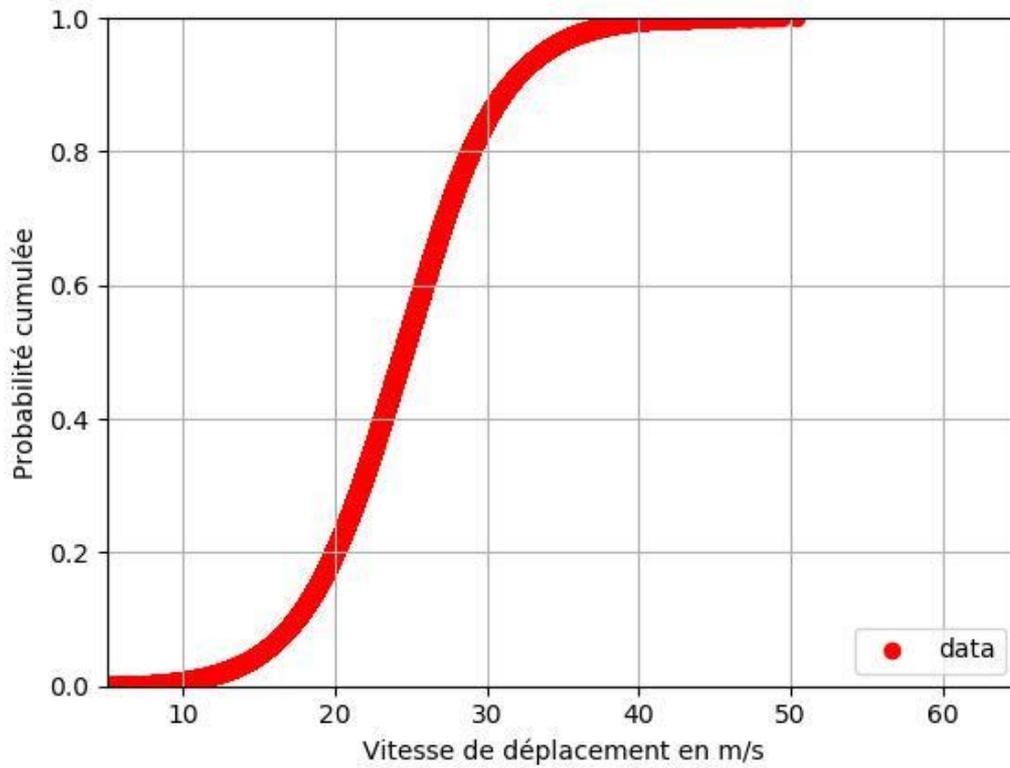


Figure 16 : exemple d’une distribution des vitesses de référence maximales annuelles

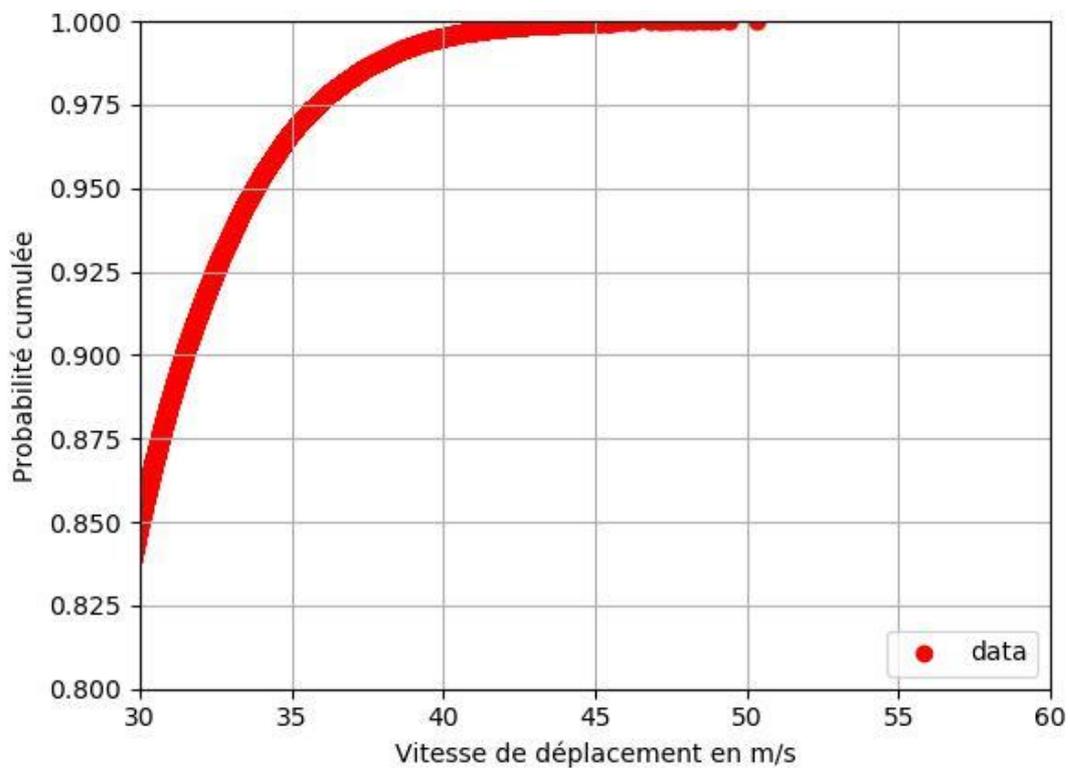


Figure 17 : zoom sur la queue de distribution des vitesses de référence maximales annuelles

Période de retour (en années)	<i>Série complète</i>			<i>Série sans SUSAN et PAM</i>		
	<i>Modélisation de B</i>			<i>Modélisation de B</i>		
	<i>1.00</i>	<i>1.15</i>	<i>HH</i>	<i>1.00</i>	<i>1.15</i>	<i>HH</i>
10	30.2	31.3	35.9	29.7	30.8	35.1
25	32.7	34.4	40.9	31.9	33.6	39.7
<b>50</b>	<b>34.4</b>	<b>36.4</b>	<b>44.1</b>	<b>33.5</b>	<b>35.4</b>	<b>42.7</b>
100	35.9	38.2	47.1	35.0	37.1	45.4
200	37.5	39.8	49.9	36.3	38.6	47.8

**Tableau 1 : Vitesses de référence (en m/s) pour différentes périodes de retour par simulation**

Le détail des simulations montre qu'en moyenne, en utilisant la formule de Harper et Holland, la valeur de B est de 1.49. La pertinence de l'application de cette formule pour la Nouvelle Calédonie est alors la question clé quant à la détermination de la valeur  $V_{b,0}$ . En effet, même si cette dernière semble la plus pertinente au regard de la littérature scientifique actuelle, sa transposabilité dans la zone étudiée n'en est pas pour autant avérée.

Parmi les travaux les plus avancés sur la caractérisation du paramètre B, (Willboughby H.E., 2004) est particulièrement intéressant. Même si la zone étudiée concerne plutôt l'hémisphère Nord, l'intérêt de la formule proposée réside dans le fait qu'elle est bâtie sur une confrontation avec un nombre conséquent d'observations (493 événements dans la base de données). Pour information, cette formule a été appliquée à la base de données fournie par Météo-France pour la Nouvelle Calédonie. La valeur moyenne de B obtenue est alors de 1.11, plus proche de la valeur de 1.15 retenue pour Mayotte, que celle calculée à partir de Harper et Holland ( $B=1.49$ ).

En définitive, pour trancher la question de la modélisation du paramètre B, il faudrait pouvoir disposer d'une étude spécifique à la région étudiée ici, étude réalisée à partir de données météorologiques observées. Néanmoins, ce type d'étude n'existe pas à notre connaissance aujourd'hui.

### 6.3 Comparaison avec les références régionales

Parmi les éléments permettant une aide à la décision, les normes établies pour les pays voisins, à savoir l'Australie et la Nouvelle Zélande, représentent des sources d'informations pertinentes.

Dans (AS/NZS\_1170.2:2002, 2002), pour une période de retour de 50 ans en zone cyclonique, 2 valeurs de vent sont proposées : 52 et 60 m/s. Il s'agit de vitesses de pointe associées à une rugosité de 2 cm.

---

La transposition de ces valeurs en vitesse Eurocode de type  $V_{b,0}$  donne soit **35 m/s** (dans le cas 52 m/s), soit **41 m/s** (dans le cas 60m/s).

Par ailleurs (HB\_212-2002, 2002) place la Nouvelle Calédonie en zone IV, qui correspond à une vitesse de pointe de période de retour 50 ans de 52 m/s. Le document ne semble pas indiquer de valeur de rugosité associée à cette vitesse. En supposant qu'il s'agit d'une hauteur de rugosité de 5 cm (valeur de référence de l'Eurocode), la transposition en vitesses moyenne, type  $V_{b,0}$ , donne : **36 m/s**.

L'ensemble de ces valeurs tend à montrer que les résultats obtenus avec la formule de Harper et Holland conduit à une surestimation des valeurs de référence.

## 7. CONCLUSION

Les simulations de Monte-Carlo réalisées dans la présente étude, à partir d'ajustements d'observations météorologiques concernant des cyclones et tempêtes tropicales ayant approchés le territoire de la Nouvelle Calédonie, ont permis de calculer différentes vitesses de vent de référence de type  $V_{b,0}$  telles que définies par l'Eurocode.

En fonction des hypothèses considérées, la valeur de  $V_{b,0}$  obtenue est très fluctuante, variant de 34 m/s à 44m/s. La principale incertitude repose sur l'estimation du paramètre de Holland dans les simulations. En l'absence d'étude spécifique relative à ce paramètre pour la zone étudiée, il apparaît difficile de statuer de manière assurée sur une valeur de  $V_{b,0}$  pour la Nouvelle Calédonie.

Cependant, la comparaison avec les autres normes régionales en vigueur et la prise en compte des travaux de (Willboughby H.E., 2004) semble mettre en avant que la valeur obtenue avec la série complète et une valeur de  $B=1.15$ , serait la plus réaliste. Cette valeur est alors de l'ordre de 37 m/s.

Enfin, notons que l'analyse proposée ici est basée sur l'utilisation des données météorologiques observées et ne peut donc en aucun cas tenir compte des éventuelles modifications liées au changement climatique. Les travaux à ce sujet (Météo-France, 2017) restent pour l'instant encore à l'état d'ébauche, même si une tendance semble se dessiner : « des cyclones moins nombreux, mais plus dévastateurs ».

Les équipes du CSTB restent disponibles et à l'écoute pour vous accompagner dans l'interprétation et l'utilisation de ces résultats.

## 8. REFERENCES

- Annexe Nationale. (février 2005). *Annexe Nationale de l'Eurocode 1*. EN 1991-1-4/NA:2005 F.
- AS/NZS\_1170.2:2002. (2002). *Australian/New Zeland Standard - Structural Design Actions Part 2 : Wind Actions*.
- Batts M.E., S. E. (1980). Hurricane wind speeds in the United States. *Journal of Structure Division*, vol.106, pp.2001-2016.
- Delaunay, D. (1986). *cahiers du CSTB n°2078 : "Vents extrêmes dus aux cyclones tropicaux dans les DOM-TOM"*. CSTB.
- E. Simiu, V. P. (1976). Mean speed profiles of hurricane winds. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, vol.102, pp.265-273.
- Eurocode 1. (février 2005). *Eurocode 1 : "Actions du vent sur les structures - Partie 1-4 : actions générales, actions du vent"*. EN 1991-1-4:2005 F.
- Georgiou P.N., D. A. (1983). Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 13, pp. 139-152.
- Guilhot, J. (2012). *rapport CSTB EN-CAPE 12.086 C V0 : "Estimation des vents extrêmes à Mayotte par simulation de Monte-Carlo"*. CSTB.
- Harper B.A., H. G. (1999). An updated parametric model of tropical cyclone. *Proceeding of the 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. Dallas, Texas: American Meteorological Society.
- Harper, B. (1999). Numerical modeling of extreme tropical cyclone winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 83, pp. 23-34.
- HB\_212-2002. (2002). *Design wind speeds for the Asia-Pacific Region*.
- Holland, G. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review*, vol.108, pp.1212-1218.
- JTWC Southern Hemisphere Best Track Data*. (2017). Récupéré sur Joint Typhoon Warning Center: [http://www.usno.navy.mil/NOOC/nmfc-ph/RSS/jtwc/best\\_tracks/shindex.php](http://www.usno.navy.mil/NOOC/nmfc-ph/RSS/jtwc/best_tracks/shindex.php)
- Lee K.H., R. D. (1980). Synthetic hurricane wind speed records : development of a database for hazard analyses and risk studies. *National Hazards Review*, vol.8, pp.23-34.
- Levinson D.H., a. (2010). A review of the climatological characteristics of landfalling Gulf Hurricanes for wind, wave and surge hazard estimations. *Ocean Engineering*, vol.37, pp.13-25.
- Météo-France. (2017). *Changement climatique et cyclones*. Récupéré sur <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-cyclones>

- 
- Météo-France. (2017). *Mieux comprendre les phénomènes atmosphériques : les cyclones tropicaux*. Récupéré sur <http://www.meteofrance.fr/activites-recherche/mieux-comprendre-les-phenomenes-atmospheriques/cyclones-tropicaux>
- Powell M.D., a. (2005). State of Florida hurricane loss projection model: atmospheric science component. *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol.93, pp.651-674.
- Vickery P.J., e. a. (2009). Hurricane hazard modeling: the past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.97, pp.392-405.
- Vickery P.J., W. D. (2008). Statistical Models of Holland Pressure Profile Parameter and Radius to Maximum Winds of Hurricanes from flight-level Pressure and H\*Wind data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol.47, pp.2497-2517.
- Wang Y., R. D. (2012). Joint distribution model for prediction of hurricane wind speed and size. *Structural Safety*, vol. 35, pp.40-51.
- Willboughby H.E., R. M. (2004). Parametric representation of the primary Hurricane Vortex. Part I : Observations and evaluation of the Holland (1980) Model. *American Meteorology Society*, pp.3033-3048.
- Xiao X.F., e. a. (2011). Typhoon wind hazard analysis for southeast China coastal regions. *Structural Safety*, vol.33, pp.286-295.